



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής & Συστημάτων Πληροφορικής

Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας για Εξυπηρέτηση Κίνησης Υψηλής Προτεραιότητας σε Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων IP

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ του

Αθανάσιου Χρ. Λιακοπούλου

Αθήνα, Δεκέμβριος 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής & Συστημάτων Πληροφορικής

Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας για Εξυπηρέτηση Κίνησης Υψηλής Προτεραιότητας σε Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων IP

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ του

Αθανάσιου Χρ. Λιακοπούλου

Συμβουλευτική Επιτροπή: Βασίλειος Μάγκλαρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευστάθιος Συκάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιχαήλ Θεολόγου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή την 22 Δεκεμβρίου 2005

Βασίλειος Μάγκλαρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συμεών Παπαβασιλείου
Επικ. καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χρήστος Μπούρας
Αν. καθηγητής Παν. Πατρών

Αθήνα, Δεκέμβριος 2005

.....

Αθανάσιος Χρήστου Λιακόπουλος

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

Copyright © Αθανάσιος Χρήστου Λιακόπουλος, 2005.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

στη σύζυγό μου Αθανασία

Abstract

The *Differentiated Services (DiffServ)* framework is widely proposed as an efficient method for providing advanced IP services to large-scale networks with *Quality of Service* requirements. However, *DiffServ* does neither define which set of mechanisms need to be enabled in the network nor describes how new connections are realised in a multi-domain environment. *GÉANT*, the Trans-European Research Network, introduced the ***Premium IP*** service offering bounded delay, jitter and negligible packet loss to end-to-end multi-domain connections across the European *National Research & Education Networks (NRENs)*.

In this thesis we first present our contribution to the design and deployment of *Premium IP* service while participating in the *SEQUIN* project. Large scale provisioning of *Premium IP* in a multi-domain environment prerequisites the definition of efficient interaction procedures between administrative domains involved. The establishment of new connections is realised in phases, in which the appropriate administrative and technical information is collected, the terms in the *Service Level Agreement (SLA)* are agreed upon among the User and the Provider (*GÉANT*), *QoS* configuration is activated in the network routers and monitoring mechanisms are enabled to assess the packet transport guarantees. The results from quantitative and qualitative tests that we performed in *GÉANT* exhibited the improved performance transport guarantees of *Premium IP* service as compared to *best effort (BE)* service.

The operational experience acquired from the deployment of *Premium IP* service in the *GÉANT/NRENs* networking environment exposed multiple technical challenges in delivering end-to-end *QoS* performance guarantees on a per flow basis across multiple domains. For example, the establishment of new connections exhibits delays while the management overhead is high. We propose a novel model referred as ***Inter-domain QoS Provisioning Model (IQPM)*** that aims to address the above challenges and tries to overcome functional and operational limitations of the *DiffServ* framework. *IQPM* is designed to ease service provisioning of high priority traffic (such as *Premium IP* traffic) and to automate administrative procedures. *IQPM* encompasses *DiffServ* data plane for packet forwarding, where packets are treated in aggregates. In the control plane, end-to-end signalling for per-flow admission control in conjunction with per traffic aggregate inter-domain policing are used to manage network resources. In addition, *IQPM* introduces the use of a monitoring method that identifies rerouted flows usually caused by link or node failures. Rerouted traffic is provided less priority over “legitimate” -non-rerouted- traffic in congested links. Apart from its enhanced performance vis-à-vis pure *DiffServ* provisioning model, it is shown via simulations that *IQPM*, compared to the *Premium IP* provisioning model in *GÉANT*, reduces the number of affected flows in congested links in multiple link failure simulated scenarios. We subsequently compare the *IQPM* with

the *Resource Management in DiffServ (RMD)* under development in IETF. In both models, signalling is used for establishing network connections and updating flow state information in the edge routers. However, handling congestion periods in *RMD* causes a higher percentage of packets to be remarked as compared to *IQPM*, as shown in a simplified network environment.

Finally, this thesis discusses scalability and robustness of the *IQPM* model in high-speed networks that sustain large number of flows. It also analyses conditions to be met in order to efficiently support the *IQPM* model and discusses suggested extensions for IPv6-enabled networks.

Αντί προλόγου

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε ένα πλήθος ανθρώπων που βοήθησαν και συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Πρώτα από όλους αισθάνομαι στην ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Βασίλη Μάγκλαρη που ήταν ο επιβλέπων της διδακτορικής μου διατριβής για την επιστημονική καθοδήγηση και την αμέριστη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια της ερευνητικής προσπάθειάς μου. Υπήρξε πάντοτε πρόθυμος να συζητήσει μαζί μου ζητήματα σχετικά με την εφαρμογή προηγμένων υπηρεσιών σε δίκτυα IP, κατανόησε σε βάθος και έδειξε εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα της έρευνά μου, και με βοήθησε να αποτυπώσω με σαφήνεια και καθαρότητα τα τελικά συμπεράσματα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Ευστάθιο Συκά και τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Μιχαήλ Θεολόγου που αποτέλεσαν τα υπόλοιπα δύο μέλη της συμβουλευτικής Επιτροπής μου για τις υποδείξεις τους σε προηγούμενα στάδια προσπάθειάς μου. Ευχαριστώ επίσης τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς Επιτροπής Εξέτασης καθηγητή ΕΜΠ κ. Παναγιώτη Τσανάκα, καθηγητή ΕΜΠ κ. Μιλτιάδη Αναγνώστου, Επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ κ. Συμεών Παπαβασιλείου και Αναπληρωτή καθηγητή Παν. Πατρών κ. Χρήστο Μπούρα για την τιμή που μου έκαναν να συμμετέχουν σε αυτή.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους Αφροδίτη Σεβαστή, Δημήτριο Καλογερά και Δημήτριο Πρίμπα για τη γόνιμη συνεργασία τους τα προηγούμενα χρόνια σε ερευνητικά θέματα σχετικά με την παρούσα διατριβή. Ευχαριστώ, επίσης, τους συναδέλφους μου στο Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ) για την ηθική συμπαράσταση και την ενθάρρυνση τους στην προσπάθειά μου. Ευχαριστώ τον Τρύφωνα Χιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε τα προηγούμενα χρόνια και τις ευκαιρίες που μου έδωσε να ασχοληθώ με ερευνητικά έργα στο θεματικό πεδίο της διατριβής μου. Ευχαριστώ ακόμα τα μέλη του εργαστηρίου Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων (NETMODE) για τη φιλική τους αντιμετώπιση και την ανάληψη εκ μέρους μου όλων σχεδόν των υποχρεώσεών μου προς το εργαστήριο. Τέλος, ευχαριστώ τον Ιλία Ανδρικόπουλο για τις παρατηρήσεις που έκανε στο τελικό κείμενο.

Οφείλω ευγνωμοσύνη στους γονείς μου Χρήστο και Βασιλική και στον αδελφό μου Σπύρο για την προσπάθειά τους να μου προσφέρουν τα εφόδια και να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις να επιτύχω σε όλες τις εκφάνσεις της ζωής μου. Ευχαριστώ, τέλος, τη σύζυγό μου Αθανασία για την αμέριστη ηθική στήριξη που μου παρείχε καθώς και την αστείρευτη υπομονή που επέδειξε τα προηγούμενα χρόνια ώστε να έχω την απαραίτητη ηρεμία και αυτοσυγκέντρωση να ολοκληρώσω τη διατριβή μου.

Ολοκληρώνοντας την προσπάθεια που κατέβαλα για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής θεωρώ ότι πέρα από τις γνώσεις που απέκτησα στο θεματικό αντικείμενο που ασχολήθηκα

βελτιώθηκα ως προσωπικότητα. Η συνεχής προσπάθεια τα τελευταία χρόνια και η ανάγκη να ανταποκριθώ στις ποικίλες ερευνητικές, εργασιακές, και προσωπικές υποχρεώσεις μου με δίδαξαν ότι η επιμονή και η υπομονή είναι οι ουσιαστικότεροι σύμμαχοι για την επίτευξη του οποιοδήποτε στόχου. Οι ψυχικές δυνάμεις που κρύβουμε μέσα μας είναι πάντοτε ισχυρότερες από όσο αρχικά υπολογίζουμε αρκεί να βρούμε τρόπο να τις απελευθερώσουμε και να τις διοχετεύσουμε για τη βελτίωση του εαυτού μας και των συνανθρώπων γύρω μας.

Αθανάσιος Λιακόπουλος

Δεκέμβριος 2005

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	5
1.2	ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	6
1.2.1	Συμβολή της Εργασίας.....	7
1.3	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΠΟΜΕΝΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ.....	8
2	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ IP.11	
2.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ.....	11
2.1.1	Αρχιτεκτονική Ενοποιημένων Υπηρεσιών (<i>Integrated Services</i>).....	12
2.1.1.1	Διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας.....	13
2.1.1.2	Περιορισμοί κατά την εφαρμογή σε δίκτυα παραγωγής.....	14
2.1.2	Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (<i>Differentiated Services</i>).....	14
2.1.2.1	Συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο (<i>Per Hop Behavior - PHB</i>).....	17
2.1.2.2	Προβλήματα κατά την εφαρμογή σε δίκτυα παραγωγής.....	17
2.1.3	Υποστήριξη κλάσεων υπηρεσίας <i>IntServ</i> πάνω από δίκτυα <i>DiffServ</i>	18
2.2	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ IP – ΣΧΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΑΠΟΔΟΧΗΣ.....	19
2.2.1	Έλεγχος αποδοχής με βάση παραμέτρους κίνησης.....	20
2.2.2	Έλεγχος αποδοχής με βάση μετρήσεις.....	21
2.2.2.1	Αλγόριθμος <i>Color MBAC</i>	24
2.2.3	Μηχανισμοί <i>End-to-End Admission Control</i>	26
2.2.4	Μηχανισμοί <i>Egress Admission Control</i>	27
2.2.5	Μοντέλα <i>QoS</i> που βασίζονται σε κεντρικούς εξυπηρετητές.....	27
2.2.5.1	Μεσίτες Εύρους Ζώνης (<i>Bandwidth Brokers</i>).....	28
2.2.5.2	Μοντέλο <i>Policy Based Networking (PBN)</i>	29
2.2.5.3	<i>Adaptive Resource Control for QoS Using an IP-Based Layered Architecture – AQUILA</i>	30
2.2.5.4	<i>General-purpose Architecture for Resource Reservation (GARA)</i>	30
2.3	ΜΟΝΤΕΛΟ <i>RESOURCE MANAGEMENT IN DIFFSERV (RMD)</i>	31
2.4	<i>MPLS DIFFSERV-AWARE TRAFFIC ENGINEERING</i>	32
2.5	ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ <i>DYNAMIC PACKET STATE (DSP)</i>	34
2.6	ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ (<i>MANAGEMENT PLANE</i>).....	35
2.6.1	<i>End-to-End QoS Across the Internet at Large - MESCAL</i>	36
2.6.2	Το μοντέλο του <i>IP Sphere Forum</i>	37
2.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	38
3	Η ΥΠΗΡΕΣΙΑ <i>PREMIUM IP</i>.....	41
3.1	ΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ <i>GÉANT</i>	41
3.2	Η ΥΠΗΡΕΣΙΑ <i>PREMIUM IP</i>	44
3.2.1	Υλοποίηση της υπηρεσίας <i>Premium IP</i>	45
3.2.1.1	Προώθηση δεδομένων (<i>data forwarding</i>).....	45
3.2.1.2	Δεσμευμένη χωρητικότητα για τη κίνηση <i>Premium IP</i>	46

3.2.1.3	Μορφοποίηση και έλεγχος της εισερχόμενης κίνησης <i>Premium IP</i>	48
3.2.2	<i>Μοντέλο παροχής της υπηρεσίας Premium IP</i>	50
3.2.2.1	Φάσεις ενεργοποίησης συνδέσεων <i>Premium IP</i>	51
3.2.2.2	Ρόλοι μεταξύ συντονιστών	52
3.2.2.3	Σύμβαση Διασφάλισης Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας <i>Premium IP</i>	53
3.3	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	55
3.3.1	<i>Μετρικές απόδοσης</i>	56
3.3.2	<i>Ζητήματα σχετικά με την παρακολούθηση υπηρεσιών</i>	57
3.3.2.1	Μέθοδοι παρακολούθησης	57
3.3.2.2	Εύρος του πεδίου μετρήσεων (<i>monitoring scope</i>)	58
3.3.2.3	Επεξεργασία και διάθεση δεδομένων	60
3.3.2.4	Συγχρονισμός των ρολογιών στους κόμβους παρακολούθησης	62
3.4	ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ <i>PREMIUM IP</i> ΣΤΟ <i>SEQUIN</i>	64
3.5	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ – ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	66
3.5.1	<i>Καθυστερήσεις στη διαδικασία παροχής της υπηρεσίας</i>	67
3.5.2	<i>Προβλήματα από την αναδρομολόγηση της κίνησης</i>	68
3.5.3	<i>Συμμόρφωση σε κοινές διαδικασίες</i>	71
3.6	ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ <i>PREMIUM IP</i> ΣΤΟ <i>GÉANT2</i>	72
3.6.1	<i>Αυτοματοποίηση διαδικασιών παροχής Premium IP στο GÉANT2</i>	72
3.6.2	<i>Υποδομή παρακολούθησης ποιότητας υπηρεσίας στο GÉANT2</i>	73
4	ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ (<i>INTER-DOMAIN QOS PROVISIONING MODEL</i>)	77
4.1	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	78
4.2	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>IQPM</i>	82
4.3	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	84
4.3.1	<i>Φάση εγγραφής</i>	85
4.3.2	<i>Φάση ελέγχου αποδοχής και αστυνόμευσης της κίνησης</i>	86
4.3.3	<i>Φάσης λειτουργίας της υπηρεσίας</i>	88
4.3.4	<i>Φάση τερματισμού</i>	91
4.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>IQPM</i>	92
4.4.1	<i>Ζητήματα κλιμάκωσης του μοντέλου IQPM</i>	93
4.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>IQPM</i> ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ	95
4.5.1	<i>Σύγκριση με μοντέλο παροχής της υπηρεσίας Premium IP</i>	95
4.5.1.1	<i>Σύγκριση με βελτιωμένο μοντέλο Premium IP στο GN2-SA3</i>	96
4.5.2	<i>Σύγκριση με την αρχιτεκτονική RMD</i>	97
4.5.3	<i>Σύγκριση του μοντέλου IQPM με λοιπές αρχιτεκτονικές</i>	102
4.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	103
4.6.1	<i>Δίκτυο – Παράμετροι</i>	103
4.6.2	<i>Αποτελέσματα και συμπεράσματα</i>	105
4.7	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>IQPM</i>	108
4.7.1	<i>Απώλεια μηνυμάτων σηματοδότησης</i>	108

4.7.1.1	Απώλεια μηνυμάτων <i>PREP REQ (request)</i>	109
4.7.1.2	Απώλεια μηνυμάτων <i>PREP RESP (response)</i>	109
4.7.1.3	Απώλεια μηνυμάτων <i>PREP TERM (termination)</i>	110
4.7.2	Δυσλειτουργίες δρομολογητών κορμού.....	110
4.7.2.1	Διακοπή λειτουργίας του δρομολογητή <i>DSR</i>	110
4.7.2.2	Διακοπή λειτουργίας ακραίου δρομολογητή εισόδου.....	111
4.7.2.3	Διακοπή λειτουργίας εσωτερικών δρομολογητών	111
4.8	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>IQPM</i>	111
4.8.1	Ασύμμετρη δρομολόγηση.....	111
4.8.2	Απαίτηση για από άκρο-σε-άκρο εφαρμογή του μοντέλου <i>IQPM</i>	112
4.8.3	Εφαρμογή του μοντέλου <i>IQPM</i> σε δίκτυα <i>MPLS</i>	113
4.8.4	Αδυναμίες των μηχανισμών <i>MBAC</i>	113
4.8.4.1	Εσφαλμένη εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων	113
4.8.4.2	Δίκαιη διαχείριση (<i>fairness</i>) ροών κατά την φάση ελέγχου αποδοχής	114
4.8.4.3	Αδυναμία χρονοπρογραμματισμού συνδέσεων στο μέλλον	115
4.9	ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ <i>IQPM</i>	115
4.9.1	Το πρωτόκολλο <i>IPv6</i>	116
4.9.1.1	Πεδία στην επικεφαλίδα <i>IPv6</i> σχετικά με την παροχή <i>QoS</i>	116
4.9.2	Επεκτάσεις του μοντέλου <i>IQPM</i> σε δίκτυα <i>IPv6</i>	118
4.9.2.1	Έλεγχος αποδοχής για αναδρομολογημένες ροές με χρήση <i>IPv6 SSM</i>	118
4.9.2.2	Χρωματισμός των πακέτων των αναδρομολογημένων ροών μόνο για τμήμα του μονοπατιού.....	120
4.9.2.3	Εκμετάλλευση του πεδίου <i>flow label</i> στην επικεφαλίδα <i>IPv6</i>	121
4.10	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ.....	121
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	123
5.1	ΣΥΝΟΨΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	124
5.2	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	126
5.2.1	Συνδέσεις υψηλής προτεραιότητας διπλής κατεύθυνσης.....	126
5.2.2	Υποστήριξη υπηρεσιών εγγυημένης προώθησης με το μοντέλο <i>IQPM</i>	126
5.2.3	Υποστήριξη υπηρεσιών σε κινούμενους χρήστες.....	128
5.2.4	Ποιότητα υπηρεσίας σε προηγμένα δίκτυα νέας γενιάς.....	129
6	ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	131
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ <i>PREMIUM IPV6</i> ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΔΕΤ	139
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΌΡΟΙ.....	143
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	146

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Λειτουργίες στα επίπεδα δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης.	6
Σχήμα 2: Ανταλλαγή μηνυμάτων με χρήση του πρωτοκόλλου <i>RSVP</i>	13
Σχήμα 3: Μηχανισμοί που εφαρμόζονται σε ένα ακραίο δρομολογητή <i>DiffServ</i>	16
Σχήμα 4: Ακραίοι και εσωτερικοί δρομολογητές σε διαχειριστικές περιοχές <i>DiffServ</i>	16
Σχήμα 5 Υποστήριξη κλάσεων υπηρεσίας <i>IntServ</i> πάνω από δίκτυα <i>DiffServ</i>	18
Σχήμα 6: Χρωματισμός πακέτων της <i>i</i> -στης ροής ανάλογα με τη σχέση του στιγμιαίου ρυθμού $R_{i,t}$ και μέσου ρυθμό $R_{i,AD}$	26
Σχήμα 7: Αλληλεπίδραση ενός <i>BB</i> με τις υπόλοιπες οντότητες στο δίκτυο.	28
Σχήμα 8: Διαδικασία δέσμευσης πόρων με χρήση <i>BB</i>	29
Σχήμα 9: Σηματοδοσία στην αρχιτεκτονική <i>Resource Management in DiffServ (RMD)</i>	32
Σχήμα 10: Μέθοδος εισαγωγή πληροφοριών κατάστασης σε πακέτα.	34
Σχήμα 11: Ανταλλαγή μηνυμάτων κατά τον έλεγχο αποδοχής στην αρχιτεκτονική <i>SCORE</i>	35
Σχήμα 12: Μοντέλο για τη σύνδεση εν σειρά προδιαγραφών <i>pSLS</i> στο έργο <i>MESCAL</i>	37
Σχήμα 13: Το μοντέλο <i>IP Sphere</i>	38
Σχήμα 14: Το Πανευρωπαϊκό Ερευνητικό Δίκτυο <i>GÉANT</i>	42
Σχήμα 15: Ιεραρχικό μοντέλο διασύνδεσης ερευνητικών δικτύων <i>NREN</i> μέσω <i>GÉANT</i>	43
Σχήμα 16: Σημεία εφαρμογής των ελεγκτών κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών. - Πολιτική «γνωστής κατεύθυνσης» (<i>destination aware</i>) για την υπηρεσία <i>Premium IP</i>	49
Σχήμα 17: Φάσεις κατά την εγκατάσταση, λειτουργία και τερματισμό μίας σύνδεσης <i>Premium IP</i>	50
Σχήμα 18: Από άκρο-σε-άκρο σύμβαση <i>SLA</i> πάνω από το δίκτυο <i>GÉANT/NRENS</i>	52
Σχήμα 19: Μοντέλο συνεργασίας κατά την εγκατάσταση υπηρεσιών <i>Premium IP</i> μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών.	53
Σχήμα 20: Παραδείγματα συμβάσεων <i>SLAs</i> για την χρήση της υπηρεσίας <i>Premium IP</i>	55
Σχήμα 21: Εύρος πεδίου μετρήσεων μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών.	59
Σχήμα 22: Δοκιμές συνόδων τηλεδιάσκεψης με το πρότυπο <i>H.323</i> στο πλαίσιο του έργου <i>SEQUIN</i>	64
Σχήμα 23: Σύγκριση του <i>jitter</i> για κίνηση <i>Premium IP</i> και <i>best effort</i> μεταξύ Αθήνας – Στουτγκάρδης (Γερμανία).	66

Σχήμα 24: Κατανομή του jitter για διαφορετικά μεγέθη πακέτων κίνησης <i>Premium IP</i> και <i>best effort</i> μεταξύ Αθήνας – Στουτγκάρδης (Γερμανία).....	66
Σχήμα 25: Αναδρομολόγηση κίνησης μέσα σε μία διαχειριστική περιοχή.....	69
Σχήμα 26: Αναδρομολόγηση κίνησης και αλλαγή του σημείου εξόδου από τη διαχειριστική περιοχή.	70
Σχήμα 27: Αρχιτεκτονική υποδομής παρακολούθησης στο GÉANT2 (GN2-JRA1).	74
Σχήμα 28: Λειτουργίες σε ανεξάρτητες διαχειριστικές περιοχές που υποστηρίζουν το μοντέλο <i>IQPM</i>	80
Σχήμα 29: Φάσεις εγκατάστασης ποιότητας υπηρεσίας στο μοντέλο <i>IQPM</i>	82
Σχήμα 30: Ελεγκτές κυκλοφορίας κίνησης μεταξύ διαχειριστικών περιοχών.	84
Σχήμα 31: Αρχικό αίτημα για την εγκατάσταση ροής με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας	86
Σχήμα 32: Σηματοδοσία και λειτουργίες στο μοντέλο <i>IQPM</i>	87
Σχήμα 33: Ενεργοποίηση ελεγκτή κίνησης στο δρομολογητή <i>DSR</i> κατά την εγκατάσταση νέας ροής.	89
Σχήμα 34: Προώθηση και αποθήκευση πακέτων παρακολούθησης στο μοντέλο <i>IQPM</i>	90
Σχήμα 35: Πακέτα συναγεμού και χρωματισμός των πακέτων από αναδρομολογημένες ροές.....	91
Σχήμα 36: Παράδειγμα υπολογισμού της πιθανότητας χρωματισμού μιας ροής στο μοντέλο <i>RMD</i> . ..	98
Σχήμα 37: Παράδειγμα υπολογισμού της πιθανότητας χρωματισμού μιας ροής στο μοντέλο <i>RMD</i> . ..	99
Σχήμα 38: Μέση πιθανότητα χρωματισμού ροής μίας μονάδας κίνησης (Λόγος αριθμού αναδρομολογημένων (<i>RR</i>) ροών προς μη αναδρομολογημένες (<i>nRR</i>) ροές = 1/1 για κάθε σύνδεσμο).....	99
Σχήμα 39: Μέση πιθανότητα χρωματισμού ροής μίας μονάδας κίνησης (Λόγος αριθμού αναδρομολογημένων (<i>RR</i>) ροών προς μη αναδρομολογημένες (<i>nRR</i>) ροές = 1/5 για κάθε σύνδεσμο).....	100
Σχήμα 40: Μέση πιθανότητα χρωματισμού ροής μίας μονάδας κίνησης (Λόγος αριθμού αναδρομολογημένων (<i>RR</i>) ροών προς μη αναδρομολογημένες (<i>nRR</i>) ροές = 5/1 για κάθε σύνδεσμο).....	100
Σχήμα 41: Ο λόγος πιθανότητας χρωματισμού της αναδρομολογημένης ροής (ή ροών) μεταξύ μοντέλων <i>RMD</i> και <i>IQPM</i>	101
Σχήμα 42: Σχηματική σύγκριση διαφορετικών αρχιτεκτονικών παροχής ποιότητας υπηρεσίας ως προς την πολυπλοκότητα του μοντέλου (κάθετος άξονας), το βαθμό χρήσης της σηματοδοσία	

(αριστερή κατεύθυνση οριζόντιου άξονα) και το μέγεθος πληροφοριών κατάστασης (δεξιά κατεύθυνση άξονα).....	101
Σχήμα 43: Επίπεδο διάγραμμα (<i>planar graph</i>) του δικτύου GÉANT.....	104
Σχήμα 44: Διάγραμμα ενεργών και αναδρομολογημένων ροών κατά τη διάρκεια μιας τυχαίας δοκιμής.	105
Σχήμα 45: Απόδοση ροών για βαθμό διαθεσιμότητας 99% των γραμμών κορμού.	106
Σχήμα 46 Απόδοση ροών για βαθμό διαθεσιμότητας 99.8% των γραμμών κορμού.	106
Σχήμα 47: Συνολικό ποσοστό ροών που χαρακτηρίστηκαν ως <i>εξαιρετικές (excellent)</i> , δηλαδή εμφάνισαν απώλεια πακέτων μικρότερη από 0.1%.....	107
Σχήμα 48: Ποσοστό των μη αναδρομολογημένων ροών που χαρακτηρίστηκαν ως <i>εξαιρετικές (excellent)</i> , δηλαδή εμφάνισαν απώλεια πακέτων μικρότερη από < 0.1%).	107
Σχήμα 49: Σύγκριση των επικεφαλίδων για τα πρωτόκολλα IPv4 και IPv6.	117
Σχήμα 50: Χρωματισμός πακέτων από τις αναδρομολογημένες ροές για περιορισμένο αριθμό <i>hops</i>	120
Σχήμα 51: Αποθήκευση στοιχείων στο πεδίο <i>flow label</i> της επικεφαλίδας IPv6.....	121
Σχήμα 52: Τοπολογία δικτύου ΕΔΕΤ για τη μέτρηση εγγυήσεων απόδοσης για κίνηση <i>Premium IPv6</i>	140
Σχήμα 53: Απώλεια πακέτων για την κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (<i>best effort</i>).....	140
Σχήμα 54: Μέση καθυστέρηση για κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (<i>best effort</i>) με χρήση πρωτοκόλλων IPv4/6.....	141
Σχήμα 55: Καθυστέρηση για την κίνηση <i>Premium IP</i> και βέλτιστης προσπάθειας (<i>best effort</i>) με χρήση πρωτοκόλλων IPv4/6.....	142

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Διαχωρισμός των δικτυακών εφαρμογών σε κατηγορίες ανάλογα με τις εγγυήσεις ποιότητας που απαιτούνται για την αποδοτική λειτουργία τους [Chan+05] [ITU01] [ITU02].	3
Πίνακας 2: Μετρικές ποιότητας σε δίκτυα IP.	4
Πίνακας 3: Προδιαγραφές κατά τη φάση σχεδίασης του μοντέλου <i>IQPM</i>	81
Πίνακας 4: Λειτουργίες που υποστηρίζονται από τους δρομολογητές κορμού στο μοντέλο <i>IQPM</i>	94
Πίνακας 5: Σύγκριση διαφορετικών αρχιτεκτονικών παροχής ποιότητας υπηρεσίας.	102

1 Εισαγωγή

Το Διαδίκτυο (*Internet*) στα αρχικά στάδια της λειτουργίας τους χρησιμοποιήθηκε από τις ερευνητικές ομάδες για να ικανοποιήσει τις μεταξύ τους ανάγκες για επικοινωνία και μεταφορά ψηφιακών δεδομένων. Οι πρώτες δικτυακές εφαρμογές που αναπτύχθηκαν, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (*electronic mail*), η μεταφορά αρχείων, η πλοήγηση στο Παγκόσμιο Δικτυακό Ιστό (*World Wide Web - WWW*) σχεδιάστηκαν να λειτουργήσουν πάνω από δίκτυα που εμφάνιζαν μειωμένο βαθμό αξιοπιστίας και μικρές δυνατότητες για μεταφορά δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς. Οι ερευνητικές και αναπτυξιακές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων μετάδοσης που μπορούσαν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε δίκτυα τα οποία προσέφεραν ελάχιστες εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της πληροφορίας. Σύντομα, το Διαδίκτυο εξαπλώθηκε εκτός της ερευνητικής κοινότητας και εκατομμύρια χρήστες αναζήτησαν να ψυχαγωγηθούν, να ενημερωθούν ή να αυξήσουν την παραγωγικότητάς τους με χρήση του νέου μέσου. Οι χρήστες υιοθέτησαν σταδιακά τη χρήση εφαρμογών πραγματικού χρόνου (*real-time applications*), οι οποίες έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν υψηλής ποιότητας πολυμεσικό (*multimedia*) υλικό, π.χ. ψηφιακό ήχο ή βίντεο, και μπορούν να χειριστούν μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Η ταχύτητα επικοινωνίας μεταξύ των δικτυακών κόμβων αυξήθηκε ενώ η μεταφορά της πληροφορίας έγινε εξαιρετικά πιο αξιόπιστη. Η έρευνα επικεντρώθηκε πλέον σε δίκτυα που εξυπηρετούν εκατομμύρια χρήστες και μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες κίνησης με ολοένα μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς. Σήμερα, εκτιμάται ότι οι προοπτικές εξέλιξης του Διαδικτύου είναι τεράστιες. Όλοι συμφωνούν ότι νέες προηγμένες εφαρμογές θα αλλάξουν ριζικά τον τρόπο επικοινωνίας, ενημέρωσης, εργασίας, συνεργασίας, εκπαίδευσης, έρευνας, ψυχαγωγίας του σύγχρονου Πολίτη. Στο μέλλον, οι Πολίτες στη πλειοψηφία τους θα είναι συνεχώς συνδεδεμένοι με το Διαδίκτυο, το οποίο θα επεκτείνεται σε κάθε σημείο του πλανήτη.

Σε κάθε μία από τις παραπάνω φάσεις ανάπτυξης του Διαδικτύου, η ερευνητική κοινότητα ασχολήθηκε με ανάπτυξη μεθόδων που επιτρέπουν την ταχεία και αξιόπιστη μεταφορά κίνησης μεταξύ των δικτυακών χρηστών. Ο όρος **Ποιότητα Υπηρεσία (Quality of Service - QoS)**, όπως έχει επικρατήσει η χρήση του διεθνώς, περιγράφει τις εγγυήσεις κατά την μεταφορά ψηφιακών δεδομένων πάνω από το Διαδίκτυο. Σύμφωνα με το *Internet Engineering Task Force (IETF)* [IETF], το ανοικτό ερευνητικό φόρουμ που ασχολείται με την εξέλιξη του Διαδικτύου και των αρχών που το διέπουν, ο όρος «Ποιότητα Υπηρεσίας» περιγράφει “το σύνολο από απαιτήσεις της υπηρεσίας που το δίκτυο οφείλει να ικανοποιήσει κατά τη μεταφορά της κίνησης μίας ροής”¹ [GJS03]. Μια ελεύθερη διατύπωση του όρου που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια στην παρούσα διατριβή είναι “η δυνατότητα του δικτύου να παρέχει εγγυήσεις απόδοσης κατά τη μεταφορά της κίνησης των χρηστών”.

Οι διαθέσιμοι δικτυακοί πόροι σε ένα δίκτυο είναι συνήθως περιορισμένοι και συχνά δεν επαρκούν για να ικανοποιήσουν το σύνολο της κίνησης παράγουν οι χρήστες. Η ύπαρξη περιόδων συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης ή στις ουρές εξόδου των δρομολογητών κορμού είναι ένας από τους βασικότερους λόγους για την παραβίαση των εγγυήσεων απόδοσης κατά τη μεταφορά της κίνησης πάνω από δίκτυα μεταγωγής πακέτων IP. Στις περιπτώσεις αυτές παρατηρείται αύξηση του αριθμού των πακέτων που απορρίπτονται λόγω έλλειψης χώρου στους καταχωρητές (*buffers*) των δρομολογητών, αυξομειώνεται ο χρόνος κατά μεταφορά των πακέτων, ελαττώνεται ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων κ.α.. Οι παραπάνω συνέπειες έχουν ως αποτέλεσμα πολλές δικτυακές εφαρμογές (βλέπε Πίνακας 1) να μη λειτουργούν αποδοτικά. Τα δίκτυα που παρέχουν Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) επιδιώκουν να καταναείμουν τους διαθέσιμους δικτυακούς πόρους ανάμεσα στους τελικούς χρήστες διασφαλίζοντας με εφαρμογή συγκεκριμένων μεθόδων αφενός εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης και αφετέρου την ικανοποιητική χρήση των πόρων του δικτύου.

Οι «απαιτήσεις της υπηρεσίας» ή διαφορετικά οι εγγυήσεις απόδοσης που παρέχονται από το δίκτυο κατά τη μεταφορά της κίνησης αποτιμώνται με χρήση συγκεκριμένων μετρήσιμων παραμέτρων, οι περισσότεροι από τις οποίες έχουν οριστεί από την ομάδα *IP Performance Metrics (IPPM)* [IPPM] του IETF. Ειδικότερα, ο Πίνακας 2 αναφέρει μερικές από τις πλέον διαδεδομένες μετρικές ποιότητας που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων IP. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές ακόμα μετρικές, οι οποίες συνήθως προκύπτουν από συνδυασμό των παρακάτω βασικών μετρικών. Οι μετρικές ποιότητας αποτελούν το κύριο εργαλείο για την αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών QoS που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

¹ Η ακριβής περιγραφή του όρου QoS είναι “A set of service requirements to be met by the network while transporting a flow”.

Πίνακας 1: Διαχωρισμός των δικτυακών εφαρμογών σε κατηγορίες ανάλογα με τις εγγυήσεις ποιότητας που απαιτούνται για την αποδοτική λειτουργία τους [Chan+05] [ITU01] [ITU02].

Κατηγορία Εφαρμογών	Χαρακτηριστικά κίνησης / Απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας
Παραδοσιακές δικτυακές εφαρμογές με ελαστικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας π.χ. ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, μεταφορά αρχείων, πλοήγηση στο Διαδίκτυο, κλπ.	Ανεκτικότητα στην καθυστέρηση, στη μεταβλητότητα καθυστέρησης και στα σφάλματα μεταφοράς.
Εφαρμογές μεταφοράς φωνής πάνω από IP (<i>VoIP, VoIP trunks</i>).	Χαμηλή μεταβλητότητα ρυθμού κίνησης, αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, ευαισθησία στη μεταβλητότητα καθυστέρησης.
Τηλε-διάσκεψη (<i>Videoconferencing</i>), μετάδοση υψηλής ποιότητας βίντεο (<i>high quality video distribution</i>), κλπ.	Υψηλή μεταβλητότητα ρυθμού κίνησης, αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, ευαισθησία στη μεταβλητότητα καθυστέρησης.
Εφαρμογές ροής ήχου και εικόνας (<i>audio / video streaming</i>).	Χαμηλή ή μέση μεταβλητότητα ρυθμού κίνησης, ελαστικές απαιτήσεις καθυστέρησης και μεταβλητότητας καθυστέρησης.
Δικτυακά εικονικά περιβάλλοντα (<i>networked virtual environments</i>), παιχνίδια με αλληλεπίδραση (<i>interactive gaming</i>), κλπ.	Μέση μεταβλητότητα ρυθμού κίνησης, ελάχιστη ανεκτικότητα στην καθυστέρηση, ευαισθησία στη μεταβλητότητα καθυστέρησης, ελάχιστη ανεκτικότητα στα σφάλματα μεταφοράς.
Κίνηση ελέγχου / σηματοδότηση (<i>critical control traffic / signalling</i>), εφαρμογές <i>tele-immersion</i> , κλπ.	Απαίτηση για μειωμένη καθυστέρηση, ευαισθησία στα σφάλματα μεταφοράς.
Εφαρμογές με αλληλεπίδρασης ή συναλλαγές (<i>Interactive-transactional applications</i>), π.χ. <i>e-commerce</i> .	Απαίτηση για μειωμένη καθυστέρηση, ευαισθησία στα σφάλματα μεταφοράς.
Τεχνολογίες Πλέγματος, εφαρμογές <i>GRIDs</i> .	Συνδέσεις μεγάλης χωρητικότητας και διάρκειας, μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, ανεκτικότητα στην καθυστέρηση και τα σφάλματα μεταφοράς.

Πίνακας 2: Μετρικές ποιότητας σε δίκτυα IP.

Μετρική ποιότητας	Περιγραφή
Καθυστέρηση μονής διαδρομής (<i>One-way delay</i>) [AKZ99b].	Αφορά τη καθυστέρηση κατά τη μεταφορά ενός πακέτου γνωστών χαρακτηριστικών από τον κόμβο Πηγή μέχρι το κόμβο Προορισμού.
Καθυστέρηση διπλής διαδρομής (<i>Round-trip delay</i>) [AKZ99c].	Αφορά τη καθυστέρηση κατά τη μεταφορά ενός πακέτου γνωστών χαρακτηριστικών από την κόμβο Πηγή μέχρι το κόμβο Προορισμού και την επιστροφή του πάλι πίσω στο κόμβο Πηγή.
Μεταβλητότητα καθυστέρησης μεταξύ πακέτων (<i>IP Packet delay variation - Jitter</i>) [DC02].	Αφορά τη διαφορά καθυστέρησης μονής διαδρομής μεταξύ πακέτων γνωστών χαρακτηριστικών από το κόμβο Πηγή προς το κόμβο Προορισμού.
Απώλεια πακέτων μονής διαδρομής (<i>One-way packet loss</i>) [AKZ99b].	Αφορά την παραλαβή ή όχι ενός πακέτου γνωστών χαρακτηριστικών από το κόμβο Προορισμού, οποίο (πακέτο) έχει σταλεί πριν πεπερασμένο χρόνο από το κόμβο Πηγή.
Αναδιάταξη σειράς πακέτων (<i>Packet Reordering</i>) [MRSP05].	Αφορά την παραλαβή πακέτων γνωστών χαρακτηριστικών από το κόμβο Προορισμού εκτός της αναμενόμενης σειράς, δηλαδή εκτός της σειράς αποστολής των πακέτων από το κόμβο Πηγή.
Διασύνδεση (<i>Connectivity</i>) [MP99].	Αφορά τη δυνατότητα λήψης πακέτων γνωστών χαρακτηριστικών από την κόμβο Προορισμού τα οποία έχουν σταλεί από συγκεκριμένο κόμβο Πηγή.
Χωρητικότητα για μαζική μεταφορά δεδομένων (<i>Bulk Transfer Capacity</i>) [MA01].	Αφορά τη δυνατότητα ενός δικτύου να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου <i>TCP</i> , ο οποίος υλοποιεί μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης.

1.1 Ορισμός του Προβλήματος

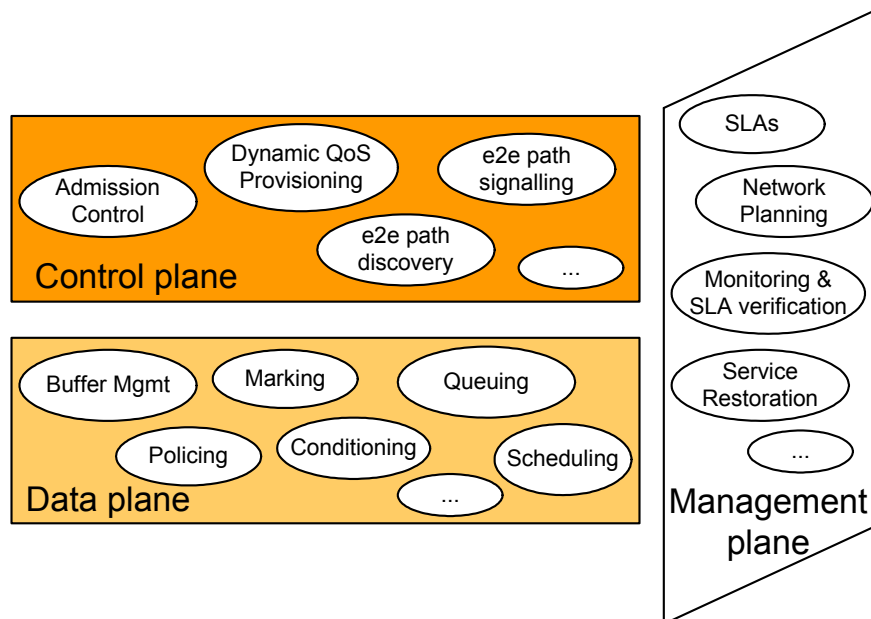
Παρόλο που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία πολλές αρχιτεκτονικές και μοντέλα για την παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας σε δίκτυα IP και οι οποίες έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε δίκτυα δοκιμών, εξακολουθούν να εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα κατά την εφαρμογή τους σε δίκτυα παραγωγής [Crow03] [Bell03] [TS02]. Μεγαλύτερες δυσκολίες παρουσιάζονται όταν οι από άκρο-σε-άκρο (*end-to-end*) συνδέσεις τερματίζουν σε διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές (*administrative domains*) και απαιτούν την συνεργασία περισσότερων του ενός Παρόχων Υπηρεσιών (*Service Providers*).

Μερικά από τα προβλήματα που παρατηρούνται κατά την εφαρμογή μοντέλων *QoS* σε σύγχρονα δίκτυα παραγωγής είναι τα ακόλουθα:

- Δυσκολίες κατά την εφαρμογή πολύπλοκων πρωτοκόλλων σηματοδότησης ή απαιτητικών -ως προς το υλικό (*hardware*) ή το λογισμικό (*software*)- μηχανισμών *QoS* στους δρομολογητές κορμού. Εμφάνιση προβλημάτων κλιμάκωσης, π.χ. ως προς την ταχύτητα διασύνδεσης μεταξύ των δρομολογητών ή το συνολικό αριθμό των εγκατεστημένων ροών.
- Αναποτελεσματικά μοντέλα συνεργασίας μεταξύ γειτονικών διαχειριστικών περιοχών κατά τη διαδικασία εγκατάστασης συνδέσεων που τερματίζουν σε διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές.
- Εφαρμογή μοντέλων που δεν λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη σφαλμάτων κατά τη λειτουργία του δικτύου, π.χ. δυσλειτουργίες στους δρομολογητές κορμού ή διακοπές στις γραμμές διασύνδεσης.
- Καθυστερήσεις κατά τη διαδικασία εγκατάστασης νέων συνδέσεων με εγγυήσεις *QoS* ή επαναδιαπραγμάτευσης των ήδη υφιστάμενων.
- Αδυναμία να εντοπιστεί άμεσα η αιτία που προκαλεί υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών *QoS* σε μια εγκατεστημένη σύνδεση ύστερα από εμφάνιση δικτυακού ή άλλου προβλήματος. Περιορισμένη ανταλλαγή πληροφοριών παρακολούθησης σχετικών με τις παρεχόμενες εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης μεταξύ των διαχειριστικών περιοχών.
- Σφάλματα κατά υποβολή των αιτημάτων από τους τελικούς χρήστες για χρήση υπηρεσιών *QoS*.
- Αδυναμία για σταδιακή εφαρμογή των περισσότερων μοντέλων *QoS* στο εσωτερικό των διαχειριστικών περιοχών ή περιορισμένη/καθόλου δυνατότητα διασύνδεσης με αντίστοιχα μοντέλα *QoS* που εφαρμόζονται στις υπόλοιπες ανεξάρτητες διαχειριστικές περιοχές.

- Χαμηλή χρησιμοποίηση των δικτυακών πόρων και ανισομερής κατανομή τους μεταξύ των εγκατεστημένων ροών.

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με την κατανόηση των παραπάνω προβλημάτων που δυσχεραίνουν την παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας σε σύγχρονα δίκτυα παραγωγής. Επικεντρωθήκαμε, όμως, στην παροχή εγγυήσεων για κίνησης υψηλής προτεραιότητας που μεταφέρεται μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών. Εξαρχής θεωρήσαμε ότι οι διαθέσιμοι μηχανισμοί που υποστηρίζονται από τους σημερινούς δρομολογητές στο *επίπεδο δεδομένων (data plane)*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, είναι ικανοί να παρέχουν τις απαιτούμενες εγγυήσεις για τη μεταφορά της κίνησης υψηλής προτεραιότητας. Προσπαθήσαμε λοιπόν να βελτιώσουμε λειτουργίες στο επίπεδο ελέγχου (*control plane*), αφενός περιγράφοντας τις διαδικασίες που απαιτούνται για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ γειτονικών διαχειριστικών περιοχών και αφετέρου αυτοματοποιώντας τις διαδικασίες αυτές με χρήση σηματοδosis. Τέλος, ασχοληθήκαμε με λειτουργίες στο επίπεδο διαχείρισης (*management plane*) που αφορούν τον ορισμό και την παρακολούθηση των εγγυήσεων που παρέχονται στους τελικούς χρήστες.



Σχήμα 1: Λειτουργίες στα επίπεδα δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης.

1.2 Σύνοψη της διδακτορικής διατριβής

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με το πρόβλημα της παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας σε δίκτυα που ακολουθούν την αρχιτεκτονική **Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (*Differentiated Services*)** [Blake+98]. Η συμμετοχή μας σε ένα ευρύ φάσμα ερευνητικών δραστηριοτήτων στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος *SEQUIN* [Roth+03] καθοδήγησε αρχικά την κατεύθυνση της έρευνάς μας.

Αρχικός στόχος μας ήταν η κατανόηση των αιτιών που κάνουν εξαιρετικά δύσκολη την παροχή μίας κλάσης υπηρεσίας υψηλής προτεραιότητας μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών. Συμμετείχαμε στον ορισμό της υπηρεσίας υψηλής προτεραιότητας *Premium IP*, ασχοληθήκαμε με το μοντέλο υλοποίησης της σε δίκτυα *DiffServ*, περιγράψαμε τη διαδικασία εγκατάστασής της σε συνδέσεις που εκτείνονται σε περισσότερες από μία διαχειριστικές περιοχές και αναφερθήκαμε στις αρχές παρακολούθησής των παρεχομένων εγγυήσεων από το δίκτυο [LMBS04]. Η συμμετοχή μας στη διαχείριση του *Εθνικού Δικτύου Έρευνας και Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ)* μας βοήθησε να κατανοήσουμε τις τεχνικές δυσκολίες που εμφανίζονται κατά την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* σε δίκτυα παραγωγής υψηλών ταχυτήτων [Ava+05]. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στην περιγραφή ενός μοντέλου που διευκολύνει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας για κίνηση υψηλής προτεραιότητας, αντίστοιχων με αυτές που παρέχονται με την υπηρεσία *Premium IP* για περιβάλλον πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών. Το **Μοντέλο για την Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας μεταξύ Διαχειριστικών Περιοχών (*Inter-domain QoS Provisioning Model – IQPM*)** [LKM06], το οποίο αποκαλούμε εν συντομία *IQPM*, επεκτείνει την αρχιτεκτονική *DiffServ* αφού βασίζεται στη χρήση σηματοδοσίας για την κατανομημένη διαχείριση των πόρων του δικτύου. Περιγράφουμε πρωτότυπη μέθοδο για την παρακολούθηση των διαδρομών που ακολουθούν οι ροές μέσα σε μία διαχειριστική περιοχή και προτείνουμε το χρωματισμό των πακέτων ροών που μεταβάλλουν το μονοπάτι τους μέσα σε μια διαχειριστική περιοχή. Στις προσομοιώσεις που εκτελέσαμε μπορέσαμε να συγκρίνουμε το μοντέλο *IQPM* με αντίστοιχες αρχιτεκτονικές ποιότητας υπηρεσίας ώστε να αναδειχτούν τα πλεονεκτήματα που αυτό επιφέρει. Τέλος, προδιαγράψαμε βελτιώσεις του μοντέλου *IQPM* που εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες του πρωτοκόλλου *IPv6* και εκτελέσαμε δοκιμές απόδοσης για κίνηση υψηλής προτεραιότητας *Premium IPv4/6* στο δίκτυο του ΕΔΕΤ [Liak+05].

1.2.1 Συμβολή της Εργασίας

Οι βασικές καινοτομίες της διατριβής είναι οι ακόλουθες:

- Προδιαγράψαμε το μοντέλο *IQPM*, το οποίο επιτρέπει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας για κίνηση υψηλής προτεραιότητας σε συνδέσεις που διασχίζουν πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές. Για το σκοπό αυτό συνδύασαμε μηχανισμούς στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*) που περιλαμβάνονται στην αρχιτεκτονική *DiffServ* με λειτουργίες από άκρο-σε-άκρο σηματοδοσίας στο επίπεδο ελέγχου (*control plane*), όπως αυτές που περιλαμβάνονται στην αρχιτεκτονική *IntServ* ή στο μοντέλο *RMD* του IETF.
- Προτείναμε μέθοδο για την παρακολούθηση των μονοπατιών που χρησιμοποιούν οι ροές υψηλής προτεραιότητας για το μοντέλο *IQPM*. Η μέθοδος επιτρέπει τον εντοπισμό των αναδρομολογημένων ροών και υλοποιείται με την περιοδική αποστολή πακέτων παρακολούθησης στο δίκτυο, τα οποία στη συνέχεια συλλέγονται επεξεργάζονται από τους

δρομολογητές του δικτύου. Αποτελέσματα από προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο διαχωρισμός της κίνησης επιτρέπει να μειωθεί ο αριθμός των ροών που λαμβάνουν χαμηλού επιπέδου υπηρεσίες μετά από αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου.

- Προτείναμε τη χρήση μηχανισμών χρωματισμού για να διαχωρίσουμε την αναδρομολογημένη και μη αναδρομολογημένη κίνηση. Ο χρωματισμός των πακέτων μίας ροής δεν σημαίνει απαραίτητα υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών κατά τη μεταφορά της κίνησης και έχει πεδίο εφαρμογής μόνο μέσα στα όρια της διαχειριστικής περιοχής. Η μέθοδος που ακολουθήσαμε μειώνει τον αριθμό των πακέτων που χρωματίζονται σε σχέση με αντίστοιχο μοντέλο που προτείνεται από το IETF.
- Προδιαγράψαμε την υπηρεσία *Premium IP* και ορίσαμε τις διαδικασίες για την παροχή και παρακολούθηση των συνδέσεων στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs στο πλαίσιο του έργου *SEQUIN*.
- Εκτελέσαμε ποιοτικές και ποσοτικές δοκιμές στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs για να δοκιμάσουμε τη βελτίωση των παρεχομένων εγγυήσεων με χρήση της υπηρεσίας *Premium IP*. Επίσης, εκτελέσαμε δοκιμές απόδοσης πάνω από το δίκτυο του ΕΔΕΤ με σκοπό να μελετήσουμε τις εγγυήσεις απόδοσης για κίνηση *Premium IPv4/6*.
- Ορίσαμε τις βασικές αρχές για την παρακολούθηση των συμβολαίων ποιότητας στο δίκτυο του *GÉANT* για την υπηρεσία *Premium IP*. Επίσης συμμετείχαμε στην περιγραφή ανοικτής υποδομής για την παρακολούθηση των εγγυήσεων κατά τη μεταφορά της κίνησης στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας *GN2-JRA1*.
- Προτείναμε την χρήση του πρωτοκόλλου IPv6 για την επέκταση των λειτουργιών του μοντέλου *IQPM*, κυρίως για τη βελτίωση αποστολής των μηνυμάτων σηματοδοσίας με χρήση της υπηρεσίας πολλαπλών προορισμών (*multicast*).

1.3 Συνοπτική παρουσίαση επόμενων ενοτήτων

Η παρούσα διατριβή δομείται ως ακολούθως. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά αρχιτεκτονικές ή μοντέλα που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία σχετικά με την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων IP. Περιγράφονται οι αρχιτεκτονικές Ενοποιημένων Υπηρεσιών (*Integrated Services*) [BCS94] και Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (*Differentiated Services*) [Blake+98] και παρουσιάζονται οι κλάσεις υπηρεσίας (*Class of Service - CoS*) που υποστηρίζονται από την κάθε αρχιτεκτονική. Στη συνέχεια, αναλύονται οι διαφορετικοί μηχανισμοί που έχουν κατά καιρό προταθεί για τη διαχείριση των διαθέσιμων δικτυακών πόρων, π.χ. χωρητικότητα, και μελετώνται μέθοδοι για τον έλεγχο αποδοχής νέων ροών κίνησης.

Επικεντρωνόμαστε στους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής βασισμένους σε μετρήσεις (*Measurement-based Admission Control - MBAC*) [BJS00] καθώς σε αυτούς βασίζεται το προτεινόμενο μοντέλο *IQPM*. Παρουσιάζουμε επίσης μοντέλα που χρησιμοποιούν κεντρικές οντότητες για τη διαχείριση των πόρων του δικτύου, όπως μοντέλα που βασίζονται στη χρήση «μεσίτη εύρους ζώνης» (*bandwidth broker*) [NJZ99]. Αναφερόμαστε στο μοντέλο *Resource Management in DiffServ (RMD)* [West+02] που προδιαγράφει του IETF, το οποίο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το προτεινόμενο μοντέλο *IQPM* ως προς τη χρήση σηματοδοσίας. Τέλος, περιγράφονται μοντέλα που επιδιώκουν να διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ των διαχειριστικών περιοχών κατά τη φάση παροχής ποιότητας υπηρεσίας, όπως το μοντέλο που προτείνεται από το *IP Sphere Forum* [Noll05].

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει αναλυτικά την υπηρεσία υψηλής προτεραιότητας *Premium IP* [Roth+03], όπως αυτή προδιαγράφηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου *SEQUIN*, και τον τρόπο υλοποίησής της στο πανευρωπαϊκό δίκτυο *GÉANT*. Αναφερόμαστε αναλυτικά στις διαφορετικές φάσεις εγκατάστασης της υπηρεσίας και περιγράφουμε την Σύμβαση Διασφάλισης Επιπέδου Ποιότητας (*Service Level Agreement*). Παρουσιάζουμε τις βασικές αρχές για την παρακολούθησή των παρεχομένων εγγυήσεων από το δίκτυο [LMBS04] και περιγράφουμε πειράματα που αποδεικνύουν ότι η υπηρεσία *Premium IP* βελτιώνει σημαντικά τις υπηρεσίες σε σχέση με την υπηρεσία Βέλτιστης Προσπάθειας (*Best Effort*) σε συνθήκες συμφόρησης. Τέλος, περιγράφουμε αναλυτικά τα προβλήματα που παρουσιάζονται από την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* στο δίκτυο του *GÉANT* και των διασυνδεδεμένων Ερευνητικών και Εκπαιδευτικών Εθνικών Δικτύων (*National Research & Education Network*), όπου η έλλειψη σηματοδοσίας δυσκολεύει σημαντικά την παροχή της υπηρεσίας και κάνει αδύνατη την αντιμετώπιση προβλημάτων που οφείλονται από αποτυχία γραμμών διασύνδεσης.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει αναλυτικά το μοντέλο *Inter-domain QoS Provisioning Model (IQPM)*. Αρχικά περιγράφουμε τους στόχους και τις προδιαγραφές που θέσαμε κατά τη φάση σχεδίασης του μοντέλου. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των διαφορετικών φάσεων εγκατάστασης της υπηρεσίας για κίνηση υψηλής προτεραιότητας και περιγράφουμε τη χρήση της σηματοδοσίας για τη διαχείριση νέων συνδέσεων που επεκτείνονται σε περισσότερες από μία διαχειριστικές περιοχές. Εξηγούμε τη μέθοδο που ακολουθούμε για την παρακολούθηση των μονοπατιών που ακολουθούν οι εγκατεστημένες ροές και περιγράφουμε με ποιο τρόπο διαχειριζόμαστε την αναδρομολογημένη κίνηση ύστερα από αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Συγκρίνουμε το προτεινόμενο μοντέλο *IQPM* με το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον *GÉANT/NRENs* καθώς και με το μοντέλο *RMD* που προδιαγράφει το IETF. Εκτελούμε σειρά προσομοιώσεων που αποδεικνύουν ότι το μοντέλο *IQPM* μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των ροών υψηλής προτεραιότητας που επηρεάζονται μετά από σφάλματα στις γραμμές διασύνδεσης. Επίσης, αναλύουμε πως το μοντέλο *IQPM* ανταπεξέρχεται σε σφάλματα που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία των δρομολογητών κορμού ή κατά την αποστολή των μηνυμάτων σηματοδοσίας. Τέλος, εξηγούμε τους

περιορισμούς κατά την εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* και προτείνουμε επεκτάσεις του σε περιβάλλον που υποστηρίζει πρωτόκολλα IPv6.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με το πέμπτο κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα από την παρούσα διατριβή. Επίσης γίνονται προτάσεις για συνέχιση της ερευνητικής προσπάθειας στο μέλλον με ανοικτά θέματα και προβλήματα, όπως αυτά προέκυψαν από την μέχρι σήμερα εμπειρία μας και την μελέτη του μοντέλου *IQPM*.

2 Αρχιτεκτονικές και μοντέλα Παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας σε δίκτυα IP

Η ενότητα ξεκινά με την παρουσίαση των δύο σημαντικότερων αρχιτεκτονικών που έχουν προταθεί για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων IP. Εξετάζονται, εν συντομία, οι μηχανισμοί προώθησης της κίνησης και διαχείρισης των πληροφοριών ελέγχου που διατηρούν οι δρομολογητές κορμού και αναφέρονται πλεονεκτήματα και περιορισμοί που προκύπτουν κατά την εφαρμογή τους σε δίκτυα παραγωγής. Η ενότητα συνεχίζεται με παρουσίαση μεθόδων ή μοντέλων που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία για τη διαχείριση των πόρων του δικτύου και τον έλεγχο αποδοχής (*admission control*) νέων συνδέσεων. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται σε κατανεμημένες μεθόδους ελέγχου αποδοχής με χρήση μετρήσεων ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εναλλακτικές μέθοδοι για τη διαχείριση πόρων με χρήση κεντρικών εξυπηρετητών. Τέλος, παρουσιάζονται μοντέλα που επιδιώκουν να ξεπεράσουν τους λειτουργικούς περιορισμούς που εμφανίζουν οι δύο βασικές αρχιτεκτονικές *QoS* και να διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ ανεξάρτητων διαχειριστικών περιοχών κατά τη εγκατάσταση νέων συνδέσεων.

2.1 Βασικές Αρχιτεκτονικές

Το *Internet Engineering Task Force (IETF)* έχει προδιαγράψει δύο βασικές αρχιτεκτονικές για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας: την αρχιτεκτονική/πλαίσιο *Ενοποιημένων Υπηρεσιών* (§2.1.1) και την αρχιτεκτονική/πλαίσιο *Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών* (§2.1.2). Παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις ο στόχος ήταν η παροχή εγγυήσεων κατά την μεταφορά των πακέτων IP, οι δύο αρχιτεκτονικές

εμφανίζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους κατά την προώθηση της κίνησης και τη διαχείριση των πληροφοριών ελέγχου.

2.1.1 Αρχιτεκτονική Ενοποιημένων Υπηρεσιών (*Integrated Services*)

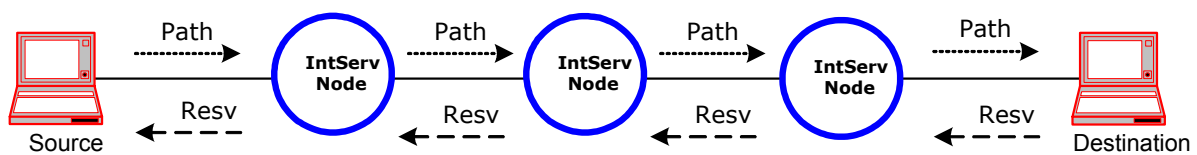
Η αρχιτεκτονική **Ενοποιημένων Υπηρεσιών (*Integrated Services – IntServ*)** [BCS94] σχεδιάστηκε για να επιτρέψει την παροχή εγγυήσεων κατάλληλων για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (*real time*) για από άκρο-σε-άκρο συνδέσεις. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι η διαχείριση της κίνησης πραγματοποιείται σε επίπεδο ροής. Στην αρχιτεκτονική *IntServ* συναντάμε:

- **Το πρωτόκολλο σηματοδότησης για τη δέσμευση δικτυακών πόρων (*Resource Reservation Protocol – RSVP*)** [Brad+97] [Wroc97], το οποίο επιτρέπει σε μεμονωμένες εφαρμογές να αιτούνται εγγυήσεις κατά τη μεταφορά των πακέτων τους μέσα από το δίκτυο και στους δρομολογητές κορμού να ανταλλάσσουν πληροφορίες ελέγχου σχετικά με την κατάσταση των εγκατεστημένων ροών.
- **Τη διαδικασία ελέγχου αποδοχής ροών**, η οποία καθορίζει κατά πόσο μια νέα αίτηση μπορεί να ικανοποιηθεί βάσει της διαθεσιμότητας των δικτυακών πόρων. Ο καθορισμός των απαραίτητων πόρων προκύπτει από τα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσουν οι τελικοί κόμβοι μεταξύ τους.
- **Τη διαδικασία διαχωρισμού της κυκλοφορίας ανά ροή**, η οποία κατηγοριοποιεί τα εισερχόμενα πακέτα σε κατάλληλες κλάσεις προτεραιότητας ώστε να εξασφαλίζονται οι συμφωνημένες εγγυήσεις ποιότητας κατά τη μεταφορά.
- **Τη διαδικασία χρονοπρογραμματισμού**, η οποία διαχειρίζεται τη συμφόρηση στις ουρές εξόδου των δρομολογητών και κατανέμει τους διαθέσιμους πόρους μεταξύ των εγκατεστημένων ροών ανάλογα με τις απαιτήσεις τους.

Πριν ξεκινήσει η ανταλλαγή κίνησης μεταξύ των δύο τελικών κόμβων, δηλαδή του *κόμβου Πηγή (source node)* και *Προορισμού (destination node)*, ανταλλάσσονται μηνύματα σηματοδότησης με χρήση του πρωτοκόλλου *RSVP*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Ο *κόμβος Πηγή* δημιουργεί μήνυμα σηματοδότησης *RSVP PATH*, στο οποίο περιγράφει τα χαρακτηριστικά κίνησης που θα παράγει χρησιμοποιώντας το πεδίο *SENDER_TSPEC*². Στο μήνυμα *RSVP PATH* συμπεριλαμβάνεται το πεδίο *ADSPEC* που καθορίζει τους μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας που ο *κόμβος Προορισμού* έχει την ικανότητα να εφαρμόσει. Το μήνυμα *RSVP PATH* προωθείται στο δίκτυο από κόμβο σε κόμβο με

² Το πεδίο *SENDER_TSPEC* μπορεί να περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους: ρυθμό κίνησης, μέγεθος κάδου με σκυτάλη (*token bucket*), μέγιστος ρυθμός κίνησης, ελάχιστη μονάδα ελέγχου, μέγιστο μέγεθος πακέτου, κλπ.

βάση τους υφιστάμενους πίνακες δρομολόγησης. Ο κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής επεξεργάζεται και, εφόσον απαιτείται, τροποποιεί τις τιμές στο πεδίο *ADSPEC* ώστε να αντικατοπτρίζει τις δυνατότητές του να υποστηρίξει τις αιτούμενες υπηρεσίες ποιότητας. Ο *κόμβος Προορισμού* επεξεργάζεται το πεδίο *ADSPEC* και, στη συνέχεια, δημιουργεί μήνυμα *RSVP RESV* αιτούμενος τη δέσμευση πόρων συγκεκριμένο ρυθμό από τον κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή στο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι. Το μήνυμα *RSVP RESV* περιλαμβάνει το πεδίο *FLOWSPEC*, στο οποίο καθορίζονται η κλάση υπηρεσίας που αιτείται να χρησιμοποιηθεί για τη κίνηση, τα χαρακτηριστικά της κίνησης (*TSPEC*) και οι υπηρεσίες που είναι επιθυμητό να παρέχονται (*RSPEC*), π.χ. ρυθμός και εγγυήσεις μέγιστης καθυστέρησης.



Σχήμα 2: Ανταλλαγή μηνυμάτων με χρήση του πρωτοκόλλου *RSVP*.

Αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση μιας νέας ροής, ο κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής στο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι διαχωρίζει την εισερχόμενη κίνηση σε μία κλάση υπηρεσίας με βάση τα στοιχεία που έχει αποθηκεύσει προηγουμένως τοπικά. Ο κάθε δρομολογητής στο δίκτυο επιλέγει ανεξάρτητα σε ποια κλάση θα αντιστοιχήσει την κίνηση της ροής, το οποίο σημαίνει ότι τα πακέτα μίας ροής μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σε διαφορετικές κλάσεις προτεραιότητας κατά τη προώθησή τους από τους ενδιάμεσους δρομολογητές.

2.1.1.1 Διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας

Οι κλάσεις υπηρεσίας που έχουν οριστεί για την αρχιτεκτονική *IntServ* είναι οι ακόλουθες:

- **Εγγυημένη (*Guaranteed*)** [SPG97]: Εξασφαλίζει το εύρος ζώνης (*bandwidth*) για τη κάθε εγκατεστημένη ροή, δηλαδή εγγυάται αμελητέα απώλεια πακέτων σε περιόδους συμφόρησης, και παρέχει εγγύηση για τη μέγιστη καθυστέρηση μέχρι τον *κόμβο Προορισμού*. Δεν εξασφαλίζει το μέγιστο όριο για τη μεταβλητότητα καθυστέρησης (*jitter*). Προορίζεται για εφαρμογές που απαιτούν συγκεκριμένες εγγυήσεις απόδοσης κατά τη μεταφορά της κίνησης.
- **Ελεγχόμενου Φόρτου (*Controlled Load*)** [Wroc97b]: Εξασφαλίζει στα πακέτα της ροής αντιμετώπιση ανάλογη με αυτή που θα είχαν σε ένα δίκτυο με ελάχιστη συμφόρηση χωρίς όμως να παρέχονται αυστηρές εγγυήσεις όσον αφορά το εύρος ζώνης και την από άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση. Προορίζεται για εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστες υπηρεσίες από το

δίκτυο χωρίς όμως να απαιτούν αυστηρές εγγυήσεις απόδοσης κατά τη μεταφορά της κίνησης.

2.1.1.2 Περιορισμοί κατά την εφαρμογή σε δίκτυα παραγωγής

Η αρχιτεκτονική *IntServ* παρουσιάζει περιορισμούς κατά την εφαρμογή της σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Ειδικότερα, η υποστήριξη μηχανισμών *IntServ* στους δρομολογητές δεν είναι εύκολα κλιμακούμενη (*scalable*) ως προς τον αριθμό των εγκατεστημένων ροών. Οι ενδιάμεσοι δρομολογητές αποθηκεύουν πληροφορίες κατάστασης (*state information*) για την κάθε εγκατεστημένη ροή ενώ τα εισερχόμενα πακέτα προωθούνται αφού πρώτα επεξεργαστούν τα αποθηκευμένα στοιχεία σχετικά με την ροή που ανήκουν. Οι εν λόγω απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικό χώρο (μνήμη) αυξάνουν γραμμικά σε σχέση με την αύξηση του αριθμού ροών που διατρέχουν το δίκτυο. Η ομαδοποίηση ροών με παρόμοιες εγγυήσεις σε μία μόνο συναθροισμένη ροή (*aggregated flow*) [Bake+01] αποτελεί μια τεχνική που βελτιώνει την κλιμάκωση της αρχιτεκτονικής *IntServ* μειώνοντας τον αριθμό των πληροφοριών κατάστασης στους δρομολογητές του δικτύου. Η βελτίωση που μπορεί να επιτευχθεί με τη συνάθροιση ομοειδών ροών εξαρτάται κυρίως από την τοπολογία του δικτύου και τον αριθμό των δρομολογητών που πραγματοποιούν την ομαδοποίηση και διαχωρισμό των ροών (*aggregator / de-aggregator routers*).

Ένα δίκτυο *IntServ* μπορεί να υποστηρίξει την «Εγγυημένη» (*Guaranteed*) κλάση υπηρεσίας μόνο εφόσον όλοι οι δρομολογητές κατά μήκος του από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού υλοποιούν μηχανισμούς προώθησης της κίνησης με διαφορετικές προτεραιότητες. Αντιθέτως, η υποστήριξη της κλάσης υπηρεσίας «Ελεγχόμενου Φόρτου» (*Controlled Load*) επιτρέπει σε μερικούς κόμβους στο δίκτυο να μη διαχωρίσουν την κίνηση σε διαφορετικές προτεραιότητες κατά την προώθησή της. Το πρωτόκολλο *RSVP* οφείλει να υποστηρίζεται από όλους τους κόμβους του δικτύου *IntServ* συμπεριλαμβανομένου των *κόμβων Πηγή και Προορισμού*. Η αρχιτεκτονική *IntServ* δεν εφαρμόστηκε ευρέως σε δίκτυα παραγωγής κυρίως λόγω των προβλημάτων κλιμάκωσης που παρουσιάζει κατά την υποστήριξη μεγάλου αριθμού ροών.

2.1.2 Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (*Differentiated Services*)

Η αρχιτεκτονική *Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών* (*Differentiated Services – DiffServ*) [Blake+98] προσπάθησε να επιλύσει τα προβλήματα κλιμάκωσης και τους περιορισμούς που παρουσίαζε η αρχιτεκτονική *IntServ*. Για το λόγο αυτό το μοντέλο που αναπτύχθηκε δεν προσπάθησε να διαχειριστεί μεμονωμένες ροές αλλά *συναθροίσεις ροών* (*aggregated flows*). Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας στην εξυπηρετούμενη κίνηση γίνεται με την χρήση προτεραιοτήτων για τις συναθροίσεις ροών παρά με τη δέσμευση πόρων ανά ροή.

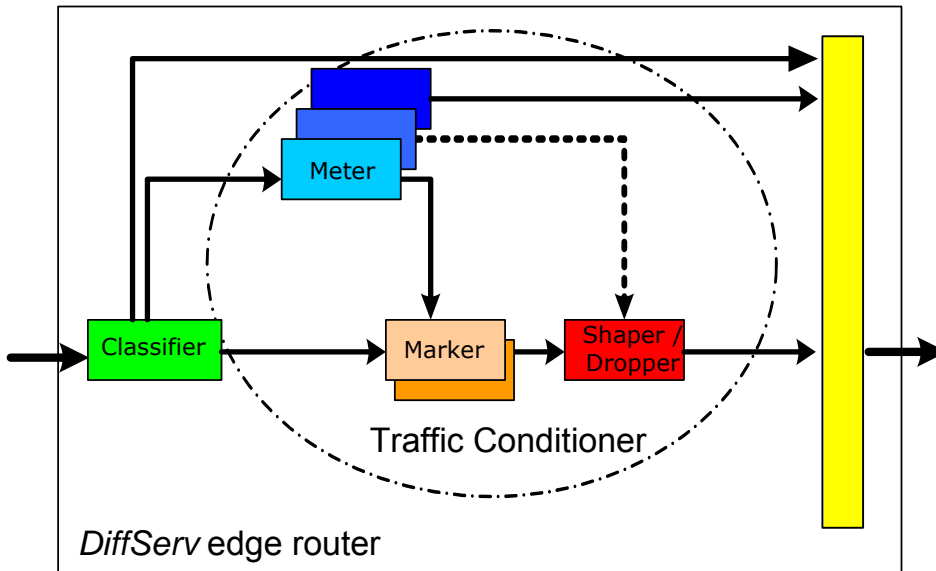
Η αρχιτεκτονική *DiffServ* προβλέπει ότι η κατηγοριοποίηση, έλεγχος και ο χρωματισμός της κίνησης για την κάθε εγκατεστημένη ροή πραγματοποιείται στα όρια της εκάστοτε διαχειριστικής περιοχής ενώ στο εσωτερικό της δεν παρακολουθούνται οι ροές ξεχωριστά αλλά τα πακέτα μεταφέρονται σύμφωνα με τις μαρκαρισμένες επικεφαλίδες τους. Ειδικότερα, αφού προηγηθεί η αίτηση παροχής ποιότητας και ο έλεγχος αποδοχής σε μία νέα ροή, μαρκάρονται τα πακέτα IP της ροής με συγκεκριμένη τιμή στην επικεφαλίδα τους, η οποία τιμή καθορίζει την αντιμετώπιση που θα έχουν τα πακέτα στους δρομολογητές του δικτύου. Ανατίθεται, λοιπόν, η κατάλληλη τιμή *Differentiated Services Code Point (DSCP)* στο πεδίο *Type of Service (ToS)* της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου IPv4 ή στο πεδίο *Traffic Class* του πρωτοκόλλου IPv6, σύμφωνα με την οποία καθορίζεται η αντιμετώπιση των πακέτων από τους δρομολογητές του δικτύου. Η αντιμετώπιση σε κάθε δρομολογητή αποκαλείται *συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο (Per Hop Behavior - PHB)* και καθορίζει την σχετική προτεραιότητα προώθησης πακέτων, τη πιθανότητα απόρριψής τους καθώς και τις εγγυήσεις σε εύρος ζώνης (*bandwidth*). Η εν σειρά εφαρμογή μιας συγκεκριμένης συμπεριφοράς *PHB* σε δρομολογητές κορμού ορίζουν τους όρους παροχής ποιότητας υπηρεσίας στα από άκρο-σε-άκρο μονοπάτια μέσα στα όρια μιας διαχειριστικής περιοχής.

Για την υποστήριξη εγγυήσεων απόδοσης σε ένα δίκτυο *DiffServ* απαιτείται να υλοποιούνται οι ακόλουθοι μηχανισμοί στους ακραίους δρομολογητές μιας διαχειριστικής περιοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3:

- **ταξινομητής πακέτων (*packet classifier*)**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κατηγοριοποίηση των πακέτων ανάλογα με την τιμή σε ένα ή περισσότερα πεδία της επικεφαλίδας των πακέτων. Σύμφωνα με την απόφαση που λαμβάνεται, το κάθε πακέτο μεταχειρίζεται σύμφωνα με το συμβόλαιο *SLA* της ροής κίνησης στην οποία ανήκει.
- **μετρητής (*meter*)**, ο οποίος συλλέγει στατιστικά στοιχεία για την κυκλοφορία της κάθε συναθροισμένης ροής και καθορίζει αν η εισερχόμενη κίνηση στη διαχειριστική περιοχή ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές που έχουν οριστεί στο συμβόλαιο *SLA* της παρεχόμενης υπηρεσίας.
- **σημαδευτής πακέτων (*packet marker*)**, ο οποίος θέτει ή μεταβάλλει την τιμή *DSCP* στην επικεφαλίδα των πακέτων με βάση τα αποτελέσματα της ταξινόμησης και των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε προηγούμενα στάδια. Η τιμή αυτή καθορίζει τη συμπεριφορά *PHB* για τα πακέτα της ροής στους ακόλουθους κόμβους.
- **διαμορφωτής (*shaper*) / «κόφτης» (*dropper*)**, εξασφαλίζουν ότι μια ροή συμμορφώνεται ακριβώς με τις παραμέτρους που καθορίζονται σε ένα προσυμφωνημένο προφίλ κίνησης. Μικρές αποκλίσεις στην ροή των πακέτων διορθώνονται στο διαμορφωτή ενώ εάν η εισερχόμενη ροή είναι πολύ διαφορετική από ότι έχει συμφωνηθεί, ο «κόφτης» προχωρά στην απόρριψη πακέτων.

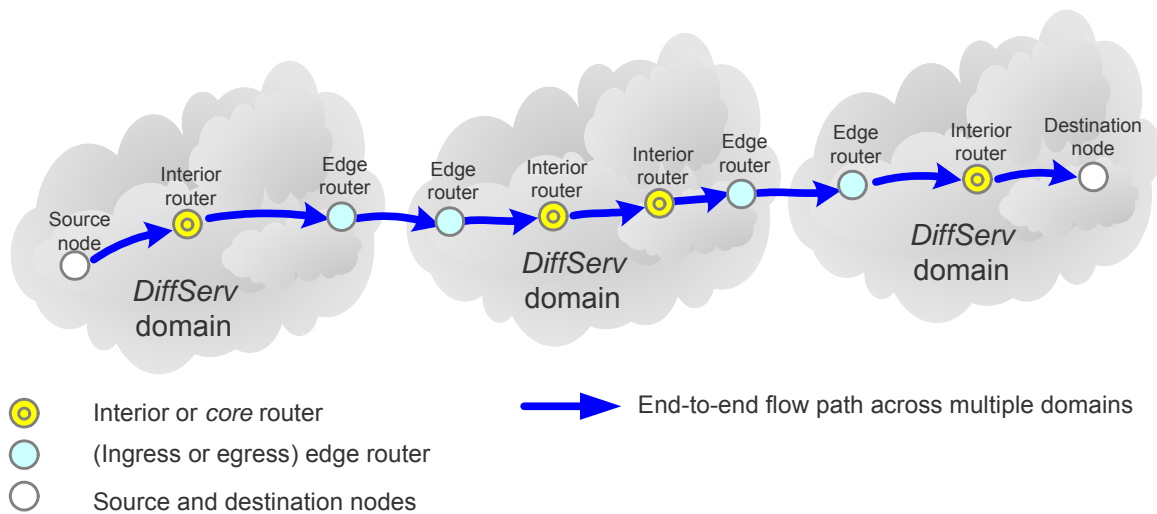
- «συμπεριφορά ανά κόμβο» (*Per Hop Behavior PHB*), ο οποίος χαρακτηρίζει το τρόπο μεταγωγής πακέτων για κάθε διαφορετική κλάση υπηρεσίας και περιλαμβάνει τη διαχείριση και το χρονοπρογραμματισμό των διαφόρων ουρών που υποστηρίζει ο κόμβος *DiffServ*.

Να σημειωθεί ότι ο μετρητής, ο σημαδευτής πακέτων, ο διαμορφωτής και ο «κόφτης» περιγράφονται συνολικά ως **ρυθμιστής κυκλοφορίας (traffic conditioner)**.



Σχήμα 3: Μηχανισμοί που εφαρμόζονται σε ένα ακραίο δρομολογητή *DiffServ*.

Μερικοί από τους παραπάνω μηχανισμούς δεν υλοποιούνται στους εσωτερικούς δρομολογητές (*interior/core routers*) μιας διαχειριστικής περιοχής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η κατηγοριοποίηση και το μαρκάρισμα των πακέτων πραγματοποιείται μόνο στα όρια της διαχειριστικής περιοχής από τους ακραίους δρομολογητές (*edge routers*) ενώ οι υπόλοιποι δρομολογητές ασχολούνται μόνο με την μεταγωγή των πακέτων σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουν αποθηκευτεί στις επικεφαλίδες των πακέτων (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Ακραίοι και εσωτερικοί δρομολογητές σε διαχειριστικές περιοχές *DiffServ*.

Η συναθροισμένη κίνηση που εισέρχεται σε μια διαχειριστική περιοχή *DiffServ* περιορίζεται από τον ρυθμιστή κυκλοφορίας (*traffic conditioner*), ο οποίος ελέγχει τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης κίνησης (*traffic profile*). Για πάρα πολλές δικτυακές εφαρμογές είναι αρκετά δύσκολο ή πρακτικά αδύνατο να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της κίνησης που παράγουν κατά τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, ο στιγμιαίος ρυθμός κίνησης που απαιτείται για τη μεταφορά βίντεο εξαρτάται από την κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται και συνήθως μεταβάλλεται με το χρόνο. Ο ρυθμιστής κυκλοφορίας σε δίκτυα *DiffServ* αδιαφορεί για τα διάφορα χαρακτηριστικά κίνησης που παράγουν οι διαφορετικές εφαρμογές και συνήθως προσπαθεί να ελέγξει μόνο το (συνολικό) μέσο και μέγιστο ρυθμό κίνησης που εμφανίζουν οι ροές. Οι μηχανισμοί «κάδου με σκυτάλη» (*token bucket*) [Tan96] και διαρρέοντος κάδου (*leaky bucket*) χρησιμοποιούνται συνήθως για το σκοπό αυτό.

2.1.2.1 Συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο (*Per Hop Behavior - PHB*)

Έχουν οριστεί από το IETF οι ακόλουθες δύο συμπεριφορές *PHB* για την εξυπηρέτηση της κίνησης σε δίκτυα *DiffServ*:

- **Επισπεύδουσα Προώθηση (*Expedited Forwarding - EF*)** [Davie+02] [Char+02], η οποία χρησιμοποιείται για την υποστήριξη υπηρεσιών που παρέχουν χαμηλή καθυστέρηση και μεταβλητότητα καθυστέρησης (*jitter*) στην μεταφορά των πακέτων καθώς και αμελητέο ρυθμό απώλειας πακέτων εφόσον δεν παραβιάζονται τα συμφωνηθέντα χαρακτηριστικά κίνησης (*traffic profile*) για τη συναθροισμένη ροή. Η συμπεριφορά *EF PHB* έχει ως στόχο να εξομοιώσει υπηρεσίες που παρέχει μια «εικονική» μισθωμένη γραμμή (*virtual leased line*). Πακέτα μιας συναθροισμένης κίνησης που παραβιάζουν το συμφωνηθέν προφίλ απορρίπτονται χωρίς να γίνεται διάκριση της ροής που ανήκουν.
- **Εγγυημένη Προώθηση (*Assured Forwarding - AF*)** [HBWW99], η οποία χρησιμοποιείται για την υποστήριξη υπηρεσιών διαφορετικής προτεραιότητας. Έχουν οριστεί τέσσερις διαφορετικές κλάσεις προτεραιότητας -*AF1*, *AF2*, *AF3*, *AF4*- και σε καθεμιά από τις οποίες ορίζονται τρεις διαφορετικές προτεραιότητες -χαμηλή, μέση, υψηλή- απόρριψης πακέτων. Η κάθε κλάση *AF* έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται τους χρησιμοποιήσιμους πόρους υπολοίπων κλάσεων. Τα πακέτα που παραβαίνουν το επιτρεπόμενο προφίλ κίνησης είτε προωθούνται στο δίκτυο με μικρότερη προτεραιότητα από αυτή που είχαν αρχικά είτε, στη χειρότερη περίπτωση, απορρίπτονται.

2.1.2.2 Προβλήματα κατά την εφαρμογή σε δίκτυα παραγωγής

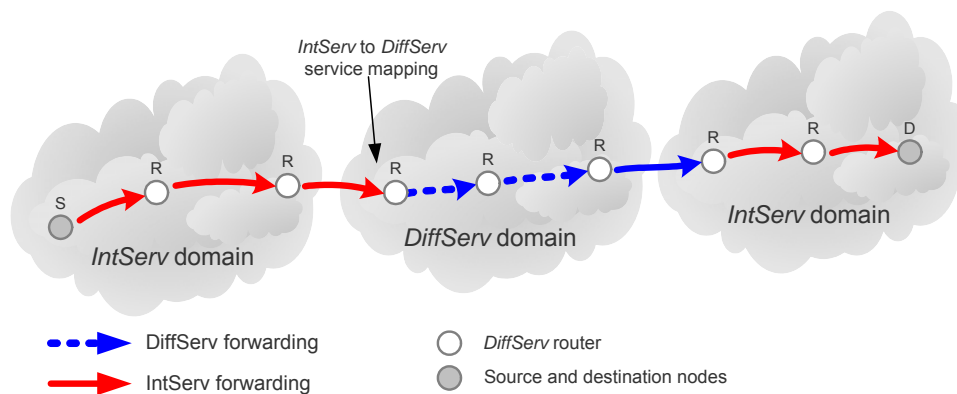
Η αρχιτεκτονική *DiffServ* παρέχει εγγυήσεις σε επίπεδο συνάθροισης κίνησης και δεν περιλαμβάνει κανένα μηχανισμό για την παρακολούθηση των εγγυήσεων που απολαμβάνουν οι μεμονωμένες ροές.

Ενδέχεται λοιπόν οι εγγυήσεις απόδοσης προς την συναθροισμένη κίνηση να μην παραβιάζονται αλλά την ίδια στιγμή μεμονωμένες ροές να λαμβάνουν χαμηλού επιπέδου υπηρεσίες.

Επίσης, η αρχιτεκτονική *DiffServ* δεν ορίζει κάποια συγκεκριμένη διαδικασία για τον έλεγχο αποδοχής των ροών και δεν καθορίζει πως οφείλουν να συγκροτηθούν οι μηχανισμοί *QoS* που ενεργοποιούνται στο δίκτυο. Για παράδειγμα, δεν διευκρινίζεται πόση ποσότητα κίνησης θα πρέπει να επιτρέπεται σε μία κλάση υπηρεσίας ή με ποιο τρόπο προστατεύεται το δίκτυο από παράνομη κίνηση που εισάγουν γειτονικές διαχειριστικές περιοχές ή τελικοί χρήστες. Ο υπεύθυνος διαχειριστής θα πρέπει να επιλέξει και να εφαρμόσει μηχανισμούς *QoS* ανάλογα με τις εγγυήσεις που επιθυμεί να παρέχει στα όρια του δικτύου ευθύνης του. Ως αποτέλεσμα, οι υπηρεσίες που παρέχονται σε γειτονικές διαχειριστικές περιοχές δεν είναι κατ' ανάγκη συμβατές μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η υποστήριξη υπηρεσιών για συνδέσεις που διασχίζουν τα διαχειριστικά όρια. Ακόμα και στην περίπτωση που οι υπηρεσίες είναι συμβατές μεταξύ τους, η έλλειψη συγκεκριμένου μοντέλου για τη δέσμευση πόρων εισάγει καθυστερήσεις κατά την εγκατάσταση συνδέσεων που διασχίζουν πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές.

2.1.3 Υποστήριξη κλάσεων υπηρεσίας *IntServ* πάνω από δίκτυα *DiffServ*

Σύμφωνα με το μοντέλο υποστήριξης κλάσεων υπηρεσίας *IntServ* πάνω από δίκτυα *DiffServ* [Bern+00], εγγυήσεις κατά την άκρο-σε-άκρο μεταφορά της κίνησης προσφέρονται από κοινού από διαχειριστικές περιοχές *IntServ* και *DiffServ*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Τα εισερχόμενα αιτήματα για χρήση κλάσεων υπηρεσίας *IntServ* αντιστοιχίζονται σε κατάλληλες συμπεριφορές *PHB* στο δίκτυο διασύνδεσης *DiffServ*. Στο συγκεκριμένο μοντέλο παροχής ποιότητας υπηρεσίας, το δίκτυο *DiffServ* που παρεμβάλλεται μεταξύ των ακραίων δρομολογητών *IntServ* «λειτουργεί» ως εικονική σύνδεση (*virtual link*).



Σχήμα 5 Υποστήριξη κλάσεων υπηρεσίας *IntServ* πάνω από δίκτυα *DiffServ*.

Η δέσμευση των δικτυακών πόρων για την κίνηση που ανταλλάσσουν ο *κόμβος Πηγή* και ο *κόμβος Προορισμού* επιτυγχάνεται με χρήση του πρωτόκολλου *RSVP* για τις διαχειριστικές περιοχές πρόσβασης (*IntServ*). Στο δίκτυο διασύνδεσης, όπου για λόγους απόδοσης χρησιμοποιείται η

αρχιτεκτονική *DiffServ*, οι διαχείριση των δικτυακών πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές μεθόδους. Εφόσον οι ακραίοι δρομολογητές *DiffServ* δεν αναγνωρίζουν τα μηνύματα *RSVP*, οι ακραίοι δρομολογητές *IntServ* εκτελούν λειτουργίες ελέγχου αποδοχής για το τμήμα του από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού που περιλαμβάνει τη διαχειριστική περιοχή *DiffServ*. Παράλληλα, οι ακραίοι δρομολογητές *DiffServ* περιορίζουν τη συνολική εισερχόμενη κίνηση από τις γειτονικές διαχειριστικές περιοχές (*IntServ*) σύμφωνα με την υφιστάμενη πολιτική διάθεσης πόρων. Εφόσον, αντιθέτως, οι ακραίοι δρομολογητές *DiffServ* αναγνωρίζουν τα μηνύματα *RSVP*, τότε εκτελούν έλεγχο αποδοχής συνήθως για το σύνολο της διαχειριστικής περιοχής *DiffServ*. Ο έλεγχος αποδοχής στην περιοχή *DiffServ* μπορεί να διευκολυνθεί αν μέρος από τους εσωτερικούς δρομολογητές *DiffServ* μπορούν να επεξεργαστούν τα μηνύματα *RSVP* και να εκτελέσουν λειτουργίες ελέγχου αποδοχής. Οι ακραίοι δρομολογητές μπορούν επίσης να συναθροίσουν δεσμεύσεις *RSVP* για την κίνηση που μεταφέρεται στα μεταξύ των ορίων της περιοχής *DiffServ* ή να ζητήσουν τη συνδρομή μιας κεντρικής διαχειριστικής οντότητας (βλέπε §2.2.5.1)

2.2 Διαχείριση Πόρων σε δίκτυα IP – Σχήματα για έλεγχο αποδοχής

Οι *μηχανισμοί ελέγχου αποδοχής (admission control mechanisms)* έχουν στόχο να εκτιμήσουν κατά πόσο μπορεί να εξυπηρετηθεί μια υπό εγκατάσταση ροή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κίνησης (*traffic profile*) που απαιτεί ορισμένες εγγυήσεις απόδοσης κατά τη μεταφορά των πακέτων της. Ταυτόχρονα, οι μηχανισμοί οφείλουν να διασφαλίσουν ότι δεν θα επηρεαστούν οι εγγυήσεις ποιότητας που παρέχονται στις ήδη εγκατεστημένες ροές αποφεύγοντας να εμφανιστεί συμφόρηση στο δίκτυο.

Οι μηχανισμοί ελέγχου αποδοχής κίνησης προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το βαθμό χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου διατηρώντας παράλληλα μικρή την πιθανότητα να διαταραχθούν οι προσφερθείς υπηρεσίες *QoS*. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα από την *στατιστική πολυπλεξία (statistical multiplexing)* ροών με μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης και επιτυγχάνουν υψηλούς βαθμούς χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου. Συχνά οι μηχανισμοί προσπαθούν να διασφαλίσουν ότι οι ροές που γίνονται δεκτές θα λάβουν *στατιστικές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας (statistical QoS guarantees)*, το οποίο σημαίνει ότι οι εγγυήσεις θα παρέχονται για ποσοστό των μεταφερόμενων πακέτων ή του χρόνου που παρέχεται η υπηρεσία. Η παροχή «*αυστηρών*» *εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (hard QoS guarantees)*, δηλαδή η παροχή εγγυήσεων καθ' όλη τη διάρκεια που παρέχεται η υπηρεσία, προϋποθέτει την υιοθέτηση μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη το χειρότερο δυνατό σενάριο (*worst case scenario*) για την περιγραφή της

κίνησης των εγκατεστημένων ροών. Στις περιπτώσεις αυτές η μέση χρησιμοποίηση των πόρων παραμένει χαμηλή.

Η κυριότερη μετρική απόδοσης για τους μηχανισμούς αποδοχής κίνησης θεωρείται ο βαθμός χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου που επιτυγχάνεται με μηδενική ή αμελητέα πιθανότητα διατάραξης των παρεχομένων υπηρεσιών. Δευτερεύουσα μετρική απόδοσης είναι ο βαθμός δικαιοσύνης (*fairness*) στην αποδοχή ροών με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης, π.χ. ως προς το ρυθμό ή το από άκρο-σε-άκρο μήκος του μονοπατιού. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε μερικούς από τους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής κίνησης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

2.2.1 Έλεγχος αποδοχής με βάση παραμέτρους κίνησης

Ο έλεγχος αποδοχής με βάση παραμέτρους (*parameter-based admission control*) προϋποθέτει ότι είναι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικές με τα χαρακτηριστικά κίνησης (*traffic profile*) της κάθε ενεργής ροής και είναι γνωστές οι διαδρομές που ακολουθούν τα πακέτα των ροών κατά την προώθησή τους στο δίκτυο. Με βάση αυτές τις πληροφορίες είναι δυνατόν να υπολογιστεί με ακρίβεια η συνολική χωρητικότητα που απαιτείται στις γραμμές διασύνδεσης. Επομένως, η αποδοχή μιας υπό εγκατάσταση ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο αν το αίτημα για «δέσμευση» πόρων μπορεί να ικανοποιηθεί από τη διαθέσιμη χωρητικότητα στις γραμμές διασύνδεσης κατά μήκος του μονοπατιού που θα χρησιμοποιηθεί από την ροή.

Ο έλεγχος αποδοχής με βάση παραμέτρους κίνησης είναι η βέλτιστη μέθοδος για τον υπολογισμό των αναγκαίων δικτυακών πόρων ώστε να υποστηριχθούν εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Προϋποθέτει, όμως, ότι κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής μιας νέας ροής είναι γνωστές ακριβείς πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κίνησης της ενώ όλες οι εγκατεστημένες ροές συμμορφώνονται με τα χαρακτηριστικά κίνησης που δήλωσαν κατά τον έλεγχο αποδοχής. Αν οποιαδήποτε από τις παραπάνω προϋποθέσεις δεν ικανοποιηθεί, η απόδοση των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής με βάση παραμέτρους κίνησης μπορεί να είναι χαμηλή.

Οι μηχανισμοί ελέγχου αποδοχής με βάση παραμέτρους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παροχή αυστηρών εγγυήσεων ποιότητας αφού μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια το χειρότερο πιθανό σενάριο (*worst case scenario*) από την παραγόμενη κίνηση των ροών. Ο έλεγχος αποδοχής της κάθε ροής γίνεται με βάση το μέγιστο ρυθμό κίνησης που μπορεί να δημιουργηθεί, ο οποίος είναι συνήθως σημαντικά υψηλότερος από τον αντίστοιχο μέσο ρυθμό κίνησης της ροής. Ως αποτέλεσμα, ο βαθμός χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου είναι χαμηλός και η παροχή εγγυήσεων ποιότητας γίνεται ιδιαίτερα δαπανηρή καθώς δεν εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα από τη στατιστικής πολυπλεξίας ροών.

2.2.2 Έλεγχος αποδοχής με βάση μετρήσεις

Οι αλγόριθμοι **έλεγχου αποδοχής ροών βασισμένων σε μετρήσεις** (*Measurement-based Admission Control - MBAC*) [BJS00] απευθύνονται συνήθως σε εφαρμογές που δεν απαιτούν αυστηρές εγγυήσεις για τον ποσοστό απώλειας πακέτων ή στη μέγιστη καθυστέρηση. Αρχικά προτάθηκαν για να εξυπηρετήσουν αιτήματα που αφορούν την κλάση υπηρεσίας *Controlled Load* σε δίκτυα *IntServ* (βλέπε §2.1.1.1) αλλά η χρήση τους μπορεί να επεκταθεί σε δίκτυα *DiffServ* διευκολύνοντας την παροχή αντίστοιχων υπηρεσιών (βλέπε §2.3). Επιπλέον, οι μηχανισμοί *MBAC* μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου η περιγραφή των χαρακτηριστικών κίνησης (*traffic profile*) των ροών είναι αδύνατη ή ασαφής ή μεταβάλλεται με το χρόνο και συνεπώς είναι απαγορευτική η χρήση αναλυτικών μεθόδων για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων.

Οι μηχανισμοί *MBAC* εκτελούν δύο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη σχετίζεται με τη διαδικασία μετρήσεων συγκεκριμένων παραμέτρων του δικτύου από τις οποίες προκύπτει εκτίμηση του δικτυακού φόρτου. Στη πληθώρα των περιπτώσεων μετριέται ο βαθμός χρησιμοποίησης στις γραμμές διασύνδεσης ενώ, σε ελάχιστες περιπτώσεις, μετρούνται άλλοι πόροι του δικτύου, όπως ο βαθμός συμφόρησης στις ουρές εξόδου των δρομολογητών. Δεύτερον, οι μηχανισμοί *MBAC* περιλαμβάνουν λειτουργία που σχετίζεται με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για την αποδοχή ή απόρριψη νέων ροών, οι οποίες βασίζονται στα αποτελέσματα των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί προηγουμένως.

Επειδή η απόφαση για την αποδοχή (ή απόρριψη) νέων ροών βασίζεται στην μέτρηση του δικτυακού φορτίου κατά τη διάρκεια περιορισμένης χρονικής περιόδου στο παρελθόν, δεν μπορεί να προβλεφθεί με σιγουριά η συμφόρηση που θα εμφανίσει το δίκτυο στο μέλλον. Για το λόγο αυτό οι μηχανισμοί *MBAC* δεν μπορούν να αποτρέψουν την απώλεια πακέτων ή την αύξηση της καθυστέρησης στις υφιστάμενες ροές του δικτύου εφόσον το κατώφλι (*threshold*)³ για τον μέγιστο βαθμό χρήσης των γραμμών διασύνδεσης είναι υψηλό. Παρόλα αυτά, οι περιστασιακές διαταραχές είναι αποδεκτές για ροές που κάνουν χρήση υπηρεσιών χωρίς αυστηρές εγγυήσεις απόδοσης και οι μηχανισμοί *MBAC* επιτυγχάνουν υψηλή αξιοποίηση των δικτυακών πόρων. Αντίθετα, εφόσον οι μηχανισμοί *MBAC* χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο αποδοχής ροών με αυστηρές εγγυήσεις απόδοσης, το κατώφλι οφείλει να παραμένει χαμηλό ώστε να αποφεύγεται η απώλεια πακέτων ή η αύξηση της καθυστέρησης στις ουρές των δρομολογητών. Η χρήση χαμηλού κατωφλιού, όμως, περιορίζει τα οφέλη από την στατιστική πολυπλεξία των ροών και μειώνει το μέσο βαθμό χρησιμοποίησης των δικτυακών πόρων.

Διαφορετικοί μηχανισμοί *MBAC* παρουσιάζονται και συγκρίνονται στα [BJS00], [GKK95], [Floyd96], [JDSZ97] και [BCP00]. Παρόλο που οι περισσότεροι από αυτούς μηχανισμούς που

³ Βλέπε παρακάτω σχετικά με τη διαδικασία αποδοχής νέων ροών.

περιγράφονται δεν έχουν εφαρμοστεί στη πράξη σε δίκτυα IP, παρουσιάζονται συνοπτικά για λόγους πληρότητας. Ειδικότερα, έχουν προταθεί οι ακόλουθοι μηχανισμοί:

- **Simple Sum (SS):** Ο μηχανισμός ελέγχει απλά αν το άθροισμα των αιτούμενων αιτήσεων δεν ξεπερνά τη χωρητικότητα της γραμμής. Αν το άθροισμα της χωρητικότητας που έχει τυχόν δεσμευτεί είναι L και η συνολική χωρητικότητα είναι C , τότε μια νέα ροή με ρυθμό r γίνεται αποδεκτή εφόσον ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$L + r < C$$

Ο μηχανισμός είναι ο απλούστερος δυνατός και κατά συνέπεια ο ευκολότερα υλοποιήσιμος.

- **Measured Sum (MS):** Ο μηχανισμός αποδέχεται μια νέα ροή με ρυθμό r εφόσον το άθροισμα του μετρούμενου φορτίου V της γραμμής και του ρυθμού r είναι μικρότερο από το γινόμενο του επιθυμητού βαθμού χρησιμοποίησης της γραμμής u και της χωρητικότητας της C .

$$V + r < u * C$$

Το μετρούμενο φορτίο της γραμμής V υπολογίζεται σε ένα ορισμένο παράθυρο χρόνου και αποτελεί εκτίμηση του φορτίου στο μέλλον. Επίσης, η παράμετρος u αποτρέπει την υπερφόρτωση της γραμμής καθώς αυτό συνεπάγεται μεταβολές της καθυστέρησης των πακέτων.

- **Hoeffding Bounds (HB):** Ο μηχανισμός προσπαθεί να υπολογίσει το «ισότιμο εύρος ζώνης» (*equivalent bandwidth*) \hat{C}_H για μια ομάδα n ροών με μέσο ρυθμό κίνησης μ_s , χρησιμοποιώντας τα «όρια» *Hoeffding (Hoeffding Bounds)*. Η τιμή \hat{C}_H ορίζει ότι η στάσιμη (*stationary*) μεταβλητή του συναθροισμένου ρυθμού κίνησης των n ροών μπορεί να ξεπεράσει τη τιμή \hat{C}_H με πιθανότητα ε . Η τιμή \hat{C}_H υπολογίζεται από το τύπο ακόλουθο τύπο, ο οποίος δέχεται ως παραμέτρους εισόδου τη πιθανότητα ε και το μέγιστο ρυθμό των ροών:

$$\hat{C}_H(\mu_s, \{p_i\}, 1 \leq i \leq n, \varepsilon) = \mu_s + \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \sum_{i=1}^n p_i}{2}}$$

Ο μηχανισμός *MBAC* αποδέχεται μια νέα ροή εφόσον το άθροισμα του «ισότιμου εύρους ζώνης» και του μέγιστου ρυθμού p της υπό εγκατάσταση $n+1$ ροής δεν υπερβαίνει το εύρος ζώνης C που έχει αποδοθεί για μια συγκεκριμένη κλάση κίνησης, δηλαδή:

$$\hat{C}_H + p_{n+1} \leq C$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο παραπάνω αλγόριθμος θεωρεί ως προϋπόθεση ότι ο ρυθμός κίνησης που παράγει η κάθε ροή είναι ανεξάρτητη μεταβλητή και ότι είναι εκ των

προτέρων γνωστό ότι ο μέσος ρυθμός των ροών είναι μ_s . Τέλος, το «ισότιμο εύρος ζώνης» για n ροές μπορεί να υπολογιστεί από ένα ισοδύναμο τύπο:

$$\widehat{C}_N(\mu_s, \sigma^2, \varepsilon) = \mu_s + \sigma \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) + \ln\left(\frac{1}{2\pi}\right)},$$

υπό την προϋπόθεση ότι η εισερχόμενη κίνηση ακολουθεί την κανονική κατανομή. Εκτιμήθηκε με χρήση προσομοίωσης ότι η τιμή \widehat{C}_N που υπολογίζεται από το παραπάνω τύπο είναι μικρότερη από τη πραγματική τιμή της συναθροισμένης κίνησης για μικρούς ρυθμούς.

- **Acceptance Region (AR):** Ο μηχανισμός καθορίζει την «περιοχή αποδοχής» (*acceptance period*), εκτός της οποίας δεν επιτρέπεται η αποδοχή νέων ροών. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται έχει προταθεί για τον έλεγχο κίνησης σε *ATM* δίκτυα [GKK95] και στόχο έχει τη μεγιστοποίηση της χρήσης πόρων του δικτύου με δεδομένη όμως την απώλεια ενός μικρού ποσοστού πακέτων (ή *ATM cells*). Κάνοντας την υπόθεση ότι υπάρχουν μόνο πηγές *ON/OFF* υπολογίζεται το «ισότιμο εύρος» με χρήση «ορίων» *Chernoff* (*Chernoff Bounds*) και ορίζονται καμπύλες μεταβάλλοντας την μέση τιμή των ροών κίνησης. Λαμβάνοντας την εφαπτομένη (*tangent*) από διαφορετικά σημεία της καμπύλης έχουν προταθεί διαφορετικοί μηχανισμοί *MBAC*. Η συνθήκη αποδοχής για δύο από αυτούς είναι:

$$\text{Tangent at Peak (TP): } np(1 - e^{-sp}) + e^{-sp}\widehat{V} \leq \mu$$

$$\text{Tangent at Origin (TO): } e^{sp}\widehat{V} \leq \mu,$$

όπου n είναι ο αριθμός των ροών, p ο μέγιστος ρυθμός των ροών, \widehat{V} η εκτίμηση του τρέχοντος φορτίου, μ διαθέσιμο εύρος, και s θετικός αριθμός για τον υπολογισμό του ορίου *Chernoff*.

- **Aggregate Traffic Envelopes (TE):** Ο μηχανισμός *MBAC* [QK00] χρησιμοποιεί μετρήσεις του φορτίου από τις συναθροισμένες ροές για να προσδιοριστεί το «φάκελο μέγιστου ρυθμού» (*maximal rate envelope*) R_k , ο οποίος χαρακτηρίζει το συνολικό ρυθμό κίνησης που εξυπηρετεί ένας δρομολογητής ως συνάρτηση των χρονικών διαστημάτων μέτρησης του. Με βάση τη μέση τιμή R_k και την απόκλιση του σ μπορεί να υπολογιστεί κατά τη φάση εγκατάστασης μια νέας ροής η πιθανότητα του συναθροισμένου ρυθμού κίνησης να είναι μικρότερο της χωρητικότητας της γραμμής εξόδου και η πιθανότητα των πακέτων της υπό-εγκατάσταση ροής να αντιμετωπίσουν καθυστέρηση μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή (*schedulability test*).
- **Measure CAC:** Ο μηχανισμός, ο οποίος βασίζεται στη θεωρία των «μεγάλων αποκλίσεων» (*large deviation theory*) [Floyd96], αποδέχεται μια νέα ροή εφόσον το άθροισμα του ο μέγιστου ρυθμού της ροής και του εκτιμώμενο εύρους των υπολοίπων ροών είναι μικρότερο

από το τη χωρητικότητα της γραμμής. Το εκτιμώμενο φορτίο υπολογίζεται με βάση το ποσοστό απωλειών και με βάση τη διαδικασία αφίξεων νέων ροών.

Η απόδοση που παρουσιάζουν οι μηχανισμοί *MBAC* μεταβάλλεται ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στους αντίστοιχους αλγόριθμους. Αυτό σημαίνει ότι κάποιος μηχανισμός μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο βαθμό χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου με αντάλλαγμα την αύξηση του ποσοστού των χαμένων πακέτων. Για το λόγο αυτό οι μηχανισμοί *MBAC* συγκρίνονται με βάση τη καμπύλη χρησιμοποίησης και βαθμού απώλειας πακέτων (*Utilization / Packet Loss curve*). Όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο [JDSZ97], οι αλγόριθμοι που εξετάστηκαν επιτυγχάνουν παρόμοια επίπεδα απόδοσης και αξιοποίησης των δικτυακών πόρων. Επισημάνθηκε, επίσης, ότι η επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης απαιτεί την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων για τη συγκρότηση των μηχανισμών.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανισμοί *Measured Sum*, *Hoeffding Bounds* και *Measured CAC* υλοποιούν μία επιπλέον λειτουργία πέρα από τους αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν. Όταν μια νέα ροή γίνεται αποδεκτή, η εκτίμηση του φορτίου το δικτύου δεν μεταβάλλεται αυτόματα για να συμπεριλάβει την ύπαρξη της νέας ροής. Αυτό δημιουργεί το κίνδυνο ο μηχανισμός *MBAC* να επιτρέψει μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα πολλές νέες ροές πριν το φορτίο του δικτύου αυξηθεί σημαντικά και οδηγήσει σε απόρριψη νέων ροών. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η τεχνική αύξηση του εκτιμώμενου δικτυακού φορτίου μετά την αποδοχή μιας νέας ροής.

2.2.2.1 Αλγόριθμος *Color MBAC*

Για να βελτιώσουμε την μέθοδο εκτίμησης των δικτυακών πόρων προτείναμε τον αλγόριθμο *Color MBAC (C-MBAC)* [Zaf+04]. Οι προηγούμενοι μηχανισμοί *MBAC* μετρούν το στιγμιαίο συνολικό ρυθμό κίνησης $R_{measured,t}$ που παράγουν οι εγκατεστημένες ροές που χρησιμοποιούν μια γραμμή διασύνδεσης. Λαμβάνοντας πολλαπλές μετρήσεις του ρυθμού $R_{measured,t}$ σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, οι μηχανισμοί *MBAC* συνήθως εκτιμούν το άθροισμα των ρυθμών $R_{i,AD}$, όπου $R_{i,AD}$ είναι ο μέσος ρυθμός που δήλωσε η i -στη ροή κατά τη φάση αποδοχής. Το άθροισμα $R_{AD} = \sum_{i=1}^N R_{i,AD}$ παραμένει σταθερό στο χρόνο υπό την προϋπόθεση ότι δεν εγκαθίστανται ή τερματίζουν νέες ροές.

Ο μηχανισμός *C-MBAC* προϋποθέτει το χρωματισμό των πακέτων της κάθε ροής κατά την εισαγωγή τους στο δίκτυο από τον ακραίο δρομολογητή (ή τον κόμβο Πηγή) με σκοπό τη βελτίωση της εκτίμησης του αθροίσματος R_{AD} από τους δρομολογητές κορμού, την οποία θα συμβολίζουμε ως \widehat{R}_{AD} . Απαιτείται λοιπόν η εφαρμογή των ακόλουθων μηχανισμών:

- a) **Εκτίμηση του στιγμιαίου ρυθμού κίνησης για την κάθε εγκατεστημένη ροή**

Ο ακραίος δρομολογητής σε μια διαχειριστική περιοχή υπολογίζει το στιγμιαίο ρυθμό $R_{i,t}$ της i -στης ροής κάθε φορά που λαμβάνει ένα πακέτο. Ο υπολογισμός του ρυθμού $R_{i,t}$ πραγματοποιείται σύμφωνα με τη ακόλουθη εξίσωση:

$$R_{i,t}^{new} = (1 - e^{-\frac{t_i^k}{K}}) * \frac{l_i^k}{T_i^k} + e^{-\frac{t_i^k}{K}} * R_{i,t}^{old},$$

όπου t_i^k είναι ο χρόνος άφιξης του k -στου πακέτου για την i -στη ροή, l_i^k είναι το μέγεθος το k -στου πακέτου, $T_i^k = t_i^k - t_i^{k-1}$ είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων πακέτων, και K είναι σταθερά με τιμή που κυμαίνεται από 100 μέχρι 500 msec. Η χρήση του εκθετικού βάρους $e^{-\frac{t_i^k}{K}}$ δίνει αξιόπιστη εκτίμηση του ρυθμού κίνησης για ροές ροής με «εκρηκτικότητα» (*flows with bursty traffic*) ακόμα και στην περίπτωση που το διάστημα $T_i^k = t_i^k - t_i^{k-1}$ μεταβάλλεται συνεχώς και το μέγεθος των πακέτων είναι μεταβλητό.

b) Διαδικασία χρωματισμού πακέτων

Τα πακέτα της i -στης ροής χρωματίζονται από τον ακραίο δρομολογητή μιας διαχειριστικής περιοχής με τρία διαφορετικά χρώματα: *μπλε*, *πράσινο* και *κόκκινο* (Σχήμα 6). Εφόσον ο στιγμιαίος ρυθμός κίνησης $R_{i,t}$ είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό $R_{i,AD}$, τα πακέτα μαρκάρονται *κόκκινα* ή *μπλε* σύμφωνα με τις ακόλουθες πιθανότητες: $Pr ob_{red} = \frac{R_{i,t} - R_{i,AD}}{R_{i,t}}$ και

$Pr ob_{blue} = 1 - Pr ob_{red} = \frac{R_{i,AD}}{R_{i,t}}$. Εφόσον ο στιγμιαίος ρυθμός κίνησης της i -στης ροής $R_{i,t}$ είναι

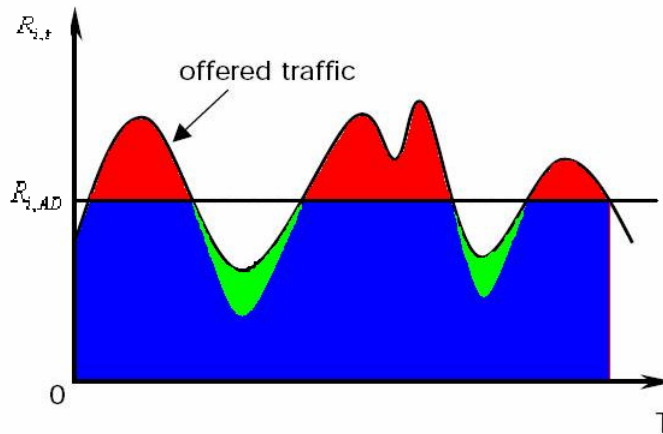
μικρότερος από το ρυθμό $R_{i,AD}$, τα πακέτα μαρκάρονται *πράσινα* ή *μπλε* σύμφωνα με τις ακόλουθες πιθανότητες $Pr ob_{green} = \frac{R_{i,AD} - R_{i,t}}{R_{i,t}}$ και $Pr ob_{blue} = 1 - Pr ob_{green} = \frac{2 * R_{i,t} - R_{i,AD}}{R_{i,t}}$. Σε

περίπτωση που ο στιγμιαίος ρυθμός κίνησης της i -στης ροής $R_{i,t}$ είναι ίσος με το ρυθμό $R_{i,AD}$, όλα τα πακέτα χρωματίζονται *μπλε*.

c) Αλγόριθμος C-MBAC

Η εκτίμηση του ρυθμού \widehat{R}_{AD} προκύπτει από το συνολικό ρυθμό των *μπλε*, *πράσινων* και *κόκκινων* πακέτων που μετρά ο δρομολογητής κορμού και η απόφαση για τον έλεγχο αποδοχής των νέων ροών πραγματοποιείται με χρήση της εξίσωσης:

$$\widehat{R}_{AD} = R_{measured} - \sum R_{i,RED} + \sum R_{i,GREEN} = \sum R_{i,BLUE} + \sum R_{i,GREE}$$



Σχήμα 6: Χρωματισμός πακέτων της i -στης ροής ανάλογα με τη σχέση του στιγμιαίου ρυθμού

$$R_{i,t} \text{ και μέσου ρυθμό } R_{i,AD}.$$

Από σειρά προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε [Zaf+04], προκύπτει ότι ο αλγόριθμος *MBAC* βελτιώνει τον αλγόριθμο *Measured Sum* καθώς για το ίδιο βαθμό χρησιμοποίησης των γραμμών κορμού επιτυγχάνει μικρότερο ποσοστό απώλειας πακέτων. Βασικό μειονέκτημα του αλγόριθμου είναι ότι απαιτεί το χρωματισμό της κίνησης σε επίπεδο ροής από τον ακραίο δρομολογητή.

2.2.3 Μηχανισμοί *End-to-End Admission Control*

Οι μηχανισμοί *End-to-End Admission Control* [Ele+00] και *End-to-End MBAC* (EMBAC) [BCP00] βασίζονται στους τελικούς χρήστες ή στους ακραίους δρομολογητές του δικτύου για τον έλεγχο αποδοχής νέων ροών στο δίκτυο. Πριν από τη δημιουργία μιας νέας ροής, ο *κόμβος Πηγή* στέλνει δοκιμαστικά πακέτα με ρυθμό αντίστοιχο με το ρυθμό που θα έχει η υπό εξέταση ροή. Τα δοκιμαστικά πακέτα λαμβάνονται από τον *κόμβο Προορισμού*, ο οποίος και ελέγχει την απώλεια πακέτων καθώς και άλλες μετρικές απόδοσης, π.χ. καθυστέρηση μετάδοσης. Εφόσον οι υπηρεσίες που έλαβαν τα δοκιμαστικά πακέτα στο δίκτυο είναι ικανοποιητικές, γεγονός που σημαίνει ότι το επίπεδο συμφόρησης στο δίκτυο δεν είναι υψηλό, ο *κόμβος Πηγή* προχωρά στη εγκατάσταση της νέας ροής.

Ο έλεγχος αποδοχής κίνησης μεταφέρεται στους τελικούς χρήστες και, επομένως, ελευθερώνονται οι δρομολογητές από αντίστοιχες λειτουργίες. Η σχετικοί μηχανισμοί, όμως, εισάγουν επιπλέον κίνηση στο δίκτυο ενώ η εγκατάσταση νέων ροών πρέπει να καθυστερήσει για όσο χρονικό διάστημα πραγματοποιούνται μετρήσεις στο δίκτυο. Τέλος, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί δεν παρέχουν καμία διαδικασία που μπορεί να εμποδίσει τους τελικούς χρήστες να παρακάμψουν την διαδικασία ελέγχου συμφόρησης στο δίκτυο. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα δοκιμαστικά πακέτα εξυπηρετούνται στις ουρές χαμηλής προτεραιότητας των δρομολογητών κορμού ώστε να προστατευτεί η πραγματική κίνηση. Εφόσον παρατηρείται συμφόρηση στο δίκτυο, τα δοκιμαστικά

πακέτα διαπιστώνουν υποβάθμιση της ποιότητας κατά τη προώθησή τους, η οποία λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη της απόφαση για αποστολή ή όχι πραγματικών δεδομένων από τον *κόμβο Πηγή*.

2.2.4 Μηχανισμοί Egress Admission Control

Μια διαφορετική μέθοδος για την αποδοχή ροών βασίζεται στο μηχανισμό *Egress Admission Control (EAC)* [CK00]. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, ο έλεγχος αποδοχής πραγματοποιείται στον ακραίο δρομολογητή εξόδου μιας διαχειριστικής. Ο δρομολογητής δημιουργεί για κάθε συνάθροιση ροών (*aggregated flows*) που αντιστοιχίζεται σε μία κλάση υπηρεσίας, δύο διαφορετικές «περιγραφές»: το «φάκελος αφίξεων» (*arrival envelope*) και το «φάκελος εξυπηρέτησης» (*service envelope*). Ο φάκελος αφίξεων για μια συγκεκριμένη κλάση περιγράφει το ρυθμό με τον οποίο εισέρχεται κίνηση στο κόμβο και μπορεί να δώσει στοιχεία για τις εκρήξεις (*bursts*) και τη διακύμανση (*fluctuation*) της κίνησης. Ο φάκελος εξυπηρέτησης περιγράφει την ελάχιστη υπηρεσία που λαμβάνει μια συνάθροιση ροών σε κάποιο χρονικό διάστημα. Ο στόχος του μηχανισμού *EAC* είναι η μέτρηση και ο έλεγχος του φακέλου αφίξεων εφαρμόζοντας έλεγχο αποδοχής για τις νέες ροές και παράλληλα η μέτρηση και ο μεταβολή του φακέλου εξυπηρέτησης με την κατάλληλη παραχώρηση πόρων.

Ο έλεγχος αποδοχής για το μηχανισμό *EAC* πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Αρχικά υπολογίζονται οι διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο και, εφόσον υπάρχουν αρκετοί πόροι, η ροή εγκαθίσταται και αποκτά αυστηρή προτεραιότητα σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ροές. Στη συνέχεια, παρακολουθείται αν η εγκατάσταση της νέας ροής προκάλεσε παραβίαση των συμβολαίων ποιότητας στις υπόλοιπες εγκατεστημένες ροές. Εφόσον παρατηρηθεί υποβάθμιση των υπηρεσιών, η ροή τερματίζεται. Διαφορετικά, η ροή αποκτά κανονική προτεραιότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες ροές και ο διαδικασία ελέγχου αποδοχής ολοκληρώνεται.

Ο μηχανισμός *EAC* δεν απαιτεί οι δρομολογητές κορμού, συμπεριλαμβανομένου του δρομολογητή εξόδου, να διατηρούν στοιχεία για τις εγκατεστημένες ροές ενώ οι οι δρομολογητές δεν ανταλλάσσουν μηνύματα που περιγράφουν τη διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων. Για τους παραπάνω λόγους, ο μηχανισμός *EAC* δεν παρουσιάζει προβλήματα κλιμάκωσης.

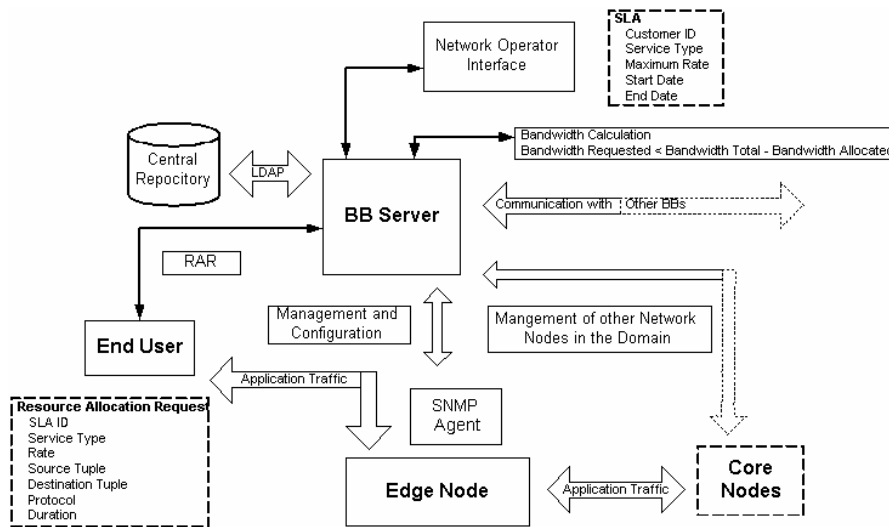
2.2.5 Μοντέλα QoS που βασίζονται σε κεντρικούς εξυπηρετητές

Τα μοντέλα *QoS* που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι βασίζονται στη λειτουργία μιας κεντρικής οντότητας που παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση συμφόρησης στο δίκτυο και διαχειρίζεται τη δέσμευση πόρων. Ανάλογα με την περίπτωση, ο κεντρική οντότητα εκτελεί επιπλέον λειτουργίες, όπως, για παράδειγμα, τον καθορισμό της συγκρότησης (*configuration*) των δικτυακών συσκευών.

2.2.5.1 Μεσίτες Εύρους Ζώνης (*Bandwidth Brokers*)

Ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης (*Bandwidth Broker - BB*) [NJZ99] προτάθηκε για τη διαχείριση των πόρων σε δίκτυα *DiffServ* ώστε να αποφευχθεί η ανάγκη να αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με τη χρήση και την απόδοση του δικτύου στους δρομολογητές κορμού. Ο *BB* είναι υπεύθυνος για ένα πλήθος λειτουργιών απαραίτητων για την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας, όπως ο έλεγχος αποδοχής νέων ροών, η εξισορρόπηση στη χρήση των πόρων του δικτύου με κατάλληλη δρομολόγηση της κίνησης, η διαπραγμάτευση συμβάσεων *SLAs* με γειτονικές περιοχές, η δέσμευση πόρων σε διάφορες χρονικές περιόδους, η πιστοποίηση της ταυτότητας (*authentication*) των χρηστών, κλπ.

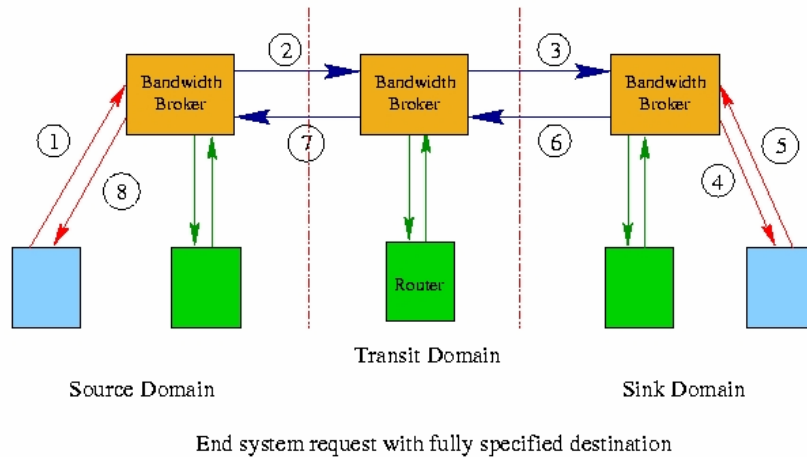
Κάθε διαχειριστική περιοχή εκπροσωπείται συνήθως από ένα *BB*, ο οποίος λαμβάνει όλα τα αιτήματα για την εγκατάσταση νέων ροών στο δίκτυο. Το κάθε αίτημα περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά κίνησης της νέας ροής και τις ελάχιστες εγγυήσεις απόδοσης που πρέπει να διασφαλίσει το δίκτυο. Ο *BB* εξετάζοντας τους διαθέσιμους πόρους στο δίκτυο και μπορεί να εκτιμήσει αν μπορούν να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της ροής και ανάλογα αποφασίζει για την αποδοχή της ή όχι. Μετά από αποδοχή μια νέας ροής, ο *BB* ανανεώνει τη βάση πληροφοριών σχετικά με το δίκτυο ευθύνης του και προχωρά στην αίτηση αλλαγής της συγκρότηση των δρομολογητών κορμού. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα του *BB* και ο τρόπος αλληλεπίδρασής του με τις υπόλοιπες οντότητες στο δίκτυο, όπως προδιαγράφηκε από έργο Internet2 Qbone [Qbon].



Σχήμα 7: Αλληλεπίδραση ενός *BB* με τις υπόλοιπες οντότητες στο δίκτυο.

Οι *BB* μεταξύ γειτονικών διαχειριστικών περιοχών επικοινωνούν μεταξύ τους για τη δέσμευση πόρων σε δίκτυα πέρα του χώρου ευθύνης τους. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ροές που διασχίζουν συνεχόμενες διαχειριστικές περιοχές. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ένας από τους πιθανούς τρόπους επικοινωνίας *BB* για την εγκατάσταση από άκρο-σε-άκρο ποιότητας υπηρεσίας σε ροές που διασχίζουν περισσότερες από μία διαχειριστικές περιοχές.

Παρόλο που η χρήση των *BB* εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα, π.χ. ο έλεγχος αποδοχής δεν χρειάζεται να πραγματοποιείται από τους δρομολογητές κορμού, παρουσιάζει προβλήματα κλιμάκωσης καθώς το σύνολο των λειτουργιών πραγματοποιείται κεντρικά από το *BB* [GB99], ο οποίος θα πρέπει να διαχειρίζεται όλα τα αιτήματα στο δίκτυο ευθύνης του, να διατηρεί πληροφορίες για όλες τις δικτυακές συσκευές, π.χ. δρομολογητές κλπ.



Σχήμα 8: Διαδικασία δέσμευσης πόρων με χρήση *BB*.

2.2.5.2 Μοντέλο Policy Based Networking (PBN)

Ο όρος **Policy-Based Networking (PBN)** περιγράφει μια τεχνική διαχείρισης και λειτουργίας ενός δικτύου με χρήση πολιτικών (*policies*) [West+01] [Moor+01] [Moor+03] [Snir+03]. Οι πολιτικές είναι κανόνες υψηλού επιπέδου που περιγράφουν την επιθυμητή συμπεριφορά του δικτύου σε μορφή που είναι ανεξάρτητη από την τοπολογία και τις συσκευές που συνθέτουν το δίκτυο. Οι κανόνες μιας πολιτικής περιγράφουν τους «στόχους» που θα πρέπει να επιτευχθούν σε ένα δίκτυο, δηλαδή το «τι» πρέπει να πραγματοποιηθεί. Οι κανόνες δεν περιγράφουν τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν, δηλαδή το «πως» θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι στόχοι που έχουν τεθεί.

Το μοντέλο *PBN* διαφέρει σημαντικά από το συνηθισμένο μοντέλο διαχείρισης που εφαρμόζεται στα σημερινά δίκτυα. Το αφηρημένο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την επίτευξη στόχων επιτρέπει την ευκολότερη διαχείριση του δικτύου, διευκολύνει την εφαρμογή αυτοματοποιημένων λειτουργιών και ελαχιστοποιεί τις διαφορές (ή λάθη) στη συγκρότηση όμοιων δικτυακών συσκευών.

Δύο είναι οι βασικές οντότητες που υπάρχουν σε ένα δίκτυο *PBN*, οι *Policy Decision Points (PDPs)* και οι *Policy Enforcement Points (PEPs)*. Οι οντότητες *PDPs* λαμβάνουν αποφάσεις που αφορούν τη λειτουργία και διαχείριση του δικτύου, σύμφωνα με τις ισχύουσες πολιτικές υψηλού επιπέδου και την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Στη συνέχεια οι οντότητες *PDPs* δημιουργούν τις

απαραίτητες εντολές συγκρότησης ανάλογα με τις δυνατότητες και περιορισμούς που εμφανίζουν οι δικτυακές συσκευές. Για παράδειγμα, οι *PDPs* μπορούν να εκτελέσουν τις λειτουργίες ενός *bandwidth broker* και να διαχειριστούν το βαθμό συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης. Οι *PEPs* λαμβάνουν τις εντολές συγκρότησης από τους *PDPs* και τις εφαρμόζουν στις δικτυακές συσκευές για τις οποίες είναι υπεύθυνοι. Οι *PEPs* μπορεί να είναι υπεύθυνοι για εφαρμογή λειτουργιών που αφορούν την παροχή ποιότητας υπηρεσίας, την ενεργοποίηση μηχανισμών ασφάλειας, τη συλλογή στατιστικών στοιχείων κ.α. Το πρωτόκολλο που προτάθηκε για την επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων *PEPs* και *PDPs* είναι το *Common Open Policy Service (COPS)* [Durh+00] [Chan+01]. Οι πολιτικές περιγράφονται μέσα από δομή δεδομένων που αποκαλείται *Policy Information Base (PIB)* κατά αναλογία με τη δομή *Management Information Base (MIB)* [CMRW93].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η οντότητα *PDP* μπορεί να εκτελέσει πλήθος από τις λειτουργίες ενός *bandwidth broker*, όπως για παράδειγμα την λήψη αποφάσεων για τον έλεγχο αποδοχής νέων ροών στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο *PBN* μπορεί να εφαρμοστεί για τη υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα IP. Οι τεχνικές που προδιαγράφει, όμως, το μοντέλο *PBN* δεν έχουν ευρέως υλοποιηθεί από κατασκευαστικούς οίκους και δεν έχουν εφαρμοστεί στη πράξη σε δίκτυα παραγωγής.

2.2.5.3 Adaptive Resource Control for QoS Using an IP-Based Layered Architecture – AQUILA

Αντίστοιχες αρχές σχεδίασης έχουν προταθεί και αξιολογηθεί στο πλαίσιο του έργου *AQUILA (Adaptive Resource Control for QoS Using an IP-Based Layered Architecture)* [Eng+03]. Όπως και στην περίπτωση αρχιτεκτονικών με χρήση *Bandwidth Brokers*, μία κεντρική λογική οντότητα, η οποία αποκαλείται *Resource Control Agent (RCA)* παρακολουθεί και διαχειρίζεται τη χρήση των πόρων του δικτύου. Στα όρια της διαχειριστικής περιοχής, οι αντιπρόσωποι *Admission Control Agents (ACA)* εκτελούν λειτουργίες ελέγχου αποδοχής και ελέγχου της εισερχόμενης κίνησης. Οι δεσμεύσεις πόρων μεταξύ διαφορετικών διαχειριστικών περιοχών πραγματοποιείται με χρήση του πρωτοκόλλου *Border Gateway Reservation Protocol (BGRP)* [PHS00]. Το πρωτόκολλο *BGRP* δημιουργεί *sink trees*, όπου τα κάθε «δέντρο» περιλαμβάνει στοιχεία για τις δεσμεύσεις χωρητικότητας από όλες τις πηγές στο Διαδίκτυο προς ένα συγκεκριμένο δίκτυο προορισμού. Η αρχιτεκτονική που προτάθηκε στο έργο *AQUILA* προϋποθέτει ότι ένα μικρό σύνολο υπηρεσιών θα υποστηρίζεται από όλες τις διαχειριστικές περιοχές του Διαδικτύου ενώ μη πρότυπη (*proprietary*) σηματοδότηση θα χρησιμοποιείται μεταξύ των τελικών χρηστών και των αντιπροσώπων *ACAs*.

2.2.5.4 General-purpose Architecture for Resource Reservation (GARA)

Οι εφαρμογές Πλέγματος (*GRIDs*) [FRSW99] εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από ότι συνηθισμένες δικτυακές εφαρμογές που συναντά κανείς σήμερα στο Διαδίκτυο. Οι εφαρμογές

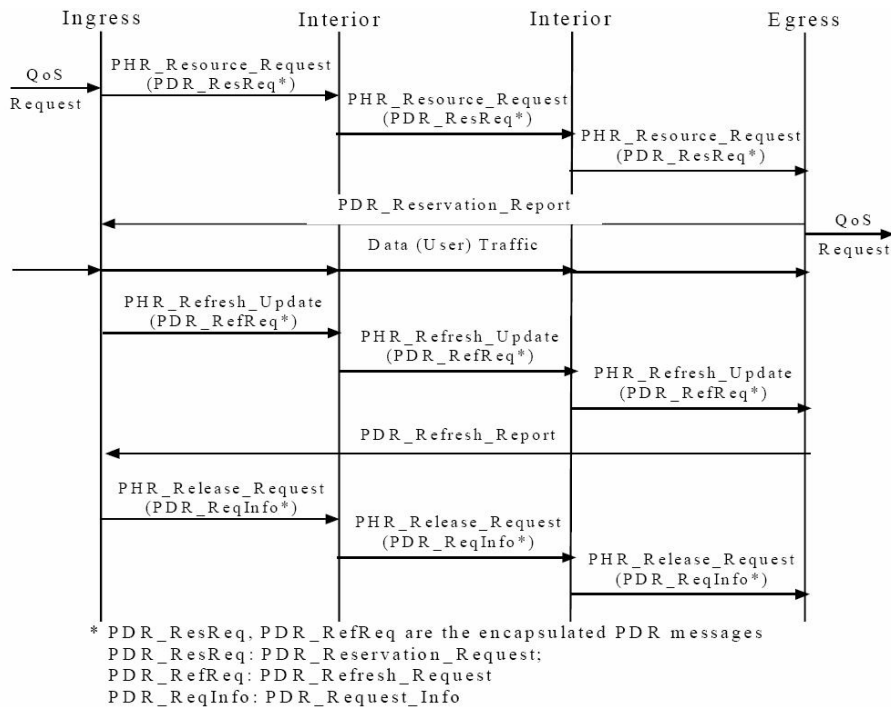
απομακρυσμένης απεικόνισης (*distance visualisation applications*), για παράδειγμα, δημιουργούν πολλαπλές πολυμεσικές ροές με ρυθμό μεταφοράς δεδομένων μεγαλύτερο από 100Mbps ενώ εφαρμογές δημιουργίας αντιγράφων δεδομένων (*data replicators*) απαιτούν την μεταφορά τεραστίων ποσοτήτων πληροφορίας της τάξης *Terabyte* σε περιορισμένο χρόνο. Οι παραπάνω εφαρμογές απαιτούν εγγυήσεις ποιότητας, όπως τη δυνατότητα μεταφοράς ποσότητας πληροφορίας μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα χωρίς να ορίζονται περιορισμοί ως προς τη στιγμιαίο ρυθμό μετάδοσης ή καθυστέρησης των πακέτων.

Η διαχείριση πόρων σε περιβάλλοντα *GRID* εξακολουθεί να είναι κυρίαρχο πρόβλημα και αποτελεί αντικείμενο ορισμού από τις ομάδες εργασίας στο *Global Grid Forum (GGF)* [GGF]. Η αρχιτεκτονική *General-purpose Architecture for Resource Reservation (GARA)* [FK99] που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του *Globus* [GLOB] προδιαγράφει τη λειτουργία μιας λογικής οντότητας, η οποία αποκαλείται *DiffServ Resource Manager (DRM)*. Ο *DRM* εκτελεί λειτουργίες αντίστοιχες με ένα *bandwidth broker* και είναι σε θέση να διαχειριστεί είτε δικτυακούς πόρους, π.χ. το βαθμό χρησιμοποίησης των γραμμών διασύνδεσης, είτε υπολογιστικούς πόρους, π.χ. τους κύκλους επεξεργασίας σε ένα υπολογιστικό κέντρο. Ο *DRM* επικοινωνεί με τους κόμβους *GRID* μέσω συγκεκριμένων APIs για την υποβολή αιτημάτων για άμεση ή μελλοντική δέσμευση δικτυακών πόρων. Παρόλο που η αρχιτεκτονική *GARA* απαιτεί τη διαχείριση πληροφοριών κατάστασης για κάθε ροή (*per flow state information*) και παρακολουθεί συνεχώς τη χρησιμοποίηση των δικτυακών πόρων, δεν παρουσιάζει προβλήματα κλιμάκωσης καθώς ο αριθμός των ταυτόχρονων ροών είναι περιορισμένος ενώ αιτήματα για δέσμευση πόρων δεν υποβάλλονται με μεγάλη συχνότητα.

2.3 Μοντέλο Resource Management in DiffServ (RMD)

Το μοντέλο *Resource Management in DiffServ (RMD)* [West+02] [HKLB05], όπως προδιαγράφεται από την ομάδα *Next Step in Signalling (NSIS) Working Group* [NSIS] του IETF, επεκτείνει την αρχιτεκτονική *DiffServ* με την ενσωμάτωση λειτουργιών για έλεγχο αποδοχής και δυναμική διαχείριση των δικτυακών πόρων. Εγγυήσεις ποιότητας παρέχονται σε συναθροίσεις κίνησης (*traffic aggregates*) σύμφωνα με την αρχιτεκτονική *DiffServ*. Όμως, πληροφορίες κατάστασης (*state information*) ανά ροή αποθηκεύονται στους ακραίους δρομολογητές του δικτύου με στόχο να ελέγχονται οι εγγυήσεις προς την κάθε ροή ξεχωριστά. Έχουν οριστεί δύο πρωτόκολλα σηματοδότησης, το *Per Domain Reservation (PDR)* και το *Per Hop Reservation (PHR)*. Το πρωτόκολλο *PDR* υποστηρίζεται από τους ακραίους δρομολογητές της διαχειριστικής περιοχής και στόχο έχει να ελέγξει αφενός τους πόρους από άκρο-σε-άκρο στο δίκτυο και αφετέρου να διαχειριστεί ζητήματα διαλειτουργικότητας (*interoperability issues*) με εξωτερικά αιτήματα δέσμευσης πόρων. Το πρωτόκολλο *PHR* χρησιμοποιείται για να εκτελέσει δέσμευση πόρων ανά κλάση υπηρεσίας στους εσωτερικούς δρομολογητές ενός δικτύου *DiffServ*.

Η σηματοδοσία που εφαρμόζεται κατά τη δέσμευσης πόρων σε ένα δίκτυο που εναρμονίζεται με την αρχιτεκτονική *RMD* εμφανίζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Σηματοδοσία στην αρχιτεκτονική *Resource Management in DiffServ (RMD)*.

Το πρωτόκολλο *PHR* μπορεί να εκτελέσει έλεγχο αποδοχής είτε με χρήση μετρήσεων (*measurement-based admission control*) είτε με χρήση «κρατήσεων» (*reservation-based admission control*). Η αρχιτεκτονική *RMD* εμφανίζει ικανοποιητικές δυνατότητες κλιμάκωσης καθώς οι εσωτερικοί κόμβοι του δικτύου δεν χειρίζονται ροές αλλά διαχειρίζονται συναθροίσεις ροών. Επιπλέον, στοιχεία κατάστασης ανά ροή διατηρούν μόνο οι ακραίοι δρομολογητές κορμού σε αντίθεση με τους εσωτερικούς δρομολογητές που οφείλουν να διατηρούν πληροφορίες μόνο ανά κλάση υπηρεσίας.

2.4 MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο δρομολόγησης IP, τα πακέτα προωθούνται πάνω στο ελάχιστο μονοπάτι προς το *κόμβο Προορισμού* ενώ η προώθηση του κάθε πακέτου πραγματοποιείται τελείως ανεξάρτητα από τη προώθηση των υπολοίπων πακέτων που ανήκουν στην ίδια ροή. Η μέθοδος αυτή, παρόλο που χαρακτηρίζεται από απλότητά στην υλοποίησή της, δύναται να οδηγήσει σε άνιση κατανομή του φορτίου που μεταφέρεται μέσω ενός δικτύου προκαλώντας συμφόρηση σε μερικές διαδρομές στο δίκτυο τη ίδια χρονική στιγμή που άλλες εναλλακτικές διαδρομές εμφανίζουν χαμηλή χρησιμοποίηση. Η τεχνολογία *μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων (Multi Protocol Label Switching - MPLS)* [RVC01] προτάθηκε να αντιμετωπίσει, μεταξύ άλλων, το συγκεκριμένο πρόβλημα, δηλαδή να

διαχειριστεί αποδοτικότερα τη συμφόρηση στις γραμμές διασύνδεσης και να αυξήσει το συνολικό ρυθμό μεταφοράς κίνησης πάνω από ένα δίκτυο. Σε δίκτυα *MPLS*, λοιπόν, η κίνηση προωθείται πάνω από ένα εκ των προτέρων επιλεγμένο μονοπάτι, το οποίο αποκαλείται *μονοπάτι μεταγωγής ετικέτας (label switched path - LSP)*. Το μονοπάτι *LSP* μπορεί να ταυτίζεται με το μονοπάτι ελάχιστου κόστους αλλά μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις απαιτήσεις της μεταφερόμενης κίνησης, π.χ. απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Η εφαρμογή λειτουργιών από την τεχνολογία *MPLS* σε δίκτυα *DiffServ*, η οποία αποκαλείται *MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering* [Fauc05], επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών *QoS* ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει τη βέλτιστη χρήση των δικτυακών πόρων. Η δημιουργία μονοπατιών *LSPs* πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα με χρήση σηματοδοσίας, π.χ. με το πρωτόκολλο *Label Distribution Protocol (LDP)* [Ader+01] ή *RSVP*, η οποία επιτρέπει την εγκατάσταση πληροφοριών απαραίτητων για την προώθηση της κίνησης μέσα στη διαχειριστική περιοχή *MPLS*. Τα μονοπάτια *LSPs* μπορούν να επιλεγθούν ώστε να χρησιμοποιήσουν γραμμές διασύνδεσης με περιορισμένη συμφόρηση επιτρέποντας την αποδοτική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Ο ακραίος δρομολογητής εισόδου σε μια διαχειριστική περιοχή *MPLS* ενθυλακώνει τα εισερχόμενα πακέτα IP σε πλαίσια (*frames*) *MPLS* αφού προηγουμένως τα διαχωρίσει σε διαφορετικές κατηγορίες. Οι κατηγορίες ορίζονται είτε με βάση τον τερματικό κόμβο του μονοπατιού *LSP* είτε με βάση τις παρεχόμενες εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης⁴. Η τιμή *DSCP* στην επικεφαλίδα IP των εισερχόμενων πακέτων αντιστοιχίζεται στο πεδίο *experimental (EXP)* στην επικεφαλίδα *MPLS* η οποία χρησιμοποιείται πλέον για το διαχωρισμό της κίνησης σε διαφορετικές προτεραιότητες. Σε περίπτωση αποτυχίας των γραμμών διασύνδεσης, είναι δυνατή η ταχεία αναδρομολόγηση της κίνησης υψηλής προτεραιότητας από εναλλακτικά μονοπάτια *LSPs* που αποφεύγουν τα τμήματα του δικτύου που εμφανίζουν δυσλειτουργία.

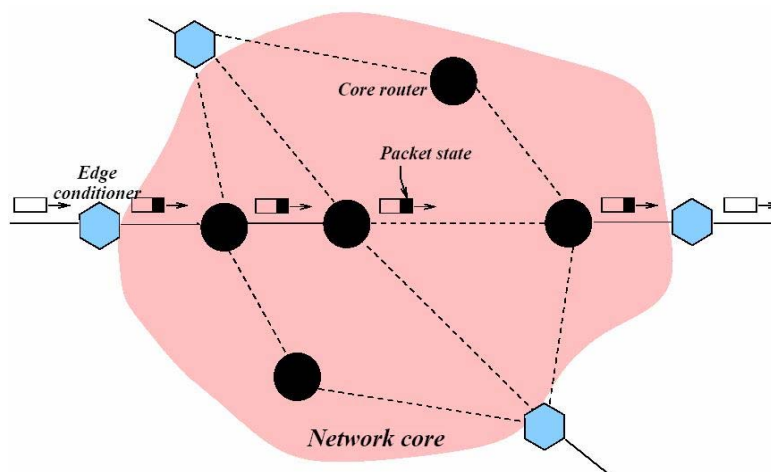
Ο συνδυασμός της τεχνολογίας *MPLS* με μηχανισμούς *DiffServ* διευκολύνουν την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στα όρια μιας διαχειριστικής περιοχής. Στις περιπτώσεις, όμως, που απαιτείται η δημιουργία μονοπατιών διαμέσου πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών, η τεχνολογία *MPLS* δεν υποστηρίζει στη πράξη που να επιτρέπουν τη δέσμευση πόρων κατά μήκος των από άκρο-σε-άκρο μονοπατιών.

⁴ Τα μονοπάτια *LSP* διακρίνονται σε *Experimental-inferred LSPs (E-LSPs)* και *Label-inferred LSP (L-LSPs)*. Στα μονοπάτια *E-LSP* η τιμή *DSCP* των πακέτων IP αντιστοιχίζεται στο πεδίο *EXP* της επικεφαλίδας *MPLS* επιτρέποντας μέχρι οκτώ διαφορετικά επίπεδα ποιότητα. Αντιθέτως, στα μονοπάτια *L-LSP* απεριόριστος αριθμός από διαφορετικές τιμές *DSCP* μπορούν να αντιστοιχηθούν σε ένα μονοπάτι. Τα μονοπάτια *L-LSP* χρησιμοποιούνται συνήθως για την προώθηση κίνησης υψηλής προτεραιότητας. Σε περίπτωση δικτυακού προβλήματος, η κίνηση που εξυπηρετείται από μονοπάτια *L-LSPs* δεν επηρεάζεται καθώς τα μονοπάτια αναδρομολογούνται ταχύτατα με την εφαρμογή μηχανισμών αποκατάστασης *fast reroute*.

2.5 Μοντέλα που βασίζονται στην τεχνική *Dynamic Packet State (DSP)*

Οι προηγούμενες αρχιτεκτονικές και μοντέλα *QoS* προϋποθέτουν ότι πληροφορίες κατάστασης για τις εγκατεστημένες ροές αποθηκεύονται στους δρομολογητές κορμού και επιτρέπουν τον διαχωρισμό των πακέτων σε διαφορετικές προτεραιότητες. Αντιθέτως, στα μοντέλα που αναφέρονται παρακάτω οι πληροφορίες κατάστασης μεταφέρονται στην επικεφαλίδα του κάθε πακέτου που προωθείται στο δίκτυο. Οι εσωτερικοί δρομολογητές δεν διατηρούν πληροφορίες για τις εγκατεστημένες ροές ενώ οι ακραίοι δρομολογητές είναι επιφορτισμένοι με τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης κίνησης και την εισαγωγή πληροφοριών κατάστασης στα πακέτα που εισέρχονται στη διαχειριστική περιοχή.

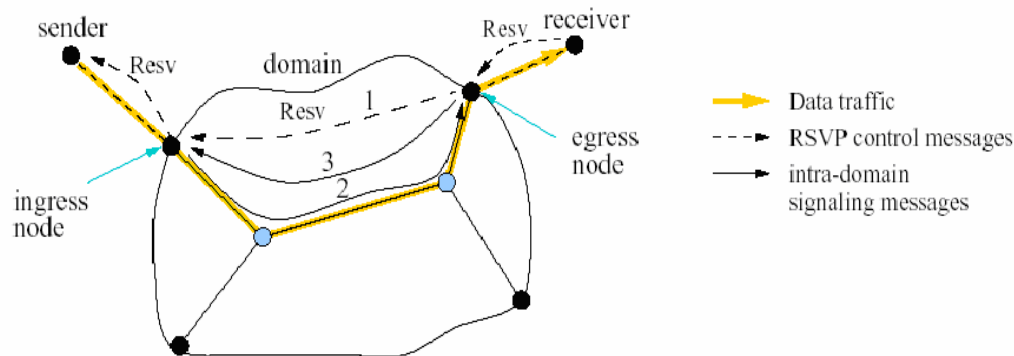
Το μοντέλο *Scalable Core (SCORE)* [SZ99] προβλέπει ότι το κάθε πακέτο μεταφέρει στην επικεφαλίδα του όλες τις πληροφορίες κατάστασης⁵ που απαιτούνται για την προώθησή του. Οι πληροφορίες στις επικεφαλίδες αρχικοποιούνται από τους ακραίους δρομολογητές εισόδου της διαχειριστικής περιοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, και χρησιμοποιούνται από τους δρομολογητές κορμού για το διαχωρισμό των πακέτων σε διαφορετικές προτεραιότητες. Πριν την προώθηση του κάθε πακέτου προς τον επόμενο κόμβο, ο δρομολογητής ανανεώνει τις πληροφορίες κατάστασης στην επικεφαλίδα του πακέτου. Η τεχνική αυτή ονομάζεται *Dynamic Packet State (DSP)* ενώ τα δίκτυα χαρακτηρίζονται ως «*core stateless*» ακριβώς γιατί δεν απαιτείται η διατήρηση πληροφοριών κατάστασης στους εσωτερικούς δρομολογητές για τις εγκατεστημένες ροές.



Σχήμα 10: Μέθοδος εισαγωγή πληροφοριών κατάστασης σε πακέτα.

⁵ Κάθε πακέτο μεταφέρει στην επικεφαλίδα τους τις τιμές από τέσσερις μεταβλητές, από τις οποίες η μία είναι ο ρυθμός της ροής που ανήκει το πακέτο.

Ο έλεγχος αποδοχής στο μοντέλο *SCORE* για τις υπό εγκατάσταση ροές πραγματοποιείται με χρήση του πρωτοκόλλου *RSVP* αλλά απαιτείται επιπλέον ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των ακραίων δρομολογητών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, Αρχικά στέλνεται ένα μήνυμα *RSVP PATH* από τον κόμβο Πηγή προς το κόμβο Προορισμού, το οποίο ακολουθείται από ένα μήνυμα *RSVP RESV* προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μόλις το ακραίο δρομολογητής προς την κατεύθυνση του κόμβου Προορισμού λάβει το μήνυμα *RSVP RESV*, το προωθεί στο αντίστοιχο δρομολογητή εισόδου προς την κατεύθυνση του κόμβου Πηγή (1). Ο τελευταίος προωθεί εκ νέου το μήνυμα στον προηγούμενο ακραίο δρομολογητή (2) αλλά αυτή τη φορά πραγματοποιείται έλεγχος αποδοχής σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο του δικτύου *SCORE* και υπολογίζονται μεταβλητές που απαιτούνται για τον αλγόριθμο *Core-Jitter-VC*. Εφόσον το μήνυμα *RSVP RESV* φτάσει στο ακραίο δρομολογητή προς την κατεύθυνση του κόμβου Προορισμού, ο έλεγχος αποδοχής έχει ολοκληρωθεί. Νέο μήνυμα αποστέλλεται στον ακραίο δρομολογητή προς την κατεύθυνση του κόμβου Πηγή (3), ο οποίος και αποθηκεύει τις συλλεγμένες πληροφορίες από τον έλεγχο αποδοχής και τις χρησιμοποιεί για την αρχικοποίηση των πληροφοριών κατάστασης που εισάγει στις επικεφαλίδες των πακέτων.



Σχήμα 11: Ανταλλαγή μηνυμάτων κατά τον έλεγχο αποδοχής στην αρχιτεκτονική *SCORE*.

Αντίστοιχες αρχές με το μοντέλο *Scalable Core (SCORE)* εφαρμόζονται στα μοντέλα *Virtual Time Reference System (VTRS)* [ZDH00] και *Deadline-based Network Resource Management (DNM)* [LW04]. Κανένα από τα τρία μοντέλα δεν έχει εφαρμοστεί τη πράξη σε δίκτυα παραγωγής.

2.6 Επεκτάσεις στο επίπεδο διαχείρισης (*management plane*)

Οι επόμενες δύο ενότητες παρουσιάζουν μεθόδους που διευκολύνουν την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε συνδέσεις που επεκτείνονται μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών χωρίς, όμως,

να διαταράσσουν την υφιστάμενη σχέση συνεργασίας μεταξύ των ανεξάρτητων διαχειριστικών περιοχών.

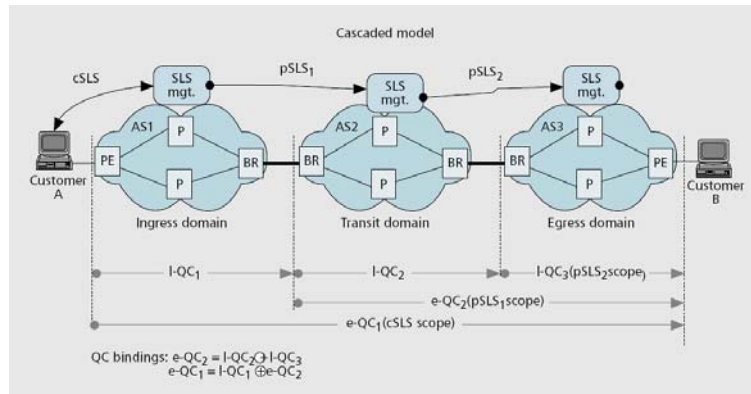
2.6.1 End-to-End QoS Across the Internet at Large - MESCAL

Το ερευνητικό έργο *End-to-End Quality of Service Across the Internet at Large (MESCAL)*⁶ [Hiw+05][Lev+05] προδιόγραψε τις λειτουργίες που οφείλει να εκτελέσει ένας Πάροχος Υπηρεσιών για να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας σε συνδέσεις που διασχίζουν πολλές ανεξάρτητες διαχειριστικές περιοχές και ανέλυσε την αλληλεπίδρασή τους

Ο κάθε Πάροχος που υποστηρίζει εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης στα όριά του δικτύου του ορίζει την τοπική κλάση *local-QoS-Class (l-QoS)*, στην οποία σε μορφή πίνακα περιλαμβάνει ζεύγη μετρικών απόδοσης και των τιμών τους, π.χ. η μέγιστη καθυστέρηση στο δίκτυο ανέρχεται σε *5msec*. Οι πληροφορίες αυτές διαφημίζονται στους γειτονικούς Παρόχους και αποτελούν κομμάτι των προδιαγραφών *peer Service Level Specifications (pSLS)* που περιλαμβάνονται τις συμβάσεις *SLAs* μεταξύ των γειτονικών Παρόχων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. Οι συμβάσεις *SLAs* οριστικοποιούνται μεταξύ των Παρόχων πριν από την ικανοποίηση οποιουδήποτε αιτήματος για παροχή *QoS* και καθορίζουν τις εγγυήσεις που προσφέρονται στην μεταφερόμενη κίνηση μεταξύ των δύο διαχειριστικών περιοχών. Οι εγγυήσεις για όσες συνδέσεις διασχίζουν πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές προκύπτουν από τον συνδυασμό εν σειρά (*cascaded*) συμβάσεων *SLAs* μεταξύ γειτονικών διαχειριστικών περιοχών.

Ο κάθε Πάροχος Υπηρεσιών γνωρίζει τις τοπικές κλάσεις *l-QoS* στο εσωτερικό του δίκτυο καθώς και τις αντίστοιχες κλάσεις *l-QoS* στις γειτονικές διαχειριστικές περιοχές. Όσες κλάσεις *l-QoS* υποστηρίζονται από κοινού από (μη γειτονικές) διαχειριστικές περιοχές αντιστοιχίζονται σε «μετα-κλάσεις» *Meta-QoS-Class (MQC)*. Η κάθε διαχειριστική περιοχή διαφημίζει με χρήση του πρωτοκόλλου *QoS-Enhanced Border Gateway Protocol (q-BGP)* τις «μετα-κλάσεις» *MQC* που υποστηρίζει. Οι πληροφορίες αυτές διαχέονται στο Διαδίκτυο με χρήση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου *q-BGP* με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν που διαχέονται οι πληροφορίες δρομολόγησης με χρήση του πρωτοκόλλου *BGP*. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται με το πρωτόκολλο *q-BGP* επιτρέπουν την επιλογή μονοπατιού κατά μήκος πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών που υποστηρίζουν αντίστοιχες τοπικές κλάσεις *l-QoS*.

⁶ Το MESCAL αποτέλεσε τη συνέχεια του ερευνητικού έργου *TEQUILA* [Myko+03].



Σχήμα 12: Μοντέλο για τη σύνδεση εν σειρά προδιαγραφών *pSLS* στο έργο *MESCAL*.

Το μοντέλο που προδιαγράφηκε στο πλαίσιο του έργου *MESCAL* έχει ήδη δοκιμαστεί σε περιορισμένου μεγέθους δίκτυο δοκιμών και σε περιβάλλον προσομοίωσης. Η επιτυχία, όμως, του μοντέλου προϋποθέτει την προτυποποίηση αριθμού μετα-κλάσεων *MQCs* και την αντιστοίχιση σε αυτές πολλαπλών τοπικών κλάσεων *I-QoS*. Οι κλάσεις *MQC* και *I-QoS* οφείλουν, στη συνέχεια, να υιοθετηθούν από τους υφιστάμενους Παρόχους Υπηρεσιών.

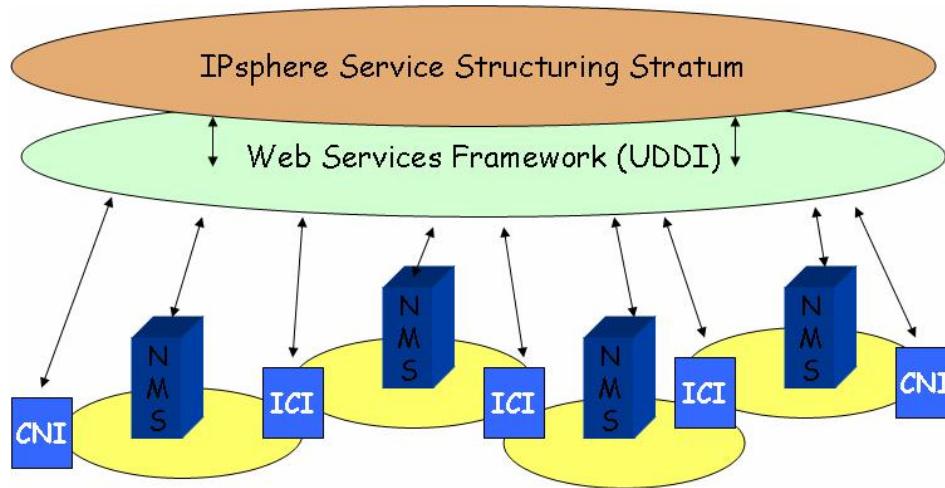
2.6.2 Το μοντέλο του *IP Sphere Forum*

Το φόρουμ *IP Sphere* [Noll05] έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός «επιχειρησιακού επιπέδου» (*business layer*), το οποίο θα διευκολύνει τους Παρόχους να εγκαταστήσουν και να διαχειριστούν νέες υπηρεσίες. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ των Παρόχων στο επίπεδο *business layer* αναφέρονται ως «πληροφορίες επιχειρησιακής πολιτικής» (*business policy data*) και δεν αφορούν τεχνικές λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο υλοποίησης των υπηρεσιών αλλά περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με τη διαχείριση των αιτημάτων από τους τελικούς χρήστες. Το μοντέλο *IP Sphere*, λοιπόν, επιτρέπει στους Παρόχους να συνεργαστούν για την ικανοποίηση των αιτημάτων των χρηστών αλλά δεν τους περιορίζει να εφαρμόσουν οποιαδήποτε τεχνολογία στο δίκτυο ευθύνης τους για να παρέχουν εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης.

Το μοντέλο *IP Sphere* έχει προδιαγράψει το στρώμα *Service Structuring Stratum (SSS)*, το οποίο βρίσκεται πάνω από τα στρώματα *Policy and Control Stratum* και το *Packet Handling Stratum*⁷. Τα αιτήματα από τους τελικούς χρήστες υποβάλλονται μέσω του *Client Network Interface (CNI)* προς την τοπική διαχειριστική περιοχή. Η τελευταία προσαρμόζει το αίτημα και το προωθεί μέσω του στρώματος *SSS* στις υπόλοιπες εμπλεκόμενες διαχειριστικές περιοχές ζητώντας τους να εκτελέσουν τις απαραίτητες ενέργειες για την εγκατάσταση της υπηρεσίας. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται,

⁷ Τα στρώματα *Policy and Control Stratum* και *Packet Handling Stratum* μπορούν να αντιστοιχιστούν στα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων (*control & data plane*).

π.χ. πληροφορίες σχετικές με τα αιτήματα των χρηστών και την κατάσταση υλοποίησής τους, επιτρέπουν στην κάθε ενδιαμέση διαχειριστική περιοχή να προσαρμόσει τις τοπικές υπηρεσίες που παρέχει με τις αντίστοιχες υπηρεσίες σε γειτονικές διαχειριστικές περιοχές μέσω των *InterCarrier Interfaces (ICI)*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται στο στρώμα *SSS* βασίζονται στη γλώσσα περιγραφής *XML* ενώ η υλοποίηση των λογικών οντοτήτων που απαιτούνται για την επικοινωνία των διαχειριστικών περιοχών βασίζεται στην τεχνολογία *Web Services* [CCMW01] και την αρχιτεκτονική *Service Oriented Architecture (SOA)*.



Σχήμα 13: Το μοντέλο *IP Sphere*.

2.7 Συμπεράσματα

Παρουσιάσαμε μερικές από τις σημαντικότερες αρχιτεκτονικές και μοντέλα για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα IP για την υποστήριξη άκρο-σε-άκρο εγγυήσεων κατά τη μεταφορά της κίνησης. Η εφαρμογή τους, όμως, σε σύγχρονα δίκτυα παραγωγής είναι περιορισμένη εξαιτίας των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την υλοποίησή τους. Οι σημαντικότεροι περιορισμοί έχουν σχέση με ζητήματα κλιμάκωσης κατά την ενεργοποίηση λειτουργιών στα επίπεδα ελέγχου ή δεδομένων για δίκτυα που εμφανίζουν υπερ-υψηλές ταχύτητες διασύνδεσης. Εξίσου σημαντικοί περιορισμοί εμφανίζονται κατά τη διαδικασία εγκατάστασης συνδέσεων που επεκτείνονται διαμέσου πολλαπλών ανεξάρτητων διαχειριστικών περιοχών που εμφανίζουν μεταξύ τους περιορισμένη συνεργασία κατά την παροχή υπηρεσιών.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί εκτιμάται ότι είναι απαραίτητη η απλοποίηση των λειτουργιών που εκτελούν οι δρομολογητές κορμού σε μία διαχειριστική περιοχή κατά την προώθηση της κίνησης με απαιτήσεις *QoS*. Η εφαρμογή των πιο σύνθετων λειτουργιών μετατοπίζεται στους ακραίους δρομολογητές, όπου οι ρυθμοί κίνησης που εξυπηρετούνται είναι περιορισμένοι. Πολλά από τα προτεινόμενα ερευνητικά μοντέλα που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν τη

προώθηση των πακέτων IP σύμφωνα με την αρχιτεκτονική *DiffServ* και δεν απαιτούν τη διατήρηση πληροφοριών κατάστασης στους εσωτερικούς δρομολογητές κορμού απαραίτητων για τον έλεγχο και περιορισμό της μεταφερόμενης κίνησης. Επίσης, η διαχείριση των δικτυακών πόρων διευκολύνεται με την χρήση καταναμημένων μεθόδων κατά τον έλεγχο αποδοχής νέων ροών ενώ η χρήση σηματοδοσίας αυτοματοποιεί τη διαχείριση των μηχανισμών προστασίας του δικτύου που εφαρμόζουν συνήθως οι ακραίοι δρομολογητές στην κάθε διαχειριστική περιοχή. Τέλος, η χρήση από άκρο-σε-άκρο σηματοδοσίας ή λειτουργιών στο επίπεδο διαχείρισης διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ των διαχειριστικών περιοχών επιτρέποντας την ικανοποίηση αιτημάτων που επεκτείνονται εκτός των ορίων μιας διαχειριστικής περιοχής.

Στις επόμενες δύο ενότητες θα περιγράψουμε το μοντέλο για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* που εφαρμόζεται σήμερα με επιτυχία σε δίκτυα *DiffServ*, το οποίο στη συνέχεια θα επιδιώξουμε να βελτιώσουμε με χρήση από άκρο-σε-άκρο σηματοδοσίας και ενσωμάτωση κατάλληλων μηχανισμών ελέγχου και παρακολούθησης των παρεχομένων υπηρεσιών.

3 Η υπηρεσία *Premium IP*

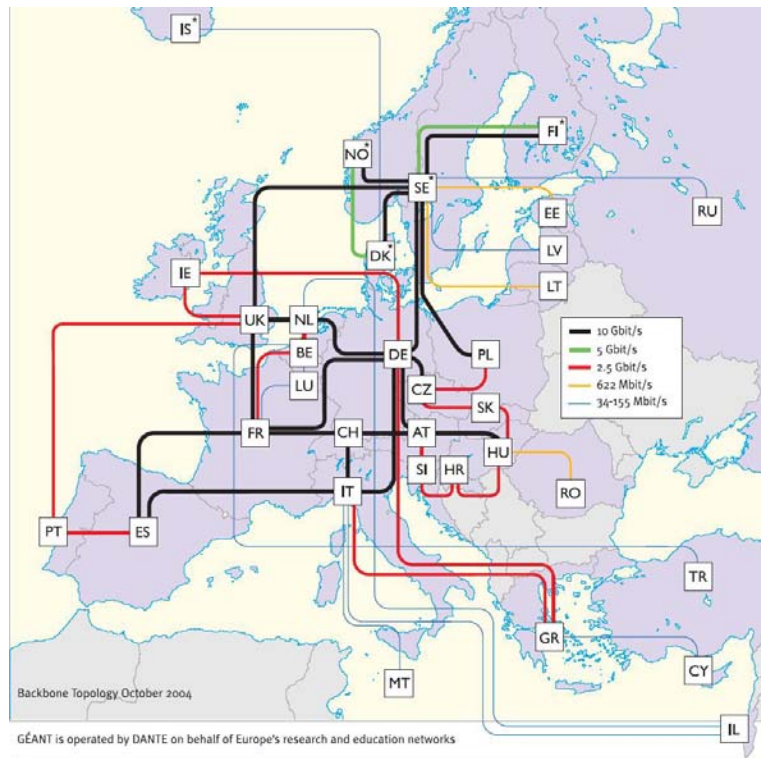
Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η υπηρεσία *Premium IP* που προδιαγράψαμε σε συνεργασία με τους λοιπούς εταίρους στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου SEQUIN [Roth+03] [SEQUA] και σήμερα υποστηρίζεται από το **Πανευρωπαϊκό Ερευνητικό δίκτυο GÉANT** [GÉANT] καθώς και από πολλά **Εθνικά Ερευνητικά και Εκπαιδευτικά Δίκτυα** (*National Research and Education Networks – NRENs*). Στην αρχή της ενότητας γίνεται αναφορά στο δίκτυο GÉANT και στο ιεραρχικό μοντέλο διασύνδεσης των ευρωπαϊκών NRENs. Παρουσιάζονται οι εγγυήσεις που προφέρει η υπηρεσία *Premium IP* και περιγράφονται αναλυτικά οι διαφορετικές φάσεις που απαιτούνται για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης *Premium IP* μεταξύ διαφορετικών διαχειριστικών περιοχών. Στη συνέχεια, αναλύονται τεχνικές σχετικές με την παρακολούθηση και καταγραφή των εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας που παρέχονται σε ροές που διασχίζουν περισσότερες από μία διαχειριστικές περιοχές. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από δοκιμές που εκτελέσαμε πάνω από το δίκτυο GÉANT, τα οποία επιβεβαιώνουν τη βελτίωση των παρεχομένων εγγυήσεων για την κίνηση *Premium IP* σε σχέση με την κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*). Στο τέλος της παρούσας ενότητας επισημαίνονται οι περιορισμοί που προκύπτουν από το υφιστάμενο μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* στα δίκτυα GÉANT/NRENs και γίνεται αναφορά στις βελτιώσεις που προτείνονται από τις ερευνητικές δραστηριότητες *Service Activity 3 (SA3)* [GN2d] και *Joint Research Activity 1 (JRA1)* [GN2a] στο πλαίσιο του έργου GÉANT2 (GN2) [GN2].

3.1 Το ερευνητικό δίκτυο GÉANT

Το **Πανευρωπαϊκό Ερευνητικό Δίκτυο GÉANT** [GÉANT] συνδέει τα Εθνικά Ερευνητικά και Εκπαιδευτικά Δίκτυα (*National Research and Education Networks – NRENs*) στην Ευρώπη

παρέχοντας διασύνδεση σε τουλάχιστον 3500 πανεπιστήμια και ερευνητικά ινστιτούτα σε 34 χώρες. Επιπλέον, το δίκτυο GÉANT παρέχει διασύνδεση με τα ερευνητικά δίκτυα στη Βόρειο Αμερική (Abilene [Abile], CANARIE [CANet4], ESnet [ESnet]), στην Νοτιοανατολική Ευρώπη (SEEREN [Seer]), στη Μεσόγειο (EUMEDCONNECT [Eumed]), στη Λατινική και Νότιο Αμερική (CLARA [CLAR]), στην Ανατολική Ασία (TEIN2 [TEIN]), συμπεριλαμβανομένου των δικτύων της Κίνας (CERNET [CNET]), της Ιαπωνίας (SINET [Sinet]) και της Νότιου Αφρικής (TENET [TENE]). Το δίκτυο GÉANT προσφέρει, επίσης, υπηρεσίες διασύνδεσης με το εμπορικό Διαδίκτυο (*commodity Internet*) μέσω της υπηρεσίας *Dante World Service (DWS) [DWS]*.

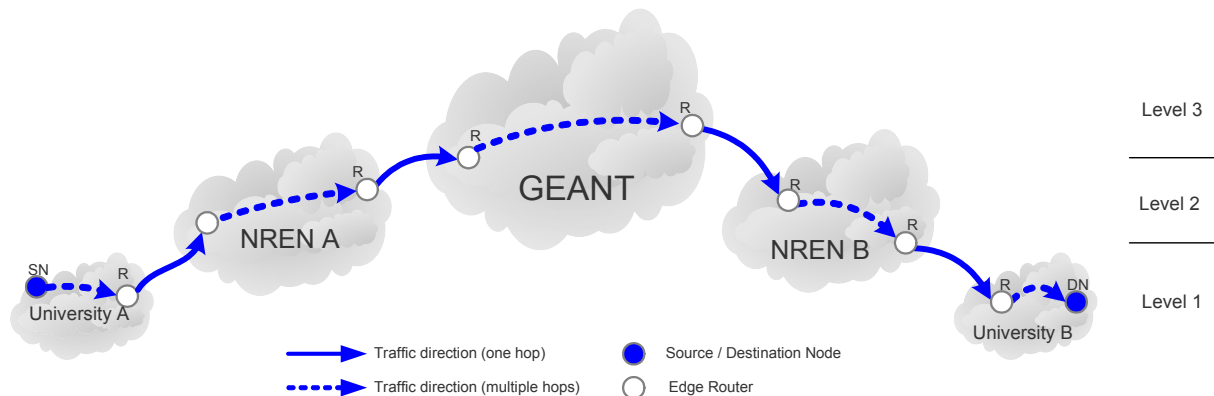
Η σημερινή τοπολογία του δικτύου GÉANT φαίνεται στο Σχήμα 14. Τα σημεία παρουσίας (*point of presence - PoP*) του δικτύου συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές διασύνδεσης των οποίων η ταχύτητα κυμαίνεται από 34 Mbps μέχρι 10 Gbps. Για να διασφαλιστεί η συνεχής διασύνδεση μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων στο δίκτυο GÉANT, ο εκάστοτε δρομολογητής κορμού συνδέεται με δύο τουλάχιστον δρομολογητές εγκατεστημένους σε γειτονικά σημεία παρουσίας. Στις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό εξαιτίας τεχνικών ή οικονομικών περιορισμών, η υψηλή διαθεσιμότητα των συνδέσεων διασφαλίζεται συνήθως με λειτουργίες προστασίας σε χαμηλότερα επίπεδα, π.χ. με λειτουργίες προστασίας που προσφέρει η τεχνολογία *Synchronous Digital Hierarchy (SDH) [ITU88]*.



Σχήμα 14: Το Πανευρωπαϊκό Ερευνητικό Δίκτυο GÉANT.

Το δίκτυο GÉANT και τα συνδεδεμένα ευρωπαϊκά NRENs –συνδρομητές του δικτύου GÉANT- ακολουθούν το *ιεραρχικό* μοντέλο διασύνδεσης. Η κίνηση μεταξύ δύο NRENs προωθείται

πάντοτε διαμέσου του δικτύου GÉANT⁸, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Αντίστοιχο μοντέλο διασύνδεσης εφαρμόζεται συνήθως και στο εσωτερικό των δικτύων NRENs. Οι τοπικοί συνδρομητές, δηλαδή τα δίκτυα των πανεπιστημίων και ερευνητικών ινστιτούτων, προωθούν την εξερχόμενη κίνηση τους προς το αντίστοιχο εθνικό δίκτυο NREN. Έχει δημιουργηθεί, λοιπόν, ένα αυστηρά ιεραρχικό μοντέλο δικτύου τριών επιπέδων στην Ευρώπη και, επομένως, η υποστήριξη υπηρεσιών μεταξύ δύο τελικών χρηστών σε διαφορετικές χώρες πραγματοποιείται συνήθως με τη συνεργασία πέντε (τουλάχιστον) διαχειριστικών περιοχών, μιας από τις οποίες είναι πάντοτε το δίκτυο του GÉANT.



Σχήμα 15: Ιεραρχικό μοντέλο διασύνδεσης ερευνητικών δικτύων NREN μέσω GÉANT.

Το ερευνητικό δίκτυο TEN-155 [TEN155], ο «πρόγονος» του δικτύου GÉANT, βασιζόταν στην τεχνολογία *Asynchronous Transfer Mode (ATM)* [ITU91][ATMF94], η οποία υποστηρίζει τη δημιουργία λογικών κυκλωμάτων⁹ για τη μεταφορά της πληροφορίας σε μικρά, σταθερού μεγέθους, κελία (*cells*). Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας ATM είναι ότι επιτρέπει τον «τεμαχισμό» της διαθέσιμης χωρητικότητας σε μια γραμμή διασύνδεσης σε πολλαπλά ανεξάρτητα λογικά κυκλώματα, διευκολύνοντας την ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων, ήχου και εικόνας. Η τεχνολογία ATM υποστηρίζει πολλαπλές *κατηγορίες υπηρεσίας (service categories)* [ATMF96], οι οποίες προσφέρουν ποικίλες εγγυήσεις απόδοσης για τη μεταφερόμενη κίνηση. Η εξυπηρέτηση της κίνησης υψηλής προτεραιότητας στο δίκτυο TEN-155, όπως προδιαγράφηκε στην *Υπηρεσία*

⁸ Τα τελευταία χρόνια, πολλά ευρωπαϊκά NRENs προχώρησαν στην εγκατάσταση απευθείας συνδέσεων μεταξύ τους ενώ η χρήση οπτικών τεχνολογιών επιτρέπει πλέον τη δημιουργία κυκλωμάτων *Gigabit Ethernet (GigE)* [IEEE99] ή *SDH* [ITU88] που παρακάμπτουν τους ενδιάμεσους δρομολογητές κορμού. Το δίκτυο GÉANT/NRENs μετατρέπεται συνεπώς από ένα αυστηρά ιεραρχικό δίκτυο σε ένα υβριδικό δίκτυο που επιτρέπει απευθείας συνδέσεις σε χαμηλότερα στρώματα από το στρώμα δικτύου (*network layer*) και, συνεπώς, μέρος της ανταλλασσόμενης κίνησης μεταξύ των NRENs παρακάμπτει τους δρομολογητές κορμού του GÉANT.

⁹ Τα λογικά κυκλώματα που υποστηρίζονται από την τεχνολογία ATM διαχωρίζονται σε «*εικονικά κυκλώματα*» (*virtual circuits - VCs*) και «*εικονικά μονοπάτια*» (*virtual paths - VPs*).

Διαχειριζόμενης Χωρητικότητας (Managed Bandwidth Service – MBS) [MBS], βασίστηκε στην κατηγορία υπηρεσίας *Constant Bit Rate (CBR)* [ATMF96], η οποία επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό της κίνησης σε ένα λογικό κύκλωμα από την υπόλοιπη μεταφερόμενη κίνηση πάνω από μια γραμμή διασύνδεσης.

Η τεχνολογία ATM εμφανίζει περιορισμούς σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας κατά την υλοποίησή της από το υλικό και τη μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας (*bandwidth overhead*) από τη μεταφορά των επικεφαλίδων ATM. Παρόλο που η τεχνολογία ATM παρουσιάζει αρκετές δυνατότητες στην παροχή εγγυήσεων κατά τη μεταφορά της κίνησης, το δίκτυο GÉANT σχεδιάστηκε ως δίκτυο μεταγωγής πακέτων IP σύμφωνα με την αρχιτεκτονική *Differentiated Services* [Blake+98]. Η εγκατάλειψη της τεχνολογίας ATM ώθησε τη σχεδίαση της υπηρεσίας *Premium IP* με στόχο την αναπλήρωση της υπηρεσίας *MBS*.

3.2 Η υπηρεσία *Premium IP*

Η υπηρεσία ποιότητας *Premium IP* έχει ως σκοπό την παροχή *εικονικών μισθωμένων γραμμών (virtual leased lines)* μέσω του ιεραρχικού δικτύου GÉANT/NRENs για τη μεταφορά κίνησης υψηλής προτεραιότητας. Ο τελικός χρήστης που κάνει χρήση της υπηρεσίας *Premium IP* έχει τη «ψευδαίσθηση» ότι χρησιμοποιεί ένα ανεξάρτητο κύκλωμα ορισμένης χωρητικότητας πάνω από την υποδομή του δικτύου IP.

Η υπηρεσία *Premium IP* καλείται να προσφέρει τις καλύτερες δυνατές εγγυήσεις που μπορούν να προσφερθούν κατά τη μεταφορά κίνησης IP πάνω από το δίκτυο GÉANT/NREN. Ειδικότερα, οφείλει παρέχει τις ακόλουθες γενικές εγγυήσεις:

- Εγγυημένη χωρητικότητα (*guaranteed bandwidth*)
- Αμελητέα απώλεια πακέτων (*negligible packet loss*)
- Ελάχιστη καθυστέρηση προς τη μια κατεύθυνση (*minimum one-way delay*)¹⁰
- Ελάχιστη μεταβλητότητα καθυστέρησης μεταξύ πακέτων (*minimum inter-packet delay variation - jitter*)

Η υπηρεσία *Premium IP* δεν παρέχει καμία εγγύηση για το βαθμό δικαιοσύνης (*fairness*) [Fair99] μεταξύ ροών με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης, π.χ. ροές που εμφανίζουν άνισους χρόνους καθυστέρησης διαδρομής με επιστροφή (*round trip time - RTT*) ή ροές που χρησιμοποιούν διαφορετικά

¹⁰ Η υπηρεσία *Premium IP* παρέχει συνήθως ένα άνω όριο στην καθυστέρηση και στη μεταβλητότητα καθυστέρησης που υφίστανται ένα υψηλό ποσοστό, π.χ. 99%, των μεταφερόμενων πακέτων IP.

πρωτόκολλα μεταφοράς¹¹. Παρόλα αυτά, η υπηρεσία *Premium IP* ελαχιστοποιεί την πιθανότητα να εμφανιστούν προβλήματα από την πολυπλεξία διαφορετικών ροών μέσα στην ίδια συνάθροιση κίνησης αφού προσφέρονται εγγυήσεις χωρητικότητας και αμελητέας απώλεια πακέτων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εγγυήσεις προϋποθέτουν ότι η τοπολογία του δικτύου παραμένει σταθερή και δεν παρουσιάζονται προβλήματα στα χαμηλότερα στρώματα του δικτύου, δηλαδή στα στρώματα 1 ως 3 του μοντέλου *Open System Interconnection/International Organization for Standardization (OSI/ISO)*. Επιπλέον, η απόδοση των δρομολογητών κορμού δεν επηρεάζεται από το ρυθμό της εξυπηρετούμενη κίνηση ενώ η πιθανότητα λανθασμένης μεταφοράς πληροφορίας στο φυσικό στρώμα (*physical layer*) είναι μικρή, δηλαδή ο ρυθμός λανθασμένων *bit* (*bit error rate - BER*) στις γραμμές διασύνδεσης είναι μικρότερος από 10^{-12} .

3.2.1 Υλοποίηση της υπηρεσίας *Premium IP*

Η υποστήριξη της υπηρεσίας *Premium IP* μέσα σε μια διαχειριστική περιοχή προϋποθέτει την υποστήριξη συγκεκριμένων μηχανισμών ποιότητας υπηρεσίας από τους δρομολογητές κορμού. Όπως θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους, οι περισσότερες λειτουργίες ενεργοποιούνται στα όρια των διαχειριστικών περιοχών ενώ η μεταγωγή των πακέτων *Premium IP* από τους εσωτερικούς δρομολογητές ακολουθεί πιστά το μοντέλο που προδιαγράφει η αρχιτεκτονική *DiffServ*. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι το σύνολο των μηχανισμών που περιγράφονται ακολούθως εκτελούν λειτουργίες στο επίπεδο IP και, συνεπώς, η υλοποίηση της υπηρεσίας *Premium IP* είναι ανεξάρτητη από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα κατώτερα στρώματα του δικτύου¹².

3.2.1.1 Προώθηση δεδομένων (*data forwarding*)

Η υπηρεσία *Premium IP* βασίζεται στη *συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο Expedited Forwarding (EF Per-Hop Behaviour)* [Davie+02] [Char+02]. Αυτό σημαίνει ότι οι δρομολογητές οφείλουν να

¹¹ Το πρωτόκολλο μεταφοράς *Transmission Control Protocol (TCP)* [TCP81] περιλαμβάνει μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης σε αντίθεση με το πρωτόκολλο *User Datagram Protocol (UDP)* [UDP]. Ως αποτέλεσμα, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνουν οι ροές *TCP* είναι σημαντικά χαμηλότερος σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό που επιτυγχάνουν οι ροές *UDP* σε δίκτυα που εμφανίζουν απώλεια πακέτων.

¹² Οι εγγυήσεις που παρέχει η υπηρεσία *Premium IP* μπορούν να υποστηριχθούν –εκτός από δίκτυα *DiffServ*– από δίκτυα *ATM* με χρήση της κατηγορίας υπηρεσίας *CBR* ή από δίκτυα με διάθεση δικτυακών πόρων σε υπερβολικό βαθμό (*overprovision*). Επίσης, μια διαχειριστική περιοχή μπορεί να υποστηρίξει είτε πλήρως είτε μερικώς τις λειτουργίες που απαιτούνται για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP*. Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά μόνο σε διαχειριστικές περιοχές που υποστηρίζουν πλήρως τις απαραίτητες λειτουργίες για την υλοποίηση της υπηρεσίας *Premium IP* και ακολουθούν την αρχιτεκτονική *DiffServ*.

προωθούν την κίνηση *Premium IP* με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση και μεταβλητότητα καθυστέρησης ενώ θα πρέπει να αποφεύγεται η συμφόρηση στις ουρές που εξυπηρετούν κίνηση *Premium IP*. Για να επιτύχουν τις παραπάνω εγγυήσεις, οι δρομολογητές προωθούν την κίνηση *Premium IP* με χρήση ουρών που υποστηρίζουν *χρονοπρογραμματισμό (scheduling)* με βάση τους παρακάτω, ή άλλους ισοδύναμους, αλγόριθμους:

- *Αναμονή με αυστηρή προτεραιότητα (Strict Priority Queuing - Strict PQ)*
- *Κυκλική σειρά με βάρη (Weighted Round Robin - WRR) [Mez+94]*
- *Τροποποιημένη ελλειμματική κυκλική σειρά (Modified Deficit Round Robin - MDRR) [SV95]*
- *Δίκαιη αναμονή με βάρη (Weighted Fair Queuing – WFQ) [Pare92]*

Με βάση με τις δυνατότητες του εγκατεστημένου εξοπλισμού και τα χαρακτηριστικά του δικτύου εφαρμογής, εναπόκειται στον εκάστοτε υπεύθυνο διαχειριστή να επιλέξει τον καταλληλότερο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού για την εξυπηρέτηση της κίνησης στις ουρές εξόδου των δρομολογητών του δικτύου. Η υποστήριξη της υπηρεσίας *Premium IP*, για παράδειγμα, σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων διασύνδεσης βασίζεται συνήθως στον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού *WRR*, ο οποίος υλοποιείται εύκολα με χρήση υλικού (*hardware*). Αντιθέτως, σε δίκτυα χαμηλών ταχυτήτων διασύνδεσης, όπου είναι δυνατή η χρήση λογισμικού (*software*), επιλέγεται συχνά ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού *WFQ*, ο οποίος εμφανίζει αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης αλλά και υψηλή απόδοση στη διαχείριση κίνησης πολλαπλών κλάσεων υπηρεσίας. Η παραμετροποίηση του αλγόριθμου χρονοπρογραμματισμού που επιλέγεται σε ένα δίκτυο δεν είναι αυστηρά καθορισμένη. Ο διαχειριστής της εκάστοτε διαχειριστικής περιοχής οφείλει να επιλέξει τις κατάλληλες παραμέτρους λαμβάνοντας υπόψη τις κλάσεις υπηρεσίας που υποστηρίζονται στο δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση, όμως, είναι υποχρεωτική η παροχή των εγγυήσεων κατά την μετάδοση της κίνησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

3.2.1.2 Δεσμευμένη χωρητικότητα για τη κίνηση *Premium IP*

Η κίνηση *Premium IP* καταλαμβάνει περιορισμένο ποσοστό στη χωρητικότητα της κάθε γραμμής διασύνδεσης σε ένα δίκτυο για τους ακόλουθους λόγους:

- Η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου, π.χ. εξαιτίας αποτυχίας σε μια γραμμή διασύνδεσης, οδηγεί σε αναδρομολόγηση μέρους της κίνησης που εξυπηρετείται. Αυτό ενδέχεται να δημιουργήσει συμφόρηση στα τμήματα του δικτύου που εκτρέπετε η αναδρομολογημένη κίνηση με συνέπεια την υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών. Η δέσμευση μικρού ποσοστού χωρητικότητας σε κάθε γραμμή διασύνδεσης για την εξυπηρέτηση της *Premium IP* κίνησης επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση της αναδρομολογημένης και μη αναδρομολογημένης κίνησης ύστερα από αλλαγή τοπολογίας και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα να εμφανιστεί απώλεια πακέτων.

- Η κίνηση *Premium IP* οφείλει να απολαμβάνει χαμηλή καθυστέρηση κατά τη μεταφορά της πάνω από το δίκτυο. Αυτό συνεπάγεται διαισθητικά χαμηλή χρησιμοποίηση στις γραμμές κορμού ώστε ο χρόνος αναμονής στις ουρές εξόδου των δρομολογητών να παραμένει μικρός. Σύμφωνα με το [CB00], το άνω φράγμα για τη μέγιστη καθυστέρηση ενός πακέτου σε ένα δίκτυο που εξυπηρετεί συναθροισμένη κίνηση και εμφανίζει χαμηλή χρησιμοποίηση στις γραμμές διασύνδεσης μπορεί να προσδιοριστεί ως συνάντηση της χρησιμοποίησης των γραμμών διασύνδεσης και του αριθμού *hops* στο μέγιστο μονοπάτι που ακολουθούν οι ροές. Για την ύπαρξη του άνω φράγματος στη μέγιστη καθυστέρηση κατά την μεταφορά των πακέτων, η μέγιστη χρησιμοποίηση των γραμμών κορμού a οφείλει να είναι μικρότερη από $a \leq \frac{1}{h-1}$, όπου h ο αριθμός *hops* για το μεγαλύτερο μονοπάτι μέσα στη διαχειριστική περιοχή¹³. Σε περίπτωση που η τιμή χρησιμοποίησης των γραμμών κορμού a ξεπερνά την ανωτέρω τιμή, δεν μπορεί να οριστεί ένα άνω όριο για τη μέγιστη καθυστέρηση για γενική τοπολογία δικτύου καθώς είναι δυνατό να υποδειχτεί τοπολογία δικτύου για την οποία η μέγιστη καθυστέρηση αυξάνει απεριόριστα. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί που προκύπτουν από τη σχετική μελέτη στο [CB00], παρόλο που βοηθούν στην κατανόηση της χειρότερης δυνατής κατάστασης (*worst case scenario*), έχουν περιορισμένη πρακτική σημασία σε δίκτυα παραγωγής καθώς οι προϋποθέσεις που τίθενται κατά την ανάπτυξη των αναλυτικών υπολογισμών είναι πρακτικά αδύνατες να συμβούν στην πράξη. Αυτό σημαίνει ότι ένα τυχαίο δίκτυο με χρησιμοποίηση των γραμμών διασύνδεσης μεγαλύτερη από την ανωτέρω τιμή a μπορεί να εγγυηθεί τη μέγιστη τιμή για την καθυστέρηση κατά τη μεταφορά των πακέτων. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη καθυστέρηση μπορεί να υπολογιστεί αφού γίνουν γνωστά περισσότερα χαρακτηριστικά του δικτύου και των εξυπηρετούμενων ροών. Συμπερασματικά, οι αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης καθυστέρησης των πακέτων σε ένα δίκτυο «δικαιολογούν» το άνω όριο που τίθεται διαισθητικά στην εισαγωγή κίνησης *Premium IP* σε δίκτυα παραγωγής.
- Η κίνηση *Premium IP* εξυπηρετείται με τη μεγαλύτερη δυνατή προτεραιότητα στις ουρές εξόδου των δρομολογητών, π.χ. από την ουρά υψηλής προτεραιότητας. Αυτό σημαίνει ότι η ανεξέλεγκτη εισαγωγή *Premium IP* κίνησης σε ένα δίκτυο κορμού μπορεί να οδηγήσει σε λιμοκτονία (*starvation*) ροές που εξυπηρετούνται από υπηρεσίες χαμηλότερης

¹³ Ο προσεγγιστικός τύπος για τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής a είναι ο εξής:

$$a \leq \frac{\Gamma}{(\Gamma - C) * (h - 1) + \Gamma} \text{ [CB00]}. \text{ Υπό την προϋπόθεση ότι ο μέγιστος ρυθμός (peak rate) } \Gamma \text{ όλων των}$$

εγκατεστημένων ροών είναι απεριόριστος (*unlimited*), ο τύπος απλοποιείται ως $a \leq \frac{1}{h-1}$.

προτεραιότητας. Το παραπάνω πρόβλημα γίνεται πιο έντονο σε περίπτωση που αναδρομολογηθεί κίνηση στο δίκτυο.

Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων, η δέσμευση χωρητικότητας για την κίνηση *Premium IP* πάνω από το δίκτυο του GÉANT προτάθηκε να μην υπερβαίνει το 5% με 10% της χωρητικότητας των γραμμών διασύνδεσης.

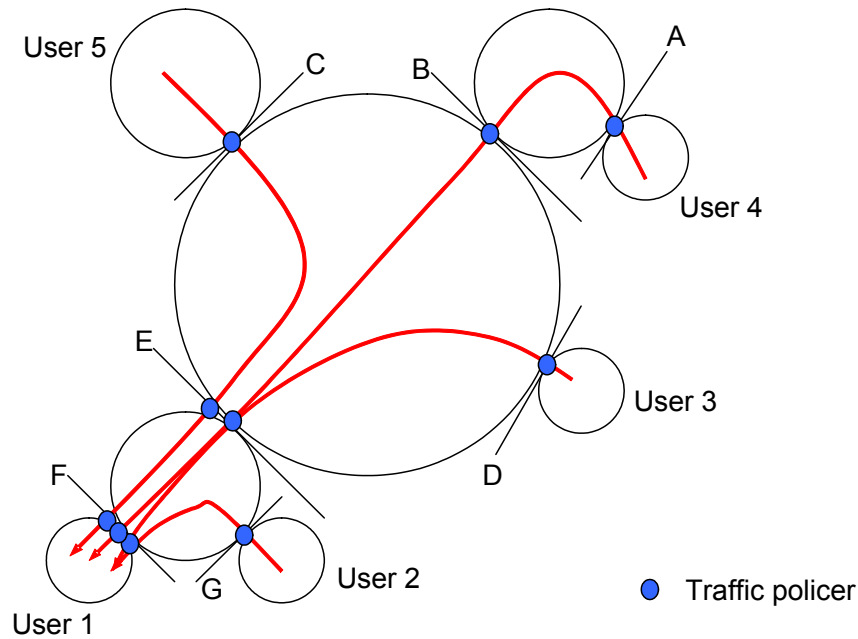
3.2.1.3 Μορφοποίηση και έλεγχος της εισερχόμενης κίνησης *Premium IP*

Η κίνηση *Premium IP* οφείλει να ελέγχεται κατά την είσοδό της σε μια διαχειριστική περιοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 16. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιείται είτε σε επίπεδο ροής είτε σε επίπεδο συνάθροισης ροών και στόχο έχει να αποφευχθεί η εμφάνιση συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης στο εσωτερικό μιας διαχειριστικής εξαιτίας ανεπαρκούς δέσμευσης πόρων.

Ο πρώτος δρομολογητής στο μονοπάτι που ακολουθεί η τυχαία ροή οφείλει να ελέγξει ότι η εισερχόμενη κίνηση συμμορφώνεται με τα χαρακτηριστικά κίνησης (*traffic profile*) που έχουν συμφωνηθεί κατά τη φάση ενεργοποίησης της ροής (βλέπε ενότητα §3.2.2.1). Ο δρομολογητής εφαρμόζει μορφοποίηση (*shaping*) και αστυνόμευση (*policing*) στην εισερχόμενη κίνηση σε επίπεδο ροής ώστε να «απορροφήσει» απότομες μεταβολές στο ρυθμό της κίνησης που εισάγεται στο δίκτυο από την εκάστοτε πηγή. Η «ομαλοποίηση» των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης κίνησης αυξάνει ελάχιστα την καθυστέρηση κατά τη μεταφορά των πακέτων αλλά μειώνει σημαντικά την πιθανότητα να υπερχειλίσουν οι καταχωρητές στις ουρές των δρομολογητών κατά μήκος του από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού. Όσα πακέτα χαρακτηρίζονται «εντός προφίλ» (*in-profile*) προωθούνται από το δρομολογητή αφού προηγουμένως η τιμή *DSCP/IP Precedence* στο πεδίο *Type of Service* στην επικεφαλίδα IP τους λάβει τη δεκαδική τιμή σαράντα έξι (46). Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όσα πακέτα χαρακτηριστούν «εκτός προφίλ» (*out-of-profile*), απορρίπτονται. Επιλεκτικός χρωματισμός (*marking*) των «εκτός προφίλ» πακέτων *Premium IP* σε χαμηλότερη κλάση υπηρεσίας δεν εφαρμόζεται γιατί οδηγεί σε αναδιάταξη της σειράς των πακέτων (*packet reordering*) κατά τη μεταφορά τους μέσα στο δίκτυο¹⁴.

¹⁴ Η αναδιάταξη της σειράς των πακέτων IP (*packet reordering*) μέσα στο δίκτυο προκαλεί προβλήματα σε εφαρμογές που βασίζονται στο πρωτόκολλο μεταφοράς TCP. Η λήψη πακέτων IP εκτός σειράς, δηλαδή όταν ένα πακέτο IP καθυστερήσει να ληφθεί από τον κόμβο προορισμού σε σχέση με πακέτα IP που στάλθηκαν χρονικά αργότερα από το κόμβο αποστολής, έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση μηχανισμών αποφυγής συμφόρησης (*congestion avoidance*) του πρωτοκόλλου TCP. Η λήψη πακέτων εκτός σειράς από το δέκτη TCP και η ανάλογη αποστολή πακέτων επιβεβαίωσης (*acknowledgements - ACKs*) προκαλούν μείωση στο ρυθμό αποστολής δεδομένων καθώς η πηγή TCP ερμηνεύει τη μη λήψη πακέτων επιβεβαίωσης για τα ενδιάμεσα πακέτα ως ένδειξη απώλειας πακέτων στο δίκτυο λόγω συμφόρησης. Το πρόβλημα αναδιάταξης των πακέτων IP είναι λιγότερο σημαντικό για τις ροές που βασίζονται στο πρωτόκολλο μεταφοράς UDP. Στις περισσότερες

Στα όρια των διαχειριστικών περιοχών που διασχίζουν ροές *Premium IP* εφαρμόζεται αστυνόμευση (*policing*) στην εισερχόμενη συναθροισμένη κίνηση (*traffic aggregate*). Περιορισμοί κλιμάκωσης που εμφανίζονται στο δικτυακό υλικό όπως, για παράδειγμα, ο μέγιστος αριθμός μηχανισμών «κάδου με κουπόνι» (*token bucket*) που μπορούν ταυτόχρονα να υποστηριχθούν, επιβάλλουν ο έλεγχος να πραγματοποιείται στη συνολική κίνηση που εισέρχεται μια διαχειριστική περιοχή και όχι ανά ροή. Υπό προϋποθέσεις, για παράδειγμα όταν μικρός αριθμός των εγκατεστημένων από ροές είναι μικρός, ο έλεγχος κίνησης δύναται να πραγματοποιηθεί ανά ροή ή ανά συνάθροιση κίνησης που κατευθύνεται προς συγκεκριμένη διαχειριστική περιοχή.



Σχήμα 16: Σημεία εφαρμογής των ελεγκτών κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών. -

Πολιτική «γνωστής κατεύθυνσης» (*destination aware*) για την υπηρεσία *Premium IP*.

Καμία λειτουργία ελέγχου της κίνησης δεν εφαρμόζεται στους εσωτερικούς και τους ακραίους δρομολογητές εξόδου (*egress routers*) των διαχειριστικών περιοχών που διασχίζει η κίνηση *Premium IP*. Η προώθηση των πακέτων και η κατανομή τους σε διαφορετικές ουρές προτεραιότητας πραγματοποιείται με βάση την τιμή *DSCP/IP Precedence*.

Η υποστήριξη της υπηρεσίας *Premium IP* σε δίκτυα *DiffServ* δεν απαιτεί την ενεργοποίηση πολύπλοκων λειτουργιών QoS στους δρομολογητές του δικτύου. Μικρός αριθμός από μηχανισμούς ελέγχου ενεργοποιούνται στα όρια της κάθε διαχειριστικής περιοχής για τον έλεγχο της μεταφερόμενης κίνησης ενώ η προώθηση των πακέτων από τους δρομολογητές κορμού πραγματοποιείται σύμφωνα με το μοντέλο προώθησης της αρχιτεκτονικής *DiffServ*. Συνεπώς, η

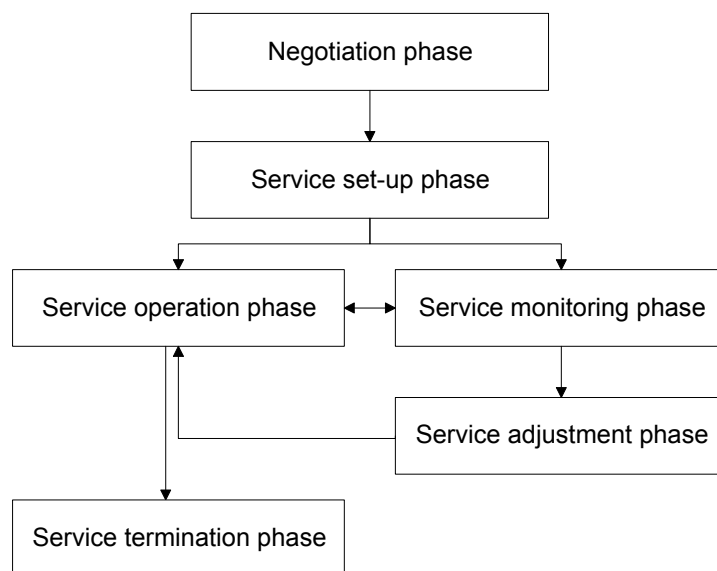
περιπτώσεις, η λήψη ενός καθυστερημένου πακέτου IP προκαλεί την απόρριψη των δεδομένων στο στρώμα μεταφοράς (*transport layer*).

υποστήριξη της υπηρεσίας *Premium IP* από το δικτυακό εξοπλισμό δεν αντιμετωπίζει πολλές δυσκολίες ή περιορισμούς.

3.2.2 Μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP*

Ο σχεδιασμός της υπηρεσίας *Premium IP* δεν προβλέπει τη χρήση σηματοδοσία για τη διαχείριση των μηχανισμών στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*). Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος αποδοχής νέων ροών και η ρύθμιση των ελεγκτών κίνησης θα πρέπει να πραγματοποιηθούν από τους υπεύθυνους διαχειριστές δικτύου. Κατά συνέπεια, η εγκατάσταση και διαχείριση των από άκρο-σε-άκρο συνδέσεων *Premium IP* που εκτείνονται διαμέσου πολλαπλών ανεξάρτητων διαχειριστικών περιοχών απαιτεί τη στενή συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων διαχειριστών δικτύου ώστε να συγκροτηθούν και να δοκιμαστούν οι απαραίτητοι μηχανισμοί QoS κατά μήκος του δικτύου.

Στο έργο SEQUIN προδιαγράψαμε με συστηματικό τρόπο τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν από τη στιγμή που οι τελικοί χρήστες αιτούνται τη χρήση της υπηρεσίας *Premium IP* μέχρι την στιγμή που οι διαχειριστές παραδίδουν προς χρήση ένα «λογικό κύκλωμα» *Premium IP*. Επιπλέον, ορίσαμε αναλυτικά το πλαίσιο επικοινωνίας και αρμοδιοτήτων μεταξύ των τελικών χρηστών και των διαχειριστών στις εμπλεκόμενες διαχειριστικές περιοχές ενώ προτάθηκε η χρήση πρότυπου συμβολαίου ποιότητας υπηρεσίας με στόχο τη συστηματοποίηση των διαδικασιών. Τα παραπάνω ζητήματα εξετάζονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 17: Φάσεις κατά την εγκατάσταση, λειτουργία και τερματισμό μίας σύνδεσης *Premium IP*.

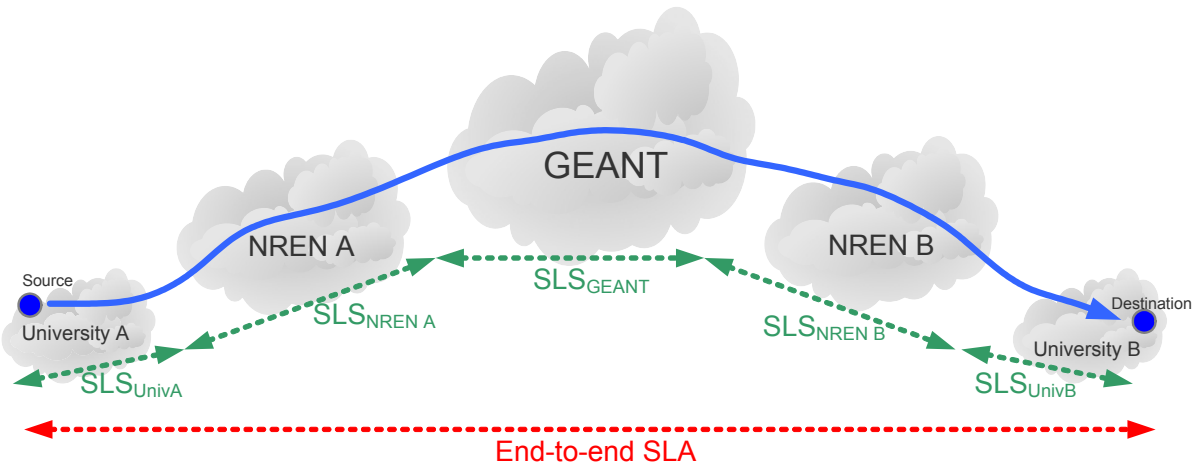
3.2.2.1 Φάσεις ενεργοποίησης συνδέσεων *Premium IP*

Η ενεργοποίηση μίας νέας σύνδεσης *Premium IP* πραγματοποιείται σε διαδοχικές φάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Η **φάση διαπραγμάτευσης (negotiation phase)** περιλαμβάνει τη συλλογή διαχειριστικών πληροφοριών που διευκολύνουν την εγκατάσταση της υπηρεσίας στα επόμενα στάδια. Στη φάση αυτή υποβάλλεται το αίτημα των τελικών χρηστών και εντοπίζονται τα εμπλεκόμενα μέλη, δηλαδή οι χρήστες και οι αρμόδιοι εκπρόσωποι από την κάθε διαχειριστική περιοχή. Επίσης, εξετάζεται η δυνατότητα υποστήριξης της υπηρεσίας από τον εγκατεστημένο δικτυακό εξοπλισμό και επιβεβαιώνεται η επάρκεια των διαθέσιμων δικτυακών πόρων. Στη φάση αυτή οριστικοποιούνται, επίσης, πλήθος λεπτομερειών στο συμβόλαιο ποιότητας όπως, για παράδειγμα, προσδιορίζεται το χρονικό παράθυρο κατά το οποίο παρέχεται η υπηρεσία, καθορίζονται οι προβλεπόμενες εγγυήσεις ποιότητας για τη μεταφερόμενη κίνηση κ.α..

Κατά τη **φάση ενεργοποίησης της υπηρεσίας (service set-up phase)** οριστικοποιούνται όλες οι τεχνικές και διαχειριστικές λεπτομέρειες που αφορούν την παροχή της υπηρεσίας. Το σύνολο των στοιχείων αποτυπώνονται στην *Σύμβαση Διασφάλισης Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσιών - ΣΔΕΠΥ (Service Level Agreement – SLA)*. Η σύμβαση SLA περιλαμβάνει αναλυτικά τις εγγυήσεις ποιότητας που παρέχει ο Πάροχος, οι οποίες περιγράφονται με χρήση τεχνικών όρων στην *Προδιαγραφή Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας - ΠΕΠΥ (Service Level Specification – SLS)*. Για κάθε σύμβαση SLA, περιλαμβάνονται μία ή περισσότερες προδιαγραφές SLS, ανάλογα με τον αριθμό των διαχειριστικών περιοχών που διασχίζει η υπό εγκατάσταση σύνδεση *Premium IP*. Η σύμβαση SLA υπογράφεται από τους τελικούς χρήστες και τους Παρόχους Υπηρεσιών και αποτελεί την επίσημη περιγραφή της υπηρεσίας. Επίσης, στη φάση εγκατάστασης μεταβάλλεται η συγκρότηση των δρομολογητών κορμού ώστε να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν το υπό εξυπηρέτηση αίτημα.

Κατά τη **φάση λειτουργίας της υπηρεσίας (service operation phase)**, ο τελικός χρήστης είναι ελεύθερος να εισάγει κίνηση *Premium IP* στο δίκτυο ενώ δεν πραγματοποιείται κάποια συγκεκριμένη ενέργεια από το Πάροχο. Παράλληλα με τη φάση λειτουργίας της υπηρεσίας, **η φάση παρακολούθησης (monitoring phase)** περιλαμβάνει τη συλλογή μετρήσεων που αποτιμούν το επίπεδο των παρεχόμενων υπηρεσιών. Σε περίπτωση που οι παρεχόμενες υπηρεσίες αποκλίνουν από τους όρους που περιλαμβάνονται στη σύμβαση SLA, ο Πάροχος πρέπει να λάβει τα κατάλληλα μέτρα για την αποκατάσταση της υπηρεσίας. Τότε ξεκινά η **φάση προσαρμογής της υπηρεσίας (service adjustment phase)** κατά την οποία πραγματοποιούνται οι απαραίτητες αλλαγές στη συγκρότηση των δρομολογητών και «αρχικοποιούνται» εκ νέου οι φάσεις λειτουργίας και παρακολούθησης της υπηρεσίας. Τέλος, η **φάση τερματισμού της υπηρεσίας (service termination phase)** ξεκινά όταν εκπνεύσει το διάστημα παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* και περιλαμβάνει την απομάκρυνση της συγκρότησης QoS από τους δρομολογητές, π.χ. απενεργοποίηση των ελεγκτών κίνησης.

Ένα τυπικό παράδειγμα καθορισμού μίας σύμβασης SLA για την υπηρεσία *Premium IP* μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών και του δικτύου GÉANT παρουσιάζεται στην Σχήμα 18. Η από άκρο-σε-άκρο σύμβαση SLA περιλαμβάνει διαδοχικές προδιαγραφές SLS, έκαστη από τις οποίες προσδιορίζει τις εγγυήσεις που προσφέρονται στα όρια της κάθε ενδιάμεσης διαχειριστικής περιοχής¹⁵.



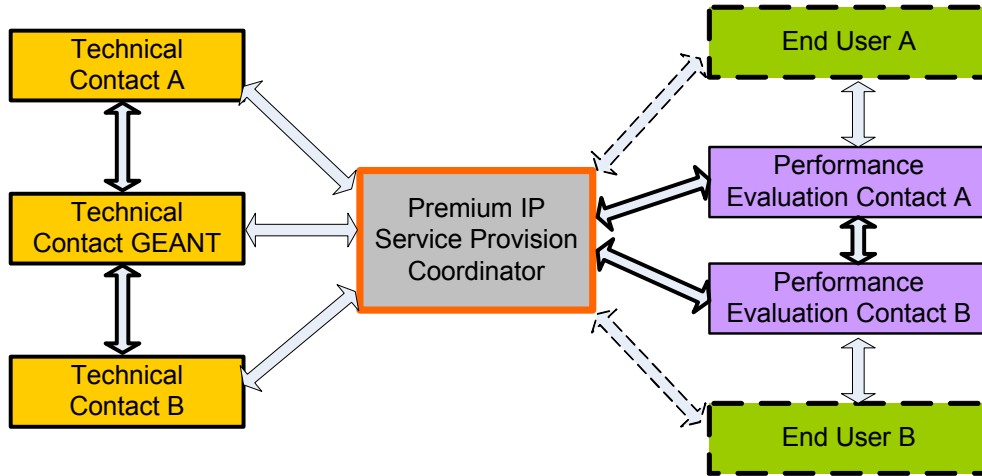
Σχήμα 18: Από άκρο-σε-άκρο σύμβαση SLA πάνω από το δίκτυο GÉANT/NRENs.

3.2.2.2 Ρόλοι μεταξύ συντονιστών

Η παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* μεταξύ δύο τελικών χρηστών σε διαφορετικές χώρες απαιτεί τη συνεργασία πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 18. Για λόγους συντονισμού, το μοντέλο για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* που περιγράψαμε στο SEQUIN [LMBS04] προδιαγράφει αναλυτικά τους ρόλους που πρέπει να έχουν οι αντιπρόσωποι από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη, π.χ. διαχειριστές δικτύου από το GÉANT, τα NRENs ή τα πανεπιστημιακά δίκτυα. Ο *Συντονιστής για την Παροχή της Υπηρεσίας (Service Provisioning Coordinator - SPC)* αποτελεί το κεντρικό σημείο επικοινωνίας μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων μερών και είναι υπεύθυνος για το συντονισμό κατά τη φάση εγκατάστασης και λειτουργίας της υπηρεσίας. Ο Συντονιστής *SPC*, μεταξύ άλλων, ασχολείται με τη διανομή των απαραίτητων πληροφοριών σχετικά με την υπηρεσίας *Premium IP* στους ενδιαφερόμενους φορείς και συγκεντρώνει τα απαραίτητα στοιχεία από τις εμπλεκόμενες διαχειριστικές περιοχές για τη σύνταξη της σύμβασης SLA. Ο Συντονιστής *SPC* υποστηρίζεται από *Τεχνικούς Αντιπροσώπους (Technical Contacts - TC)* που προέρχονται από την κάθε εμπλεκόμενη διαχειριστική περιοχή και χειρίζονται τις τεχνικές λεπτομέρειες κατά την εγκατάσταση των υπηρεσιών *Premium IP*. Επιπλέον, οι *Αντιπρόσωποι Εκτίμησης Ποιότητας (Performance Evaluation Contacts - PEC)* ελέγχουν το επίπεδο των παρεχομένων υπηρεσιών σε

¹⁵ Η από άκρο-σε-άκρο σύμβαση SLA μπορεί επίσης να προκύψει από την «συνένωση» διαδοχικών συμβάσεων SLA, οι οποίες ορίζονται στα όρια της κάθε ενδιάμεσης διαχειριστικής περιοχής.

κάθε διαχειριστική περιοχή και ενημερώνουν το Συντονιστή για τυχόν προβλήματα. Το μοντέλο συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών εμφανίζεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Μοντέλο συνεργασίας κατά την εγκατάσταση υπηρεσιών *Premium IP* μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών.

3.2.2.3 Σύμβαση Διασφάλισης Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας *Premium IP*

Η Σύμβαση Διασφάλισης Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσιών - ΣΔΕΠΥ (*Service Level Agreement – SLA*) για την υπηρεσία *Premium IP* μεταξύ GÉANT και NRENs συντίθεται από δύο ξεχωριστές ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει διαχειριστικές πληροφορίες ενώ η δεύτερη ενότητα προσδιορίζει τις εγγυήσεις απόδοσης που παρέχει το δίκτυο GÉANT. Η δεύτερη ενότητα, η οποία αποκαλείται Προδιαγραφή Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας - ΠΕΠΥ (*Service Level Specification – SLS*), περιέχει όλες τις τεχνικές πληροφορίες που επιτρέπουν την εκτίμηση των παρεχομένων υπηρεσιών από το Πάροχο στα όρια της διαχειριστικής του περιοχής και την επιβεβαίωσή τους από το Συνδρομητή.

Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο διαχειριστικό τμήμα μίας σύμβασης SLA είναι οι ακόλουθες:

- **Υπεύθυνοι επικοινωνίας για διαχειριστικά / τεχνικά ζητήματα (*administrative/technical parties*):** Περιλαμβάνει τα στοιχεία επικοινωνίας των υπευθύνων από τα εμπλεκόμενα μέρη επιφορτισμένων με την επίλυση διαχειριστικών και τεχνικών ζητημάτων.
- **Διάρκεια παροχής της υπηρεσίας (*duration*):** Ορίζει τη χρονική περίοδο κατά την οποία θα παρέχεται η υπηρεσία.
- **Εγγυήσεις διαθεσιμότητας (*availability guarantees*):** Περιλαμβάνει τη μέθοδο μετρήσεων και τον τρόπο υπολογισμού των μετρικών διαθεσιμότητας.

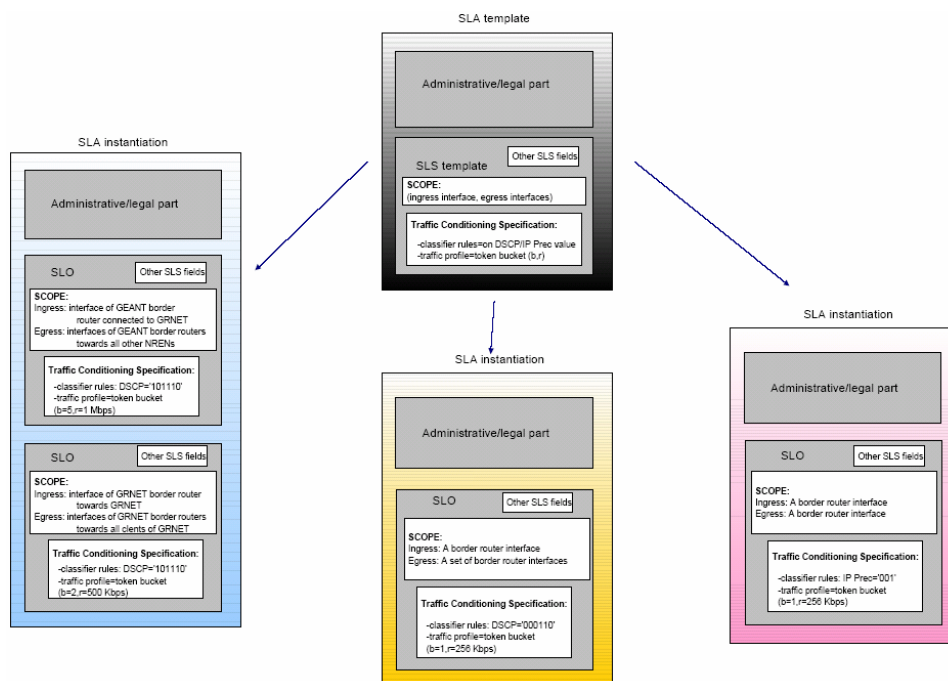
- **Μέθοδος παρακολούθησης (*monitoring*):** Περιγράφει πληροφορίες για τη μέθοδο και τη συχνότητα επιβεβαίωσης των παρεχομένων εγγυήσεων, τα σημεία παρακολούθησης των υπηρεσιών καθώς και τα στοιχεία που θα λαμβάνει ο Συνδρομητής.
- **Χρόνος απόκρισης (*response time*):** Ορίζει το χρόνο απόκρισης του Παρόχου Υπηρεσιών κατόπιν αιτήματος του Συνδρομητή για αλλαγή της ισχύοντος σύμβασης SLA.
- **Χειρισμός λαθών (*fault handling*):** Καθορίζει τις ενέργειες που θα εκτελέσει ο Πάροχος Υπηρεσιών σε περίπτωση παραβίασης των εγγυήσεων ποιότητας.
- **Ποιότητα τεχνικής υποστήριξης (*Quality and performance of support & helpdesk*):** Περιλαμβάνει πληροφορίες για την υποδομή του Παρόχου Υπηρεσιών ώστε να παρέχει υπηρεσίες στους Συνδρομητές του.
- **Κόστος (*pricing*):** Καθορίζει το κόστος για την παροχή της υπηρεσίας προς το Συνδρομητή.
- **Περιγραφή της υπηρεσίας (*description of the service*):** Περιλαμβάνει σύντομη περιγραφή της παρεχομένης υπηρεσίας χωρίς τη χρήση τεχνικών όρων.

Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στη *Προδιαγραφή Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας (Service Level Specifications)* είναι οι ακόλουθες:

- **Πεδίο εφαρμογής (*scope*):** Ορίζει το τμήμα του δικτύου στο οποίο θα προσφέρονται οι εγγυήσεις που περιέχονται στην προδιαγραφή SLS και καθορίζει με ακρίβεια τα σημεία εισόδου/εξόδου της κίνησης από τη διαχειριστική περιοχή του Παρόχου Υπηρεσιών.
- **Περιγραφή της ροής (*flow description*):** Καθορίζει με ακρίβεια τα πακέτα που προβλέπεται να λάβουν τις υπηρεσίες που περιγράφονται στη σύμβαση, συνήθως με τον καθορισμό συγκεκριμένης τιμής DSCP στην επικεφαλίδα IP.
- **Εγγυήσεις απόδοσης (*performance guarantees*):** Περιλαμβάνει τις εγγυήσεις απόδοσης κατά την μεταφορά της *Premium IP* κίνησης.
- **Μέγιστη μονάδα μεταφοράς (*maximum transmission unit - MTU*):** Ορίζει το μέγεθος της μεταβλητής MTU, σύμφωνα με την οποία ρυθμίζονται οι ελεγκτές κίνησης.
- **Προδιαγραφές και συμμόρφωση κίνησης (*traffic envelope and traffic conformance*):** Περιγράφει τα χαρακτηριστικά της κίνησης, π.χ. το μέσο ρυθμό και την εκρηκτικότητα, και

καθορίζει τον αλγόριθμο με τον οποίο θα χαρακτηρίζονται τα πακέτα «εντός προφίλ» (*in-profile*).

- **Χειρισμός πλεονάζουσας κίνησης (*excess treatment*):** Καθορίζει το χειρισμό της πλεονάζουσας κίνησης, π.χ. αν θα απορριφθεί στα σημεία ελέγχου ή αν θα χρωματιστεί σε κίνηση κατώτερης προτεραιότητας.
- **Χρονοδιάγραμμα της υπηρεσίας (*service schedule*):** Ορίζει την αρχή και το τέλος της υπηρεσίας.
- **Αξιοπιστία (*reliability*):** Ορίζει την επιτρεπτή μέση διάρκεια χωρίς την παροχή της υπηρεσία ανά έτος (*mean downtime per year - MDT*) και το μέγιστο επιτρεπτό διάστημα για αποκατάσταση της υπηρεσίας (*maximum allowed time to repair - TTR*) σε περίπτωση που εμφανιστεί πρόβλημα στην παροχή της.
- **Μετρικές απόδοσης ορατές στο Χρήστη (*User visible metrics*):** Καθορίζει τις μετρικές απόδοσης που θα είναι ορατές στο Συνδρομητή ώστε να μπορεί να παρακολουθεί τις υπηρεσίες που λαμβάνει.



Σχήμα 20: Παραδείγματα συμβάσεων SLAs για την χρήση της υπηρεσίας *Premium IP*.

3.3 Παρακολούθηση ποιότητας υπηρεσίας

Ο κάθε Πάροχος που προσφέρει υπηρεσίες ποιότητας στους συνδρομητές του οφείλει να παρακολουθεί συνεχώς τις εγγυήσεις απόδοσης κατά τη μεταφορά της κίνησης και να επιβεβαιώνει

ότι δεν παραβιάζονται οι όροι που περιλαμβάνονται στις ισχύουσες συμβάσεις SLA. Σε περίπτωση που ο Πάροχος παρατηρήσει ή ειδοποιηθεί για υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών, οφείλει να εντοπίσει άμεσα το τμήμα του δικτύου στο οποίο παρουσιάζεται «δυσλειτουργία» και να αντιμετωπίσει την αιτία ή να αποκαταστήσει τη βλάβη που την προκαλεί. Επιπλέον, ο Πάροχος μπορεί να επιθυμεί να διαφημίζει πληροφορίες για τις παρεχόμενες υπηρεσίες και τις εγγυήσεις απόδοσης στο δίκτυο ευθύνης του ώστε οι συνδρομητές να γνωρίζουν εκ των προτέρων τις εγγυήσεις που μπορούν να αιτηθούν με σχετική ακρίβεια. Η ύπαρξη **υποδομής παρακολούθησης (*monitoring infrastructure*)** που καταγράφει συνεχώς την κατάσταση του δικτύου μπορεί να βοηθήσει στο να ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις.

3.3.1 Μετρικές απόδοσης

Η προδιαγραφή SLS που συμπεριλαμβάνεται σε κάθε σύμβαση SLA περιέχει μετρικές απόδοσης της δικτυακής υποδομής και των εγγυήσεων που προσφέρονται κατά τη μεταφορά δεδομένων. Οι μετρικές απόδοσης αφορούν συνήθως το στρώμα δικτύου (*network layer*), δηλαδή μετρικών που εκτιμούν την αξιοπιστία και την ταχύτητα κατά την μεταφορά πακέτων IP. Δεν αποκλείεται, όμως, οι προδιαγραφές SLS να περιλαμβάνουν μετρικές στο στρώμα μεταφοράς (*transport layer*) ή στο στρώμα εφαρμογής (*application layer*), π.χ. μετρικές που εκτιμούν κατά πόσο μια εφαρμογή μπορεί λειτουργήσει αποδοτικά πάνω από το δίκτυο.

Για την υπηρεσία υψηλής προτεραιότητας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs, προτάθηκαν οι παρακάτω μετρικές απόδοσης στο στρώμα δικτύου (*network layer*) για την εκτίμηση των παρεχομένων υπηρεσιών:

- **Εύρος Ζώνης (*bandwidth*):** Περιγράφει τη δυνατότητα του συνδρομητή να μεταφέρει δεδομένα στη μονάδα του χρόνου. Η τιμή της μετρικής επηρεάζεται από τη χωρητικότητα (*capacity*) των γραμμών διασύνδεσης, το εύρος ζώνης που έχει «δεσμευτεί» σε κάθε γραμμή διασύνδεσης, τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού των ουρών (*queue scheduling*) στους δρομολογητές, τους μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης στις ουρές των δρομολογητών, τις δυνατότητες μεταγωγής πακέτων από το υλικό, κλπ. Οι αποδεκτές τιμές της μετρικής είναι θετικές και η μονάδα μέτρησης είναι ο ρυθμός πληροφοριών (*bits per second - bps*).
- **Απώλεια πακέτων (*packet loss*):** Αποτιμά το ποσοστό των πακέτων IP που χάθηκαν κατά την μεταφορά τους πάνω από το δίκτυο σε σύγκριση με τον συνολικό αριθμό πακέτων που στάλθηκαν. Η απώλεια πακέτων οφείλεται σε εξάντληση των καταχωρητών στις ουρές (*buffer exhaustion*), τους μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης (*congestion control*), λάθη κατά την μετάδοση (*transmission errors*), προβλήματα δρομολόγησης, κλπ. Ένα πακέτο IP από τον *κόμβο Πηγή* προς τον *κόμβο Προορισμού* θεωρείται χαμένο αν δεν παραδοθεί μέσα σε

συγκεκριμένο χρονικό διάστημα [AKZ99b]. Οι αποδεκτές τιμές της μετρικής είναι πάντοτε μη αρνητικές και δεν ακολουθούνται από μονάδα μέτρησης.

- **Καθυστέρηση προς τη μια κατεύθυνση (*one-way delay - OWD*):** Ορίζει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη μετάδοση του πρώτου *bit* ενός πακέτου IP από τον *κόμβο Πηγή* μέχρι τη λήψη του τελευταίου *bit* στον *κόμβο Προορισμού* [AKZ99a]. Η τιμή της καθυστέρησης *OWD* επηρεάζεται από την καθυστέρηση στις ουρές (*queuing delay*), το χρόνο μετάδοσης (*transmission delay*), το χρόνο διάδοσης (*propagation delay*) στο φυσικό μέσο και το χρόνο μεταγωγής (*switching delay*). Οι αποδεκτές τιμές της μετρικής είναι θετικές και η μονάδα μέτρησης είναι το δευτερόλεπτο (*second*).
- **Μεταβλητότητα καθυστέρησης μεταξύ πακέτων (*inter-packet delay variation - jitter*):** Περιγράφει τη αυξομείωση στην καθυστέρηση *one-way delay* που εμφανίζουν τα πακέτα μια ροής [RFC 3393] εξαιτίας της στατιστικής πολυπλεξίας της κίνησης και των μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού στις ουρές των δρομολογητών. Οι αποδεκτές τιμές της μετρικής είναι είτε αρνητικές είτε θετικές και η μονάδα μέτρησης είναι το δευτερόλεπτο (*second*).

3.3.2 Ζητήματα σχετικά με την παρακολούθηση υπηρεσιών

Ο Πάροχος που σχεδιάζει μια υποδομή παρακολούθησης (*monitoring infrastructure*) καλείται να λάβει σημαντικές αποφάσεις σχετικά με το εύρος του πεδίου μετρήσεων (*monitoring scope*), τη μεθοδολογία για την εκτέλεση των μετρήσεων, την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την επιλογή των εργαλείων για την εκτέλεση των μετρήσεων, τη διαδικασία διαχείρισης και δημοσίευσης των δεδομένων κ.α. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται μερικά από το σημαντικότερα ζητήματα [LMBS04].

3.3.2.1 Μέθοδοι παρακολούθησης

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την εκτίμηση των εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας που παρέχει ένα δίκτυο, η *ενεργητική παρακολούθηση (active monitoring)* και η *παθητική παρακολούθηση (passive monitoring)*.

Κατά την ενεργητική παρακολούθηση, συνθετική κίνηση εισάγεται στο δίκτυο από τους κόμβους παρακολούθησης (*monitoring nodes*). Η συνθετική κίνηση μοιράζεται τους κοινούς πόρους στο δίκτυο με την πραγματική κίνηση και επομένως αντιμετωπίζει τις ίδιες συνθήκες συμφόρησης στις ουρές των δρομολογητών ή σφάλματα στις γραμμές διασύνδεσης. Η παρατήρηση, λοιπόν, των υπηρεσιών προς τη συνθετική κίνηση αποτελεί εκτίμηση για τις υπηρεσίες που απολαμβάνει η πραγματική κίνηση. Όσο αυξάνει η ποσότητα της συνθετικής κίνησης που εισάγεται στο δίκτυο, τόσο

βελτιώνεται¹⁶ η ακρίβεια των μετρήσεων αλλά αναλογικά αυξάνει και η επιβάρυνση του δικτύου. Η ενεργητική παρακολούθηση χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στα δίκτυα παραγωγής καθώς επιτρέπει την επανάληψη των εκτελούμενων δοκιμών ποιότητας. Η χρήση μεθόδων ενεργητικής παρακολούθησης όμως απαιτεί την κατάλληλη επιλογή των χαρακτηριστικών της συνθετικής κίνησης ώστε να είναι αξιόπιστη η εκτίμηση των υπηρεσιών για την πραγματική κίνηση υπό παρακολούθηση.

Η παθητική παρακολούθηση περιλαμβάνει τη συλλογή στοιχείων που προέρχονται από την πραγματική κίνηση που διατρέχει ένα δίκτυο. Καθώς η κίνηση περνάει από τους κόμβους παρακολούθησης, συλλέγονται στοιχεία από τις επικεφαλίδες των πακέτων IP. Τα στοιχεία συγκεντρώνονται και αναλύονται σε κεντρικούς εξυπηρετητές, οι οποίοι, αφού τα διασταυρώσουν, αναγνωρίζουν τα σημεία παρακολούθησης που διέσχισε το κάθε πακέτο κίνησης. Η παθητική παρακολούθηση προϋποθέτει ακριβή συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης ενώ είναι αδύνατη η επανάληψη των μετρήσεων. Παρόλο η μέθοδος παθητικής παρακολούθησης δεν εισάγει συνθετική κίνηση στο δίκτυο, η αποστολή των συλλεγμένων στοιχείων από τους κόμβους παρακολούθησης προς τους κεντρικούς εξυπηρετητές μπορεί να επιβαρύνει σημαντικά τη χρησιμοποίηση των γραμμών διασύνδεσης.

Η παρακολούθηση της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs προτείναμε να πραγματοποιηθεί με την εκτέλεση ενεργών μετρήσεων και τη χρήση εργαλείων ανοικτού κώδικα, π.χ. *RUDE/CRUDE* [Rude]. Ο ρυθμός αποστολής πακέτων παρακολούθησης για κάθε εγκατεστημένη σύνδεση *Premium IP* προτάθηκε να είναι ένα πακέτο το δευτερόλεπτο ανά ένα *Mbps* ρυθμού μεταφερόμενης κίνησης. Η συνθετική κίνηση μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης προβλέφθηκε να είναι μεταβλητού ρυθμού και να περιλαμβάνει τη χρήση άνισου μεγέθους πακέτων για την ταυτόχρονη εκτίμηση του βαθμού αναδιάταξης της σειράς των πακέτων IP (*packet reordering*)¹⁷.

3.3.2.2 Εύρος του πεδίου μετρήσεων (*monitoring scope*)

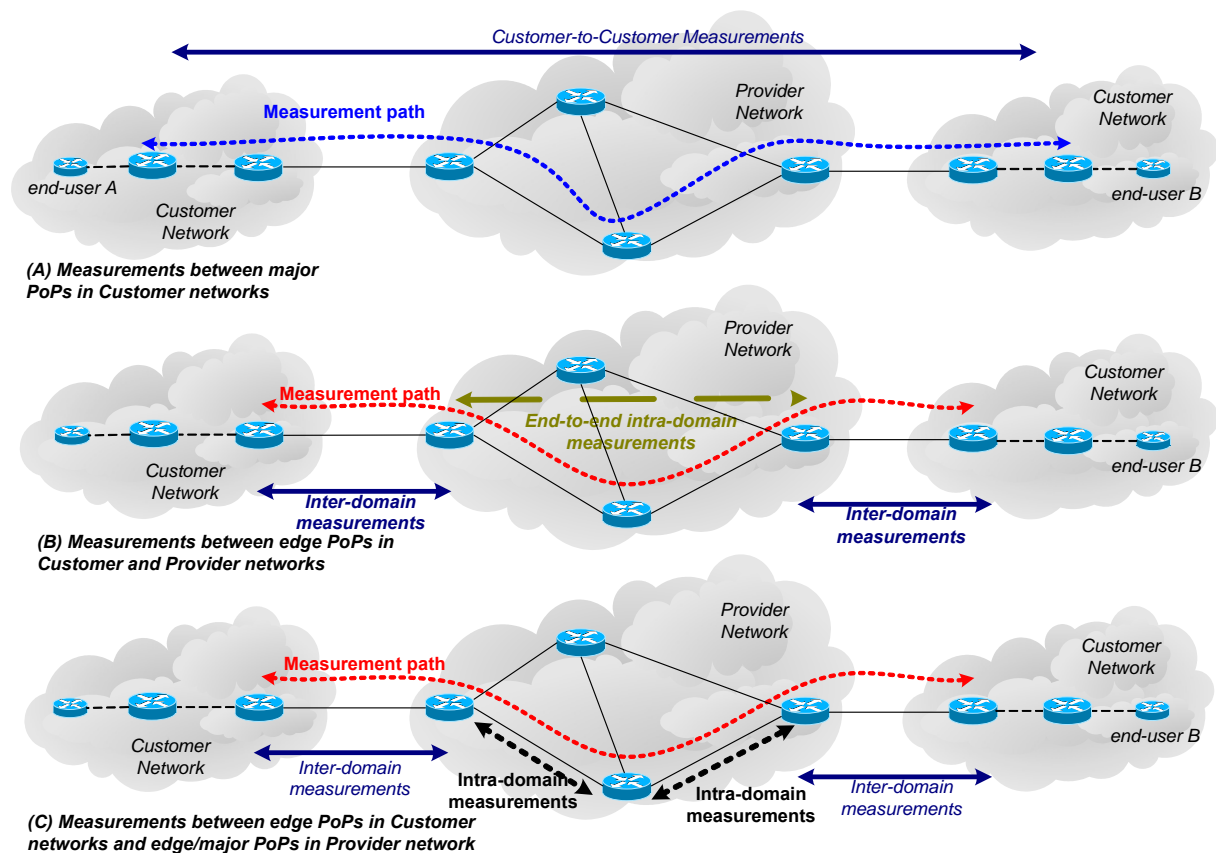
Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες της υποδομής παρακολούθησης είναι ο εντοπισμός της περιοχής του δικτύου στο οποίο παραβιάζονται οι εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Για το λόγο αυτό ο

¹⁶ Η αύξηση της συνθετικής κίνησης βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων καθώς λαμβάνονται περισσότερα δείγματα. Σε αρκετές περιπτώσεις, όμως, η ακρίβεια στις μετρήσεις εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους εκτός από τον αριθμό των συλλεγμένων δειγμάτων, όπως για παράδειγμα την ακρίβεια συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης.

¹⁷ Λόγω της εσωτερικής αρχιτεκτονικής των δρομολογητών κορμού του GÉANT και των μεθόδων διαμοίρασης των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, π.χ. *processor sharing*, ευνοείται η μεταγωγή πακέτων IP μικρού μεγέθους με αποτέλεσμα να παρατηρείται αναδιάταξη στη σειρά των πακέτων (*packet reordering*) μιας τυχαίας ροής.

Πάροχος Υπηρεσιών οφείλει να επιλέξει με ιδιαίτερη προσοχή τα σημεία που θα εγκατασταθούν οι κόμβοι παρακολούθησης. Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται μια τυπική τοπολογία δικτύου με τρεις διαχειριστικές περιοχές τις οποίες διασχίζει μια από άκρο-σε-άκρο ροή. Μελετήσαμε τρεις διαφορετικές μεθόδους για την κατανομή των κόμβων παρακολούθησης μέσα στις διαχειριστικές περιοχές:

1. Οι κόμβοι παρακολούθησης εγκαθίστανται σε κεντρικό σημείο παρουσίας (*point of presence – PoP*) της διαχειριστικής περιοχής του συνδρομητή (Σχήμα 21(a)). Η κατανομή αυτή διευκολύνει την εκτίμηση των από άκρο-σε-άκρο εγγυήσεων καθώς οι κόμβοι παρακολούθησης εγκαθίστανται κοντά στα τελικά συστήματα των χρηστών. Σε περίπτωση προβλήματος κατά την παροχή ποιότητας υπηρεσίας, όμως, δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός της διαχειριστικής περιοχής στην οποία παραβιάζονται οι παρεχόμενες εγγυήσεις μεταφοράς. Ο συνολικός αριθμός εκτελούμενων μετρήσεων για n διαχειριστικές περιοχές είναι ανάλογος του $O(n^2)$ καθώς η προσθήκη του n -στου κόμβου παρακολούθησης απαιτεί την εγκατάσταση $n-1$ επιπλέον συνδέσεων με τους υπόλοιπους κόμβους. Η παραπάνω μέθοδος κατανομής των κόμβων παρακολούθησης έχει υιοθετηθεί από το *Réseaux IP Européens Network Coordination Centre Network Coordination Center (RIPE NCC)* [RIPE] για την παροχή της υπηρεσίας παρακολούθησης *Test traffic Measurements (TTM)* [RIPEb].



Σχήμα 21: Εύρος πεδίου μετρήσεων μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών.

2. Οι κόμβοι παρακολούθησης εγκαθίστανται δίπλα στους ακραίους δρομολογητές της κάθε διαχειριστικής περιοχής (Σχήμα 21(b)). Η κατανομή των κόμβων επιτρέπει τη μέτρηση των εγγυήσεων ποιότητας στα όρια της κάθε διαχειριστικής περιοχής καθώς και στις γραμμές διασύνδεσης μεταξύ δύο γειτονικών περιοχών. Ο αριθμός των μετρήσεων αυξάνει αναλογικά με τον αριθμό των συνδεδεμένων δικτύων ενώ, σε περίπτωση προβλήματος, είναι δύσκολος ο εντοπισμός του σημείου που παραβιάζονται οι υπηρεσίες μέσα στη διαχειριστική περιοχή.
3. Οι κόμβοι παρακολούθησης εγκαθίστανται στα όρια των διαχειριστικών περιοχών, αντίστοιχα με την προηγούμενη κατανομή, αλλά επιπλέον κόμβοι τοποθετούνται στο εσωτερικό της διαχειριστικής περιοχής του Παρόχου Υπηρεσιών (Σχήμα 21(c)). Ο προσδιορισμός των από άκρο-σε-άκρο εγγυήσεων στα όρια του δικτύου του Παρόχου προϋποθέτει το συνδυασμό μετρήσεων που συλλέγονται από τους ενδιάμεσους κόμβους παρακολούθησης. Η παρούσα κατανομή απαιτεί την εγκατάσταση μεγαλύτερου αριθμού κόμβων στο δίκτυο σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Επομένως, παρουσιάζει αυξημένο κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας της υποδομής παρακολούθησης σε δίκτυα με πολλαπλά σημεία παρουσίας (*PoPs*). Πλεονέκτημα της, όμως, είναι ότι επιτρέπει τον εύκολο εντοπισμό του σημείου του δικτύου που υποβαθμίζεται η ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών.

Ο σχεδιασμός για την ανάπτυξη της υποδομής παρακολούθησης για την υπηρεσία *Premium IP* στο δίκτυο GÉANT προβλέπει την υιοθέτηση του τρίτου μοντέλου κατανομής των κόμβων παρακολούθησης (Σχήμα 21(c)). Με τον τρόπο αυτό θα είναι εφικτή η παρακολούθηση των παρεχομένων υπηρεσιών στα όρια του δικτύου GÉANT καθώς και των γραμμών πρόσβασης των συνδεδεμένων NRENs.

3.3.2.3 Επεξεργασία και διάθεση δεδομένων

Η επεξεργασία των «ακατέργαστων» δεδομένων που συλλέγονται από πολλαπλές μετρήσεις μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης είναι απαραίτητη για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών. Μόνο τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιβεβαίωση των εγγυήσεων που περιγράφονται στα συμβόλαια SLA. Για παράδειγμα, η εκτίμηση της καθυστέρησης σε ένα τυχαίο μονοπάτι μέσα στο δίκτυο προκύπτει από τη συσχέτιση των μετρήσεων καθυστέρησης στις γραμμές διασύνδεσης που συνθέτουν το συγκεκριμένο μονοπάτι. Ο περαιτέρω υπολογισμός στατιστικών μεγεθών, π.χ. ο υπολογισμός της μέσης τιμής στα δείγματα που συλλέχθηκαν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, επιτρέπει την εξαγωγή μετρικών ποιότητας που περιλαμβάνονται στα ισχύοντα συμβόλαια SLA.

Μπορούν να εφαρμοστούν τρεις διαφορετικοί μέθοδοι για να συνδυαστούν μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε ανεξάρτητα τμήματα του δικτύου:

- **Συνάθροιση στο χρόνο (*aggregation in time*):** Ο υπολογισμός στατιστικών μετρικών σε κάποιο ορισμένο διάστημα μέτρησης, όπως για παράδειγμα η μέση καθυστέρηση ανά ώρα μεταξύ δύο κόμβων παρακολούθησης, επιτρέπει το «χαρακτηρισμό» των παρεχομένων υπηρεσιών απόδοσης του δικτύου με μία μοναδική τιμή. Η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως για τη μείωση του αποθηκευτικού χώρου που καταλαμβάνουν τα συλλεγμένα δεδομένα αλλά τα δεδομένα που διατηρούνται παρέχουν μειωμένη εικόνα για την κατάσταση του δικτύου. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της μέση καθυστέρησης μεταξύ δύο κόμβων σε χρονικό διάστημα μίας ημέρας δεν παρέχει πληροφορίες για την διακύμανση της καθυστέρησης ανά χρονικά διαστήματα μίας ώρας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως από διαχειριστικά εργαλεία που δημιουργούν δυναμικά διαγράμματα, π.χ. τα διαγράμματα MRTG [MRTG], τα οποία παρουσιάζουν συνοπτικά δεδομένα από μετρήσεις σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, π.χ. τον μέσο βαθμό χρησιμοποίησης στις γραμμές διασύνδεσης ανά ώρα, εβδομάδα, μήνα, έτος κλπ.
- **Συνάθροιση στο χώρο (*aggregation in space*):** Η μέθοδος επιστέφει μετρικές που χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός δικτύου συνδυάζοντας μετρήσεις που εκτελούνται σε επιμέρους τμήματά του. Η συνάθροιση στο χώρο επιτρέπει τη γενική περιγραφή της κατάστασης του δικτύου με μία μοναδική τιμή. Για παράδειγμα, η μέγιστη μέση καθυστέρηση που αναμένεται να συναντήσει κίνηση που διασχίζει μία διαχειριστική περιοχή προσδιορίζεται μετρώντας την μέση καθυστέρηση σε κάθε πιθανό μονοπάτι του δικτύου και επιλέγοντας την μέγιστη μετρούμενη τιμή. Η «συνάθροιση» των αποτελεσμάτων προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλης συνάρτησης για την επεξεργασία των δεδομένων, όπως προκύπτει και από το προηγούμενο παράδειγμα. Σε αρκετές περιπτώσεις η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης συνάθροισης είναι πολύπλοκη. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της μέσης πιθανότητας απώλειας πακέτων σε ένα δίκτυο απαιτεί τη γνώση της πιθανότητας απώλειας πακέτων σε κάθε γραμμή διασύνδεσης καθώς και των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους, όπως η χωρητικότητά και ο βαθμός χρησιμοποίησής τους. Η μέθοδος συνάθροισης στο χώρο εφαρμόζεται ευρέως από διαχειριστικές πλατφόρμες που εμφανίζουν με γραφικό τρόπο τη συνολική λειτουργική κατάσταση του δικτύου συλλέγοντας στοιχεία που σχετίζονται με τη λειτουργική κατάσταση του εγκατεστημένου δικτυακού εξοπλισμού.
- **Σύνδεση κατά σειρά στο χώρο (*concatenate in space*):** Μετρικές που χαρακτηρίζουν τις εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης σε ένα μονοπάτι του δικτύου μπορούν να προκύψουν από συνδυασμό μετρικών που περιγράφουν αντίστοιχες εγγυήσεις στην κάθε γραμμή διασύνδεσης που περιλαμβάνεται στο υπό εξέταση μονοπάτι. Η μέθοδος σύνδεσης κατά σειρά στο χώρο συνήθως προϋποθέτει την εφαρμογή του τελεστή «πρόσθεσης» για τις επιμέρους μετρικές. Για παράδειγμα, η μέση καθυστέρηση (*one-way delay*) σε ένα μονοπάτι προκύπτει από το άθροισμα των μέσων τιμών καθυστέρησης στις γραμμές διασύνδεσης που

συνθέτουν το μονοπάτι. Ο τελεστής «πρόσθεσης» δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετές μετρικές ποιότητας, όπως για παράδειγμα για τη μετρική που περιγράφει τη διαθέσιμη χωρητικότητα σε ένα μονοπάτι. Σε αυτή την περίπτωση, η διαθέσιμη χωρητικότητα ισούται με την ελάχιστη διαθέσιμη χωρητικότητα από όλες τις γραμμές διασύνδεσης. Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εφαρμογή οποιουδήποτε τελεστή είναι αδύνατη, π.χ. είναι αδύνατος ο υπολογισμός του μέσου ρυθμού που επιτυγχάνουν ροές TCP πάνω από ένα μονοπάτι από στοιχεία που αφορούν μετρήσεις ροών TCP με παρόμοια χαρακτηριστικά στις ενδιάμεσες γραμμές διασύνδεσης.

Οι παραπάνω μέθοδοι συνδυασμού αποτελεσμάτων από πολλαπλές μετρήσεις έχουν πρακτική αξία μόνο εφόσον τα εισερχόμενα σφάλματα κατά την επεξεργασία των δεδομένων παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, παρόμοια μεθοδολογία οφείλει να χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των μετρήσεων για τον περιορισμό των σφαλμάτων. Για παράδειγμα, είναι αδύνατη η σύνδεση κατά σειρά στο χώρο μετρήσεων καθυστέρησης σε ένα μονοπάτι από αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από μετρήσεις με κίνηση διαφορετικής προτεραιότητας.

Ο Πάροχος Υπηρεσιών οφείλει να δημοσιοποιεί τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που πραγματοποιεί ώστε να μπορούν οι συνδρομητές του να επιβεβαιώνουν τις υπηρεσίες ποιότητας που απολαμβάνουν. Για το λόγο αυτό οι μετρικές απόδοσης που ενσωματώνονται σε ένα συμβόλαιο SLA εξαρτώνται σημαντικά από τη δυνατότητα του Παρόχου να συλλέγει ακριβή στοιχεία για την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, ο Πάροχος δύναται να διευκολύνει τον εντοπισμό προβλημάτων απόδοσης για κίνηση που διασχίζει πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές επιτρέποντας -υπό προϋποθέσεις- σε εξωτερικούς διαχειριστές ή συνδρομητές την πρόσβαση στα δεδομένα μετρήσεων που συλλέγει.

3.3.2.4 Συγχρονισμός των ρολογιών στους κόμβους παρακολούθησης

Η καθυστέρηση προς τη μία κατεύθυνση (*one-way delay*) είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που περιγράφουν τη συμπεριφορά του δικτύου. Η εκτέλεση μετρήσεων καθυστέρησης μεταξύ δύο κόμβων παρακολούθησης απαιτεί τον ακριβή συγχρονισμό των ρολογιών τους¹⁸, ο οποίος δύσκολα επιτυγχάνεται στη πράξη χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού. Το σφάλμα στην ακρίβεια των μετρήσεων καθυστέρησης είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το σφάλμα (διαφορά) στο συγχρονισμό των ρολογιών μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των μετρήσεων.

¹⁸ Η εκτέλεση μετρήσεων για τη μεταβλητότητα καθυστέρησης (*jitter*) και την καθυστέρηση διαδρομής με επιστροφή (*RTT*) δεν προϋποθέτει το συγχρονισμό των κόμβων παρακολούθησης.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για το συγχρονισμό των δικτυακών κόμβων, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά στη ακρίβεια που επιτυγχάνουν, την πολυπλοκότητα και το κόστος υλοποίησης τους. Ειδικότερα:

1. *Εσωτερική Πηγή Χρονισμού*: Ο κάθε κόμβος ενσωματώνει το δικό του ανεξάρτητο ρολόι, το οποίο συγχρονίζεται με μια εξωτερική πηγή χρονισμού κατά τη φάση αρχικοποίησης του κόμβου ή ανά άτακτα χρονικά διαστήματα.
2. *Phase Locked Loop*: Ο κάθε κόμβος ανήκει σε ένα σύνολο από αλληλοεξαρτώμενους κόμβους αντίστοιχης ακρίβειας, οι οποίοι συγχρονίζουν συνεχώς τα εσωτερικά τους ρολόγια υπολογίζοντας τη διαφορά συγχρονισμού που εμφανίζει το εσωτερικό τους ρολόι με τα ρολόγια των υπολοίπων κόμβων.
3. *Εξωτερική πηγή χρονισμού*: Ο κάθε κόμβος χρησιμοποιεί πληροφορίες χρονισμού που λαμβάνει από εξωτερική πηγή μεγάλης ακρίβειας.

Στην πράξη, μόνο οι δύο τελευταίες μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε δίκτυα κορμού. Το πρωτόκολλο *network time protocol (NTP)* [NTP] χρησιμοποιείται από τους δικτυακούς κόμβους για να διορθώσουν το εσωτερικό τους ρολόι με βάση πληροφορίες που λαμβάνουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα από εξυπηρετητές *NTP (NTP servers)*. Οι τελευταίοι συγχρονίζουν το ρολόι τους με χρήση εξωτερικών πηγών μεγάλης ακρίβειας, π.χ. με χρήση δέκτη GPS¹⁹ ή με ανταλλαγή πληροφοριών συγχρονισμού μεταξύ τους. Η χρήση του πρωτοκόλλου *NTP* επιτρέπει υπό προϋποθέσεις²⁰ το συγχρονισμό με ακρίβεια 5 msec [NTP-prec] ενός δικτυακού κόμβου με ένα κοντινό εξυπηρετητή *NTP*. Τα σφάλματα συγχρονισμού οφείλονται στο γεγονός ότι ο πελάτης *NTP* μετρά την καθυστέρηση διαδρομής με επιστροφή (*round trip time – RTT*) μέχρι τον εξυπηρετητή *NTP* και στη συνέχεια την υποδιαιρεί για να εκτιμήσει τη καθυστέρηση προς τη μία κατεύθυνση (*one-way delay*) μέχρι τον εξυπηρετητή *NTP*.

Για τη βελτίωση του συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης στο δίκτυο του GÉANT, προτείναμε η κίνηση *NTP* να χαρακτηρίζεται ως κίνηση υψηλής προτεραιότητας. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η καθυστέρηση και η μεταβλητότητα καθυστέρησης κατά την ανταλλαγή πληροφοριών συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων παρακολούθησης και των εξυπηρετητών *NTP*. Ανά περίπτωση, επίσης, προτάθηκε η εγκαταστάτη δεκτών *GPS* για τη βελτίωση του συγχρονισμού των κόμβων όπου η χρήση του πρωτοκόλλου *NTP* κρίνεται ανεπαρκής.

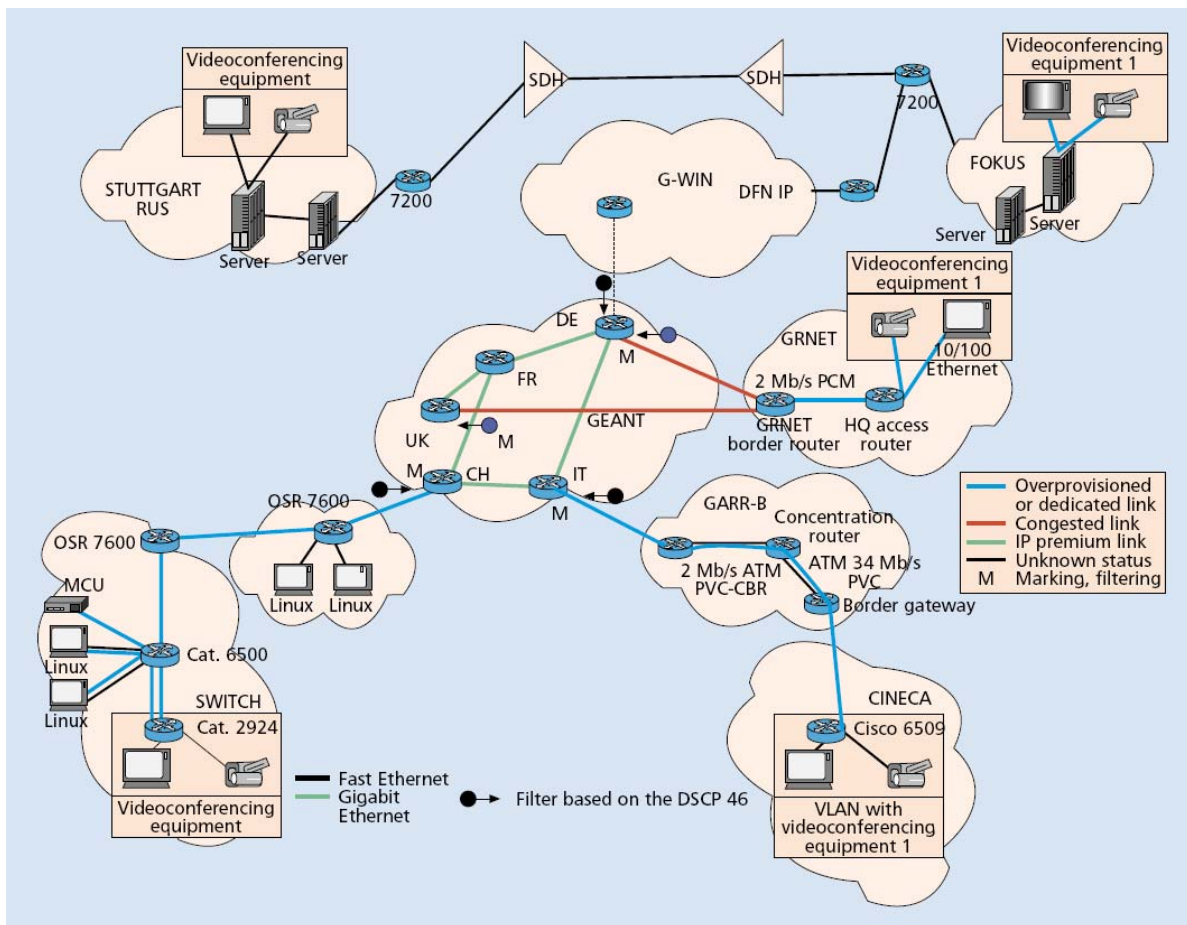
¹⁹ Το *Global Position System (GPS)* [GPS] αποτελείται από 24 δορυφόρους που κινούνται σε τροχιά γύρω από τη γη. Ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει περιοδικά ακριβείς πληροφορίες χρόνου τους οποίους μπορεί κανείς να λάβει με χρήση ενός δέκτη GPS. Οι δορυφόροι συγχρονίζονται με το *Coordinated Universal Time (UTC)* με τη βοήθεια επίγειου σταθμού ελέγχου.

²⁰ Η συμφόρηση των γραμμών διασύνδεσης και ο φόρτος του εξυπηρετητή *NTP* επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια συγχρονισμού του δικτυακών κόμβων, δηλαδή των πελατών *NTP*.

3.4 Δοκιμές της υπηρεσίας *Premium IP* στο SEQUIN

Στο πλαίσιο του έργου SEQUIN [SEQUB] [SEQUC] λάβαμε μέρος στην μελέτη των εγγυήσεων απόδοσης που μπορούν να προσφερθούν με την υπηρεσία *Premium IP* πάνω από το δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Αρχικά, οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την υλοποίηση της υπηρεσίας *Premium IP* δοκιμάστηκαν σε ανεξάρτητο δίκτυο δοκιμών με σκοπό να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία τους [SEQUB]. Στη συνέχεια επεκτείναμε τις δοκιμές πάνω από δίκτυο παραγωγής του GÉANT και μικρού αριθμού συνδεδεμένων NRENs [SEQUC]. Οι δοκιμές είχαν σκοπό την αξιολόγηση των υπηρεσιών που παρέχονται προς τους τελικούς χρήστες από διαφορετικές χώρες που ζητούν την χρήση της υπηρεσίας *Premium IP* για την υποστήριξη συνόδων τηλεδιάσκεψης με χρήση του προτύπου H.323 [H.323].

Η τοπολογία του δικτύου δοκιμών φαίνεται στο Σχήμα 22. Έξι τοπικά δίκτυα συνδέθηκαν μεταξύ τους μέσω τεσσάρων NRENs, συμπεριλαμβανομένου και τοπικού δικτύου στο *Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (ΕΛΕΤ)*, επιτρέποντα την εκτέλεση των δοκιμών πάνω από το δίκτυο του GÉANT.



Σχήμα 22: Δοκιμές συνόδων τηλεδιάσκεψης με το πρότυπο H.323 στο πλαίσιο του έργου SEQUIN.

Οι δοκιμές περιλάμβαναν υποκειμενικές (*subjective*) μετρήσεις ποιοτικών (*qualitative*) χαρακτηριστικών απόδοσης με χρήση εφαρμογή τηλεδιάσκεψης H.323 καθώς και αντικειμενικές

(*objective*) μετρήσεις ποσοτικών (*quantitative*) μετρικών απόδοσης με χρήση κατάλληλων διαχειριστικών εργαλείων. Οι υποκειμενικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση το την σύσταση *Recommendation P.800 (ITU-T)* [ITU96] που προδιαγράφει τη χρήση της «βαθμολογίας μέσης γνώμης» (*mean opinion score - MOS*) για την εκτίμηση της ποιότητας της λαμβανόμενου ήχου και εικόνας από τους τελικούς χρήστες.

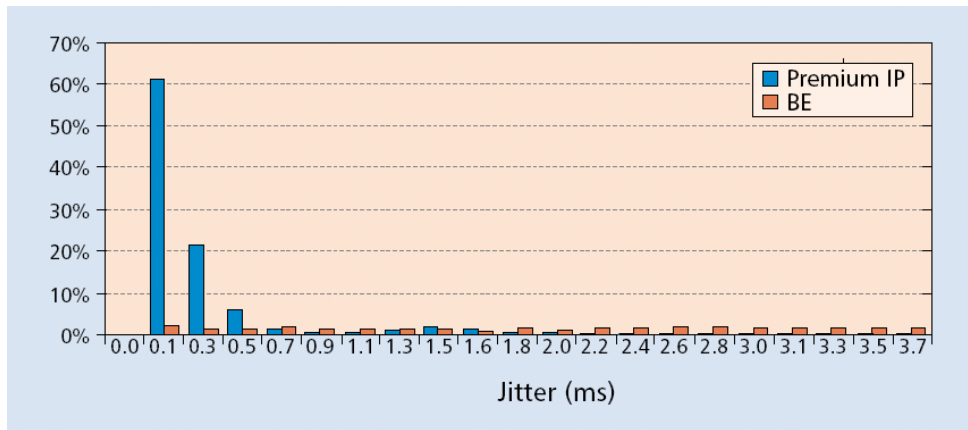
Η μεθοδολογία των μετρήσεων ήταν η ακόλουθη:

1. Σύνοδοι τηλεδιάσκεψης με χρήση του προτύπου H.323 μεταξύ δύο σημείων σε διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές εγκαθίσταντο και, στη συνέχεια, οι συμμετέχοντες εκτιμούσαν την ποιότητα της λαμβανόμενης εικόνας και ήχου.
2. Ταυτόχρονες μετρήσεις με χρήση του πρωτοκόλλου *Internet Control Message Protocol - ICMP*²¹ [Post81] επέτρεπαν τη μέτρηση της καθυστέρησης διαδρομής με επιστροφή (*RTT*) μεταξύ των τελικών συστημάτων κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δοκιμών.
3. Αμέσως μετά το τέλος της κάθε συνόδου, πραγματοποιήθηκαν «ενεργές» μετρήσεις με το εργαλείο *RUDE/CRUDE* [Rude] εισάγοντας στο δίκτυο συνθετική κίνηση UDP [UDP] που προσομοίωνε σύνοδο H.323. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με κίνηση *Premium IP* και βέλτιστης προσπάθειας (BE) και προς τις δύο κατευθύνσεις μεταξύ κάθε ζευγαριού τελικών συστημάτων. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν με το τέλος της κάθε μέτρησης επεξεργάστηκαν για να υπολογιστεί η μεταβλητότητα καθυστέρησης (*jitter*) και το ποσοστό απώλειας πακέτων.
4. Τέλος, το εργαλείο “*netperf*” [Netp] χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (*bandwidth*) που μπορούσε να καταλάβει η κίνηση *Premium IP* στα λογικά κυκλώματα που είχαν εγκατασταθεί διαμέσου του GÉANT.

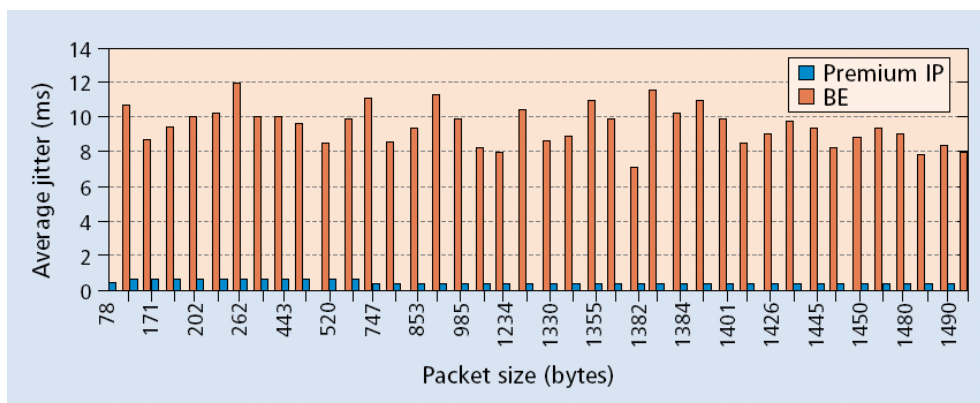
Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές έδειξαν υψηλό βαθμό ικανοποίησης των τελικών χρηστών με εξαίρεση δοκιμές στις οποίες απαιτήθηκε η χρήση H.323 *Multipoint Conference Unit (MCU)* μεταξύ μη συμβατών τελικών συστημάτων. Οι μετρήσεις καθυστέρησης και μεταβλητότητας καθυστέρησης (*jitter*) έδειξαν σημαντικές διαφορές για την *Premium IP* και την υπόλοιπη κίνηση χωρίς προτεραιότητα (*best effort*). Ιδιαίτερα στη σύνδεση ΕΔΕΤ-GÉANT τα συγκριτικά αποτελέσματα ήταν ενδεικτικά για τη βελτίωση που παρέχει η υπηρεσία *Premium IP* καθώς η γραμμή διασύνδεσης του δικτύου του ΕΔΕΤ εμφάνιζε σημαντική συμφόρηση κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Στα παρακάτω σχήματα -Σχήμα 23 και Σχήμα 24- φαίνεται η συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τη σύνδεση Αθήνας – Στουτγκάρδης (*Stuttgart*), η οποία εμφάνισε τον μεγαλύτερο μήκος μονοπατιού αναφορικά με τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων (*hops*). Σύμφωνα με τα στοιχεία που

²¹ Χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο *ping* [Ping]

συλλέχθηκαν, η απώλεια πακέτων που μετρήθηκαν είτε με το εργαλείο *RUDE/CRUDE* είτε τους μετρητές στα θύρες διασύνδεσης (*interfaces*) των δρομολογητών κορμού έδειξαν μηδενικό ή ελάχιστο βαθμό απώλειας πακέτων (0,02%). Το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την κίνηση *Premium IP* επιβεβαιώθηκε σε όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν προέκυψαν προβλήματα κατά τη λειτουργία των δρομολογητών ή λάθη στη συγκρότησή τους.



Σχήμα 23: Σύγκριση του *jitter* για κίνηση *Premium IP* και *best effort* μεταξύ Αθήνας – Στουτγκάρδης (Γερμανία).



Σχήμα 24: Κατανομή του *jitter* για διαφορετικά μεγέθη πακέτων κίνησης *Premium IP* και *best effort* μεταξύ Αθήνας – Στουτγκάρδης (Γερμανία).

3.5 Περιορισμοί – Προβλήματα

Η παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* σε περιβάλλον παραγωγής πάνω από το δίκτυο του GÉANT και των συνδεδεμένων NREN αποκάλυψε σημαντικά προβλήματα και περιορισμούς, κυρίως κατά την εγκατάσταση και διαχείριση συνδέσεων *Premium IP* μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών. Ειδικότερα, αποδείχτηκε στη πράξη πως η εγκατάσταση μιας νέας σύνδεσης *Premium IP* είναι μια ιδιαίτερη χρονοβόρα διαδικασία, συνήθως όταν αυτή επεκτείνεται διαμέσου πολλών διαχειριστικών περιοχών. Επιπλέον, είναι πρακτικά αδύνατη η άμεση αντιμετώπιση της συμφόρησης στις γραμμές

κορμού που οφείλονται σε αναδρομολογημένη κίνηση εξαιτίας αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου. Τέλος, το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* απαιτεί την άριστη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων διαχειριστικών περιοχών και την προσήλωσή τους σε κοινές διαδικασίες.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα παραπάνω προβλήματα και αναλύονται οι αιτίες που τα προκαλούν. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα προβλήματα οφείλονται σε λειτουργικές αδυναμίες της αρχιτεκτονικής *DiffServ*. Για το λόγο αυτό, ανάλογα προβλήματα εμφανίζονται σε άλλα δίκτυα *DiffServ* που παρέχουν υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας.

3.5.1 Καθυστερήσεις στη διαδικασία παροχής της υπηρεσίας

Η παροχή εγγυήσεων απόδοσης για τη μεταφορά κίνησης *Premium IP* μεταξύ δύο κόμβων σε διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές ξεκινά με την ολοκλήρωση των φάσεων διαπραγμάτευσης (*negotiation*) και ενεργοποίησης (*service set-up*) της υπηρεσίας, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως στο Σχήμα 17. Η φάση διαπραγμάτευσης αρχίζει με την υποβολής αίτησης για χρήση της υπηρεσίας *Premium IP* από τους τελικούς χρήστες. Στη φάση αυτή διευκρινίζονται οι απαραίτητες λεπτομέρειες μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών για την εγκατάσταση μιας νέας σύνδεσης, γεγονός που συνεπάγεται καθυστερήσεις μέχρι την ολοκλήρωση των απαραίτητων συνεννοήσεων. Ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα είναι η αδυναμία των τελικών χρηστών να καθορίσουν τις ελάχιστες εγγυήσεις απόδοσης, π.χ. τη μέγιστη καθυστέρηση, που απαιτούν από το δίκτυο για να λειτουργήσουν αποδοτικά οι εφαρμογές τους. Επιπλέον, οι χρήστες αδυνατούν συνήθως να περιγράψουν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της κίνησης (*traffic profile*) που επιθυμούν εισάγουν στο δίκτυο είτε λόγω τεχνικής ανεπάρκειας είτε λόγω ότι είναι πρακτικά αδύνατη η όποια πρόβλεψη. Οι ανεπαρκείς πληροφορίες που μπορούν να συγκεντρωθούν από τους τελικούς χρήστες δυσχεραίνουν τον ορισμό των μηχανισμών ελέγχου της κίνησης που οφείλουν να ενεργοποιηθούν στο δίκτυο ενώ, σε περίπτωση λάθους, σημαντικό μέρος της κίνησης *Premium IP* ενδέχεται να απορριφθεί στα όρια των διαχειριστικών περιοχών.

Η διαδικασία υποβολής της αίτησης για χρήση της υπηρεσίας *Premium IP* επαναλαμβάνεται στο επίπεδο NREN και στη συνέχεια στο GÉANT. Για τον καλύτερο συντονισμό των ενεργειών μεταξύ των διαφορετικών διαχειριστικών περιοχών, η κάθε διαχειριστική περιοχή ορίζει υπεύθυνο τεχνικό εκπρόσωπο (*technical contact*) που οφείλει να βοηθήσει στη σύνταξη της σύμβασης SLA²². Ο τεχνικός υπεύθυνος οφείλει να έχει σαφή γνώση των εγγυήσεων που μπορούν να προσφερθούν στη διαχειριστική περιοχή ευθύνης του και να έχει κατανοήσει τους περιορισμούς που προκύπτουν από τον εγκατεστημένο δικτυακό εξοπλισμό.

²² Ο συγγραφέας της παρούσας διατριβής εκτελεί χρέη τεχνικού υπευθύνου για την υπηρεσία *Premium IP* για όσα αιτήματα υποβάλλονται στο δίκτυο του ΕΔΕΤ.

Η εγκατάσταση μιας νέας σύνδεσης *Premium IP* προϋποθέτει τη «δέσμευση» πόρων κατά μήκος της από άκρο-σε-άκρο διαδρομής. Ο έλεγχος αποδοχής πραγματοποιείται από τους υπεύθυνους διαχειριστές, οι οποίοι διατηρούν στοιχεία για την κατάσταση χρησιμοποίησης των γραμμών διασύνδεσης. Τα διαθέσιμα συστήματα καταγραφής των πόρων του δικτύου, όπως για παράδειγμα το σύστημα που χρησιμοποιείται στο δίκτυο GÉANT [PIPStat], παύουν να λειτουργούν αξιόπιστα σε περιπτώσεις που αλλάζει η τοπολογία του δικτύου. Η «δέσμευση» πόρων από το διαχειριστή για την ικανοποίηση μια νέας σύνδεσης πραγματοποιείται στατικά κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής και επηρεάζεται από την τοπολογία του δικτύου την δεδομένη χρονική στιγμή. Εφόσον μέρος της κίνησης αναδρομολογηθεί, η αξιοπιστία των στοιχείων που βρίσκονται αποθηκευμένες στο σύστημα καταγραφής μειώνεται σημαντικά. Επομένως, ο διαχειριστής οφείλει στη πράξη να επιβεβαιώνει τα στοιχεία που λαμβάνει από τα εργαλεία καταγραφής πριν από τη εγκατάσταση νέων συνδέσεων *Premium IP* με αποτέλεσμα την εισαγωγή επιπλέον καθυστερήσεων.

Η φάση εγκατάστασης της υπηρεσίας περιλαμβάνει την εγκατάσταση της απαραίτητης συγκρότησης στους δρομολογητές του δικτύου. Οι τεχνικοί αντιπρόσωποι πρέπει να ρυθμίσουν τους μηχανισμούς QoS που περιλαμβάνει το μοντέλο υλοποίησης του *Premium IP* στο διαθέσιμο υλικό και να δοκιμάσουν την ορθή λειτουργία τους στο δίκτυο ευθύνης τους. Η ύπαρξη εφεδρικών γραμμών διασύνδεσης μεταξύ γειτονικών διαχειριστικών περιοχών και η εφαρμογή λειτουργιών εξισορρόπησης φορτίου (*load balancing*) απαιτούν να γίνει ειδική πρόβλεψη στον ορισμό των μηχανισμών ελέγχου. Σημαντικά προβλήματα εμφανίζονται επίσης σε περιπτώσεις που μία από τις δύο γειτονικές περιοχές παρέχει υπηρεσίες *Premium IP* πάνω από δίκτυο ATM.

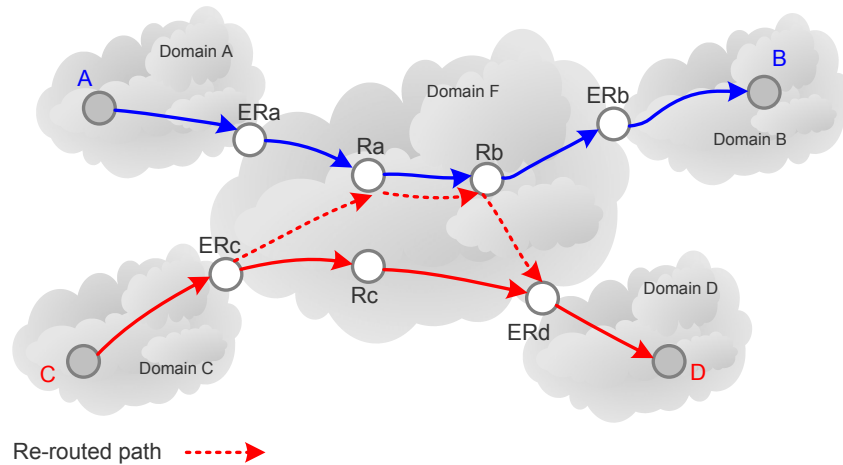
Είναι προφανές ότι το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs προβλέπει τη συνεργασία εκπροσώπων από πολλές διαχειριστικές περιοχές ενώ απαιτούνται πολλαπλά επίπεδα επικοινωνίας για την ολοκλήρωση των απαραίτητων εργασιών. Επιπλέον, καθυστερήσεις εισάγονται κατά τη φάση υλοποίησης όταν πρέπει να ξεπεραστούν αρκετές τεχνικές δυσκολίες. Οι παραπάνω αιτίες δημιουργούν σημαντικές καθυστερήσεις στην παροχή της υπηρεσίας ενώ δημιουργούν σημαντικό διαχειριστικό κόστος. Για το λόγο αυτό, η μέχρι σήμερα εμπειρία από την εγκατάσταση υπηρεσιών *Premium IP* έχει δείξει ότι η ικανοποίηση ενός αιτήματος απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα και συνεπώς η εγκατάσταση μια νέας σύνδεσης προϋποθέτει την διατήρησή της για μεγάλη χρονική περίοδο, π.χ. της τάξης μερικών μηνών.

3.5.2 Προβλήματα από την αναδρομολόγηση της κίνησης

Η φυσική και λογική τοπολογία ενός δικτύου IP μεταβάλλεται συνεχώς με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται και οι διαδρομές που ακολουθούν οι ροές που διασχίζουν μια διαχειριστική περιοχή. Μερικοί από τους λόγους μεταβολής είναι οι ακόλουθοι:

- Αποτυχία ή αποκατάσταση γραμμών διασύνδεσης στο φυσικό στρώμα (*physical layer*) ή στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (*data link layer*), π.χ. εξαιτίας κομμένων οπτικών ινών, δυσλειτουργιών των οπτικών λέιζερ στα συστήματα μετάδοσης, προβλημάτων συγχρονισμού στην μετάδοση των δεδομένων κλπ.
- Αποτυχία ή αποκατάσταση γραμμών διασύνδεσης στο στρώμα δικτύου (*network layer*), π.χ. εξαιτίας λανθασμένων παραμέτρων στη συγκρότηση των δικτυακών συσκευών, λανθασμένου ορισμού του μέγεθος MTU ή των φίλτρων κίνησης, κλπ.
- Εγκατάσταση νέων κόμβων στο δίκτυο ή αποτυχία των υφισταμένων κόμβων, π.χ. κατά τις περιόδους αναβάθμισης λογισμικού ή υλικού.
- Αλλαγή στην πολιτική δρομολόγησης μέσα σε μία διαχειριστική περιοχή, π.χ. λόγω αλλαγής των βαρών που χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

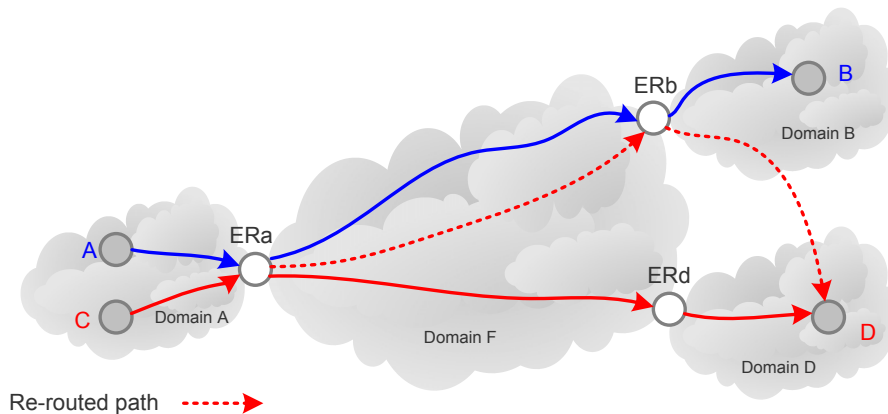
Οι αλλαγές στη δρομολόγηση των ροών δύναται να δημιουργήσουν για μικρά ή μεγάλα διαστήματα συμφόρηση στις γραμμές διασύνδεσης του δικτύου με συνέπεια την υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών σε ροές κίνησης με εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Στο Σχήμα 25, για παράδειγμα, παρουσιάζεται η περίπτωση όπου η αναδρομολογημένη κίνηση μεταξύ των τελικών κόμβων “C-D” προκαλεί συμφόρηση στη γραμμή διασύνδεσης $R_a - R_b$ με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι υπηρεσίες που προσφέρονται στη κίνηση μεταξύ των κόμβων “A-B”.



Σχήμα 25: Αναδρομολόγηση κίνησης μέσα σε μία διαχειριστική περιοχή

Στο δίκτυο GÉANT ακολουθείται η πολιτική «γνωστής κατεύθυνσης» (*destination aware*) [Roth+03] κατά τη φάση εγκατάστασης (*set-up phase*) της υπηρεσίας *Premium IP*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 16 στην παράγραφο §3.2.1.3. Σύμφωνα με την εν λόγω πολιτική, ορίζονται με ακρίβεια τα σημεία εισόδου και εξόδου της κίνησης από το δίκτυο GÉANT. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται αστυνόμευση (*policing*) της κίνησης σε επίπεδο ροής ή συναθροισμένης κίνησης στα σημεία εισόδου. Η εσωτερική διαστασιολόγηση των γραμμών κορμού γίνεται με βάση την τοπολογία του δικτύου κατά τη χρονική περίοδο εγκατάστασης της υπηρεσίας. Στο δίκτυο GÉANT δεν υπάρχει καμία λειτουργία

που μπορεί να περιορίσει την κίνηση που αναδρομολογείται ύστερα από αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Για το λόγο αυτό, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα §3.2.1.2, η μέγιστη χωρητικότητα που δεσμεύεται σε κάθε γραμμή διασύνδεσης για κίνηση *Premium IP* περιορίζεται περίπου στο 10% της χωρητικότητας της γραμμής και επομένως υπάρχει «διαθέσιμη» χωρητικότητα για την εξυπηρέτηση αναδρομολογημένης κίνησης υψηλής προτεραιότητας. Η εν λόγω πρακτική ευνοήθηκε σημαντικά από την πτώση του κόστους των γραμμών διασύνδεσης σε δίκτυα δεδομένων αλλά εξακολουθεί να μην αποτελεί τη βέλτιστη δυνατή λύση.



Σχήμα 26: Αναδρομολόγηση κίνησης και αλλαγή του σημείου εξόδου από τη διαχειριστική περιοχή.

Πέρα από τα προβλήματα συμφόρησης που δημιουργεί η αναδρομολόγηση της κίνησης και τα οποία είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντικά ανάλογα με το συνολικό βαθμό συμφόρησης του δικτύου²³, ενδέχεται να μεταβληθεί το σημείο εξόδου της αναδρομολογημένης κίνησης από τη διαχειριστική περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση, η αύξηση της συνολικής κίνησης που διασχίζει τα όρια δύο διαχειριστικών περιοχών συνήθως προκαλεί απόρριψη πακέτων για λόγους προστασίας της διαχειριστικής περιοχής που δέχεται την κίνηση χωρίς να είναι δυνατόν να διαχωριστεί η αναδρομολογημένη από την μη αναδρομολογημένη κίνηση. Στο Σχήμα 26, για παράδειγμα, ο ελεγκτή κίνησης για τη συναθροισμένη κίνηση στο δρομολογητή ER_b στα όρια της διαχειριστικής περιοχής B δέχεται την κίνηση από τις ροές $A-B$ και $C-D$ και αναπόφευκτα θα απορρίψει τμήμα από τη «νόμιμη» (μη-αναδρομολογημένη) κίνηση $A-B$. Η αδυναμία αυτή δημιουργεί προβλήματα σε δίκτυα που ακολουθούν την πολιτική «άγνωστης κατεύθυνσης» “*destination unaware*” κυρίως κατά τη διαστασιολόγηση των γραμμών κορμού. Όπως παρουσιάσαμε στο [Ava+05], η πολιτική «άγνωστης κατεύθυνσης» επιτρέπει τη δέσμευση μικρού μέρους χωρητικότητας στις γραμμές διασύνδεσης των συνδρομητών στο δίκτυο ΕΔΕΤ για εφαρμογές *Voice over IP (VoIP)*, οι οποίες εμφανίζουν μικρές ανάγκες σε χωρητικότητα.

²³ Σε πολλά δίκτυα παραγωγής, η αναδρομολόγηση της κίνησης δε δημιουργεί προβλήματα στις παρεχόμενες υπηρεσίες ποιότητας καθώς πολλές από τις γραμμές κορμού παρουσιάζουν ελάχιστη ή περιορισμένη συμφόρηση εξαιτίας «υπερ-προσφοράς πόρων» (*overprovisioning*).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο περιορισμός της κίνησης των αναδρομολογημένων ροών είναι ανέφικτος σε δίκτυα DiffServ. Τα όποια μέτρα μπορούν να ληφθούν απαιτούν τη μεσολάβηση του αρμόδιου διαχειριστή του δικτύου και, επομένως, οι όποιες διορθωτικές αλλαγές απαιτούν σημαντικό χρόνο. Για το λόγο αυτό παρατηρείται αρκετά συχνά η υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών μετά την αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Στο δίκτυο του GÉANT, η κίνηση *Premium IP* περιορίζεται στο 10% της διαθέσιμης χωρητικότητας στις γραμμές διασύνδεσης ώστε σε περίπτωση αποτυχίας μιας γραμμής διασύνδεσης η κίνηση *Premium IP* για τις εναπομείναντες γραμμές να μην ξεπεράσει στην χειρότερη περίπτωση το 20% της χωρητικότητας. Η υποστήριξη σηματοδότησης σε ένα δίκτυο DiffServ θα μπορούσε να μειώσει τις συνέπειες από τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, όπως θα αναλύσουμε σε επόμενη ενότητα.

3.5.3 Συμμόρφωση σε κοινές διαδικασίες

Ερευνητικές ομάδες εργασίας που ασχολούνται με τη σχεδίαση και βελτίωση των υποδομών και υπηρεσιών για την εκπαίδευση και την έρευνα έχουν σχηματιστεί σε εθελοντική βάση στο πλαίσιο του *Trans-European Research and Education Networking Association (TERENA)* [TERENA] *Task Forces*, όπως το *Task Force - Next Generation Networking (TF-NGN)* [NGN]. Οι ομάδες αυτές επιτρέπουν την ελεύθερη ανταλλαγή απόψεων και εμπειριών, διερευνούν τη χρησιμότητα νέων τεχνολογιών και επιτρέπουν τη δοκιμή νέων δικτυακών υπηρεσιών πάνω από τα δίκτυα NRENs.

Η υπηρεσία *Premium IP*, όπως προδιαγράφηκε στο έργο SEQUIN, προϋποθέτει συνεργασία μεταξύ των διαχειριστών που εμπλέκονται στην εγκατάσταση και παρακολούθηση της υπηρεσίας σε συνδέσεις που εκτείνονται σε πολλές διαχειριστικές περιοχές. Ειδικότερα, η διαδικασία παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* προϋποθέτει:

- Την συμφωνία μεταξύ των διαχειριστικών περιοχών για τις εγγυήσεις ποιότητας που πρέπει να παρέχει η υπηρεσία *Premium IP* στην μεταφερόμενη κίνηση. Αυτό διευκολύνει την υποστήριξη συμβολαίων SLAs μεταξύ γειτονικών περιοχών καθώς και των από άκρο-σε-άκρο συμβολαίων που προσφέρονται από κοινού στους τελικούς χρήστες.
- Τον ορισμό κοινών διαδικασιών για την υποστήριξη της υπηρεσίας στα όρια των διαχειριστικών περιοχών, τον συντονισμό κατά την επικοινωνία με τους τελικούς χρήστες, την παρακολούθηση των παρεχόμενων υπηρεσιών και τον εντοπισμό των περιπτώσεων που παραβιάζονται οι παρεχόμενες υπηρεσίες.
- Την αποφυγή ενεργοποίησης πλεοναζόντων μηχανισμών ελέγχου κίνησης σε κάθε εμπλεκόμενη διαχειριστική περιοχή που διασχίζει μια σύνδεση *Premium IP*. Οι σχέσεις εμπιστοσύνης μεταξύ των δικτύων επιτρέπουν την απλοποίηση του μοντέλου υλοποίησης της υπηρεσίας *Premium IP* και μείωση των απαιτήσεων από το υλικό (*hardware*). Για παράδειγμα, ο έλεγχος των χαρακτηριστικών κίνησης (*traffic profile*) για την κάθε σύνδεση

Premium IP πραγματοποιείται από το κοντινότερο δρομολογητή στην πηγή και όχι από τους δρομολογητές κορμού.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν ισχύουν στα εμπορικά δίκτυα όπου κανόνες τις αγορές υπαγορεύουν διαφορετικές σχέσεις συνεργασίας μεταξύ των Παρόχων. Συμφωνίες μεταξύ Παρόχων επηρεάζονται κυρίως από τις διμερείς εμπορικές σχέσεις τους. Σε ελάχιστες περιπτώσεις κοινές διαδικασίες μπορούν να οριστούν μεταξύ τριών ή περισσότερων δικτύων, κυρίως λόγω «επιβολής» τους από τον σημαντικότερο Πάροχο. Τέλος, οι εμπορικοί Πάροχοι αποφεύγουν τη δημοσιοποίηση στοιχείων για την κατάσταση του εσωτερικού τους δικτύου δυσκολεύοντας την εγκατάσταση νέων ροών υψηλής προτεραιότητας και την ανίχνευση προβλημάτων κατά την παροχή της υπηρεσίας.

3.6 Επέκταση της υπηρεσίας *Premium IP* στο **ΓÉANT2**

Οι περιορισμοί που εντοπίστηκαν στη διαδικασία παροχής και παρακολούθησης της υπηρεσίας *Premium IP*, όπως αυτές παρουσιάστηκαν προηγουμένως, προσπαθούν να ξεπεραστούν στο πλαίσιο των ερευνητικών δραστηριοτήτων *Service Activity 3 (SA3)* “*End to End Quality of Service*” [GN2d] και *Joint Research Activity 1 (JRA1)* “*Performance Measurement and Management*” [GN2a] του έργου **ΓÉANT2 (GN2)** [GEANT2]. Η δραστηριότητα *SA3* έχει αντίστοιχους στόχους με το μοντέλο που θα παρουσιάσουμε στην αμέσως επόμενη ενότητα και στοχεύει να βελτιώσει τον τρόπο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP*. Επίσης, η δραστηριότητα *JRA3* επεκτείνει προγενέστερες εργασίες πάνω σε θέματα παρακολούθησης υπηρεσιών σε δίκτυα IP, όπως για παράδειγμα ζητήματα σχετικά με την παρακολούθηση της υπηρεσίας *Premium IP* πάνω από το δίκτυο **ΓÉANT**.

3.6.1 Αυτοματοποίηση διαδικασιών παροχής *Premium IP* στο **ΓÉANT2**

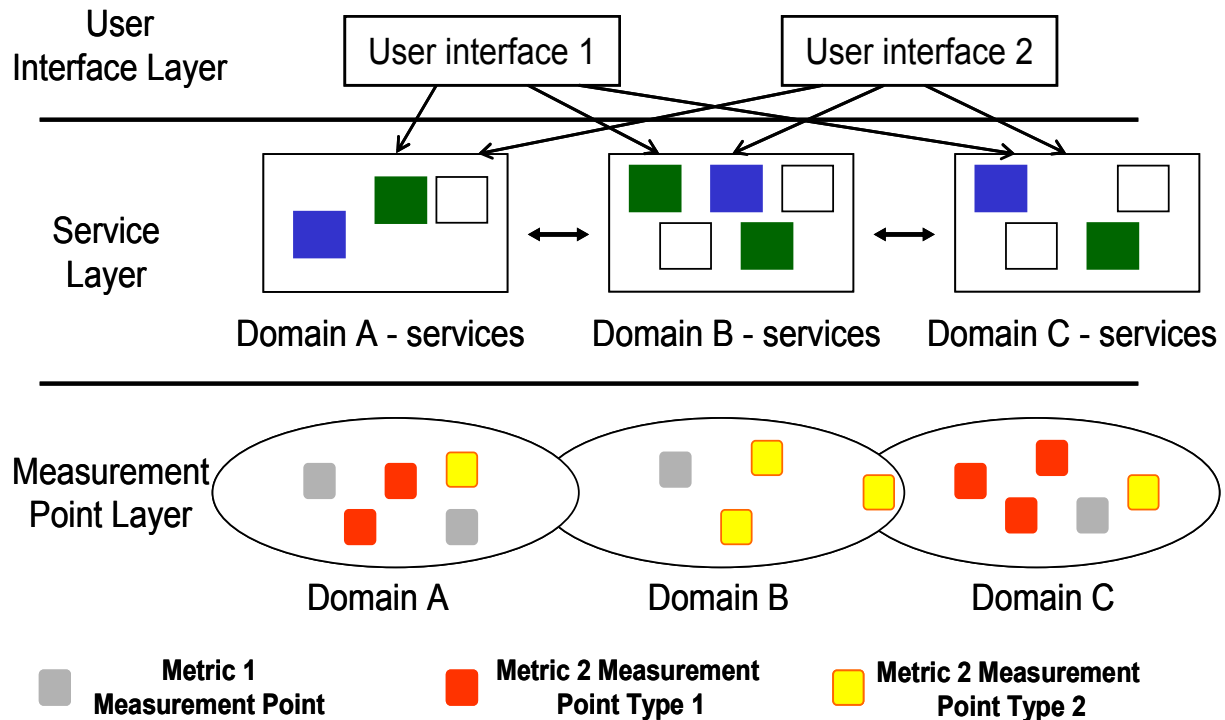
Η παροχή υπηρεσιών *Premium IP* στο δίκτυο **ΓÉANT2** θα βασίζεται σε μια κεντρική οντότητα, η οποία αποκαλείται *Premium IP Provisioning System (Premium IP PS)* και θα υλοποιεί λειτουργίες ανάλογες με ένα τυπικό *Bandwidth Broker* [BB]. Μερικές από τις λειτουργίες που θα εκτελεί το *Premium IP PS* είναι αποδοχή των αιτημάτων από τους χρήστες, ο έλεγχος των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, η αυτόματη συγκρότηση (*configuration*) για τους δρομολογητές κορμού, η αίτηση δέσμευσης πόρων από γειτονικές περιοχές, κ.α.. Παράλληλα, το *Premium IP PS* θα λαμβάνει συνεχώς δεδομένα από την υποδομή παρακολούθησης (*monitoring infrastructure*) ώστε να μπορεί να εκτιμά τις προσφερθείς υπηρεσίες και να πληροφορείται τις αλλαγές στη τοπολογία του δικτύου. Η υλοποίηση των συστήματος *Premium IP PS* βασίζεται στην τεχνολογία *Web Services* [CCMW01], η οποία αποτελεί τη σύγχρονη τάση για δημιουργία καταναμημένων εφαρμογών που λειτουργούν πέρα από τα όρια μιας διαχειριστική περιοχής.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί η αλλαγή στη δομή του μοντέλου διασύνδεσης μεταξύ GÉANT/NRENs. Στις μέρες μας παρατηρείται συνεχής αύξηση στη χρήση οπτικών τεχνολογιών πολυπλεξίας σήματος, όπως η τεχνολογία *Wavelength Division Multiplexing WDM* [ITU02b], η οποία επιτρέπει την υποστήριξη πολλαπλών οπτικών συνδέσεων πάνω από μία οπτική ίνα. Ολοένα και περισσότερες οπτικές συνδέσεις εγκαθίστανται για την απευθείας διασύνδεση των NRENs «διαταράσσοντας» το ιεραρχικό μοντέλο διασύνδεσης (Σχήμα 15) των ερευνητικών δικτύων της Ευρώπης. Παράλληλα, η εξάπλωση των υποδομών για οπτικά δίκτυα και η ανάγκη για μακροχρόνιες συνδέσεις από άκρο-σε-άκρο ταχύτητας μέχρι και 10 Gbps απαιτούν την απευθείας μεταγωγή των πληροφοριών χωρίς την μεσολάβηση λειτουργιών από δρομολογητές κορμού στο στρώμα δικτύου (*network layer*). Το ερευνητικό δίκτυο νέας γενιάς εξελίσσεται σε ένα «υβριδικό» δίκτυο όπου συνυπάρχουν μεταγωγή πακέτων IPv4/6 (*packet switching*) και μεταγωγή κυκλωμάτων (*circuit switching*) σε χαμηλότερα επίπεδα, κυρίως για χρήστες με υψηλές ανάγκες σε χωρητικότητα και με αυστηρούς περιορισμούς στην καθυστέρηση της μεταφερόμενης πληροφορίας. Σε αυτό το περιβάλλον λειτουργίας, η πολυπλοκότητα κατά τη φάση εγκατάστασης και λειτουργίας υπηρεσιών *Premium IP* είναι ιδιαίτερα αυξημένη και απαιτεί τη χρήση εργαλείων, όπως το *Premium IP Provisioning System*, που αυτοματοποιούν τις διαχειριστικές λειτουργίες.

3.6.2 Υποδομή παρακολούθησης ποιότητας υπηρεσίας στο GÉANT2

Τα στοιχεία που συλλέγονται από τη υποδομή παρακολούθησης στο GÉANT δεν είναι άμεσα διαθέσιμα στους τελικούς χρήστες ή στους διαχειριστές των συνδεδεμένων NRENs. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών σε κάποια σύνδεση που τερματίζει σε διαφορετικά NRENs, π.χ. κατά τη διάρκεια που πραγματοποιείται μία σύνοδος τηλεδιάσκεψης, δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός του τμήματος του δικτύου στον οποίο εμφανίζεται πρόβλημα. Η συλλογή των στοιχείων παρακολούθησης από τις διαφορετικές εμπλεκόμενες διαχειριστικές περιοχές είναι μια χρονοβόρα διαδικασία καθώς απαιτείται η συνδρομή των υπεύθυνων διαχειριστών. Επιπλέον περιορισμοί δημιουργούνται από την πολιτική πρόσβασης και ασφάλειας που εφαρμόζει η κάθε διαχειριστική περιοχή για τα δεδομένα που συγκεντρώνει καθώς και από τη συλλογή ανομοιογενών δεδομένων μεταξύ διαφορετικών διαχειριστικών περιοχών. Κατά συνέπεια, τα δεδομένα από τις μετρήσεις παρακολούθησης που σήμερα συλλέγονται στο GÉANT και τα NRENs δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πράξη κατά τη διάρκεια που εμφανίζονται προβλήματα στο δίκτυο αλλά συνήθως αξιοποιούνται για την ανάλυση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στο παρελθόν με σκοπό την πρόληψη αντίστοιχων προβλημάτων στο μέλλον.

Στο πλαίσιο του έργου GÉANT2 (GN2) και της δραστηριότητας JRA1²⁴ καταβάλλεται προσπάθεια για την ανάπτυξη υποδομής που θα επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών παρακολούθησης μεταξύ του δικτύου GÉANT και των συνδεδεμένων NRENs. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επιτρέπει ανεξάρτητα στην κάθε διαχειριστική περιοχή να εγκαταστήσει υποδομή παρακολούθησης και να μετρήσει την απόδοση στα όρια της. Μοντελοποιεί, όμως, τη διαδικασία για τη δημοσιοποίηση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις στις υπόλοιπες διαχειριστικές περιοχές και ορίζει τον τρόπο που στοιχεία συλλέγονται και αξιοποιούνται.



Σχήμα 27: Αρχιτεκτονική υποδομής παρακολούθησης στο GÉANT2 (GN2-JRA1).

Η γενική αρχιτεκτονική που ορίστηκε στο JRA1 [GN2a] φαίνεται στο Σχήμα 27. Τα «σημεία παρακολούθησης» (*measurement points – MPs*) είναι υπεύθυνα για την εκτέλεση ενεργών (*active*) ή παθητικών (*passive*) μετρήσεων στο δίκτυο και τη συλλογή αποτελεσμάτων. Το κάθε MP συνεργάζεται με ένα αντιπρόσωπο (*agent*) στο «στρώμα σημείων παρακολούθησης» (*measurement point layer*), ο οποίος αποκρύπτει τις λεπτομέρειες υλοποίησης του MP και παρέχει πληροφορίες για μία συγκεκριμένη μετρική απόδοσης με βάση τις μετρήσεις που εκτελεί συστηματικά το MP. Το «στρώμα υπηρεσίας» (*service layer*) περιλαμβάνει εξειδικευμένες λειτουργικές οντότητες που επιτρέπουν τη διαχείριση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις, την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαχειριστικών περιοχών καθώς και τον έλεγχο της υποδομής παρακολούθησης. Το «επίπεδο

²⁴ Ο συγγραφέας της παρούσας διατριβής συμμετέχει ενεργά στην σχεδίαση και ανάπτυξη της υποδομής παρακολούθησης στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας GN2-JRA1.

υπηρεσίας» αποκρύπτει τις λεπτομέρειες σχετικά με την εγκατάσταση των σημείων παρακολούθησης καθώς και τις εκτελούμενες μετρήσεις.

Οι αλληλεπίδραση μεταξύ των λειτουργικών οντοτήτων στο *service layer* δεν είναι ορατές στους τελικούς χρήστες. Οι τελευταίοι αλληλεπιδρούν μόνο με τα «εργαλεία απεικόνισης» (*visualization tools*) στο «στρώμα διεπαφής χρήστη» (*user interface layer*). Τα «εργαλεία απεικόνισης» παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων με βάση τις προδιαγραφές που ορίζουν οι τελικοί χρήστες. Επιπλέον, το «επίπεδο διαπροσωπίας χρήστη» παρέχει τη δυνατότητα στο τελικό χρήστη να εκτελέσει μετρήσεις χρησιμοποιώντας λειτουργίες από τα χαμηλότερα επίπεδα.

Η σχεδίαση της υποδομής παρακολούθησης στο GN2-JRA1 βασίζεται στην τεχνολογία Web Services [CCMW01]. Οι οντότητες που έχουν προδιαγραφεί [GN2b] λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους και επικοινωνούν διαμέσου σαφώς καθορισμένα διεπαφών (*interfaces*). Η αρχιτεκτονική ορίζει επίσης τη σημασιολογία (*schematics*) για τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται με τυποποιημένο τρόπο, δηλαδή με χρήση της γλώσσας περιγραφής XML και τη χρήση μηνυμάτων SOAP, ανεξάρτητα από την τεχνολογία υλοποίησης των δικτυακών υποδομών. Η προβλεπόμενη αρχιτεκτονική επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση ή προσθήκη οντοτήτων στην εγκατεστημένη υποδομή και, επομένως, αυξάνει την ευελιξία κατά την επέκταση ή την προσαρμογή σε νέα δίκτυα ή τεχνολογίες.

Έχουν προδιαγραφεί οι ακόλουθες υπηρεσίες *WS*:

- *Measurement Point (MP) service*: Εκτελεί μετρήσεις απόδοσης στο δίκτυο και προωθεί τα δεδομένα που συλλέγονται προς τους τελικούς χρήστες ή προς άλλες υπηρεσίες.
- *Measurement Archive (MA) service*: Αποθηκεύει τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που συλλέγουν οι MPs.
- *Lookup service (LS)*: Συντηρεί βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται στοιχεία για όλες τις λειτουργικές οντότητες στην υποδομή παρακολούθησης.
- *Topology service (TS)*: Συλλέγει στοιχεία για την τοπολογία του δικτύου με σκοπό την βελτιστοποίηση κατά την εκτέλεση μετρήσεων απόδοσης.
- *Authentication service (AS)*: Παρέχει υπηρεσίες πιστοποίησης και εξουσιοδότησης των τελικών χρηστών (ή των υπηρεσιών) που ζητούν υπηρεσίες από κάποια λειτουργική οντότητα.
- *Transformation service (TrS)*: Εκτελεί πράξεις στα δεδομένα μετρήσεων, π.χ. aggregation, correlation, filtering, or translation.
- *Resource Protector (RP)*: Αστυνομεύει την εκτέλεση μετρήσεων που καταναλώνουν περιορισμένους δικτυακούς πόρους, π.χ. χωρητικότητα στις γραμμές διασύνδεσης.

Η αρχιτεκτονική για την υποδομή παρακολούθησης στο GN2-JRA1 βρίσκεται στα πρώτα στάδια υλοποίησης και δοκιμής. Παράλληλα, εξετάζονται θέματα σχετικά με την συσχέτιση μετρήσεων από

διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές και τον υπολογισμό των σφαλμάτων μέτρησης ανάλογα με την μεθοδολογία εκτέλεσης των μετρήσεων [HLMS06].

4 Μοντέλο για την Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας μεταξύ Διαχειριστικών Περιοχών (*Inter-domain QoS Provisioning Model*)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά το προτεινόμενο Μοντέλο για την Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας μεταξύ Διαχειριστικών Περιοχών (*Inter-domain QoS Provisioning Model – IQPM*) [LKM06], το οποίο επεκτείνει την αρχιτεκτονική *Differentiated Services (DiffServ)* [Blake+98] με την εισαγωγή σηματοδότησης (*signalling*) για την κατανομημένη διαχείριση των πόρων του δικτύου και ενσωμάτωση μηχανισμών ελέγχου και περιορισμού της αναδρομολογημένης κίνησης. Το μοντέλο *IQPM* βελτιώνει το αντίστοιχο μοντέλο για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα μειώνοντας, αφενός, το χρόνο που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας νέας σύνδεσης και, αφετέρου, περιορίζοντας τις επιπτώσεις που προκαλούνται ύστερα από μεταβολή στην τοπολογία του δικτύου.

Στην αρχή της παρούσας ενότητας περιγράφονται οι προδιαγραφές που τέθηκαν κατά τη φάση σχεδίασης του μοντέλου *IQPM* και αναφέρονται οι παραδοχές που έγιναν. Παρουσιάζονται εν συντομία οι βασικές αρχές που διέπουν το μοντέλο *IQPM* και, στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά οι διαδοχικές φάσεις που μεσολαβούν από την υποβολή ενός αιτήματος από τον τελικό χρήστη μέχρι την εγκατάσταση μιας σύνδεσης υψηλής προτεραιότητας μεταξύ δύο διαχειριστικών περιοχών. Συγκρίνουμε το μοντέλο *IQPM* με το αντίστοιχο μοντέλο που εφαρμόζεται σήμερα στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* καθώς και με την

αρχιτεκτονική *Resource Management in DiffServ (RMD)* [West+02] [Bade+05] του IETF. Αποτελέσματα από προσομοιώσεις του μοντέλου *IQPM* αναλύονται με στόχο να διευκρινιστεί κατά πόσο μπορούν να υποστηριχθούν υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας σε δίκτυα που παρουσιάζουν προβλήματα στις γραμμές διασύνδεσης και γίνεται σύγκριση με ανάλογες αρχιτεκτονικές. Στο τέλος της ενότητας, παρουσιάζονται επεκτάσεις του μοντέλου *IQPM* σε περιβάλλον που υποστηρίζει το πρωτόκολλο IPv6 και γίνεται αναφορά σε δοκιμές με κίνηση υψηλής προτεραιότητας στο δίκτυο διπλής στοίβας (*dual stack*) ΕΔΕΤ.

4.1 Προδιαγραφές

Η πολυμορφία που εμφανίζουν τα σύγχρονα δίκτυα δεδομένων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη πλήθους διαφορετικών μοντέλων για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Το κάθε μοντέλο προσαρμόζεται στις λειτουργικές δυνατότητες και τους περιορισμούς που εμφανίζει το εκάστοτε δίκτυο εφαρμογής ενώ επηρεάζεται από τις απαιτήσεις που θέτουν οι εφαρμογές. Ένα ασύρματο δίκτυο, για παράδειγμα, βασίζεται σε ένα μη αξιόπιστο μέσο μετάδοσης περιορισμένης χωρητικότητας επιβάλλοντας τη χρήση μεθόδων αναγνώρισης των σφαλμάτων κατά τη μετάδοση και την εφαρμογή μηχανισμών διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων. Στις ακόλουθες παραγράφους, λοιπόν, περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά του δικτυακού περιβάλλοντος στο οποίο επιδιώκουμε την εφαρμογή του μοντέλου *IQPM*. Εξηγούμε τις τεχνικές προδιαγραφές που τέθηκαν κατά τη φάση σχεδίασης και δικαιολογούμε την επιλογή μας να βασιστούμε ή να απορρίψουμε συγκεκριμένες τεχνικές σχετικά με την παροχή ποιότητας υπηρεσίας.

Το μοντέλο *IQPM* σχεδιάστηκε εξ αρχής με στόχο να μπορεί να υποστηριχθεί σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων IP που υποστηρίζουν συνδέσεις σε υπερ-υψηλές ταχύτητες και εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων ροών. Σύγχρονα δίκτυα δεδομένων υποστηρίζουν ταχύτητες διασύνδεσης *10 Gbps* ενώ οι πλέον προηγμένοι δρομολογητές κορμού μετάνουν συνολική κίνηση με ρυθμούς της τάξης *Tbps* [CiscoE] [JuniperB]. Υπό αυτές τις συνθήκες, ένα τυχαίο πακέτο IP που λαμβάνεται στη θύρα εισόδου ενός δρομολογητή κορμού θα πρέπει να προωθηθεί προς τον επόμενο κόμβο μέσα σε χρονικό διάστημα μικρότερο του μικροδευτερολέπτου²⁵ (*microsecond - μsec*). Επιπλέον, οι γραμμές διασύνδεσης δύναται να εξυπηρετούν εκατομμύρια ταυτόχρονες ροές ενώ ο ρυθμός άφιξης ή τερματισμού ροών μπορεί να ανέρχεται σε μερικές χιλιάδες ροές ανά δευτερόλεπτο [Casp03]. Για λόγους απόδοσης κατά την μεταγωγή των πακέτων IP, το μοντέλο *IQPM* σχεδιάστηκε να είναι συμβατό με την αρχιτεκτονική *DiffServ*, όπου τα πακέτα κατηγοριοποιούνται και

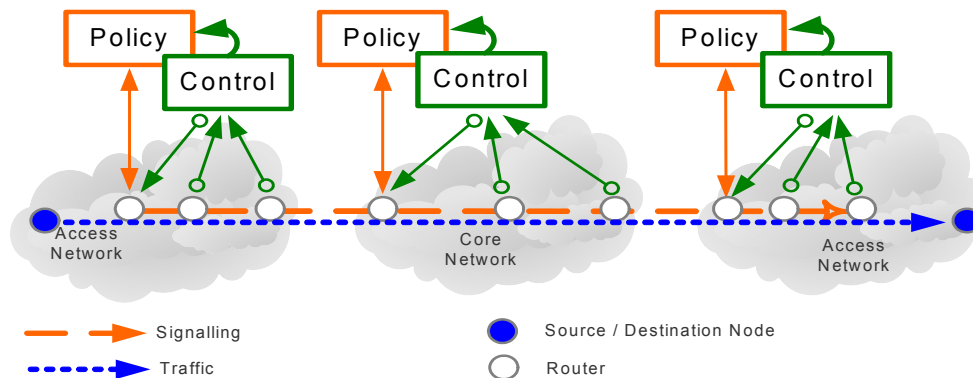
²⁵ Ένα πακέτο μεγέθους *512 bytes*, δηλαδή *4096 bits*, που λαμβάνεται από μια γραμμή διασύνδεσης *10 Gbps* θα πρέπει να προωθηθεί από το δρομολογητή μέσα σε χρονικό διάστημα περίπου $\sim 0,41 \mu sec$.

προωθούνται με βάση την τιμή *DiffServ Code Point (DSCP)* στην επικεφαλίδα τους επιτρέποντας την εύκολη υλοποίηση μηχανισμών μεταγωγής στο υλικό (*hardware*). Η αρχιτεκτονική *Integrated Services (IntServ)*, αντιθέτως, απαιτεί την εκτέλεση σύνθετων λειτουργιών στους δρομολογητές κορμού για κάθε εισερχόμενο ενώ προϋποθέτει τη διατήρηση στοιχείων κατάστασης για τις ενεργές ροές. Αντιστοίχως, τα θεωρητικά μοντέλα που βασίζονται στην τεχνική *Dynamic Packet State* [SZ99] [ZDH04] [LW04] απαιτούν την επεξεργασία των πληροφοριών που μεταφέρονται σε κάθε μεταγόμενο πακέτου στους δρομολογητές κορμού. Παρόλο που τα εν λόγω μοντέλα επιτυγχάνουν να προσφέρουν ικανοποιητικές εγγυήσεις σε επίπεδο ροής, αποφεύχθηκε η χρήση των μηχανισμών τους εξαιτίας των προβλημάτων κλιμάκωσης που εμφανίζουν κατά τη μεταγωγή πακέτων σε υψηλές ταχύτητες. Τέλος, κατά τη σχεδίαση του μοντέλου *IQPM* αποφεύχθηκε η χρήση κεντρικών εξυπηρετητών ανά διαχειριστική περιοχή, π.χ. ανάλογων με τους μεσίτες εύρους ζώνης (*bandwidth brokers*), εξαιτίας των περιορισμών στο χειρισμό μεγάλου αριθμού ταυτόχρονων αιτημάτων.

Το μοντέλο *IQPM* εμφανίζει αρκετές λειτουργικές ομοιότητες με το μοντέλο παροχής υπηρεσίας ποιότητας *Premium IP* που εφαρμόζεται στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Το μοντέλο *Premium IP* έχει αποδειχτεί στην πράξη ότι μπορεί να υποστηριχθεί σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων για την εγκατάσταση συνδέσεων μεταξύ διαφορετικών διαχειριστικών περιοχών. Το χρονικό διάστημα, όμως, που μεσολαβεί από τη στιγμή που υποβάλλεται ένα αίτημα για εγκατάσταση μιας νέας σύνδεσης *Premium IP* από τον τελικό χρήστη μέχρι την ικανοποίηση του από τον αρμόδιο Πάροχο Υπηρεσιών διαρκεί υπερβολικά ενώ η διαδικασία εγκατάστασης συνεπάγεται σημαντικό διαχειριστικό κόστος. Το μοντέλο *IQPM* επιδιώκει να μειώσει στο ελάχιστο το χρόνο εγκατάστασης νέων ροών υψηλής προτεραιότητας αυτοματοποιώντας τις διαδικασίες εγκατάστασης και συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων διαχειριστικών περιοχών. Η απαίτηση αυτή επέβαλε τη χρήση σηματοδοσίας (*signalling*) για το χειρισμό λειτουργιών στο επίπεδο ελέγχου (*control plane*) (§4.3.2). Το μοντέλο *IQPM* απλοποιεί τον έλεγχο αποδοχής νέων ροών και δεν απαιτεί τη μεσολάβηση των αρμόδιων διαχειριστών. Η ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας μεταξύ των δρομολογητών επιταχύνει την εγκατάσταση νέων ροών με απαιτήσεις ποιότητας, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που οι ροές διασχίζουν πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές. Επιπλέον, το μοντέλο *IQPM* εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι ρυθμιστές κίνησης που εφαρμόζονται στα όρια των διαχειριστικών περιοχών μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση μικρού συνόλου παραμέτρων και εκμεταλλεύεται τη χρήση μηνυμάτων σηματοδοσίας για τη ρύθμισή τους.

Η επικοινωνία μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων του Διαδικτύου δε διακόπτεται όταν μεταβάλλεται η τοπολογία του δικτύου υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει μία τουλάχιστον διαδρομή που να συνδέει τους δύο κόμβους. Η δυνατότητα αυτή οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι πληροφορίες κατάστασης της κάθε ενεργής ροής διατηρούνται μόνο από τους τελικούς κόμβους *Πηγής και Προορισμού (source & destination nodes)* χωρίς να απαιτείται η συνδρομή των δρομολογητών κορμού. Κατά τη σχεδίαση του μοντέλου *IQPM* αποφεύχθηκε η διατήρηση στοιχείων

κατάσταση για τις ενεργές ροές στους δρομολογητές κορμού επιτρέποντας την αξιόπιστη λειτουργία του μοντέλου σε περιπτώσεις βλαβών. Παρόλο, όμως, που η διασύνδεση μεταξύ δύο κόμβων διατηρείται, αυτό δεν συνεπάγεται ότι οι παρεχόμενες υπηρεσίες κατά τη μεταφορά της κίνησης δεν επηρεάζονται ύστερα από μεταβολή της διαδρομής διασύνδεσης. Παρατηρείται συχνά η αναδρομολογημένη κίνηση να δημιουργεί προβλήματα συμφόρησης στα τμήματα του δικτύου που καλούνται να την εξυπηρετήσουν. Ενσωματώθηκε, λοιπόν, στο μοντέλο *IQPM* μηχανισμός που μπορεί να περιορίσει τις επιπτώσεις από την αναδρομολογημένη κίνηση ύστερα από σφάλματα στις γραμμές διασύνδεσης (§4.3.3). Η διατήρηση πληροφοριών για το πλήρες μονοπάτι που ακολουθούν οι ροές στους δρομολογητές κορμού ή η δέσμευση πόρων σε εναλλακτικό μονοπάτι εμφανίζουν προβλήματα κλιμάκωσης, πολυπλοκότητας και αξιοπιστίας. Στο μοντέλο *IQPM* επιλέξαμε τη χρήση μίας τεχνικής, σύμφωνα με την οποία εισάγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα πακέτα παρακολούθησης για τον έλεγχο του μονοπατιού της κάθε ροής. Η τεχνική που προτείναμε παρουσιάζει χαμηλή πολυπλοκότητα στην υλοποίησή της αφού υποστηρίζει υποσύνολο λειτουργιών που συναντώνται σε αντίστοιχες τεχνικές που εφαρμόζονται σε δίκτυα ATM ή MPLS [PSA05]. Η χρήση των πακέτων παρακολούθησης δεν αποσκοπεί στην αναζήτηση εναλλακτικής όδευσης ή στη δέσμευση νέων πόρων σε νέο μονοπάτι αλλά στον εύκολο και σύντομο εντοπισμό των αναδρομολογημένων ροών ώστε να είναι δυνατή η προστασία των «νόμιμων» ροών.



Σχήμα 28: Λειτουργίες σε ανεξάρτητες διαχειριστικές περιοχές που υποστηρίζουν το μοντέλο *IQPM*.

Το Διαδίκτυο αποτελείται από ανεξάρτητες διαχειριστικές περιοχές που διασυνδέονται μεταξύ τους σε περιορισμένα σημεία παρουσίας και ανταλλάσσουν κίνηση με σαφώς ορισμένους κανόνες και περιορισμούς. Η εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* δε διαταράσσει τις ισχύουσες πρακτικές που σήμερα συναντά κανείς στο Διαδίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 28. Η χρήση από άκρο-σε-άκρο σηματοδότης για την ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου για τις υπό εγκατάσταση ροές επιτρέπει στον κάθε Πάροχο Υπηρεσιών να δεχτεί ή να αποτρέψει τα εισερχόμενα αιτήματα σύμφωνα με την ισχύουσα πολιτική πρόσβασης στις υπηρεσίες. Η κάθε διαχειριστική περιοχή μπορεί να εφαρμόσει ανεξάρτητη πολιτική πρόσβασης σε επίπεδο ροής, να υποστηρίξει διαφορετικές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, να διαμορφώσει διαφορετικά τους μηχανισμούς στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*) κ.τ.λ.. Επιπλέον, ο Πάροχος Υπηρεσιών είναι αποκλειστικά υπεύθυνος για την προστασία του δικτύου

ευθύνης του από δυσλειτουργίες που παρουσιάζονται σε γειτονικές διαχειριστικές περιοχές²⁶ ή από προβλήματα που προκαλούν οι συνδρομητές του. Τυπικό παράδειγμα μηχανισμών προστασίας είναι ο έλεγχος της εισερχόμενης κίνησης (*traffic policing*) που εφαρμόζεται στα όρια των διαχειριστικών περιοχών. Τέλος, τα στοιχεία που συλλέγονται από τα μηνύματα ελέγχου στο μοντέλο *IQPM* επιτρέπουν την αλλαγή στην πολιτική πρόσβασης στα όρια της διαχειριστικής περιοχής. Το μοντέλο *IQPM*, λοιπόν, διαφυλάσσει τη ανεξαρτησία της κάθε διαχειριστικής περιοχής από τις υπόλοιπες γειτονικές διαχειριστικές περιοχές ενώ δεν προϋποθέτει αλλαγές στο ισχύον μοντέλο εμπιστοσύνης μεταξύ Παρόχων Υπηρεσιών ή μεταξύ Παρόχου Υπηρεσιών και Συνδρομητών.

Πίνακας 3: Προδιαγραφές κατά τη φάση σχεδίασης του μοντέλου *IQPM*.

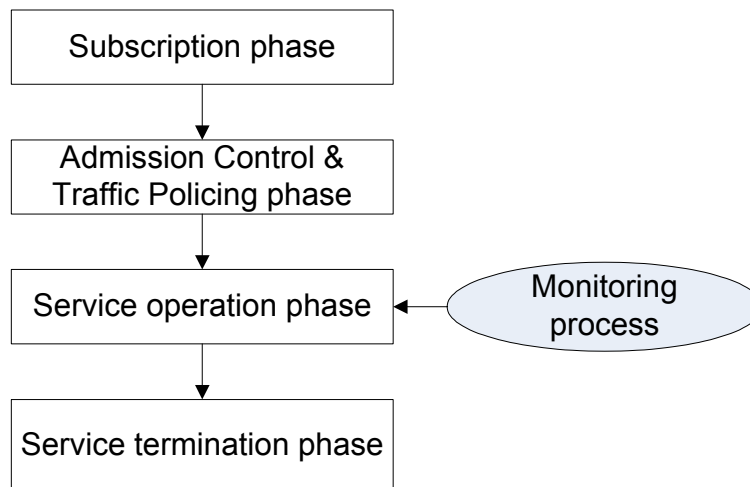
Προδιαγραφές	Συνέπεια
Εφαρμογή σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων	<ul style="list-style-type: none"> - Συμμόρφωση με τις αρχές της αρχιτεκτονικής <i>DiffServ</i>. - Αποφυγή διατήρησης πληροφοριών κατάστασης ανά ροή και εφαρμογής απλών μηχανισμών κατά την μεταγωγή των πακέτων.
Εγκατάσταση νέων συνδέσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα	<ul style="list-style-type: none"> - Αυτοματοποίηση των λειτουργιών με χρήση σηματοδοσίας. - Ελάχιστη εμπλοκή των αρμόδιων διαχειριστών δικτύου.
Αξιόπιστη λειτουργία του μοντέλου σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο.	<ul style="list-style-type: none"> - Αποφυγή αποθήκευσης πληροφοριών κατάστασης στους δρομολογητές κορμού για τις ενεργές ροές.
Αποφυγή προβλημάτων από την αναδρομολογημένη κίνηση	<ul style="list-style-type: none"> - Παρακολούθηση του μονοπατιού που ακολουθούν οι εγκατεστημένες ροές στο δίκτυο. - Ενσωμάτωση μηχανισμών περιορισμού της αναδρομολογημένης κίνησης.
Διατήρηση του ισχύοντος μοντέλου συνεργασίας μεταξύ Παρόχων Υπηρεσιών ή μεταξύ Παρόχου Υπηρεσιών και Συνδρομητών.	<ul style="list-style-type: none"> - Η εκάστοτε διαχειριστική περιοχή οφείλει να αυτοπροστατεύεται από εξωγενείς παράγοντες που μπορούν να διαταράξουν τις παρεχόμενες υπηρεσίες. - Δεν είναι αναγκαία η στενή συνεργασία μεταξύ των Παρόχων Υπηρεσιών για την υποστήριξη συνδέσεων μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών

²⁶ Σε ελάχιστες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κατά την ανταλλαγή των πληροφοριών δρομολόγησης μέσω του πρωτοκόλλου BGP [BGP], οι μηχανισμοί προστασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων διαχειριστικών περιοχών είναι λιγότερο αυστηροί, κυρίως για λόγους λειτουργικότητας.

4.2 Γενική Περιγραφή του Μοντέλου IQPM

Το μοντέλο παροχής ποιότητας υπηρεσίας *IQPM* εμφανίζει ομοιότητες με το αντίστοιχο μοντέλο που εφαρμόζεται στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP*, το οποίο βελτιώνει με την εισαγωγή σηματοδοσίας κατά τη διαδικασία εγκατάστασης νέων συνδέσεων. Ωστόσο, το μοντέλο *IQPM* είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να επιτρέπει την υποστήριξη υπηρεσιών με διαφορετικές εγγυήσεις ποιότητας πέρα από τις υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας. Ρυθμίζοντας τη διαδικασία ελέγχου αποδοχής νέων ροών και διαχειριζόμενο τους διαθέσιμους πόρους στο δίκτυο, το μοντέλο *IQPM* ελέγχει το βαθμό συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης και, επομένως, τις προσφερθείς υπηρεσίες προς την μεταφερόμενη κίνηση. Στην συνέχεια της παρούσας ενότητας επικεντρωνόμαστε στην παροχή υπηρεσίας υψηλής προτεραιότητας με αντίστοιχες εγγυήσεις ποιότητας με την υπηρεσία *Premium IP*.

Το μοντέλο *IQPM* διασπά τη διαδικασία για την παροχής μίας νέας σύνδεσης υψηλής προτεραιότητας σε τέσσερις διαφορετικές φάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29. Ο Πάροχος Υπηρεσιών, ύστερα από τη λήψη ενός αιτήματος από ένα συνδρομητή του, εκτελεί καθορισμένη σειρά από ενέργειες στην κάθε ενδιάμεση φάση μέχρι να ικανοποιήσει το εισερχόμενο αίτημα και παραδώσει τη νέα σύνδεση.



Σχήμα 29: Φάσεις εγκατάστασης ποιότητας υπηρεσίας στο μοντέλο *IQPM*.

Η **φάση εγγραφής** (*subscription phase*) περιλαμβάνει τη συλλογή στοιχείων από τους συνδρομητές του Παρόχου Υπηρεσιών που επιθυμούν να κάνουν χρήση της προσφερόμενης υπηρεσίας. Ο Πάροχος Υπηρεσιών συγκεντρώνει στοιχεία που χρησιμεύουν στην επικύρωση της γνησιότητας (*authentication*) των συνδρομητών και της εξουσιοδότησης (*authorisation*) τους στη χρήση της υπηρεσίας. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, ο Πάροχος Υπηρεσιών αποκτά καλύτερο έλεγχο στη χρήση των πόρων του δικτύου και μπορεί να εφαρμόσει σύνθετες πολιτικές πρόσβασης για την προσφερόμενη υπηρεσίας ελέγχοντας το πληθυσμό των εγγεγραμμένων χρηστών καθώς και τα δικαιώματά τους.

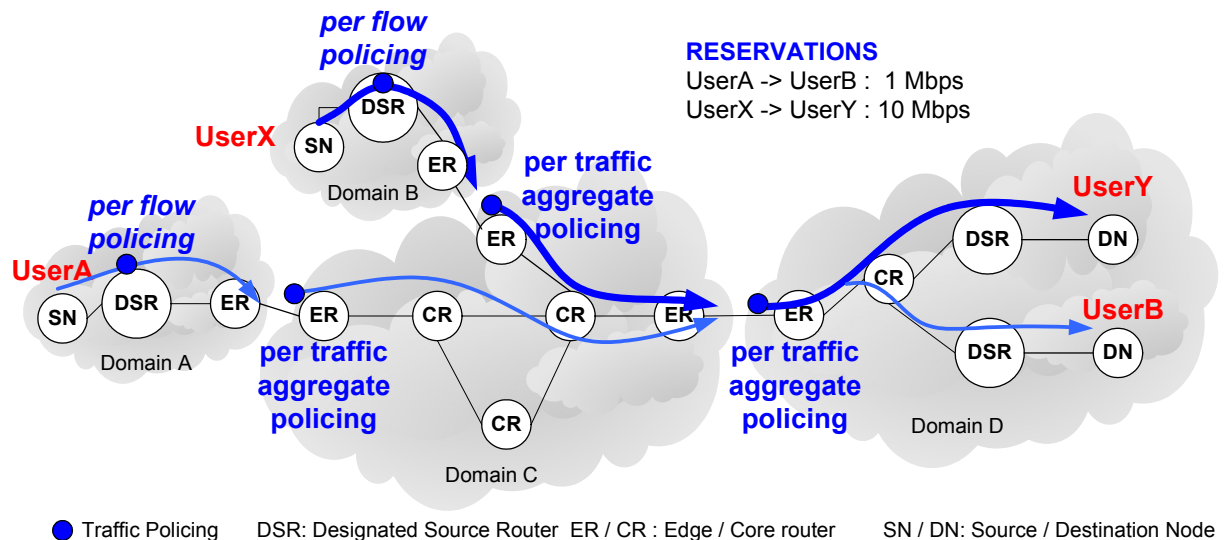
Η φάση **ελέγχου αποδοχής και αστυνόμευσης της κίνησης** (*admission control & traffic policing phase*) απαιτείται για το δυναμικό έλεγχο της χρήσης των πόρων του δικτύου καθώς και την αστυνόμευση (περιορισμό) της κίνησης που μεταφέρεται μεταξύ γειτονικών διαχειριστικών περιοχών. Σύμφωνα με το μοντέλο *IQPM*, ο έλεγχος αποδοχής νέων ροών πραγματοποιείται καταναμημένα στο δίκτυο ώστε να αποφευχθούν προβλήματα κλιμάκωσης, τα οποία εμφανίζονται συχνά σε αρχιτεκτονικές που βασίζονται σε κεντρικές οντότητες. Πριν από την εγκατάσταση μιας ροής, μηνύματα σηματοδότησης διασχίζουν το από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι και ενεργοποιούν μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής βασισμένους σε μετρήσεις (*measurement-based admission control - MBAC*) [BJS00] [GKK95] στους δρομολογητές κορμού. Οι δρομολογητές είναι υποχρεωμένοι να εκτιμήσουν κατά πόσο υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο για την ικανοποίηση της υπό εγκατάσταση ροής. Επιπλέον, οι ακραίοι δρομολογητές εισόδου σε κάθε διαχειριστική περιοχή μπορούν να αποτρέψουν την εγκατάσταση της ροής απορρίπτοντας το σχετικό μήνυμα σηματοδότησης και επιτρέποντας έτσι την εφαρμογή πολιτικών πρόσβασης για τις συνδέσεις που επεκτείνονται πέρα των ορίων μιας διαχειριστικής περιοχής. Τέλος, τα παραπάνω μηνύματα σηματοδότησης ανανεώνουν τους ρυθμιστές κυκλοφορίας²⁷ (*traffic conditioners*) που εφαρμόζονται στα όρια της κάθε διαχειριστικής περιοχής *DiffServ* από τους ακραίους δρομολογητές εισόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 30. Με στόχο τη βελτίωση των χαρακτηριστικών κλιμάκωσης, οι ελεγκτές κυκλοφορίας κατηγοριοποιούν τη συναθροισμένη κίνηση ανάλογα με τη διαχειριστική περιοχή προορισμού. Μόνο ο πρώτος δρομολογητής στο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι της κάθε ροής, ο οποίος αποκαλείται *Επιλεγμένος Δρομολογητής Πηγής* (*Designated Source Router - DSR*), εφαρμόζει έλεγχο της εισερχόμενης κίνησης σε επίπεδο ροής για όσες ροές που ξεκινούν από το τοπικό δίκτυο ευθύνης του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 30.

Κατά τη διάρκεια της **φάσης λειτουργίας της υπηρεσίας** (*service operation phase*), οι συνδρομητές εισάγουν κίνηση στο δίκτυο με βάση τα συμφωνηθέντα χαρακτηριστικά κίνησης. Δεδομένου ότι η αποτυχία μίας γραμμής διασύνδεσης αναγκάζει μέρος της μεταφερόμενης κίνησης να αναδρομολογηθεί, συνθήκες συμφόρησης μπορούν να εμφανιστούν σε γραμμές διασύνδεσης που εξυπηρετούν την αναδρομολογημένη κίνηση. Η συμφόρηση επηρεάζει τις εγγυήσεις ποιότητας που παρέχονται τόσο για τις αναδρομολογημένες ροές όσο και τις «νόμιμες» ροές. Βασισμένο στη **διαδικασία παρακολούθησης** (*monitoring process*) (Σχήμα 29), το μοντέλο *IQPM* κατορθώνει να περιορίζει τις επιπτώσεις που προκαλούν οι αναδρομολογημένες ροές χρωματίζοντας τα πακέτα τους σε κλάση ποιότητας υπηρεσίας χαμηλότερης προτεραιότητας. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο αριθμός ροών που επηρεάζονται ύστερα από μια αποτυχία γραμμής διασύνδεσης. *Πακέτα παρακολούθησης*

²⁷ Οι ρυθμιστές κυκλοφορίας σε δίκτυα *DiffServ* (§2.1.1) αποτελούνται από τα ακόλουθα λειτουργικά μέρη: το μετρητή (*meter*), τον σηματοδότη πακέτων (*marker*), τον διαμορφωτή (*shaper*) και τον «κόφτη» (*dropper*). Στο μοντέλο *IQPM*, οι ελεγκτές κυκλοφορίας δεν εφαρμόζουν διαμόρφωση στην κίνηση υψηλής προτεραιότητας.

(*monitoring packets*) εισάγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα από το δρομολογητή *DSR* για την κάθε ενεργή πηγή κίνησης. Οι δρομολογητές στο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι αναγνωρίζουν τα πακέτα παρακολούθησης και τα αντιστοιχίζουν σε ροές. Στη συνέχεια, αφού τα υποθηκεύσουν στην τοπική τους μνήμη, τα προωθούν προς το *κόμβο Προορισμού* χωρίς να εκτελέσουν κάποια άλλη λειτουργία. Στην περίπτωση που μια τυχαία ροή αναδρομολογηθεί, οι δρομολογητές που δεν ανήκουν στο νέο μονοπάτι ανιχνεύουν τη παύση λήψης πακέτων παρακολούθησης για τη συγκεκριμένη ροή. Σε αυτή την περίπτωση, οι δρομολογητές στέλνουν *μηνύματα συναγερμού* (*alarm messages*) στον ακραίο δρομολογητή εισόδου της διαχειριστικής περιοχής παρέχοντας στοιχεία για την αναδρομολογημένη ροή που έχει εντοπιστεί.

Η **φάση τερματισμού** (*termination phase*) στο μοντέλο *IQPM* αρχίζει όταν τερματίσει μια ροή με εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Οι δρομολογητές στο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης που ανανεώνουν τους ελεγκτές κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών και εξαλείφουν τις πληροφορίες κατάστασης που είναι αποθηκευμένες στη τοπική τους μνήμη.



Σχήμα 30: Ελεγκτές κυκλοφορίας κίνησης μεταξύ διαχειριστικών περιοχών.

4.3 Αναλυτικό σενάριο

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο *IQPM* μέσω ενός παραδείγματος σύμφωνα με το οποίο μία ροή αιτείται την παροχή ποιότητας υπηρεσίας κατά μήκος μονοπατιού που επεκτείνεται μεταξύ δύο διαχειριστικών περιοχών.

4.3.1 Φάση εγγραφής

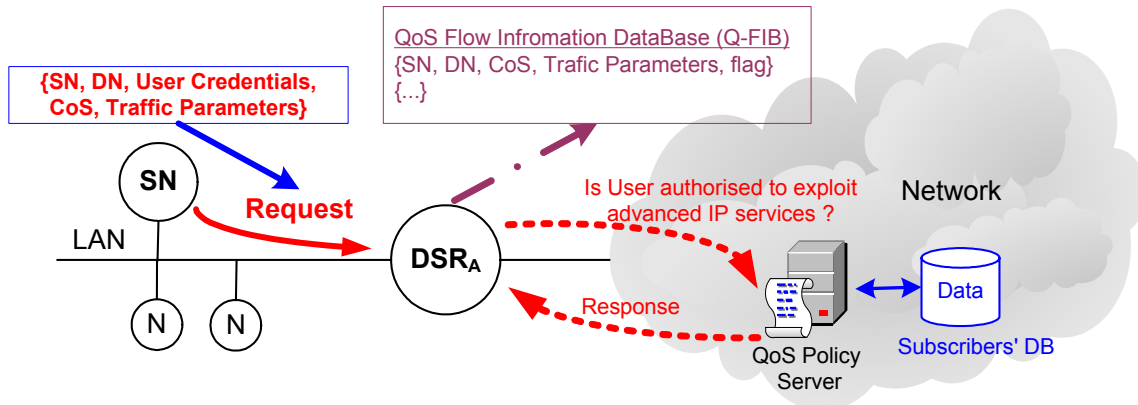
Ο συνδρομητής που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει υπηρεσίες σε δίκτυο που εφαρμόζει το μοντέλο *IQPM* οφείλει καταρχήν να αποκτήσει «σχέση εμπιστοσύνης» με τον τοπικό Πάροχο Υπηρεσιών. Ο χρήστης εγγράφεται στη **βάση συνδρομητών** (*subscribers' database*) του δικτύου²⁸, όπου καταγράφονται δεδομένα πιστοποίησης, για παράδειγμα κωδικοί πρόσβασης, καθώς και τα δικαιώματά του για χρήση της εκάστοτε υπηρεσίας, δηλαδή “πότε” και “υπό ποιες προϋποθέσεις” μπορεί γίνει χρήση της υπηρεσίας. Ο Πάροχος Υπηρεσιών χρησιμοποιεί τα παραπάνω στοιχεία για να επικυρώσει τη γνησιότητα (*authentication*) και για να επιβεβαιώσει το δικαίωμα (*authorisation*) του εκάστοτε συνδρομητή να εκμεταλλευτεί μία προσφερόμενη υπηρεσία. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της βάσης συνδρομητών είναι πολλαπλά. Ο Πάροχος Υπηρεσιών μπορεί να εφαρμόσει σύνθετες πολιτικές πρόσβασης για την εκάστοτε υπηρεσία ανάλογα με τα δικαιώματα και τον πληθυσμό των τελικών χρηστών²⁹. Για παράδειγμα, ο Πάροχος Υπηρεσιών μπορεί να δώσει το δικαίωμα σε μία μερίδα συνδρομητών να δεσμεύσει πόρους εκτός των ορίων της διαχειριστικής περιοχής ή να επιτρέψει τη δέσμευση περισσότερων πόρων από ότι προβλέπεται για τους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου. Επιπλέον, ο Πάροχος Υπηρεσιών μπορεί ευκολότερα να υπολογίσει τη χρήση των παρεχομένων υπηρεσιών (*accounting*) με βάση τα στοιχεία που αποθηκεύονται στη βάση συνδρομητών και τα εισερχόμενα αιτήματα.

Στη συνέχεια, ο συνδρομητής υποβάλει αίτημα στον *Επιλεγμένο Δρομολογητή Πηγής* (*Designated Source Router - DSR*) για την εγκατάσταση μιας ροής με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας με χρήση σηματοδότησης, π.χ. με χρήση του πρωτοκόλλου *Subnet Bandwidth Management* [Yava+00]. Τα πακέτα σηματοδότησης μεταφέρουν τα διαπιστευτήρια (*credentials*) του τελικού χρήστη, τα χαρακτηριστικά κίνησης της υπό εγκατάσταση ροής καθώς και την αιτούμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας στο δρομολογητή που είναι απευθείας συνδεδεμένος στο τοπικό δίκτυο, δηλαδή το δρομολογητή *DSR*. Ο τελευταίος θα πρέπει να επιβεβαιώσει ότι ο τελικός χρήστης επιτρέπεται να δεσμεύει πόρους του δικτύου κατά μήκος του μονοπατιού προς το δίκτυο του *κόμβου Προορισμού* ή να προωθήσει το αίτημα σε κατάλληλο εξυπηρετητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 31. Εφόσον ο δρομολογητής *DSR* εγκρίνει το εισερχόμενο αίτημα αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με την υπό εγκατάσταση ροή στην τοπική βάση που διατηρεί, την οποία αποκαλούμε *Βάση Πληροφοριών για*

²⁸ Η βάση συνδρομητών στο μοντέλο *IQPM* μπορεί να βασιστεί σε υπηρεσίες καταλόγου (*directory services*) που επιτρέπουν την αναζήτηση πληροφοριών ευρετηρίου για τους συνδρομητές ενός δικτύου. Η ανταλλαγή πληροφοριών πραγματοποιείται με χρήση του πρωτοκόλλου *Lightweight Directory Access Protocol – LDAP* [HM02].

²⁹ Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ακριβής τρόπος περιγραφής της πολιτικής πρόσβασης, η διαδικασία πιστοποίησης (*authentication*) και εξουσιοδότησης (*authorization*) των τελικών χρηστών δεν εξετάζεται στην παρούσα διατριβή.

ροές με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (*QoS-Flow Information Database - Q-FLIB*), και χαρακτηρίζει τη σχετική εγγραφή σε «εκκρεμότητα» (*pending*).



Σχήμα 31: Αρχικό αίτημα για την εγκατάσταση ροής με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας

Σε περίπτωση που το αίτημα για την εγκατάσταση της ροής απορριφθεί, ο δρομολογητής *DSR* επιστρέφει σχετικό αρνητικό μήνυμα στον τελικό χρήστη και η διαδικασία ολοκληρώνεται.

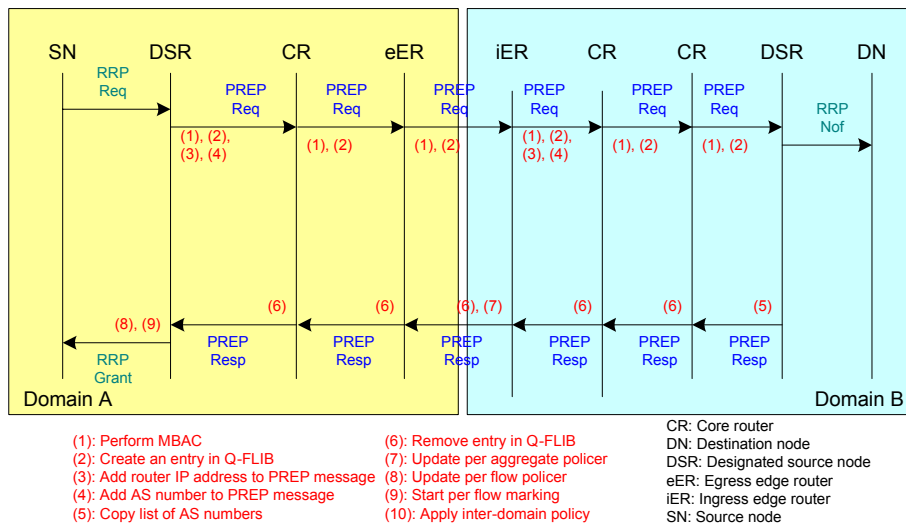
4.3.2 Φάση ελέγχου αποδοχής και αστυνόμευσης της κίνησης

Κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής και αστυνόμευσης της κίνησης (*admission control & traffic policing phase*) οι δρομολογητές επιβεβαιώνουν ότι υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο και, επομένως, η αποδοχή μιας επιπλέον ροής δεν θα επηρεάσει τις εγγυήσεις ποιότητας που παρέχονται στις ήδη εγκατεστημένες ροές. Η απόφαση κατά τον έλεγχο αποδοχής μιας νέας ροής σε κάθε ενδιαμέσο δρομολογητή λαμβάνεται με χρήση των μηχανισμών *Measurement-based Admission Control (MBAC)*. Η χρήση των μηχανισμών *MBAC* είναι ιδιαίτερα ελκυστική προσέγγιση για τη καταναμημένη διαχείριση των πόρων του δικτύου καθώς δεν προϋποθέτουν τη διατήρηση πληροφοριών κατάστασης ανά ροή και δεν απαιτούν τη γνώση των ακριβών χαρακτηριστικών κίνησης των υπό εγκατάσταση ροών. Επιπλέον, οι ακραίοι δρομολογητές εισόδου σε κάθε διαχειριστική περιοχή μπορούν να εφαρμόσουν συγκεκριμένες πολιτικές πρόσβασης για τα εισερχόμενα αιτήματα επιτρέποντας τον έλεγχο των δικτυακών πόρων στη διαχειριστική περιοχή που ανήκουν.

Η παρούσα φάση ξεκινά με την αποστολή πακέτου σηματοδοσίας που διατρέχει το δίκτυο προς την κατεύθυνση του *κόμβου Προορισμού* προκαλώντας τη «δέσμευση» πόρων κατά μήκος του μονοπατιού ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κίνησης της υπό εγκατάσταση ροής. Τα πακέτα σηματοδοσίας αποκαλούνται στο εξής ως *Πακέτα Εκτίμησης των Πόρων Μονοπατιού (Path Resource Estimation Packets - PREPs)*³⁰. Ο δρομολογητής *DSR* δημιουργεί το αρχικό μήνυμα

³⁰ Τα μηνύματα σηματοδοσίας *PREP* υποστηρίζουν την δέσμευση πόρων αντίστοιχα με το πρωτόκολλο *RSVP* [*RSVP*]. Τα μηνύματα *PREP*, όμως, δεν απαιτούν την αποθήκευση πληροφοριών κατάστασης σε επίπεδο ροής

PREP REQ (request), το οποίο δρομολογείται με βάση τη διεύθυνση IP του κόμβου Προορισμού (*path coupled signaling*). Καθώς το μήνυμα προωθείται στο δίκτυο (βλέπε Σχήμα 32), προκαλεί την ενεργοποίηση των μηχανισμών *MBAC*. Οι δρομολογητές προχωρούν στην εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων κατά μήκος του μονοπατιού που προβλέπεται να χρησιμοποιήσουν στο μέλλον τα πακέτα δεδομένων της ροής υπό την προϋπόθεση ότι αυτή θα έχει γίνει προηγουμένως αποδεκτή. Εφόσον υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι πόροι στις γραμμές διασύνδεσης, ο κάθε δρομολογητής προωθεί το μήνυμα προς το επόμενο κόμβο του δικτύου και προσωρινά αποθηκεύει πληροφορίες κατάστασης για τη ροή στην τοπική βάση *Q-FLIB*. Σε αντίθετη περίπτωση, εφόσον δηλαδή δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι, ο δρομολογητής απορρίπτει το μήνυμα και επιστρέφει μήνυμα λάθους στο δρομολογητή *DSR*. Εφόσον τελικά το μήνυμα *PREP REQ* (request) φτάσει στο δρομολογητή *DSR* στο δίκτυο προορισμού³¹, ο τελευταίος μπορεί να συμπεράνει ότι η νέα ροή μπορεί να εγκατασταθεί και επιστρέφει θετικό μήνυμα *PREP RESP* (response) στο δρομολογητή *DSR* στο τοπικό δίκτυο του κόμβου Πηγή. Οι δρομολογητές κατά μήκος του μονοπατιού επιστροφής οφείλουν να επιβεβαιώσουν ότι υπάρχουν στοιχεία κατάστασης για την αντίστοιχη ροή αποθηκευμένα στην τοπική τους βάση *Q-FLIB*. Εφόσον ο έλεγχος είναι επιτυχημένος, ο εκάστοτε δρομολογητής αφαιρεί τη σχετική εγγραφή από τη τοπική βάση *Q-FLIB* και προωθεί το μήνυμα περαιτέρω. Όταν το μήνυμα *PREP RESP* (response) ληφθεί από το δρομολογητή *DSR*, ανανεώνει τη σχετική εγγραφή στη βάση *Q-FLIB* και χαρακτηρίζει τη ροή «εγκατεστημένη» (*established*).



Σχήμα 32: Σηματοδοσία και λειτουργίες στο μοντέλο *IQPM*.

στους δρομολογητές του δικτύου ενώ ο έλεγχος και η «δέσμευση» πόρων πραγματοποιείται προς την κατεύθυνση του κόμβου Πηγή προς τον κόμβο Προορισμού.

³¹ Ο δρομολογητής «πύλης» (*gateway router*) για το τοπικό δίκτυο που είναι συνδεδεμένος ο κόμβος Προορισμού λειτουργεί ως δρομολογητής *DSR* για την κίνηση που παράγεται από όλους τους κόμβους στο τοπικό δίκτυο.

Αν μια ροή παραβιάζει το συμφωνηθέν συμβόλαιο κίνησης μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο *IQPM* υποχρεώνει τη χρήση ελεγκτών κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών που διασχίζει η ροή. Τα πακέτα σηματοδότησης *PREP*, επιπλέον των στοιχείων σχετικά με τα χαρακτηριστικά κίνησης της ροής, μεταφέρουν πληροφορίες για το μονοπάτι μεταξύ κόμβου Πηγή και Προορισμού. Οι αριθμοί *Autonomous System (AS)* [RIPEc] από την κάθε ενδιάμεση διαχειριστική περιοχή συλλέγονται σταδιακά στα πακέτα *PREP REQ (request)* καθώς διασχίζουν το δίκτυο. Η πληροφορία αυτή αντιγράφεται στα πακέτα *PREP RESP (response)* που προωθούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι ακραίοι δρομολογητές χρησιμοποιούν τη λίστα με τους αριθμούς *AS* για να καθορίσουν τη διαχειριστική περιοχή από την οποία εισέρχεται η κίνηση και την αντίστοιχη διαχειριστική περιοχή προς την οποία προωθείται. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, οι ακραίοι δρομολογητές ανανεώνουν τους ελεγκτές κίνησης που εφαρμόζουν για την εισερχόμενη κίνηση. Για λόγους αποφυγής προβλημάτων κλιμάκωσης³², οι ελεγκτές κίνησης εφαρμόζονται σε συναθροίσεις κίνησης παρά σε ξεχωριστές ροές. Χαρακτηριστικά κίνησης για την κάθε ροή αποθηκεύονται στην τοπική βάση *Q-FLIB* αλλά δεν χρησιμοποιούνται για τις λειτουργίες στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*), δηλαδή για την προώθηση των πακέτων ή τη διαχείριση των ουρών εξόδου στους δρομολογητές.

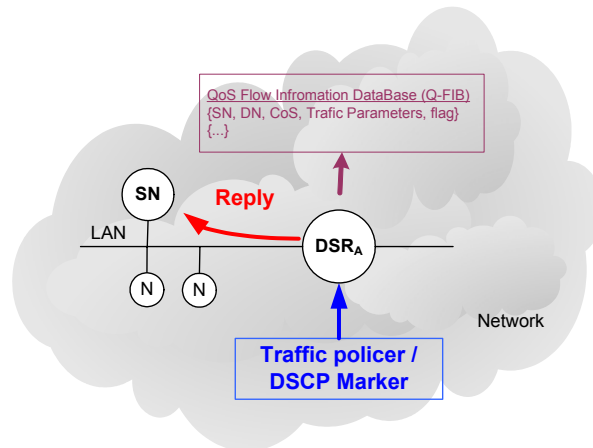
4.3.3 Φάσης λειτουργίας της υπηρεσίας

Ο δρομολογητής *DSR* στο δίκτυο της πηγής, αφού λάβει θετικό μήνυμα *PREP RESP (response)*, ενημερώνει τον τελικό χρήστη ότι απέκτησε το δικαίωμα να εισάγει κίνηση στο δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 33. Επιπλέον, ο δρομολογητής *DSR* εγκαθιστά ελεγκτή κίνησης, ο οποίος παρακολουθεί την κίνηση που εισάγεται από τη πηγή και σε περίπτωση που τα συμφωνηθέντα χαρακτηριστικά κίνησης (*traffic profile*) παραβιάζονται, η επιπλέον κίνηση απορρίπτεται. Η κίνηση από την πηγή προωθείται από τους εσωτερικούς δρομολογητές μιας διαχειριστικής περιοχής χωρίς να υπόκειται σε κάποιον περαιτέρω έλεγχο ή περιορισμό. Στα όρια των διαχειριστικών περιοχών, οι ακραίοι δρομολογητές παρακολουθούν την εισερχόμενη κίνηση από τις γειτονικές διαχειριστικές περιοχές και εφαρμόζουν έλεγχο κίνησης ανάλογα τη κλάση ποιότητας υπηρεσίας και τον αριθμό *AS* της διαχειριστικής περιοχής εξόδου (Σχήμα 30).

Το μοντέλο *IQPM* περιλαμβάνει διαδικασία σύμφωνα με την οποία μπορούν να αναγνωριστούν οι αναδρομολογημένες ροές στο δίκτυο ύστερα από αποτυχία σε κάποια γραμμή διασύνδεσης ή ύστερα από αλλαγή της πολιτικής δρομολόγησης στο δίκτυο. Τέτοια περιστατικά

³² Οι δρομολογητές κορμού υποστηρίζουν περιορισμένο αριθμό από λειτουργίες στο υλικό. Όταν ο αριθμός αυτός ξεπεραστεί, συνήθως οι λειτουργίες πραγματοποιούνται με χρήση μονάδας επεξεργασίας και προκαλούν υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών.

συνήθως δημιουργούν συμφόρηση σε γραμμές του δικτύου που εξυπηρετούν την αναδρομολογημένη κίνηση και ευθύνονται για τον υποβιβασμό του επιπέδου των υπηρεσιών που προσφέρεται σε όλες τις ροές που χρησιμοποιούν τις συμφορημένες γραμμές. Στο μοντέλο *IQPM*, οι αναδρομολογημένες ροές «χρωματίζονται» σε κλάση υπηρεσίας χαμηλότερης προτεραιότητας με σκοπό να μειωθεί ο αριθμός των ροών που λαμβάνουν χαμηλού επιπέδου υπηρεσίες ποιότητας σε γραμμές διασύνδεσης με υψηλή συμφόρηση. Επομένως, το μοντέλο *IQPM* «περιορίζει» τις αναδρομολογημένες ροές προστατεύοντας την υπόλοιπη νόμιμη –μη αναδρομολογημένη- κίνηση στο δίκτυο.

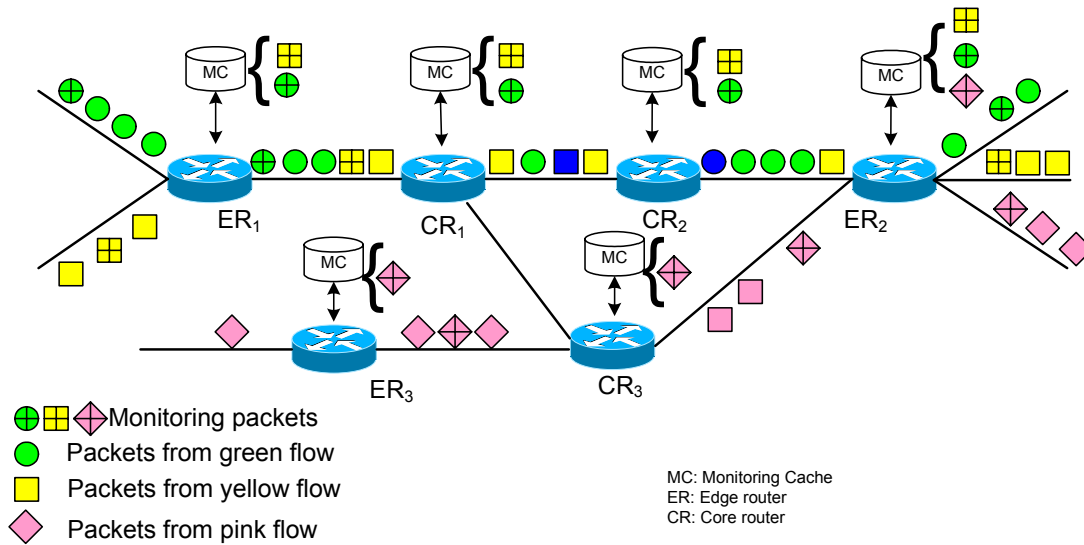


Σχήμα 33: Ενεργοποίηση ελεγκτή κίνησης στο δρομολογητή *DSR* κατά την εγκατάσταση νέας ροής.

Η αναγνώριση των αναδρομολογημένων ροών πραγματοποιείται με τη χρήση *πακέτων παρακολούθησης (monitoring packets)*. Ο κάθε δρομολογητής *DSR* στο δίκτυο του *κόμβου Πηγή* παρεμβάλλει πακέτα παρακολούθησης μεταξύ των «συνηθισμένων» πακέτων δεδομένων (Σχήμα 34). Τα πακέτα παρακολούθησης μεταφέρουν τη διεύθυνση IP του ακραίου δρομολογητή εισόδου της διαχειριστικής περιοχής στην οποία τυχαίνει να βρίσκονται. Ο δρομολογητής *DSR* εισάγει την τοπική του διεύθυνση IP σε όσα πακέτα παρακολούθησης δημιουργεί αλλά, καθώς τα πακέτα διασχίζουν τις ενδιάμεσες διαχειριστικές περιοχές, η διεύθυνση IP του αντίστοιχου ακραίου δρομολογητή εισόδου αποθηκεύεται. Ο κάθε δρομολογητής κατά μήκος του από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού αντιγράφει τα πακέτα παρακολούθησης στην τοπική του μνήμη, την οποία αποκαλούμε *μνήμη παρακολούθησης (monitoring cache)*, χωρίς να εκτελεί καμία λειτουργία στα δεδομένα τους και στη συνέχεια προωθεί τα πακέτα παρακολούθησης όπως τα υπόλοιπα πακέτα IP (Σχήμα 34).

Οι εγγραφές στη μνήμη παρακολούθησης (*monitoring cache*) συνεχώς «γηράσκουν» (*age out*). Εφόσον εκπνεύσει η περίοδος παραμονής της εγγραφής στη μνήμη, μήνυμα συναγερμού *PREP ALRM (alarm)* δημιουργείται και στέλνεται στον ακραίο δρομολογητή εισόδου της διαχειριστικής περιοχής. Οι πληροφορίες για τη διεύθυνση IP του δρομολογητή εισόδου περιλαμβάνεται στις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στις εγγραφές στη μνήμη παρακολούθησης. Εφόσον η ροή παραμένει ενεργή και δεν αναδρομολογηθεί μέσα στο δίκτυο, η συνεχής λήψη

αλληπαλλήλων πακέτων παρακολούθησης ανανεώνουν συνεχώς το μετρητή χρόνου έγκυρης εγγραφής (*validity timer*) και συνεπώς αποφεύγεται η δημιουργία μηνυμάτων συναγερμού (*alarm messages*).

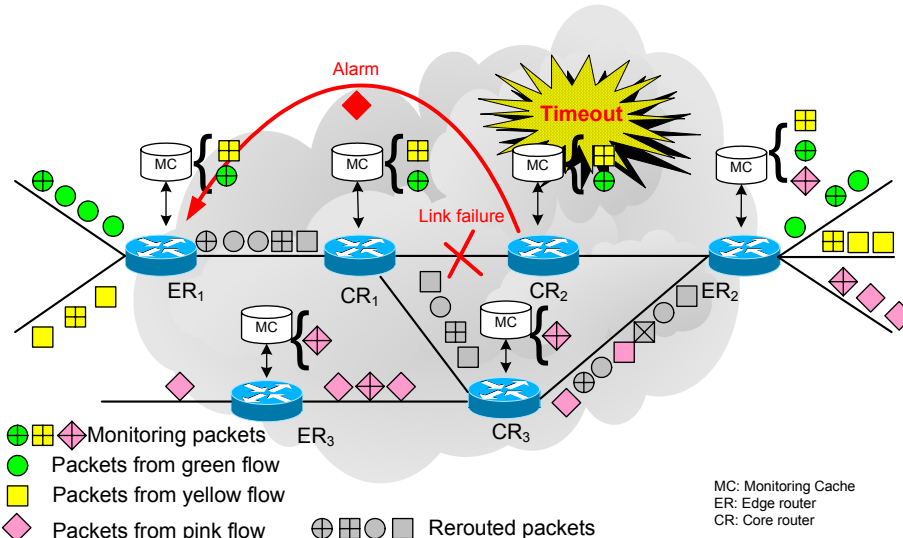


Σχήμα 34: Προώθηση και αποθήκευση πακέτων παρακολούθησης στο μοντέλο IQPM.

Η αποτυχία μιας γραμμής διασύνδεσης έχει ως αποτέλεσμα να μεταβληθεί το μονοπάτι δρομολόγησης μέρους των εγκατεστημένων ροών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 35. Οι δρομολογητές που δεν ανήκουν στο νέο μονοπάτι που ακολουθούν όσες ροές αναδρομολογηθούν θα πάνε να λαμβάνουν πακέτα παρακολούθησης. Επομένως, μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος έγκυρης εγγραφής στη μνήμη παρακολούθησης, μηνύματα συναγερμού *PREP ALRM (alarm)* δημιουργούνται από τους δρομολογητές. Ο ακραίος δρομολογητής, αφού λάβει μηνύματα συναγερμού, μπορεί να προσδιορίσει τις αναδρομολογημένες ροές που εισέρχονται στην διαχειριστική περιοχή μέσω των τοπικών γραμμών διασύνδεσης. Όσες ροές έχουν χαρακτηριστεί ως «αναδρομολογημένες», ο ακραίος δρομολογητής «χρωματίζει» τα πακέτα τους ώστε να μπορούν να διαχωριστούν από την υπόλοιπη κίνηση. Η «χρωματισμένη» κίνηση αν και ανήκει στην ίδια κλάση ποιότητας υπηρεσίας με την υπόλοιπη κίνηση υψηλής προτεραιότητας, προωθείται με μικρότερη προτεραιότητα από τους δρομολογητές κορμού³³. Αυτή η διαδικασία προστατεύει την μη αναδρομολογημένη κίνηση σε γραμμές υπό κατάσταση συμφόρησης μέσα στη διαχειριστική περιοχή. Όταν τα πακέτα εξέρχονται από τη διαχειριστική περιοχή, ο ακραίος δρομολογητής εξόδου επαναφέρει την αρχική τιμή *DSCP* στην επικεφαλίδα IP «αποχρωματίζοντας» τα πακέτα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 35. Στη συνέχεια τα πακέτα προωθούνται στην επόμενη διαχειριστική περιοχή, η οποία δεν μπορεί να ξεχωρίσει αν η ροή είχε προηγουμένως αναδρομολογηθεί ή όχι.

³³ Μία αναδρομολογημένη ροή μπορεί να μη χρωματιστεί εφόσον υπάρχουν αρκετοί πόροι κατά μήκος του μονοπατιού που ακολουθεί. Όπως θα αναλυθεί στην παράγραφο §4.9.2.1, οι δρομολογητές κορμού μπορούν να εκτελέσουν έλεγχο αποδοχής με βάση τα στοιχεία που τους προωθεί ο δρομολογητής εισόδου.

Το μοντέλο *IQPM* χρησιμοποιεί με πρωτότυπο τρόπο μηχανισμούς χρωματισμού των πακέτων σε σχέση αντίστοιχες αρχιτεκτονικές ή μοντέλα παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Ο χρωματισμός της κίνησης δεν σημαίνει υποβάθμιση της σε κλάση χαμηλότερης προτεραιότητας αλλά πραγματοποιείται για να διαχωριστεί -και επομένως να περιοριστεί- η αναδρομολογημένη κίνηση. Το μοντέλο *IQPM* προβλέπει το χρωματισμό της κίνησης μόνο στα όρια της διαχειριστικής περιοχής αντίθετα με την συνήθη πρακτική που ακολουθείται σε άλλα μοντέλα *QoS*, δηλαδή τα πακέτα να χρωματίζονται για το υπόλοιπο μονοπάτι που απομένει μέχρι το *κόμβο Προορισμού* [West+02].



Σχήμα 35: Πακέτα συναγερμού και χρωματισμός των πακέτων από αναδρομολογημένες ροές.

4.3.4 Φάση τερματισμού

Όταν ολοκληρωθεί η επικοινωνία μεταξύ των *κόμβων Πηγής* και *Προορισμού*, ο *κόμβος Πηγή* οφείλει να στείλει μήνυμα τερματισμού στο δρομολογητή *DSR*. Ο τελευταίος, αφού επιβεβαιώσει ότι υπάρχει σχετική εγγραφή στην τοπική βάση *Q-FLIB*, απομακρύνει τον ελεγκτή κίνησης για τη συγκεκριμένη ροή και δημιουργεί μήνυμα τερματισμού *PREP TERM (termination)*, το οποίο και αποστέλλει στον αντίστοιχο δρομολογητή *DSR* στο δίκτυο που φιλοξενεί τον *κόμβο Προορισμού*. Οι ενδιαμέσοι δρομολογητές κατά μήκος του μονοπατιού που λαμβάνουν το μήνυμα τερματισμού αφαιρούν τη σχετική εγγραφή από την τοπική μνήμη παρακολούθησης ώστε να αποφευχθεί η εσφαλμένη δημιουργία μηνυμάτων συναγερμού. Επιπλέον, οι ακραίοι δρομολογητές εισόδου σε μία διαχειριστική περιοχή, αφού επιβεβαιώσουν ότι υπάρχει σχετική εγγραφή στη βάση *Q-FLIB*, ανανεώνουν τους ελεγκτές κίνησης που ρυθμίζουν την εισερχόμενη κίνηση από τις γειτονικές διαχειριστικές περιοχές.

4.4 Εφαρμογή του μοντέλου *IQPM*

Το μοντέλο *IQPM* μπορεί να υποστηρίζει αντίστοιχες υπηρεσίες με αυτές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο 3.2 και αφορούσαν την υπηρεσία *Premium IP* που παρέχεται στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Ειδικότερα, το μοντέλο *IQPM* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη εικονικών κυκλωμάτων (*virtual circuits*) για κίνηση υψηλής προτεραιότητας παρέχοντας τις ακόλουθες εγγυήσεις:

- Εγγυημένη χωρητικότητα (*guaranteed bandwidth*)
- Αμελητέα απώλεια πακέτων (*negligible packet loss*)
- Ελάχιστη καθυστέρηση προς τη μια κατεύθυνση (*minimum one-way delay*)
- Ελάχιστη μεταβλητότητα καθυστέρησης (*minimum inter-packet delay variation - jitter*)

Το μοντέλο *IQPM* επιτρέπει την υποστήριξη συμβολαίων SLA ανάλογων με αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα §3.2.2.3. Η χρήση σηματοδότησης και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας εγκατάστασης νέων συνδέσεων όμως απλοποιεί τον ορισμό των συμβολαίων SLA και δεν είναι πλέον απαραίτητη η συλλογή των περισσοτέρων διαχειριστικών πληροφοριών που απαιτούνται στα συμβόλαια SLA για την υπηρεσία *Premium IP*.

Οι λειτουργίες στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*) για το μοντέλο *IQPM* είναι ακριβώς οι ίδιες με τις λειτουργίες που εφαρμόζονται για την προώθηση κίνησης *Premium IP*, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην ενότητα §3.2.1. Ο χρονοπρογραμματισμός (*scheduling*) των ουρών εξόδου στους δρομολογητές κορμού παρέχει προνομαϊκή μεταχείριση στην κίνηση υψηλής προτεραιότητας σε σχέση με την υπόλοιπη μεταφερόμενη κίνηση, π.χ. εξυπηρετώντας την κίνηση υψηλής προτεραιότητας από ουρά αυστηρής προτεραιότητας (*strict priority*). Το μέγεθος των καταχωρητών (*buffers*) στις ουρές εξόδου των δρομολογητών παραμένει μικρό καθώς κίνηση υψηλής προτεραιότητας εξυπηρετείται άμεσα προκαλώντας σχεδόν αμελητέα συσσώρευση πακέτων στις ουρές εξόδου. Η κατηγοριοποίηση (*classification*) της κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών πραγματοποιείται σε συναθροίσεις κίνησης και επομένως η αστυνόμευση της κίνησης (*traffic policing*) πραγματοποιείται από μικρό αριθμό από ελεγκτές, ο αριθμός των οποίων είναι ανάλογος με τον αριθμό των γειτονικών διαχειριστικών περιοχών³⁴. Τέλος, η δρομολόγηση της κίνησης υψηλής προτεραιότητας πραγματοποιείται σύμφωνα με το τυπικό μοντέλο προώθησης σε δίκτυα IP, όπου το κάθε πακέτο μεταάγεται ανεξάρτητα σύμφωνα με τις πληροφορίες στο πίνακα δρομολόγησης και τη διεύθυνση του κόμβου Προορισμού.

³⁴ Το μοντέλο *IPQM* προδιαγράφει τον ορισμό των συναθροίσεων σύμφωνα με την οποία η κίνηση διαχωρίζεται ανάλογα με την κλάση προτεραιότητας και τη διαχειριστική περιοχή εξόδου.

4.4.1 Ζητήματα κλιμάκωσης του μοντέλου IQPM

Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται από τους δρομολογητές κορμού σε ένα δίκτυο υπερ-υψηλών ταχυτήτων διασύνδεσης οφείλουν να υλοποιούνται με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση εξαιτίας των χρονικών περιορισμών κατά την μεταγωγή των πακέτων. Λειτουργίες που εμφανίζουν αυξημένη πολυπλοκότητα απαιτούν ή την ενσωμάτωση υπολογιστικών μονάδων (*processing units*) που εκτελούν κώδικα λογισμικού ή επιβάλλουν τη χρήση προηγμένου υλικού (*hardware*) ή δεν υποστηρίζονται στους εμπορικά διαθέσιμους δρομολογητές. Στην περίπτωση που επιλέγεται η ενσωμάτωση υπολογιστικών μονάδων παρατηρούνται περιορισμοί στο μέγιστο ρυθμό μεταγωγής πακέτων ενώ στην περίπτωση που επιλέγεται η χρήση προηγμένου υλικού αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής.

Ο Πίνακας 4 ανακεφαλαιώνει τις λειτουργίες που εκτελούνται από τους δρομολογητές κορμού σε ένα δίκτυο που υποστηρίζει το μοντέλο IQPM. Όσες λειτουργίες απαιτούν αυξημένες απαιτήσεις σε υλικό ή σε χρόνο επεξεργασίας από μονάδα επεξεργασίας (*processing unit*), όπως για παράδειγμα η εφαρμογή των ελεγκτών κίνησης με τη χρήση μηχανισμών διαρρέοντος κάδου (*leaky bucket*), εκτελούνται είτε δίπλα στις πηγές κίνησης είτε στα σημεία εισόδου των διαχειριστικών περιοχών. Στα σημεία αυτά, όπως επιβεβαιώνεται στην πράξη από στατιστικά στοιχεία που συλλέγονται από δίκτυα παραγωγής, η ποσότητα της μεταφερόμενης κίνησης είναι μικρότερη σε σχέση με την κίνηση που μεταφέρεται στο εσωτερικό της διαχειριστικής περιοχής. Μόνο οι δρομολογητές DSR εκτελούν έλεγχο κίνησης σε επίπεδο ροής αλλά μόνο για τις ροές που ξεκινούν από το τοπικό δίκτυο ευθύνης τους. Συνεπώς, ο αριθμός των ροών που παρακολουθούνται είναι περιορισμένος ενώ ο συνολικός ρυθμός παραγόμενης κίνησης είναι συνήθως χαμηλός. Οι ακραίοι δρομολογητές εισόδου εφαρμόζουν έλεγχο κίνησης σε συναθροίσεις ροών σε υψηλές ταχύτητες αλλά για μικρό αριθμό διαφορετικών κλάσεων κίνησης. Οι εσωτερικοί δρομολογητές κορμού προωθούν τα πακέτα σύμφωνα με την αρχιτεκτονική *DiffServ* χωρίς να απαιτείται να διατηρούν στοιχεία κίνησης για τις ενεργές ροές που τους διατρέχουν. Οι εσωτερικοί δρομολογητές λαμβάνουν μέρος στην κατανομημένη διαδικασία για έλεγχο αποδοχής νέων ροών, η οποία όμως απαιτεί ελάχιστους πόρους για την παρακολούθηση της χρησιμοποίησης των γραμμών διασύνδεσης. Η επιβάρυνση κατά τη φάση αποδοχής νέων ροών είναι ανάλογη με το ρυθμό εγκατάστασης νέων ροών και όχι με το συνολικό αριθμό ροών που διατρέχουν το εκάστοτε εσωτερικό δρομολογητή. Τέλος, οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στη μνήμη των δρομολογητών είναι περιορισμένες και δε χρησιμοποιούνται για λειτουργίες στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*), δηλαδή σε λειτουργίες προώθησης των πακέτων. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, το μοντέλο IQPM εμφανίζει τις απαραίτητες ιδιότητες που του επιτρέπουν να εγκατασταθεί σε δίκτυα υπερ-υψηλών ταχυτήτων.

Πίνακας 4: Λειτουργίες που υποστηρίζονται από τους δρομολογητές κορμού στο μοντέλο IQPM.

Δρομολογητής / Λειτουργία	Επιλεγμένος Δρομολογητής Πηγής (Designated source router - DSR)	Ακραίος δρομολογητής εισόδου (Ingress edge router)	Ενδιάμεσος δρομολογητής κορμού (Interior core router)	Ακραίος δρομολογητής εξόδου (Egress edge router)
Υποστήριξη σηματοδότησης κατά τη φάση εγκατάστασης & τερματισμού ροών.	NAI	NAI	NAI	NAI
Διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου με χρήση μηχανισμών MBAC.	NAI	NAI	NAI	NAI
Έλεγχος της εισερχόμενης κίνησης στη διαχειριστική περιοχή.	NAI (Ροές από το τοπικό δίκτυο.)	NAI (Συναθροίσεις κίνησης ανάλογα με τον αριθμό AS.)	OXI	OXI
Συμμετοχή στη διαδικασία παρακολούθησης του μονοπατιού των ροών ⁽¹⁾ .	NAI (Δημιουργία των πακέτων παρακολούθησης.)	NAI (Λαμβάνει όλα τα μηνύματα συναγερμού.)	NAI	NAI
Υποστήριξη τοπικής βάσης Q-FLIB.	NAI	NAI ⁽²⁾	OXI ⁽³⁾	OXI ⁽³⁾
Χρωματισμός & αποχρωματισμός της αναδρομολογημένης κίνησης ⁽⁴⁾ .	NAI (Χρωματίζει τις αναδρομολογημένες ροές)	OXI	OXI	NAI (Αποχρωματίζει όσα πακέτα ανήκουν σε αναδρομολογημένες ροές)

(1): Τα πακέτα παρακολούθησης αποθηκεύονται στη τοπική μνήμη παρακολούθησης χωρίς επεξεργασία.-- (2): Οι εγγραφές στη βάση Q-FLIB χρησιμοποιούνται μόνο για την ανανέωση των ελεγκτών κίνησης.-- (3): Εγγραφές στη βάση Q-FLIB διατηρούνται προσωρινά κατά τη φάση εγκατάστασης των ροών.-- (4): Η κάθε κλάση υπηρεσίας αντιστοιχίζεται σε δύο τιμές DSCP («χρωμάτα»), οι οποίες καθορίζουν αν η κίνηση έχει αναδρομολογηθεί ή όχι.

4.5 Σύγκριση μοντέλου *IQPM* με παρόμοιες αρχιτεκτονικές

Στις ακόλουθες παραγράφους συγκρίνουμε το προτεινόμενο μοντέλο *IQPM* με το αντίστοιχο μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Εξετάζουμε, επίσης, το βελτιωμένο μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* που πρόσφατα προδιαγράφηκε στο πλαίσιο της δραστηριότητας SA3 – “End to End Quality of Service” του έργου GN2. Στη συνέχεια, συγκρίνουμε το μοντέλο *IQPM* με το μοντέλο *Resource Management in DiffServ (RMD)* [West+02], το οποίο παρουσιάζει λειτουργικές ομοιότητες ως προς τη χρήση της σηματοδοσίας αλλά διαφοροποιείται στις λειτουργίες ελέγχου συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης. Τέλος, αντιπαραβάλλουμε το μοντέλο *IQPM* με διάφορες αρχιτεκτονικές με τη βοήθεια ενός διάγραμμα που παρουσιάζει σχηματικά τη σχετική πολυπλοκότητα και το βαθμό χρήσης της σηματοδοσίας κατά την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα IP.

4.5.1 Σύγκριση με μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP*

Το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας ποιότητας *Premium IP* παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με το μοντέλο *IQPM*, δεδομένου ότι η ανάπτυξη του δεύτερου (μοντέλου) βασίστηκε στις αρχές που ορίστηκαν για την υποστήριξη της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται στο πεδίο δεδομένων (*data plane*) είναι πανομοιότυπες για τα δύο μοντέλα. Η προώθηση των πακέτων πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αρχές της αρχιτεκτονικής *DiffServ* ενώ η κίνηση προωθείται με μέγιστη δυνατή προτεραιότητα στις ουρές εξόδου των δρομολογητών. Επιπλέον, η κάθε διαχειριστική περιοχή ελέγχει τη συναθροισμένη εισερχόμενη κίνηση με σκοπό την αποφυγή συνθηκών συμφόρησης στο εσωτερικό της.

Το μοντέλο για την παροχή συνδέσεων *Premium IP* εμφανίζει σημαντικό διαχειριστικό κόστος, κυρίως για συνδέσεις που επεκτείνονται κατά μήκος διαφορετικών διαχειριστικών περιοχών. Η εφαρμογή του μοντέλου στο δίκτυο του GÉANT πραγματοποιείται συνήθως για συνδέσεις που δεσμεύουν σημαντικό ποσοστό από τη διαθέσιμη χωρητικότητα στις γραμμές διασύνδεσης και διαρκούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αντιθέτως, το μοντέλο *IQPM* έχει σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπει την υποστήριξη ροών που εμφανίζουν μικρή διάρκεια ή χαμηλό ρυθμό κίνησης. Το μικρό διαχειριστικό κόστος και η εγκατάσταση των ροών σε ελάχιστο χρονικό διάστημα επιτρέπουν τη χρήση του μοντέλου *IQPM* για την υποστήριξη πλήθος εφαρμογών που δεν θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν αντίστοιχες υπηρεσίες με χρήση του μοντέλου *Premium IP*, π.χ. εφαρμογές τηλεδιάσκεψης. Κατά συνέπεια, ένα δίκτυο που βασίζεται στο μοντέλο *IQPM* μπορεί να επιτύχει υψηλό βαθμό χρησιμοποίησης και να υποστηρίξει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.

Το μοντέλο *IQPM* περιλαμβάνει μηχανισμούς παρακολούθησης των ροών και, σε περίπτωση αλλαγής της τοπολογίας του δικτύου, εφαρμόζει μηχανισμούς που χρωματίζουν την αναδρομολογημένη κίνηση σε κίνηση χαμηλότερης προτεραιότητας. Με την τεχνική αυτή, το μοντέλο *IQPM* κατορθώνει να περιορίσει τον αριθμό των ροών που λαμβάνουν μειωμένες υπηρεσίες σε περιόδους συμφόρησης ύστερα από αναδρομολόγηση μέρους της μεταφερόμενης κίνησης πάνω από το δίκτυο. Όπως προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από προσομοιώσεις στην υποενότητα 0, το μοντέλο προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες από το αντίστοιχο μοντέλο *Premium IP* σε δίκτυα που εμφανίζουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων στο δίκτυο.

Το μοντέλο για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* στο GÉANT/NRENs δεν περιλαμβάνει μηχανισμός για έλεγχο της συμφόρησης στο δίκτυο. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί παραβίαση των παρεχόμενων υπηρεσιών, προβλέπεται ότι θα διαπραγματευτούν εκ νέου οι παρεχόμενες υπηρεσίες που παρέχονται προς τους τελικούς χρήστες. Η προσέγγιση αυτή εισάγει καθυστερήσεις κατά την αντιμετώπιση των προβλημάτων συμφόρησης αφού απαιτείται η εξαρχής εφαρμογή των φάσεων εγκατάστασης της υπηρεσίας *Premium IP*. Αντιθέτως, το μοντέλο *IQPM* επιτρέπει τη σταδιακή εξομάλυνση της συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης με την απόρριψη εγκατάστασης νέων συνδέσεων σε όσες γραμμές διασύνδεσης εμφανίζουν υψηλό βαθμό χρησιμοποίησης.

4.5.1.1 Σύγκριση με βελτιωμένο μοντέλο *Premium IP* στο GN2-SA3

Το βελτιωμένο μοντέλο που προδιαγράφεται στο πλαίσιο της δραστηριότητας SA3 – “End to End Quality of Service” του έργου GN2 περιλαμβάνει τη χρήση σηματοδοσίας και μεσίτη εύρους ζώνης (*bandwidth broker*) για την εγκατάσταση νέων συνδέσεων *Premium IP* διαμέσου πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών. Αντίθετα με το μοντέλο *IQPM*, ο έλεγχος αποδοχής στο GN2-SA3 πραγματοποιείται από κεντρική οντότητα³⁵, το *Premium IP Provisioning System (PIP PS)*, η οποία διαχειρίζεται τους διαθέσιμους πόρους μέσα στη διαχειριστική περιοχή. Αυτό προϋποθέτει τη συνεχή συλλογή στοιχείων για τους διαθέσιμους πόρους στο δίκτυο από την οντότητα *PIP PS* ενώ η εγκατάσταση συνδέσεων μεταξύ πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών απαιτεί τη συνεργασία των οντοτήτων *PIP PS* από την κάθε εμπλεκόμενη διαχειριστική περιοχή. Το μοντέλο που προδιαγράφεται στο GN2-SA3 οφείλει να ξεπεράσει προβλήματα κλιμάκωσης κατά την εφαρμογή του σε δίκτυα που απαιτούν την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού αιτημάτων.

³⁵ *bandwidth broker*

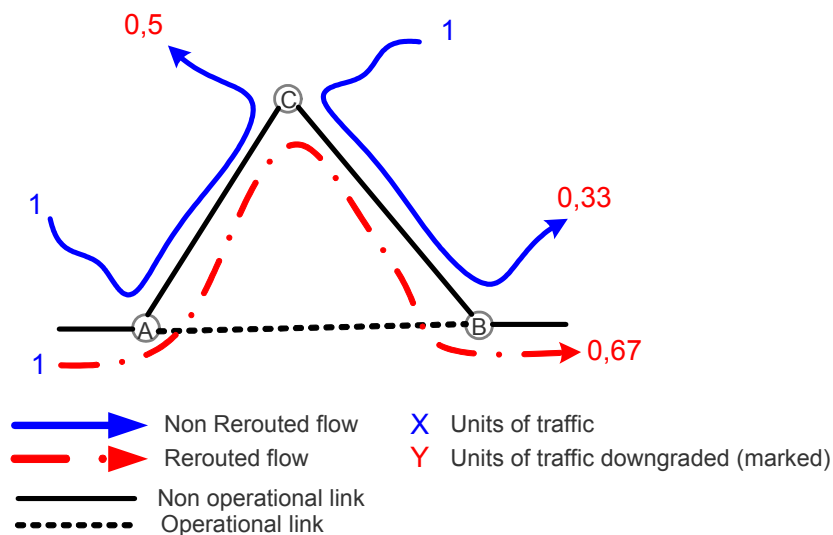
4.5.2 Σύγκριση με την αρχιτεκτονική *RMD*

Το προτεινόμενο μοντέλο *IQPM* και το μοντέλο *Resource Management in DiffServ (RMD)* [West+02], παρουσιάζουν αρκετές λειτουργικές ομοιότητες αλλά και ουσιαστικές διαφορές. Τα δύο μοντέλα βασίζονται στην αρχιτεκτονική *DiffServ*, σύμφωνα με την οποία οι πιο σύνθετες λειτουργίες πραγματοποιούνται στους ακραίους δρομολογητές του δικτύου. Οι εσωτερικοί δρομολογητές, εκτός από τη μεταγωγή πακέτων σε συναθροίσεις κίνησης εκτελούν ελάχιστες επιπλέον λειτουργίες στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*). Ο έλεγχος αποδοχής και η διαχείριση των δικτυακών πόρων υλοποιείται κατανεμημένα με τη εφαρμογή μηχανισμών *MBAC* από τον κάθε δρομολογητή που παρεμβάλλεται στο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι.

Οι διαφορές που εμφανίζουν τα δύο μοντέλα εντοπίζονται κυρίως στο επίπεδο ελέγχου (*control plane*), κυρίως στον ορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών στα πρωτοκόλλα σηματοδοσίας και στο τρόπο χειρισμού της κίνησης σε περιόδους συμφόρησης στο δίκτυο. Ειδικότερα, το μοντέλο *IQPM* βασίζεται στην από άκρο-σε-άκρο σηματοδοσία κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής σε αντίθεση με το μοντέλο *RMD* όπου προδιαγράφονται δύο επίπεδα σηματοδοσίας. Το πρωτόκολλο *Per-Hop Reservation (PHR)* του *RMD*, το οποίο εμφανίζει ομοιότητες με το πρωτόκολλο *RSVP* [Brad+97], χρησιμοποιείται για τη διαχείριση πόρων στο εσωτερικό της εκάστοτε διαχειριστικής περιοχής. Αιτήματα για εγκατάσταση συνδέσεων που προέρχονται από γειτονικές διαχειριστικές περιοχές ικανοποιούνται με τη χρήση του πρωτόκολλου *Per Domain Reservation (PDR)* του *RMD*. Η από άκρο-σε-άκρο σηματοδοσία καθώς και η δέσμευση πόρων προς την κατεύθυνση του κόμβου Προορισμού στο μοντέλο *IQPM* -σε αντίθεση με το πρωτόκολλο *PHR*-απλοποιούν τις λειτουργίες που υλοποιούνται από τους ακραίους δρομολογητές –ιδιαίτερα στους δρομολογητές εξόδου- αλλά κάνει υποχρεωτική την υποστήριξη του μοντέλου *IQPM* από όλες τις ενδιάμεσες διαχειριστικές περιοχές κατά μήκος του μονοπατιού.

Τα δύο μοντέλα εφαρμόζουν διαφορετικούς μεθόδους για την αντιμετώπιση των συνεπειών σε περιόδους συμφόρησης στο δίκτυο ύστερα από αποτυχία γραμμών διασύνδεσης και αναδρομολόγηση μέρους της κίνησης. Το μοντέλο *IQPM* παρακολουθεί τις διαδρομές που ακολουθούν οι ροές μέσα σε μια διαχειριστική περιοχή με χρήση των πακέτων παρακολούθησης (*monitoring packets*). Σε περίπτωση που μια ροή αναδρομολογηθεί, ο ακραίος δρομολογητής εισόδου «χρωματίζει» τα πακέτα της ροής σε κλάση χαμηλότερη προτεραιότητας με στόχο να προστατευτούν οι υπόλοιπες ροές υψηλής προτεραιότητας σε γραμμές με υψηλή συμφόρηση. Τα πακέτα των αναδρομολογημένων ροών «χρωματίζονται» στην αρχική προτεραιότητά τους κατά την έξοδό τους από την διαχειριστική περιοχή. Αντίθετα, στο μοντέλο *RMD* παρακολουθείται ο βαθμός συμφόρησης που αντιμετωπίζουν οι ροές στις γραμμές διασύνδεσης. Όσες ροές αντιμετωπίζουν αυξημένο βαθμό συμφόρησης στους ενδιάμεσους δρομολογητές κορμού είτε «χρωματίζονται» σε χαμηλότερης κλάσης υπηρεσίες είτε τερματίζονται από το ακραίο δρομολογητή εισόδου χωρίς να γίνεται καμία διάκριση μεταξύ αναδρομολογημένων ή μη αναδρομολογημένων ροών. Η προσέγγιση αυτή, εκτός από αυξημένη

πολυπλοκότητα στην υλοποίησή της για τους εσωτερικούς δρομολογητές και τους δρομολογητές εξόδου, αυξάνει τον αριθμό των «χρωματισμένων» ροών σε σύγκριση με το μοντέλο *IQPM*. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 36 φαίνεται τοπολογία δικτύου με τρεις κόμβους και τρεις ροές κίνησης. Για λόγους απλότητας, η κάθε ροή θεωρείται ότι εισάγει μία μονάδα κίνησης ενώ οι γραμμές διασύνδεσης μπορούν να ικανοποιήσουν μία μονάδα κίνησης υψηλής προτεραιότητας. Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, δηλαδή χωρίς σφάλματα στις γραμμές διασύνδεσης, όλη η κίνηση εξυπηρετείται. Σε περίπτωση προβλήματος στη γραμμή διασύνδεσης “AB”, η ροή με κόκκινο χρώμα αναδρομολογείται μέσω του κόμβου “C”. Σύμφωνα με το μοντέλο *RMD*, μία (1) από τις δύο (2) μονάδες κίνησης θα χρωματιστεί στη γραμμή διασύνδεσης “AC” ενώ μισή (0,5) μονάδα από τη μιάμιση (1,5) μονάδα θα χρωματιστεί στη γραμμή “CB”. Συνεπώς, θα χρωματιστεί συνολικά μιάμιση (1,5) μονάδα κίνησης. Αντίθετα, το μοντέλο *IQPM* θα χρωματίσει μόνο την αναδρομολογημένη ροή, δηλαδή μόνο μία (1) μονάδα κίνησης. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο *RMD* δεν αντιμετωπίζει την αιτία που προκαλεί τη συμφόρηση στο δίκτυο, δηλαδή τις αναδρομολογημένες ροές, αλλά προσπαθεί να περιορίσει επιπτώσεις τους.



Σχήμα 36: Παράδειγμα υπολογισμού της πιθανότητας χρωματισμού μιας ροής στο μοντέλο *RMD*.

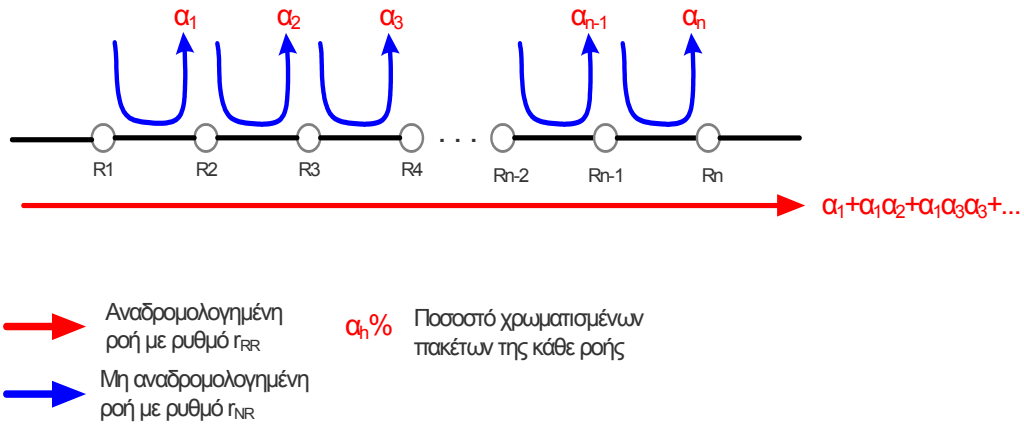
Στη γενικότερη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση που το νέο μονοπάτι αποτελείται από n γραμμές διασύνδεσης (Σχήμα 37), ο ρυθμός R_{color} των «χρωματισμένων» πακέτων σύμφωνα με το μοντέλο *RMD* υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$R_{color} = \sum_{h=1}^n \{a_h * r_{NR}\} + \sum_{h=1}^n \prod_{k=1}^h a_k r_{RR} = (a_1 + a_2 + \dots) * r_{NR} + (a_1 + a_1 a_2 + a_1 a_2 a_3 + \dots) * r_{RR},$$

όπου $\alpha_0 = 0$ και $a_h = \frac{\prod_{l=1}^{h-1} (1 - a_l) * r_{RR}}{r_{NR} + \prod_{l=1}^{h-1} (1 - a_l) * r_{RR}}$.

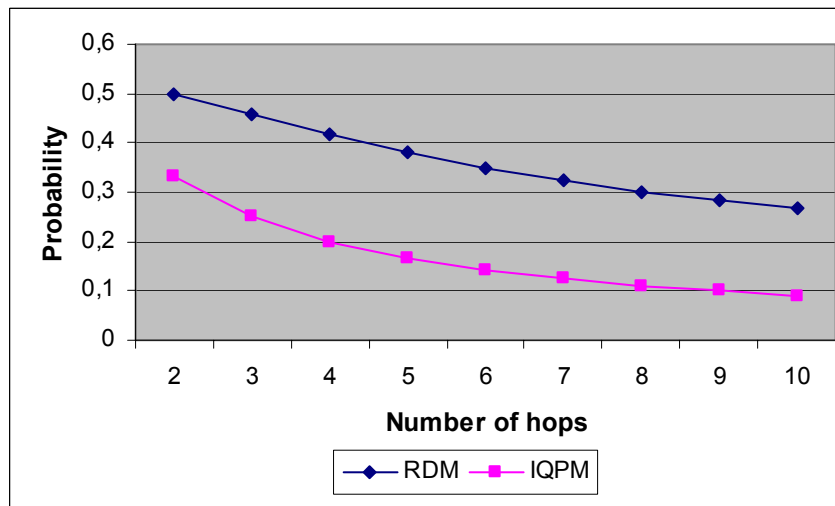
Η μέση πιθανότητα P_{color} για χρωματισμό (ή τερματισμό) μιας ροής προκύπτει από το τύπο:

$$P_{color} = \frac{n * R_{color}}{n * r_{NR} + r_{RR}} \text{ (τύπος A),}$$

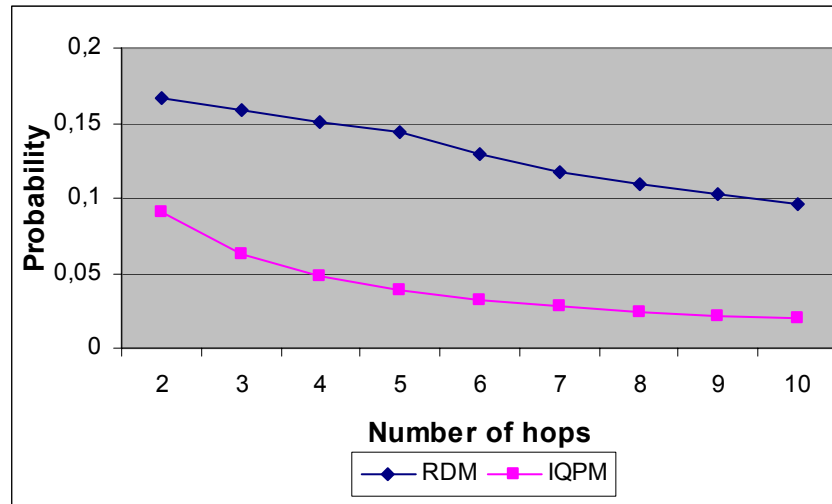


Σχήμα 37: Παράδειγμα υπολογισμού της πιθανότητας χρωματισμού μιας ροής στο μοντέλο RMD.

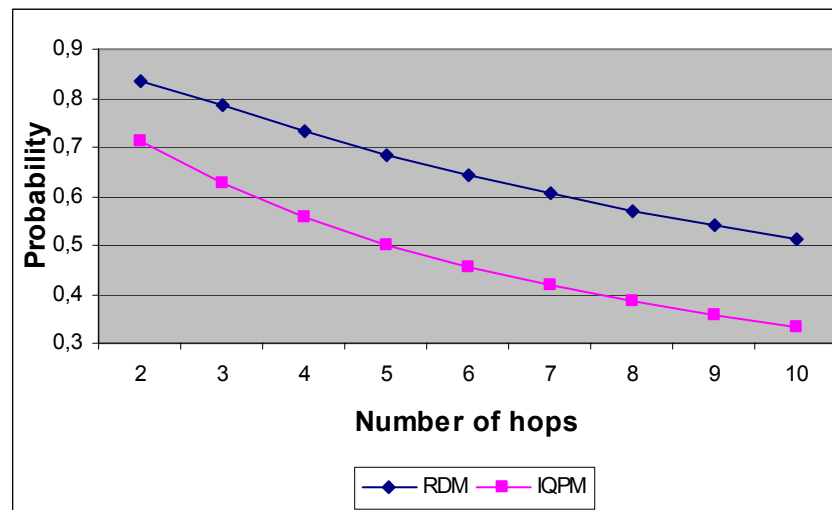
Τα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζουν τη μέση πιθανότητα χρωματισμού των πακέτων σύμφωνα με τα μοντέλα IQPM και RMD. Οι καμπύλες προκύπτουν από τη εφαρμογή του τύπου A καθώς μεταβάλλεται ο λόγος της αναδρομολογημένης “RR” προς την μη αναδρομολογημένη “non-RR” κίνησης. Σε κάθε περίπτωση το μοντέλο RMD χρωματίζει περισσότερες ροές από όσες χρωματίζει το μοντέλο IQPM.



Σχήμα 38: Μέση πιθανότητα χρωματισμού ροής μίας μονάδας κίνησης (Λόγος αριθμού αναδρομολογημένων (RR) ροών προς μη αναδρομολογημένες (nRR) ροές = 1/1 για κάθε σύνδεσμο).

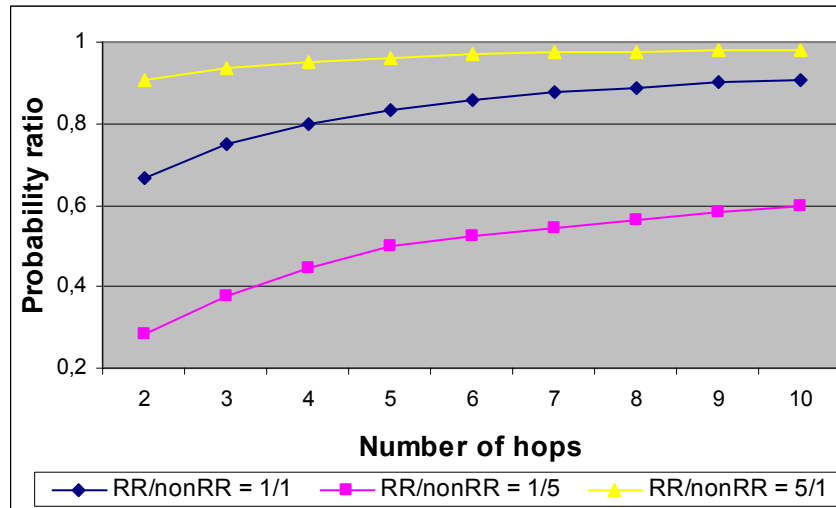


Σχήμα 39: Μέση πιθανότητα χρωματισμού ροής μίας μονάδας κίνησης (Λόγος αριθμού αναδρομολογημένων (RR) ροών προς μη αναδρομολογημένες (nRR) ροές = $1/5$ για κάθε σύνδεσμο).

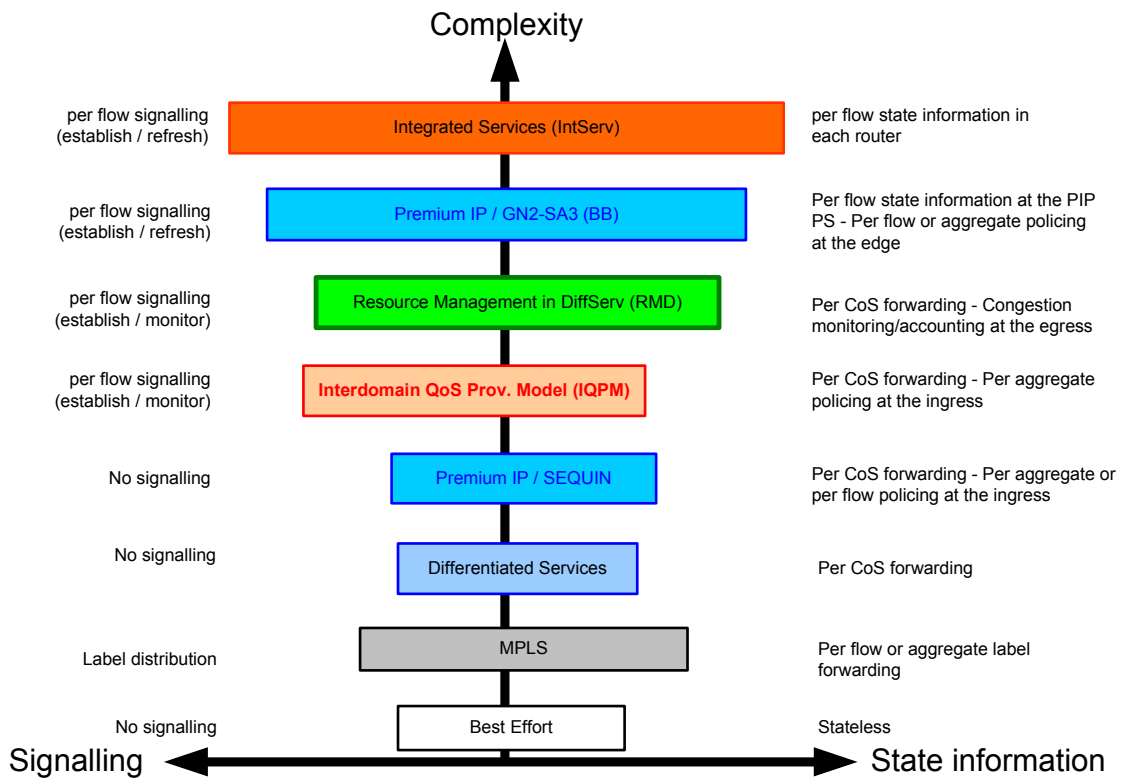


Σχήμα 40: Μέση πιθανότητα χρωματισμού ροής μίας μονάδας κίνησης (Λόγος αριθμού αναδρομολογημένων (RR) ροών προς μη αναδρομολογημένες (nRR) ροές = $5/1$ για κάθε σύνδεσμο).

Το Σχήμα 41 εμφανίζει τη ο λόγος της μέσης πιθανότητας να χρωματιστούν οι αναδρομολογημένες ροές σύμφωνα με τα μοντέλα RMD και $IQPM$. Όπως προκύπτει από το διαγράμματα, το μοντέλο RMD χρωματίζει την κίνηση από τις αναδρομολογημένες ροές με μικρότερη πιθανότητα από ότι πραγματοποιεί το μοντέλο $IQPM$. Η διαφορά μειώνεται όταν ο λόγος της αναδρομολογημένης κίνησης προς την υπόλοιπή κίνηση είναι μικρός και όταν το μονοπάτι της αναδρομολογημένης κίνησης αυξάνει κατά μεγάλο αριθμό από $hops$.



Σχήμα 41: Ο λόγος πιθανότητας χρωματισμού της αναδρομολογημένης ροής (ή ροών) μεταξύ μοντέλων RMD και IQPM.



Σχήμα 42: Σχηματική σύγκριση διαφορετικών αρχιτεκτονικών παροχής ποιότητας υπηρεσίας ως προς την πολυπλοκότητα του μοντέλου (κάθετος άξονας), το βαθμό χρήσης της σηματοδοσία (αριστερή κατεύθυνση οριζόντιου άξονα) και το μέγεθος πληροφοριών κατάστασης (δεξιά κατεύθυνση άξονα).

4.5.3 Σύγκριση του μοντέλου IQPM με λοιπές αρχιτεκτονικές

Στην ενότητα §2 της παρούσας διατριβής παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες αρχιτεκτονικές ή μοντέλα έχουν προτεθεί στη βιβλιογραφία για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει γενικά συγκριτικά χαρακτηριστικά για τον τρόπο υλοποίησης τους συμπεριλαμβανομένου του μοντέλου IQPM και τα κατατάσσει ανάλογα με την πολυπλοκότητά τους.

Πίνακας 5: Σύγκριση διαφορετικών αρχιτεκτονικών παροχής ποιότητας υπηρεσίας.

Μοντέλο	Πολυπλοκότητα	Σηματοδότηση	Μέγεθος πληροφοριών κατάστασης απαραίτητων για τη προώθηση της κίνησης (data plane)
<i>Best Effort</i>	Ελάχιστη	OXI	Μηδενικό
<i>MPLS DiffServ-aware TE</i>	Περιορισμένη	NAI	Μικρό (Διατήρηση ετικετών (labels) για τα εγκατεστημένα μονοπάτια LSPs)
<i>Differentiated Services</i>	Περιορισμένη	OXI	Αμελητέο
<i>Premium IP/S EQUIN</i>	Περιορισμένη	OXI	Μικρό (Διατήρηση πληροφοριών ανά ροή στους ακραίους δρομολογητές κορμού)
<i>IQPM</i>	Μέση	NAI	Μικρό (Διατήρηση πληροφοριών ανά συνάθροιση κίνησης και ανά αριθμό AS στους ακραίους δρομολογητές εισόδου)
<i>Resource Management in DiffServ</i>	Μέση	NAI	Μεγάλο (Διατήρηση πληροφοριών ανά συνάθροιση κίνησης στους ακραίους δρομολογητές)
<i>Premium IP / GN2-SA3</i>	Αυξημένη	NAI	Μεγάλο (Διατήρηση πληροφοριών ανά ροή στο PIPPS)
<i>Integrated Services</i>	Μέγιστη	NAI	Υπερβολικό (Διατήρηση πληροφοριών ανά ροή σε όλους τους δρομολογητές)

Το μοντέλο *IQPM* εμφανίζει μέση πολυπλοκότητα κατά την υλοποίηση του και περιορισμένες ανάγκες για διατήρηση πληροφοριών κατάστασης για τις ενεργές ροές του δικτύου. Αντίστοιχες πληροφορίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 42.

4.6 Αποτελέσματα από προσομοιώσεις

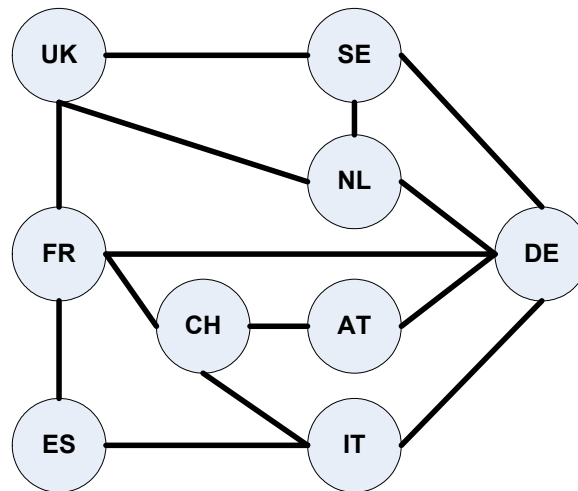
Το μοντέλο *IPQM* υλοποιήθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης *Network Simulator - 2 (NS-2)* [NS-2] ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του θεωρητικού μοντέλου παροχής της υπηρεσίας. Οι δοκιμές προσομοίωσης που εκτελέστηκαν επαλήθευσαν ότι υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας μπορούν να υποστηριχθούν με το μοντέλο *IQPM*. Επίσης, επιβεβαιώθηκε η εκτίμηση ότι το προτεινόμενο μοντέλο μειώνει τον αριθμό των υψηλής προτεραιότητας ροών που λαμβάνουν χαμηλού επιπέδου υπηρεσίες ύστερα από αποτυχία των γραμμών διασύνδεσης στο δίκτυο σε σχέση με το μοντέλο υλοποίησης της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENS.

4.6.1 Δίκτυο – Παράμετροι

Για την εκτέλεση των δοκιμών προσομοίωσης του μοντέλου *IQPM* χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία δικτύου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 43, η οποία βασίστηκε στη σημερινή τοπολογία του πανευρωπαϊκού δικτύου GÉANT³⁶. Το δίκτυο προσομοίωσης περιλάμβανε εννέα κόμβους (δρομολογητές) συνδεδεμένους μεταξύ τους με δεκατέσσερις γραμμές διασύνδεσης. Ο κάθε κόμβος συνδέονταν με τουλάχιστον δύο άλλους γειτονικούς κόμβους ενώ ο μέγιστος βαθμός διασύνδεσης των κόμβων ήταν πέντε. Η συγκεκριμένη τοπολογία επιτρέπει σε δύο τυχαίους κόμβους του δικτύου να επικοινωνούν μεταξύ τους παρόλο που μία οποιαδήποτε γραμμή διασύνδεσης παρουσίαζε σφάλμα κατά τη λειτουργία της.

Ο κάθε δρομολογητής στο δίκτυο προσομοίωσης είναι συνδεδεμένος με δέκα γεννήτριες κίνησης –δεν φαίνονται στο Σχήμα 43- όπου η καθεμία από τις οποίες παράγει κίνηση με σταθερό ρυθμό 150 Kbps. Οι ροές που εγκαθίστανται μεταξύ δύο τυχαίων σταθμών κίνησης χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο μεταφοράς UDP και επομένως ο ρυθμός παραγόμενης κίνησης δεν μειώνεται ύστερα από απώλεια πακέτων κατά τη μεταφορά τους πάνω από το δίκτυο. Οι γραμμές διασύνδεσης στο δίκτυο προσομοίωσης έχουν χωρητικότητα 1 Mbps επιτρέποντας την ταυτόχρονη εγκατάσταση έξι ροών χωρίς υπερκάλυψη πόρων (*oversubscription*).

³⁶ Το δίκτυο προσομοίωσης περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου GÉANT που συνδέονται μεταξύ τους με τουλάχιστον δύο άλλους γειτονικούς κόμβους με γραμμές διασύνδεσης ταχύτητας 10 Gbps (Σχήμα 14).



Σχήμα 43: Επίπεδο διάγραμμα (*planar graph*) του δικτύου GÉANT.

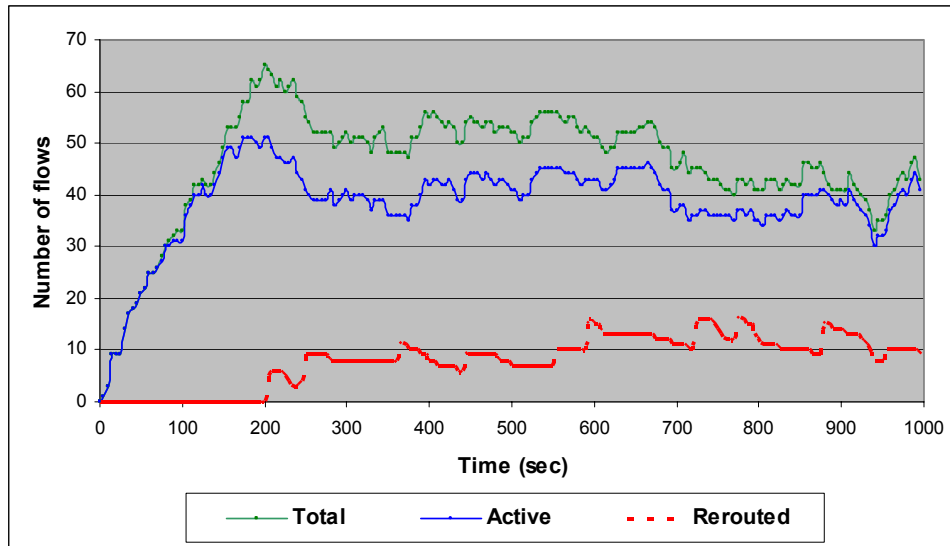
Εξετάσαμε την απόδοση που παρουσίασαν τρεις κλάσεις υπηρεσίας διαφορετικής προτεραιότητας η καθεμία. Η κλάση υψηλής προτεραιότητας –αντίστοιχη με την υπηρεσία *Premium IP*- χρησιμοποιήθηκε για την εξυπηρέτηση της κίνησης που εισάγουν οι γεννήτριες κίνησης. Μια δεύτερη κλάση μέσης προτεραιότητας δεσμεύτηκε για τις ροές υψηλής προτεραιότητας, οι οποίες που έχουν αναδρομολογηθεί στο δίκτυο. Τέλος, η κλάση βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*) δημιουργήθηκε για να εξυπηρετήσει την υπόλοιπη κίνηση στο «παρασκήνιο» (*background traffic*)³⁷.

Ο χρονοπρογραμματισμός στις ουρές εξόδου του κάθε δρομολογητή βασίστηκε στον αλγόριθμο *Weighted Round Robin (WRR)* [Mez+94]. Στόχος ήταν η απομόνωση της κίνησης μεταξύ διαφορετικών κλάσεων και η παροχή διαφορετικών εγγυήσεων για την απώλεια πακέτων στην κάθε κλάση. Ο μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού WRR είχε συγκροτηθεί να δίνει 90% της χωρητικότητας στην κίνηση υψηλής προτεραιότητας. Ο έλεγχος αποδοχής (*admission control*) απέτρεπε την εγκατάσταση νέων ροών όταν ο βαθμός χρησιμοποίησης στις γραμμές διασύνδεσης υπερέβαινε το 85% της χωρητικότητας. Επομένως, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή χωρίς αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, καμία από τις γραμμές διασύνδεσης δεν παρουσίαζε υπερκάλυψη πόρων (*oversubscribed*) και επομένως δεν εμφανίζονταν απώλειες πακέτων στους καταχωρητές στις ουρές.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμών προσομοίωσης, η κάθε μία από τις οποίες εμφάνιζε μέσο βαθμό διαθεσιμότητας των γραμμών διασύνδεσης 99% και 99,8%, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, οι γραμμές διασύνδεσης αποτύγχαναν από μία μόνο φορά, εναλλάξ. Η αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου προκαλούσε την αναδρομολόγηση μέρους της κίνησης. Το ποσοστό των ροών που αναδρομολογούνταν σε κάθε προσομοίωση μεταβάλλονταν από 10% μέχρι 40% (Σχήμα

³⁷ Η κίνηση *BE* δεν προκάλεσε κάποια αντιληπτή συνέπεια στην απόδοση της κίνησης υψηλής προτεραιότητας και για το λόγο αυτό δεν αναφερόμαστε περαιτέρω στο κείμενο.

44). Σε ορισμένες γραμμές διασύνδεσης η αναδρομολογημένη κίνηση δημιουργούσε συνθήκες συμφόρησης. Σε αυτές τις περιόδους, πακέτα απορρίπτονταν εξαιτίας υπερχειλίσσης των καταχωρητών (*buffer overflow*) και, επομένως, η κίνηση υψηλής προτεραιότητας εμφάνιζε σημαντικό βαθμό απώλειας πακέτων. Η συμφόρηση στις γραμμές διασύνδεσης ύστερα από σφάλμα στις γραμμές διασύνδεσης σταδιακά μειώνονταν καθώς ο μηχανισμός ελέγχου αποδοχής απέτρεπε την εγκατάσταση νέων ροών. Παρόλα αυτά, πολλαπλές ροές υψηλής προτεραιότητας επηρεάζονται ύστερα από σφάλμα στις γραμμές διασύνδεσης.



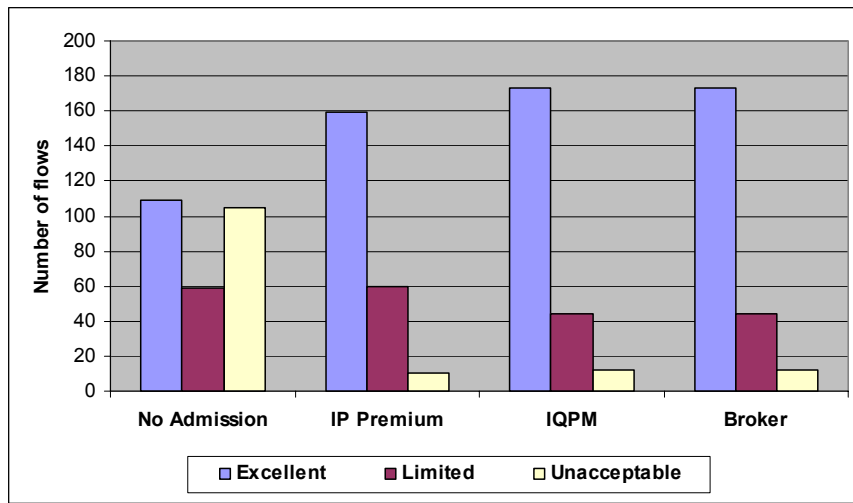
Σχήμα 44: Διάγραμμα ενεργών και αναδρομολογημένων ροών κατά τη διάρκεια μιας τυχαίας δοκιμής.

4.6.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

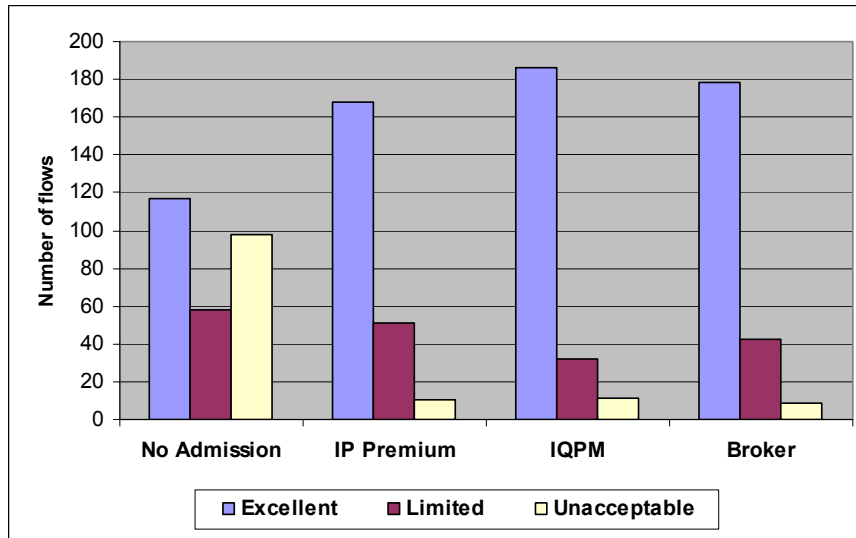
Η μετρική απόδοσης που υπολογίζονταν ύστερα από κάθε δοκιμή προσομοίωσης ήταν το ποσοστό των ροών υψηλής προτεραιότητας που εμφάνιζαν αμελητέα απώλεια πακέτων. Σε κάθε προσομοίωση, οι ροές διαχωρίζονταν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την απόδοση που επιτύγχαναν; (Α) *Εξαιρετική (excellent)*, εφόσον το ποσοστό απώλειας πακέτων ήταν μικρότερο από 0.1%, (Β) *Περιορισμένη (limited)*, και (Γ) *Απορριπτέα (unacceptable)*, εφόσον το ποσοστό χαμένων πακέτων υπερέβαινε το 3%. Επομένως, όλες οι ροές υψηλής προτεραιότητας που εμφάνιζαν αμελητέα απώλεια πακέτων κατατάσσονταν στην ομάδα Α (εξαιρετική). Στο πρώτο σενάριο, δεν εφαρμόστηκε καθόλου έλεγχος αποδοχής και επομένως οι γεννήτριες κίνησης παρήγαγαν κίνηση χωρίς περιορισμό. Το δεύτερο σενάριο προσομοίωνε το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* στο δίκτυο GÉANT, όπου έλεγχος αποδοχής εφαρμόζεται πριν από την εγκατάσταση μιας νέας ροής. Το τρίτο σενάριο βασίστηκε στο μοντέλο *IQPM* και επομένως είχαν ενεργοποιηθεί έλεγχος αποδοχής και ο μηχανισμός παρακολούθησης των μονοπατιών για την κάθε ενεργή ροή. Το διάστημα παραμονής στη μνήμη των δρομολογητών για τα πακέτα παρακολούθησης (*timeout*) εξέπνεε σε τρία δευτερόλεπτα και όσες αναδρομολογημένες ροές εντοπίζονταν χρωματίζονταν στη μέση κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Το

τελευταίο σενάριο προσομοίωνε ένα ιδεατό μοντέλο, όπου μία κεντρική δικτυακή οντότητα, π.χ. ένας μεσίτης εύρους ζώνης (*bandwidth broker*), χρωματίζει ακαριαία τις αναδρομολογημένες ροές.

Στο Σχήμα 45 και στο Σχήμα 46 παρουσιάζονται οι εγγυήσεις ποιότητας για την κίνηση υψηλής προτεραιότητας για μέση διαθεσιμότητα των γραμμών διασύνδεσης 99% και 99.8%, αντίστοιχα. Στις προσομοιώσεις όταν απουσίαζε ο έλεγχος αποδοχής περίπου το 60% των ροών δεν κατάφεραν να επιτύχουν το στόχο στις εγγυήσεις απόδοσης. Με την εφαρμογή του ελέγχου αποδοχής, δηλαδή στο μοντέλο *Premium IP*, ο αριθμός των ροών που επιτύγχαναν το στόχο απόδοσης αυξάνονταν σημαντικά φτάνοντας περίπου στο 70% των ροών.



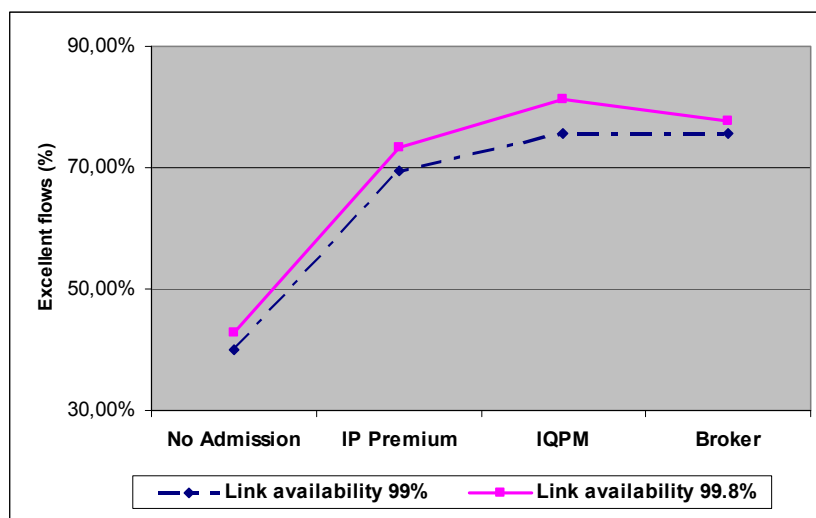
Σχήμα 45: Απόδοση ροών για βαθμό διαθεσιμότητας 99% των γραμμών κορμού.



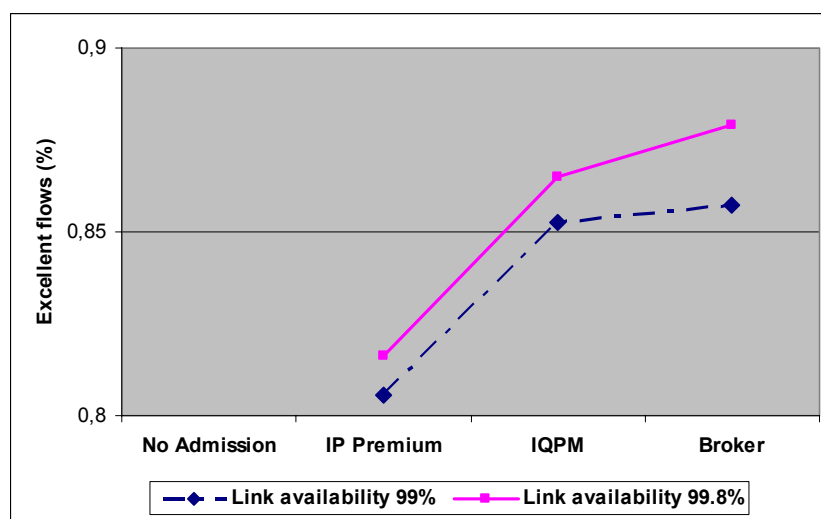
Σχήμα 46 Απόδοση ροών για βαθμό διαθεσιμότητας 99.8% των γραμμών κορμού.

Ο έλεγχος αποδοχής δεν μπορούσε να μειώσει τις συνέπειες από την αναδρομολογημένη κίνηση και επομένως 3 στις 10 ροές επιτύγχαναν μέσο ή χαμηλό επίπεδο εγγυήσεων απόδοσης. Ενεργοποιώντας συμπληρωματικά το μηχανισμό παρακολούθησης, δηλαδή εφαρμόζοντας το μοντέλο *IQPM*, ο

αριθμός των «εξαιρετικών» ροών αυξάνονταν επιπλέον κατά 8,8%-10,7%, φτάνοντας σε απόλυτη τιμή το 75,55% - 81,22% για βαθμό διαθεσιμότητας 99% και 99.8%, αντίστοιχα. Καθώς η αναδρομολογημένη κίνηση χρωματίζονταν σε κλάση χαμηλότερης προτεραιότητας, η μη αναδρομολογημένη κίνηση επιτύγχανε το στόχο απόδοσης σε ποσοστό 85,25%-86,59% (Σχήμα 47). Στην ιδεατή περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση με τη χρήση «μεσίτη» (*Broker*), η μη αναδρομολογημένη κίνηση επιτύγχανε το στόχο απόδοσης σε ποσοστό 85,71% - 87,91% (Σχήμα 47). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απώλεια μιας γραμμής διασύνδεσης σημαίνει αυτομάτως μείωση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου και, επομένως, ακόμα και στην ιδεατή περίπτωση του «μεσίτη» είναι πρακτικά αδύνατη η αποφυγή της υποβάθμισης των υπηρεσιών για κάποιες από τις ροές υψηλής προτεραιότητας.



Σχήμα 47: Συνολικό ποσοστό ροών που χαρακτηρίστηκαν ως εξαιρετικές (*excellent*), δηλαδή εμφάνισαν απώλεια πακέτων μικρότερη από 0.1%.



Σχήμα 48: Ποσοστό των μη αναδρομολογημένων ροών που χαρακτηρίστηκαν ως εξαιρετικές (*excellent*), δηλαδή εμφάνισαν απώλεια πακέτων μικρότερη από < 0.1%.

Στις παραπάνω προσομοιώσεις το μοντέλο *IQPM* επέτυχε να μειώσει τον αριθμό των υψηλής προτεραιότητας ροών που επηρεάστηκαν ύστερα από σφάλμα στις γραμμές διασύνδεσης σε σχέση με το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP*. Επομένως, ο μηχανισμός παρακολούθησης και χρωματισμού στο μοντέλο *IQPM* κατάφερε να περιορίσει αποτελεσματικότερα την αναδρομολογημένη κίνηση. Επιπλέον, το μοντέλο *IQPM* επέτυχε σχεδόν την ίδια απόδοση με το «ιδεατό» σενάριο που βασίστηκε στη χρήση μεσίτη (*Broker*).

4.7 Αντιμετώπιση σφαλμάτων κατά τη λειτουργία του μοντέλου *IQPM*

Η συγκέντρωση και η διατήρηση επικαιροποιημένων πληροφοριών για την κατάσταση των ενεργών ροών που διατρέχουν ένα δίκτυο δεδομένων αποτελεί πολύπλοκη και απαιτητική διαδικασία. Η αρχιτεκτονική *IntServ* και το μοντέλο *RMD* προβλέπουν ότι οι πληροφορίες σχετικά με τις εγκατεστημένες ροές αποθηκεύονται κατανεμημένα στους δρομολογητές του δικτύου. Αντιθέτως, η χρήση μεσίτη εύρους ζώνης (*bandwidth broker*) από δίκτυα *DiffServ* επιτρέπει τη συλλογή και διαχείριση πληροφοριών κεντρικά.

Στο μοντέλο *IQPM*, πληροφορίες κατάστασης σχετικά με τις εγκατεστημένες ροές διατηρούνται κατανεμημένα στους δρομολογητές *DSR* και στους ακραίους δρομολογητές εισόδου της εκάστοτε διαχειριστικής περιοχής. Επιπλέον, πληροφορίες κατάστασης αποθηκεύονται προσωρινά στους εσωτερικούς δρομολογητές κορμού κατά τη φάση εγκατάστασης νέων ροών. Στις επόμενες παραγράφους εξετάζεται κατά πόσο επηρεάζεται η λειτουργία του μοντέλου *IQPM* από προβλήματα που παρατηρούνται συχνά κατά τη λειτουργία ενός δικτύου παραγωγής, π.χ. απώλεια μηνυμάτων σηματοδοσίας, με αποτέλεσμα να επηρεάσουν την ορθότητα των πληροφοριών κατάστασης που διατηρούνται στο δίκτυο.

4.7.1 Απώλεια μηνυμάτων σηματοδοσίας

Το μοντέλο *IQPM* δεν προβλέπει μηχανισμούς για τον έλεγχο της ορθής αποστολής ή αναμετάδοσης των μηνυμάτων σηματοδοσίας σε περιπτώσεις σφαλμάτων κατά τη μεταφορά τους. Η αποφυγή χρήσης των συγκεκριμένων μηχανισμών ελέγχου απλοποιεί την υλοποίηση του μοντέλου *IQPM* αλλά

προϋποθέτει την εν τω προτέρων πρόβλεψη των συνεπειών από πιθανή απώλεια πακέτων σηματοδοσίας³⁸.

Στο μοντέλο *IQPM*, η ανανέωση των πληροφοριών κατάστασης για τις ενεργές ροές πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους δρομολογητές με την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας θεωρούνται έγκυρες για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Αν τα επόμενα μηνύματα σηματοδοσίας που ανταλλάσσονται επιβεβαιώσουν την ορθότητά των πληροφοριών, οι δρομολογητές τις αποθηκεύουν μόνιμα στη μνήμη τους. Αντιθέτως, αν δηλαδή δεν υπάρξει επιβεβαίωση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (*timeout*), οι πληροφορίες αφαιρούνται από τη μνήμη των δρομολογητών. Οι επόμενες παράγραφοι αναφέρουν πιθανές περιπτώσεις απώλειας πακέτων σηματοδοσίας και περιγράφονται οι λειτουργίες πραγματοποιούνται από τους δρομολογητές του δικτύου.

4.7.1.1 Απώλεια μηνυμάτων *PREP REQ (request)*

Τα μηνύματα *PREP REQ (request)* δημιουργούν προσωρινές εγγραφές στη μνήμη των δρομολογητών, οι οποίες παραμένουν έγκυρες μέχρι είτε οι δρομολογητές να λάβουν θετικό ή αρνητικό μήνυμα *PREP RESP (response)* ή εφόσον εκπνεύσει το μέγιστο χρονικό διάστημα παραμονής στη βάση *Q-FLIB* χωρίς επιβεβαίωση. Επομένως, η απώλεια πακέτων *PREP REQ (request)* δεν δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία του μοντέλου *IQPM* και οι μη έγκυρες πληροφορίες κατάστασης αφαιρούνται από τη μνήμη των δρομολογητών.

Εφόσον ένας δρομολογητής σε μία διαχειριστική περιοχή εντοπίσει την απώλεια ενός πακέτου *PREP REQ (request)* μπορεί προαιρετικά να δημιουργήσει μήνυμα ελέγχου προς το δρομολογητή *DSR* στη κατεύθυνση του κόμβου Πηγή με σκοπό την ταχύτερη απομάκρυνση των σχετικών πληροφοριών κατάστασης από τους υπόλοιπους δρομολογητές στο δίκτυο.

4.7.1.2 Απώλεια μηνυμάτων *PREP RESP (response)*

Τα μηνύματα *PREP RESP (response)* δεν προκαλούν τη δημιουργία νέων εγγραφών στη βάση *Q-FLIB* στους εσωτερικούς δρομολογητές μιας διαχειριστικής περιοχής και επομένως η απώλειά τους κατά την προώθησή του περαιτέρω στο δίκτυο δεν επηρεάζει την εγκυρότητα των πληροφοριών κατάστασης για τις ενεργές ροές. Επίσης, όσες εγγραφές στη βάση *Q-FIB* δεν επαληθευτούν με τη λήψη μηνυμάτων *PREP RESP (response)* αφαιρούνται εφόσον εκπνεύσει το μέγιστο χρονικό διάστημα παραμονής στη βάση *Q-FLIB* χωρίς επιβεβαίωση.

³⁸ Η πιθανότητα απώλειας πακέτων σηματοδοσίας στο δίκτυο μπορεί να μειωθεί εφόσον οι δρομολογητές κορμού εξυπηρετήσουν τα πακέτα σηματοδοσίας από την ουρά υψηλής προτεραιότητας ή από ξεχωριστή ουρά που καταλαμβάνει επαρκές ποσοστό της διαθέσιμης χωρητικότητας των γραμμών διασύνδεσης.

Οι ακραίοι δρομολογητές που προωθούν μηνύματα *PREP RESP (response)* ανανεώνουν τους μηχανισμούς ελέγχου κίνησης που εφαρμόζουν για τον περιορισμό της εισερχόμενης κίνησης στη χειριστική περιοχή. Στην περίπτωση που ένα τυχαίο μήνυμα *PREP RESP (response)* χαθεί κατά την προώθησή του περαιτέρω στο δίκτυο, οι ακραίοι δρομολογητές οφείλουν να ανανεώσουν εκ νέου τους μηχανισμούς ελέγχου κίνησης που διατηρούν. Αυτό επιτυγχάνεται όταν εκπνεύσει το μέγιστο χρονικό διάστημα αναμονής για τη λήψη πακέτων παρακολούθησης για τη συγκεκριμένη ροή.

4.7.1.3 Απώλεια μηνυμάτων *PREP TERM (termination)*

Τα μηνύματα *PREP TERM (termination)* δημιουργούνται από τους δρομολογητές *DSR* όταν τερματιστεί μια οποιαδήποτε ροή στο δίκτυο ευθύνης τους και επιτρέπουν στους ακραίους δρομολογητές εισόδου κατά μήκος του μονοπατιού να ανανεώνουν άμεσα του μηχανισμούς ελέγχου κίνησης που διατηρούν. Στην περίπτωση που ένα τυχαίο μήνυμα *PREP TERM (termination)* χαθεί κατά την προώθηση του στο δίκτυο, οι ακραίοι δρομολογητές θα ανανεώσουν τους μηχανισμούς ελέγχου κίνησης όταν θα εκπνεύσει το χρονικό διάστημα παραμονής των πακέτων παρακολούθησης στην τοπική τους μνήμη.

4.7.2 Δυσλειτουργίες δρομολογητών κορμού

Η λειτουργία των δρομολογητών κορμού μπορεί προσωρινά να επηρεαστεί από πλήθος αιτιών με αποτέλεσμα την απώλεια των πληροφοριών ελέγχου που συντηρούν στην μνήμη τους. Για παράδειγμα, η αναβάθμισή λογισμικού στους δρομολογητές επιβάλλει συνήθως την επανεκκίνησης (*reboot*) τους και την εκ εξαρχής συγκέντρωση πληροφοριών ελέγχου με την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης. Στο μοντέλο *IQPM* η προσωρινή παύση της λειτουργίας των δρομολογητών προκαλεί την απώλεια των πληροφοριών κατάστασης για τις ενεργές ή υπό εγκατάσταση ροές στην τοπική βάση *Q-FLIB* και την μνήμη παρακολούθησης (*monitoring cache*). Οι επόμενες παράγραφοι αναλύουν τις συνέπειες από περιπτώσεις δυσλειτουργίας των δρομολογητών κορμού.

4.7.2.1 Διακοπή λειτουργίας του δρομολογητή *DSR*

Ο δρομολογητή *DSR* αποτελεί τη «πύλη» (*gateway*) για τους κόμβους που παράγουν κίνηση στο τοπικό δίκτυο ευθύνης του και, επομένως, η διακοπή της λειτουργίας του προκαλεί τη διακοπή των εγκατεστημένων ροών και παύση δημιουργίας πακέτων παρακολούθησης (*monitoring packets*). Μετά από σύντομο χρονικό διάστημα από τη διακοπή, οι πληροφορίες κατάστασης για τις ροές που διατηρούν οι δρομολογητές κατά μήκος των μονοπατιών προώθησης αφαιρούνται και εκπνέουν οι εγγραφές στη μνήμη παρακολούθησης (*monitoring cache*). Όταν αποκατασταθεί η λειτουργία του δρομολογητή *DSR* απαιτείται να επαναληφθεί εκ νέου η διαδικασία για την εγκατάσταση των ροών που διακόπηκαν. Οι παραπάνω συνέπειες μπορούν να αποφευχθούν αν το μοντέλο *IQPM* επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει τη χρήση εφεδρικών δρομολογητών *DSR*.

4.7.2.2 Διακοπή λειτουργίας ακραίου δρομολογητή εισόδου

Ο κάθε ακραίος δρομολογητή εισόδου σε μία διαχειριστική περιοχή εφαρμόζει μηχανισμούς ελέγχου της εισερχόμενης κίνησης και διατηρεί στην τοπική βάση *Q-FLIB* στοιχεία με τις εγκατεστημένες ροές που τον διασχίζουν. Πιθανή δυσλειτουργία του ακραίου δρομολογητή θα οδηγήσει σε αναδρομολόγηση όλων των εγκατεστημένων ροών μέσω άλλου σημείου εισόδου στη ίδια ή διαφορετική διαχειριστική περιοχή. Σε κάθε περίπτωση, οι ροές μεταβάλλουν το μονοπάτι τους στην προηγούμενη διαχειριστική περιοχή. Επομένως, οι ροές χαρακτηρίζονται ως αναδρομολογημένες και προωθούνται ως κίνηση χαμηλότερης προτεραιότητας χωρίς την ανάγκη για εφαρμογή μηχανισμών ελέγχου της κίνησης.

4.7.2.3 Διακοπή λειτουργίας εσωτερικών δρομολογητών

Οι εσωτερικοί δρομολογητές κορμού δε διατηρούν πληροφορίες κατάστασης για τις εγκατεστημένες ροές που τους διατρέχουν με εξαίρεση τη φάση εγκατάστασης νέων ροών. Πιθανή δυσλειτουργία ενός εσωτερικού δρομολογητή στο διάστημα αυτό ενδέχεται να προξενήσει την απόρριψη μηνυμάτων σηματοδοσίας (βλέπε παράγραφο §4.7.1). Επομένως, η προσωρινή δυσλειτουργία τους δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του μοντέλου *IQPM*.

4.8 Περιορισμοί του μοντέλου *IQPM*

Στις ακόλουθες παραγράφους αναφερόμαστε στις προϋποθέσεις που είναι αναγκαίο να ισχύουν για τη λειτουργία του μοντέλου *IQPM* και αναλύουμε τους περιορισμούς που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του μοντέλου σε δίκτυα παραγωγής.

4.8.1 Ασύμμετρη δρομολόγηση

Το μοντέλο *IQPM* προϋποθέτει την ύπαρξη *συμμετρικής δρομολόγησης* στο δίκτυο, το οποίο σημαίνει ότι η ανταλλαγή πακέτων μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων πραγματοποιείται πάνω από το ίδιο μονοπάτι και προς τις δύο κατευθύνσεις επικοινωνίας. Η συμμετρική δρομολόγηση επιτρέπει στο μοντέλο *IQPM* να εγκαταστήσει πληροφορίες κατάστασης στους ενδιάμεσους δρομολογητές του δικτύου και να εκτιμήσει σωστά τους διαθέσιμους πόρους κατά μήκος τους μονοπατιού επικοινωνίας. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα §4.3.2, ένα μήνυμα σηματοδοσίας *PREP RESP (response)* προωθείται από ένα τυχαίο δρομολογητή μόνο εφόσον σχετικό μήνυμα σηματοδοσίας *PREP REQ (request)* είχε προηγουμένως προωθηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επομένως, το μήνυμα *PREP RESP (response)* θα φτάσει στο δρομολογητή *DSR* στο τοπικό δίκτυο του *κόμβου Πηγή* μόνο εφόσον εφαρμόζεται συμμετρική δρομολόγηση κατά μήκος τους από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού.

Η ύπαρξη συμμετρικής δρομολόγησης στο δίκτυο αποτελεί προϋπόθεση για τη εφαρμογή του πρωτοκόλλου RSVP στην αρχιτεκτονική *IntServ*. όπου τα μηνύματα σηματοδότησης *RSVP Path* και *RSVP Resv* δρομολογούνται με βάση το υφιστάμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Αντιθέτως το μοντέλο *RMD* ξεπερνά τον περιορισμό για συμμετρική δρομολόγηση εφαρμόζοντας δύο «επίπεδα» σηματοδότησης. Η δέσμευση πόρων προς την κατεύθυνση επικοινωνίας από το *κόμβο Πηγή* προς το *κόμβο Προορισμού* πραγματοποιείται με το πρωτόκολλο *PHR* ενώ η επιβεβαίωση πραγματοποιείται με τη χρήση του πρωτοκόλλου *RDR*.

Σε σημερινά δίκτυα παραγωγής εμφανίζεται περιορισμένη ασυμμετρία στη δρομολόγηση της κίνησης που μεταφέρουν [IJD01]. Οι δύο σημαντικότεροι λόγοι για το γεγονός αυτό αποτελούν, αφενός, η πολιτική δρομολόγησης που εφαρμόζεται μεταξύ ανεξάρτητων διαχειριστικών περιοχών και, αφετέρου, η εφαρμογή τεχνικών εξισορρόπησης φορτίου (*load balancing*). Δεδομένου ότι η ύπαρξη ασύμμετρης δρομολόγησης σε ένα δίκτυο δημιουργεί δυσλειτουργίες [BPS02] στους μηχανισμούς του πρωτοκόλλου TCP και δυσχεραίνει την επίλυση δικτυακών προβλημάτων (*troubleshooting*) από τους διαχειριστές, αποφεύγεται η δημιουργία μονοπατιών ασύμμετρης δρομολόγησης.

4.8.2 Απαίτηση για από άκρο-σε-άκρο εφαρμογή του μοντέλου IQPM

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας με χρήση του μοντέλου *IQPM* για κίνηση υψηλής προτεραιότητας προϋποθέτει την εφαρμογή του μοντέλου κατά μήκος του από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού που χρησιμοποιούν οι ροές. Σε περίπτωση που έστω και ένας κόμβος κατά μήκος του μονοπατιού δεν υποστηρίζει το μοντέλο *IQPM*, δεν είναι εφικτή η υποστήριξη αυστηρών εγγυήσεων κατά τη μεταφορά της κίνησης αφού δεν διασφαλίζεται η αποφυγή συμφόρησης στις γραμμές διασύνδεσης ενώ περιορίζεται η ικανότητα αναγνώρισης των αναδρομολογημένων ροών.

Αντίστοιχες απαιτήσεις προβλέπονται κατά την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής *IntServ* για την υποστήριξη της εγγυημένης υπηρεσίας (*guaranteed service*). Η υποστήριξη κίνησης υψηλής προτεραιότητας επιβάλλει την υποστήριξη των απαραίτητων λειτουργιών από όλους τους δρομολογητές κατά μήκος του μονοπατιού που χρησιμοποιούν οι ροές. Το μοντέλο *RMD* και τα μοντέλα που βασίζονται σε μεσίτες εύρους ζώνης (*bandwidth brokers*) χαλαρώνουν τους περιορισμούς και προδιαγράφουν ότι μόνο οι δρομολογητές μέσα στη διαχειριστική περιοχή είναι υποχρεωτικό να υποστηρίζουν τις απαραίτητες λειτουργίες του εκάστοτε μοντέλου. Οι υπόλοιποι κόμβοι κατά μήκος του μονοπατιού εκτός της διαχειριστικής περιοχής οφείλουν να υποστηρίζουν αντίστοιχες εγγυήσεις κατά την μεταφορά της κίνησης χωρίς να υπάρχει περιορισμός ως προς την εφαρμοζόμενη τεχνολογία.

Οι λειτουργίες που περιγράφονται στο μοντέλο *IQPM* μπορούν να ενεργοποιηθούν σταδιακά μέσα σε μία διαχειριστική περιοχή χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του καθώς το μοντέλο δεν

μεταβάλλει τους μηχανισμούς στο επίπεδο δεδομένων (*data plane*) αλλά μόνο στο επίπεδο ελέγχου (*control plane*). Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τη σταδιακή εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* σε μία διαχειριστική περιοχή παράλληλα με την εφαρμογή άλλου μοντέλου ποιότητας υπηρεσίας.

4.8.3 Εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* σε δίκτυα MPLS

Η τεχνολογία *μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων (Multi Protocol Label Switching - MPLS)* ενθυλακώνει τα πακέτα IP σε πλαίσια *MPLS* με την προσθήκη κατάλληλης επικεφαλίδας. Η εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* προϋποθέτει ότι οι ενδιαμέσοι δρομολογητές IP/MPLS μπορούν να αναγνωρίσουν τα ενθυλακωμένα πακέτα σηματοδοσίας *PREP* μέσα στα πλαίσια *MPLS*. Επίσης, ειδική μέριμνα οφείλει να υπάρξει ώστε λειτουργίες προστασίας των *μονοπατιών μεταγωγής ετικέτας (label switched path - LSP)*, π.χ. λειτουργίες *MPLS fast reroute*, να συνδυαστούν με τις λειτουργίες παρακολούθησης και χρωματισμού των ροών που προδιαγράφονται στο μοντέλο *IQPM*. Επομένως, η εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* προϋποθέτει επεκτάσεις στην τεχνολογία *MPLS*.

4.8.4 Αδυναμίες των μηχανισμών *MBAC*

Η εφαρμογή μηχανισμών *MBAC* σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων δεν παρουσιάζει περιορισμούς κλιμάκωσης σε αντίθεση με την αρχιτεκτονική *IntServ*, όπου ο χειρισμός της κίνησης σε επίπεδο ροής εμφανίζει προβλήματα για μεγάλους αριθμούς ταυτόχρονων ροών. Οι μηχανισμοί *MBAC* δεν απαιτούν την αποθήκευση πληροφοριών κατάστασης για τις εγκατεστημένες ροές και δεν προϋποθέτουν τη γνώση των ακριβών χαρακτηριστικών κίνησης τους κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής. Η ενσωμάτωση των μηχανισμών *MBAC* στο μοντέλο *IQPM*, όμως, εισάγει συγκεκριμένους περιορισμούς εξαιτίας αποκλίσεων στην εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων στο δίκτυο, την άνιση μεταχείριση ροών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και την αδυναμία δέσμευσης πόρων στο μέλλον. Οι περιορισμοί αυτοί περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

4.8.4.1 Εσφαλμένη εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων

Οι μηχανισμοί *MBAC* δε διατηρούν στοιχεία σε επίπεδο ροής και, συνεπώς, αδυνατούν να υπολογίσουν το συνολικό μέσο και μέγιστο ρυθμό κίνησης των εγκατεστημένων ροών στο δίκτυο που δήλωσαν κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής. Αντιθέτως, οι μηχανισμοί *MBAC* επιδιώκουν να εκτιμήσουν³⁹ τα ανωτέρω μεγέθη παρακολουθώντας τη διακύμανση στο χρόνο που παρουσιάζει η συνολική κίνηση που μεταφέρεται. Λόγω αποκλίσεων των εκτιμώμενων και πραγματικών διαθέσιμων

³⁹ Οι αλγόριθμοι *MBAC* βασίζονται στην υπόθεση ότι η πιθανότητα απότομης μεταβολής της συνολικής μετρούμενης κίνησης είναι μικρή εφόσον ο αριθμός των εγκατεστημένων ροών είναι μεγάλος και η πιθανότητα συγχρονισμού των εγκατεστημένων ροών πρακτικά μηδενική.

πόρων, οι μηχανισμοί ενδέχεται να επιτρέψουν την εγκατάσταση μεγαλύτερου αριθμού ροών από όσα ήταν επιθυμητό προκαλώντας υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών, π.χ. απώλεια πακέτων.

Αντίστοιχοι περιορισμοί εμφανίζονται στο μοντέλο *RMD*, όπου προβλέπεται η χρήση μηχανισμών *MBAC* στους δρομολογητές και η ανταλλαγή πληροφοριών με το πρωτόκολλο *PHR* κατά τη φάση εγκατάστασης των νέων ροών. Εναλλακτικά, το μοντέλο *RMD*⁴⁰ προδιαγράφει την εφαρμογή *reservation-based* μηχανισμών στους δρομολογητές αλλά προϋποθέτει τη συνεχόμενη ανταλλαγή μηνυμάτων ανανέωσης (*refresh messages*) μεταξύ των δρομολογητών με το πρωτόκολλο *PHR*. Η διαδικασία διατήρησης πληροφοριών στους δρομολογητές εμφανίζει ομοιότητες με την αντίστοιχη διαδικασία που περιλαμβάνεται στην αρχιτεκτονική *IntServ* και η οποία εμφανίζει περιορισμούς κλιμάκωσης.

Το μοντέλο *IQPM* σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας με αυστηρές εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα §3.2, η παροχή εγγυήσεων χαμηλής καθυστέρησης και μεταβλητότητας καθυστέρησης κάνουν υποχρεωτική τη χρήση χαμηλών κατωφλίων στους μηχανισμούς *MBAC* κατά τον έλεγχο αποδοχής νέων ροών σε ένα δίκτυο. Για το λόγο αυτό, ο εσφαλμένος υπολογισμός των διαθέσιμων πόρων με χρήση των μηχανισμών *MBAC* δεν προβλέπεται να προκαλέσει προβλήματα κατά την εφαρμογή του μοντέλου *IQPM* σε δίκτυα παραγωγής.

4.8.4.2 Δίκαιη διαχείριση (*fairness*) ροών κατά την φάση ελέγχου αποδοχής

Η πιθανότητα επιτυχημένης αποδοχής μιας υπό εγκατάσταση ροής σε δίκτυο που εφαρμόζει έλεγχο αποδοχής με μηχανισμούς *MBAC* εξαρτάται από το μέσο ή/και μέγιστο ρυθμό κίνησης που η ροή δηλώνει ότι θα εισάγει στο δίκτυο κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής καθώς και από το μήκος του από άκρο-σε-άκρο μονοπατιού. Οι ροές με χαμηλό ρυθμό κίνησης έχουν περισσότερες πιθανότητες να γίνουν αποδεκτές κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής σε σχέση με ροές που δηλώνουν σημαντικά μεγάλο ρυθμό μετάδοσης. Ιδιαίτερα σε δίκτυα με υψηλό βαθμό χρησιμοποίησης, η πιθανότητα αποδοχής μια ροής με αυξημένο ρυθμό κίνησης μειώνεται σημαντικά. Αντιθέτως, ροές με μικρό ρυθμό κίνησης, π.χ. κλήσεις VoIP, αντιμετωπίζουν αμελητέα πιθανότητα απόρριψης. Ανάλογα, ροές με μικρότερο από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι έχουν περισσότερες πιθανότητες να γίνουν αποδεκτές από αντίστοιχες ροές αλλά με μεγαλύτερο μονοπάτι. Αν θεωρήσουμε, για παράδειγμα, ότι η πιθανότητα μία ροή να γίνει αποδεκτή στον *i*-στον τυχαίο κόμβο είναι $0 \leq P_i \leq 1$, τότε η συνολική πιθανότητα να γίνει αποδεκτή

σε ένα μονοπάτι *n* κόμβων είναι $P_n = \prod_{k=1}^n P_k$ θεωρώντας ότι η αποδοχή μίας ροής σε ένα κόμβο είναι

⁴⁰ Δεν έχει προδιαγραφεί πλήρως μέχρι σήμερα κάποιο *measurement-based* ή *reservation-based* πρωτόκολλο *PHR* από το NSIS WG του IETF.

τελείως ανεξάρτητη διαδικασία από την αποδοχή της στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Επομένως, μία δεύτερη ροή με τα ίδια χαρακτηριστικά με την παραπάνω ροή που διασχίζει μεγαλύτερο μονοπάτι m κόμβων, όπου το $m > n$, εμφανίζει $P_{m-n} = \prod_{k=n}^m P_k$ φορές λιγότερες πιθανότητες να γίνει αποδεκτή στο δίκτυο.

Αντίστοιχοι περιορισμοί εμφανίζονται κατά την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής *IntServ* ή του μοντέλου *RMD*, όπου η αποδοχή μιας νέας ροής πραγματοποιείται σε κάθε κόμβο ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους κόμβους. Αντιθέτως, η χρήση μεσιτών εύρους ζώνης (*bandwidth brokers*) μπορεί να αποτρέψει τα παραπάνω προβλήματα αφού είναι εύκολα εφαρμόσιμη διαφορετική πολιτική αποδοχής για την εγκατάσταση ροών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, π.χ. μήκος μονοπατιού.

4.8.4.3 Αδυναμία χρονοπρογραμματισμού συνδέσεων στο μέλλον

Η αποδοχή μιας νέας ροής με χρήση μηχανισμών *MBAC* βασίζεται στην εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου κατά τη χρονική στιγμή που λαμβάνεται το σχετικό αίτημα. Δεδομένου ότι οι μηχανισμοί *MBAC* δε διατηρούν στοιχεία για τη χρονική διάρκεια των εγκατεστημένων ροών ή για τη μεταβολή της κίνησης στο παρελθόν, είναι αδύνατη η πρόβλεψη των διαθέσιμων πόρων του δικτύου στο μέλλον. Επομένως, η χρήση μηχανισμών *MBAC* δεν μπορεί να επιτρέψει τη εν τω προτέρων δέσμευση πόρων για ροές που θα εγκατασταθούν στο μέλλον και η ικανοποίηση των αιτημάτων πραγματοποιείται με βάση τη σειρά που αυτά υποβάλλονται.

Αντίστοιχοι περιορισμοί εμφανίζονται κατά την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής *IntServ* ή του μοντέλου *RMD*, όπου η αποδοχή μιας νέας ροής πραγματοποιείται με βάση τους διαθέσιμους πόρους κατά τη στιγμή υποβολής τους αιτήματος. Αντιθέτως, η χρήση μεσιτών εύρους ζώνης (*bandwidth brokers*) μπορεί να πραγματοποιηθεί αν αξιοποιηθούν στα στατιστικά στοιχεία που συλλέγει ο μεσίτης και εφαρμοστεί πολιτική για τη διασφάλιση των απαραίτητων πόρων στο μέλλον.

4.9 Επεκτάσεις του μοντέλου *IQPM*

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζουμε επεκτάσεις του μοντέλου *IQPM*, οι οποίες διευκολύνουν την εφαρμογή του σε δίκτυα υπερ-υψηλών ταχυτήτων, αυξάνουν τη λειτουργικότητα του και βελτιώνουν το επίπεδο των παρεχομένων υπηρεσιών για κίνηση υψηλής προτεραιότητας. Πριν παρουσιάσουμε αναλυτικά τις επεκτάσεις του μοντέλου *IQPM*, αναφερόμαστε συνοπτικά στο πρωτόκολλο *Internet Protocol version 6 (IPv6)* [DH98] και περιγράφουμε τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του σχετικά με την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Οι επεκτάσεις του μοντέλου *IQPM*, όπως θα προκύψει στις επόμενες παραγράφους, εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες που παρέχει το

πρωτόκολλο IPv6. Τέλος, αναφερόμαστε σε πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές με κίνηση *Premium IPv4/6*⁴¹ πάνω από το δίκτυο παραγωγής του ΕΔΕΤ.

4.9.1 Το πρωτόκολλο IPv6

Το *Internet Protocol version 4 (IPv4)* [IPv4] αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη πρωτόκολλα που συστήνουν σήμερα το Διαδίκτυο. Η κύρια λειτουργία του πρωτοκόλλου IPv4 είναι η χωρίς εγγυήσεις μεταφορά των πακέτων κίνησης που ανταλλάσσονται μεταξύ τους οι τερματικοί δικτυακοί κόμβοι διαμέσου των δρομολογητών κορμού. Παρόλο που η σχεδίαση του πρωτόκολλου IPv4 θεωρείται εξαιρετικά πετυχημένη, η συνεχόμενη αύξηση και εξέλιξη του Διαδικτύου απαιτεί τη σταδιακή αντικατάστασή του.

Το *πρωτόκολλο IPv6 (Internet Protocol version 6 - IPv6)* [DH98], η νέα έκδοση του πρωτοκόλλου *IPv4*, προδιαγράφηκε από το IETF IPv6 WG [IETF6] με στόχο να βελτιώσει τις δυνατότητες του Διαδικτύου. Το πρωτόκολλο IPv6 υποστηρίζει τη διασύνδεση πρακτικά απεριόριστου αριθμού συσκευών, παρέχει ενσωματωμένες (*built-in*) λειτουργίες που διευκολύνουν την κινητικότητα (*mobility*) [JPA04] και ασφάλεια (*security*) [KA98] στις επικοινωνίες, επιτρέπει την αυτόματη συγκρότηση των τελικών συστημάτων (*autoconfiguration*) [TN96], παρέχει προηγμένα χαρακτηριστικά για την υπηρεσία πολλαπλών προορισμών (*multicast service*) [HD98] κτλ. Εκτιμάται ότι το πρωτόκολλο IPv6 θα επιτρέψει τη συνεχή διασύνδεση των τελικών χρηστών με το Διαδίκτυο με πληθώρα συσκευών και με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης.

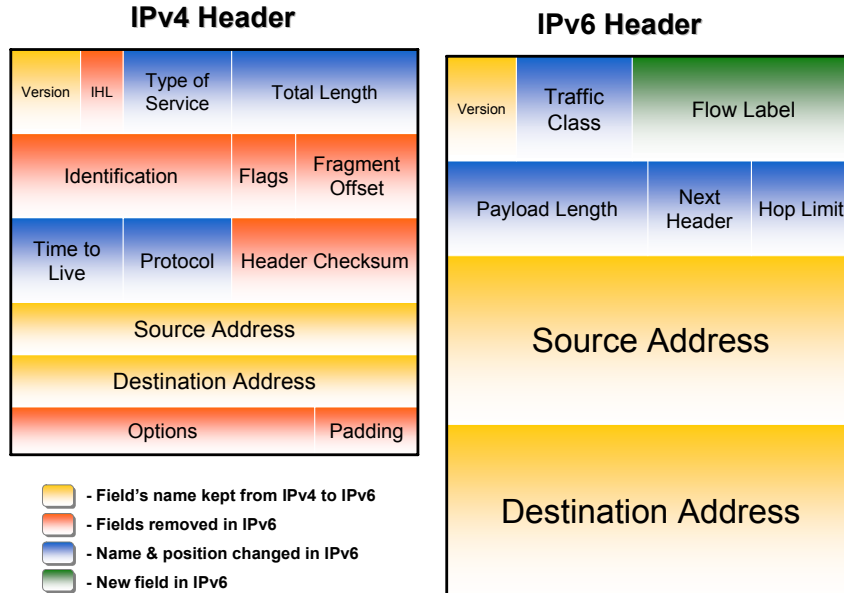
Το πρωτόκολλο IPv6 υιοθετείται ολοένα και περισσότερο από τα σύγχρονα δίκτυα παραγωγής, όπως το δίκτυο του GÉANT, ενώ τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που εκτελέσαμε στο δίκτυο του ΕΔΕΤ [Liak+05] με κίνηση *Premium IP* απέδειξαν ότι οι δρομολογητές υπό δοκιμή υποστηρίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό μηχανισμούς για τη διαχείριση της κίνησης IPv6 υψηλής προτεραιότητας (βλέπε Παράρτημα Α). Υπό αυτό το πρίσμα, προτείνουμε επεκτάσεις του μοντέλου *IQPM* που εκμεταλλεύονται τις βελτιωμένες δυνατότητες που παρέχει το πρωτόκολλο IPv6.

4.9.1.1 Πεδία στην επικεφαλίδα IPv6 σχετικά με την παροχή QoS

Η επικεφαλίδα των πακέτων του πρωτοκόλλου IPv6, όπως φαίνεται στο Σχήμα 49, έχει επανασχεδιαστεί ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις κατά την επεξεργασία των πακέτων καθώς διασχίζουν το Διαδίκτυο. Αυτό έχει επιτευχθεί με τη μετακίνηση των λιγότερο σημαντικών πεδίων που εμφανίζονται στην επικεφαλίδα IPv4 και την προσθήκη νέων πεδίων. Ως συνέπεια, οι επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων IPv4 και IPv6 δεν είναι συμβατές μεταξύ τους.

⁴¹ Κίνηση υψηλής προτεραιότητας *Premium IP* με χρήση των πρωτοκόλλων IPv4 και IPv6.

Η επικεφαλίδα IPv6 έχει δύο πεδία που σχετίζονται με την παροχή ποιότητας υπηρεσίας: τα πεδία *traffic class* και *flow label*. Το πεδίο *traffic class* αποτελείται από 8 bits και χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των πακέτων σε διαφορετικές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Ακριβώς την ίδια λειτουργικότητα εμφανίζει το πεδίο *type of service* (ή *precedence*) στην επικεφαλίδα IPv4.



Σχήμα 49: Σύγκριση των επικεφαλίδων για τα πρωτόκολλα IPv4 και IPv6.

Ως ροή ορίζεται ως μια σειρά πακέτων από ένα *κόμβο Πηγή* προς συγκεκριμένο *unicast κόμβο Προορισμού*⁴². Σε περιβάλλον που υποστηρίζει το πρωτόκολλο IPv4, η κατηγοριοποίηση μίας ροής βασίζεται σε πέντε πεδία: τη διεύθυνση IP του *κόμβου Πηγή*, τη διεύθυνση IP του *κόμβου Προορισμού*, το πρωτόκολλο μεταφοράς (*transport protocol*) και τις αντίστοιχες πόρτες (*ports*) επικοινωνίας. Εν τούτοις, μερικά από τα παραπάνω πεδία μπορεί να μην είναι διαθέσιμα κατά τη διαδικασία κατηγοριοποίησης της κίνησης IPv4 στους δρομολογητές κορμού εξαιτίας λειτουργιών τεμαχισμού (*fragmentation*) ή κρυπτογράφησης (*encryption*) των πακέτων που έχουν εφαρμοστεί προηγουμένως στο δίκτυο. Με σκοπό να ξεπεραστούν τα εν λόγω προβλήματα, η κατηγοριοποίηση της κίνησης στο πρωτόκολλο IPv6 προβλέπεται να πραγματοποιείται⁴³ με τρία μόνο πεδία: τη διεύθυνση IPv6 του *κόμβου Πηγή*, τη διεύθυνση IPv6 του *κόμβου προορισμού* και το πεδίο *flow label*. Το πεδίο *flow label* αποτελείται από 20 συνεχόμενα bits και βρίσκεται σε προκαθορισμένη θέση μέσα

⁴² Μία ροή ενδέχεται να έχει (περισσότερους του ενός) *anycast* ή *multicast* κόμβους προορισμού.

⁴³ Η κατηγοριοποίηση της κίνησης IPv6 μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τη χρήση των πέντε πεδίων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κίνηση IPv4.

στην επικεφαλίδα του κάθε πακέτου IPv6⁴⁴. Όταν ένας κόμβος Πηγή επιθυμεί να ορίσει τα πακέτα που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη ροή θέτει την τιμή του πεδίου *flow label* σε μια καθορισμένη μη μηδενική τιμή, η οποία και παραμένει αμετάβλητη κατά την προώθηση των πακέτων μέσα στο δίκτυο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν σήμερα εφαρμογές ή λειτουργίες στους δρομολογητές που μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα που παρέχει το πεδίο *flow label*. Αυτό οφείλεται ενδεχομένως στο γεγονός ότι η λειτουργία τεμαχισμού (*fragmentation*) απαγορεύεται στο πρωτόκολλο IPv6 ενώ η χρήση των μεθόδων κρυπτογράφησης (*encryption*) είναι προς το παρόν περιορισμένες για συνδέσεις IPv6. Επομένως, η κατηγοριοποίηση της κίνηση IPv6 πραγματοποιείται με αντίστοιχο τρόπο με την κίνηση IPv4, δηλαδή με τη χρήση των πέντε πεδίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Το πρωτόκολλο IPv6, όσο αναφορά τις λειτουργίες ποιότητας υπηρεσίας, δεν παρέχει προς το παρόν καμία βελτίωση σε σχέση με το πρωτόκολλο IPv4. Εκτιμάται, όμως, ότι η χρήση του πεδίου *flow label* στην επικεφαλίδα των πακέτων IPv6 θα διευκολύνει στο μέλλον την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στα δίκτυα κορμού. Στο τέλος της παρούσας ενότητας, για παράδειγμα, προτείνουμε τη χρήση του πεδίου *flow label* στο μοντέλο IQPM με στόχο να διευκολύνουμε τις λειτουργίες που πραγματοποιούνται από τους δρομολογητές κορμού.

4.9.2 Επεκτάσεις του μοντέλου IQPM σε δίκτυα IPv6

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζουμε επεκτάσεις του μοντέλου IQPM σε δίκτυα που υποστηρίζουν το πρωτόκολλο IPv6 και οι οποίες δεν θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε δίκτυα IPv4. Ειδικότερα, περιγράφουμε διαδικασία για την επανάληψη του ελέγχου αποδοχής για όσες ροές αναδρομολογούνται, βελτιώνουμε το μηχανισμό χρωματισμού των πακέτων από αναδρομολογημένες ροές και προτείνουμε την μεταφορά πληροφοριών παρακολούθησης στις επικεφαλίδες IPv6 των πακέτων.

4.9.2.1 Έλεγχος αποδοχής για αναδρομολογημένες ροές με χρήση IPv6 SSM

Η αλλαγή της τοπολογίας σε ένα δίκτυο κορμού προξενεί αναπόφευκτα την αναδρομολόγηση ενός μέρους από τις ροές που διατρέχουν το δίκτυο. Σε μια τέτοια περίπτωση, το μοντέλο IQPM προβλέπει το μαρκάρισμα των αναδρομολογημένων ροών σε κλάση υπηρεσίας μικρότερης προτεραιότητας ώστε να προστατευτεί η «νόμιμη»⁴⁵ κίνηση από την αναδρομολογημένη κίνηση. Δεν προβλέπει, όμως, κάποια διαδικασία που θα δεσμεύει επιπλέον πόρους στο μονοπάτι που ακολουθούν οι

⁴⁴ Η θέση των πεδίων που απαιτούνται για την κατηγοριοποίηση των πακέτων IPv4 μεταβάλλεται ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι των προαιρετικών πεδίων στην επικεφαλίδα τους. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει την υλοποίηση των μηχανισμών κατηγοριοποίησης στο υλικό (*hardware*).

⁴⁵ μη αναδρομολογημένη

αναδρομολογημένες ροές. Εφόσον επιβεβαιωθεί η ύπαρξη διαθέσιμων πόρων στο μονοπάτι, ο ακραίος δρομολογητής εισόδου μπορεί να τερματίσει τη διαδικασία χρωματισμού των πακέτων τους.

Η αποτυχία μίας γραμμής διασύνδεσης σε ένα δίκτυο κορμού υψηλών ταχυτήτων μπορεί να είναι η αιτία για την αναδρομολόγηση χιλιάδων ροών με εγγυήσεις ποιότητας. Μια ενδεχόμενη λύση που θα περιλάμβανε τη δημιουργία ξεχωριστών μηνυμάτων σηματοδοσίας για την έναρξη ελέγχου αποδοχής για την κάθε αναδρομολογημένη ροή θα εμφάνιζε σημαντικά προβλήματα κλιμάκωσης⁴⁶. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί, προτείνεται η χρήση του πρωτοκόλλου *Source Specific Multicast (SSM)* [Bhat03] για την κατανομή των πληροφοριών ελέγχου από τον ακραίο δρομολογητή εισόδου προς τους δρομολογητές κορμού μέσα σε μια διαχειριστική περιοχή⁴⁷. Ο ακραίος δρομολογητής μεταδίδει πληροφορίες για το σύνολο των ροών που έχουν αναδρομολογηθεί σε μία ομάδα πολλαπλών προορισμών (*multicast group*), στην οποία έχουν προηγουμένως συνδεθεί οι δρομολογητές κορμού. Οι απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζονται οι δρομολογητές κορμού για την σύνδεση τους στην ομάδα πολλαπλών προορισμών (*multicast group*) περιλαμβάνονται στα πακέτα παρακολούθησης (*monitoring packets*) που έχουν αποθηκευμένα στη τοπική τους μνήμη τους. Ο ακραίος δρομολογητής, αφού μεταδώσει τα χαρακτηριστικά κίνησης για όλες τις αναδρομολογημένες ροές, ζητά από τους εσωτερικούς δρομολογητές στο νέο μονοπάτι να εκτελέσουν έλεγχο αποδοχής με χρήση μηχανισμών *MBAC*. Οι δρομολογητές που οφείλουν να εκτελέσουν έλεγχο αποδοχής καθορίζονται με ακρίβεια από τον ακραίο δρομολογητή με βάση τις εγγραφές στην τοπική βάση εσωτερικής δρομολόγησης. Σε περίπτωση που ένας δρομολογητής αδυνατεί να δεσμεύσει τους απαραίτητους πόρους για μία τυχαία αναδρομολογημένη ροή, οφείλει να στέλνει μήνυμα λάθους στον ακραίο δρομολογητή. Αν σε κάποιο χρονικό διάστημα ο ακραίος δρομολογητής δεν λάβει κανένα μήνυμα λάθους για μια τυχαία ροή, θεωρεί ότι υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο και σταματά το χρωματισμό της ροής.

Η παραπάνω διαδικασία δεν απαιτεί από τους ακραίους δρομολογητές εισόδου να διατηρούν στοιχεία για το μονοπάτι των ροών που τους διατρέχουν και απλοποιεί εξαιρετικά την κατανομή μηνυμάτων ελέγχου προς τους εσωτερικούς δρομολογητές. Οι τελευταίοι λαμβάνουν πληροφορίες μόνο για τις ροές που τους διατρέχουν. Τέλος, η διαδικασία επιτρέπει σε αναδρομολογημένες ροές να

⁴⁶ Η δημιουργία ξεχωριστού μηνύματος ανά ροή και η αποστολή του στο δίκτυο θα αύξανε σημαντικά το φορτίο στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) του ακραίου δρομολογητή.

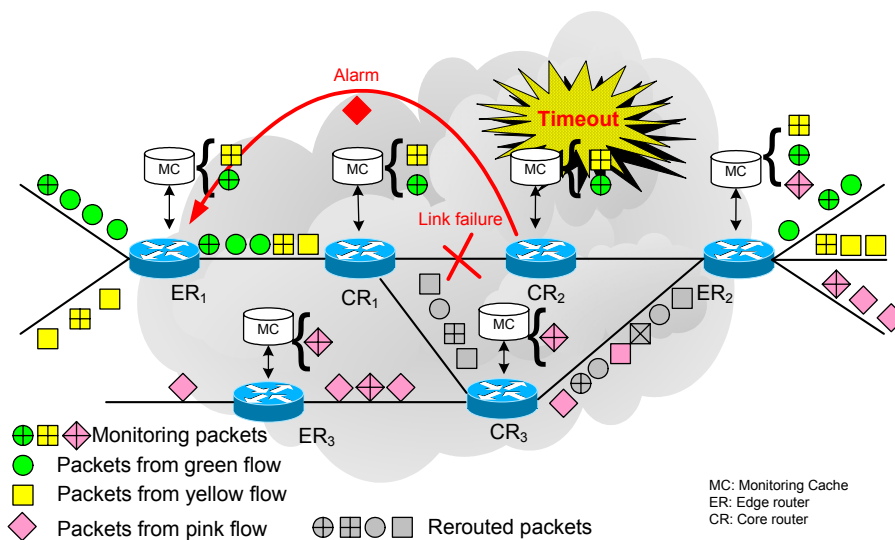
⁴⁷ Η ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας για το μοντέλο *IQPM* μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα αντίστοιχα πρωτόκολλα *multicast* που υποστηρίζονται σε περιβάλλον IPv4 [Estr+98]. Η χρήση του πρωτοκόλλου *SSM*, όμως, βελτιστοποιεί τη πρόωση των πακέτων καθώς η πηγή της κίνησης *multicast* είναι μόνο ο ακραίος δρομολογητής, ο οποίος είναι εξ αρχής γνωστός από τους υπόλοιπους εσωτερικούς δρομολογητές μέσω των πακέτων παρακολούθησης. Επίσης, το πρωτόκολλο *SSM* δεν απαιτεί τη χρήση *rendezvous point (RP)* επιτρέποντας την εύκολη υλοποίησή του.

«δεσμεύσουν» εκ νέου πόρους στο δίκτυο και να αποφύγουν το χρωματισμό των πακέτων τους σε κίνηση χαμηλότερης προτεραιότητας.

4.9.2.2 Χρωματισμός των πακέτων των αναδρομολογημένων ροών μόνο για τμήμα του μονοπατιού

Το μοντέλο IQPM προβλέπει το χρωματισμό των αναδρομολογημένων ροών υψηλής προτεραιότητας σε κλάση υπηρεσίας χαμηλότερης προτεραιότητας. Ο χρωματισμός των πακέτων πραγματοποιείται από τον ακραίο δρομολογητή εισόδου και έχει ισχύ για όλο το από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι της ροής μέσα στη διαχειριστική περιοχή.

Ο ακραίος δρομολογητής δύναται να εντοπίσει το νέο μονοπάτι που θα ακολουθήσουν τα πακέτα μιας αναδρομολογημένης ροής αν επεξεργαστεί τα μηνύματα *PREP Alarm* που συλλέγει και τα συνδυάσει με την τοπολογία του δικτύου. Με βάση τα στοιχεία από το πρωτόκολλο εσωτερικής δρομολόγησης (*Interior Gateway Protocol – IGP*), ο ακραίος δρομολογητής, μπορεί να υπολογίσει σε πόσα ακριβώς *hops* από την είσοδο των πακέτων στη διαχειριστικής περιοχής μεταβάλλεται το αρχικό μονοπάτι της εκάστοτε αναδρομολογημένης ροής. Μπορεί, λοιπόν, να αποφύγει να χρωματίσει τα πακέτα για τα πρώτα *hops*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 50, εισάγοντας πληροφορίες στην επικεφαλίδα των πακέτων IPv6⁴⁸.



Σχήμα 50: Χρωματισμός πακέτων από τις αναδρομολογημένες ροές για περιορισμένο αριθμό *hops*.

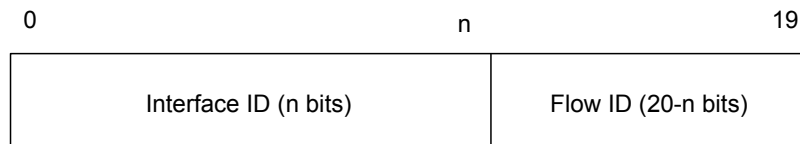
Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την προστασία των πακέτων των αναδρομολογημένων ροών στο αρχικό τμήμα του μονοπατιού αποφεύγοντας την υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Απαιτεί, όμως, τη εκτέλεση λειτουργιών χρωματισμού (*marking*) από τους εσωτερικούς δρομολογητές σε μία

⁴⁸ Οι προδιαγραφές του πρωτόκολλου IPv6 επιτρέπει την επέκταση της επικεφαλίδας των πακέτων IPv6 με την εισαγωγή νέων πεδίων.

διαχειριστική περιοχή καθώς και τη συλλογή και επεξεργασία των μηνυμάτων *PREP Alarm* από τον ακραίο δρομολογητή. Επίσης, προϋποθέτει η υλοποίηση του πρωτοκόλλου IPv6 περιλαμβάνει τη μεταφορά πληροφοριών χρωματισμού στην επικεφαλίδα των πακέτων.

4.9.2.3 Εκμετάλλευση του πεδίου *flow label* στην επικεφαλίδα IPv6

Η υλοποίηση του μοντέλου *IQPM* μπορεί να απλοποιηθεί εφόσον το πεδίο *flow label* στην επικεφαλίδα των πακέτων IPv6 χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά των πληροφοριών που ενσωματώνονται στα πακέτα παρακολούθησης (*monitoring packets*). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ακραίοι δρομολογητές κορμού εισάγουν στα πακέτα παρακολούθησης πληροφορίες για το σημείο εισόδου (*ingress interface*) στη διαχειριστική περιοχή. Την πληροφορία αυτή χρησιμοποιούν οι εσωτερικοί δρομολογητές κορμού για να ειδοποιήσουν τον ακραίο δρομολογητή για την ύπαρξη αναδρομολογημένων ροών. Τα πακέτα παρακολούθησης μπορούν να καταργηθούν εφόσον οι ακραίοι δρομολογητές σε κάθε διαχειριστική περιοχή επιτραπεί να εγγράφουν στο πεδίο *flow label* της επικεφαλίδας IPv6 πληροφορίες για το σημείο εισόδου (*ingress interface*). Η πρόταση αυτή έρχεται σε αντίθεση το σχετικό πρότυπο που περιγράφει την επικεφαλίδα IPv6 [RCCD04], όπου αναφέρεται ότι η τιμή στο πεδίο *flow label* τίθεται από μόνο από το *κόμβο Πηγή* και δεν αλλάζει κατά την μεταγωγή των πακέτων από τους δρομολογητές κορμού. Ο λόγος που προτείνεται η παραπάνω αλλαγή, όμως, οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση του συγκεκριμένου πεδίου *flow label* δεν πραγματοποιείται στη πράξη από τις υφιστάμενες εφαρμογές και επομένως είναι δυνατός ο επαναπροσδιορισμός της χρήσης τμήματός του.



Σχήμα 51: Αποθήκευση στοιχείων στο πεδίο *flow label* της επικεφαλίδας IPv6.

4.10 Περίληψη της ενότητας

Στην ενότητα παρουσιάστηκε το **Μοντέλο για την Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας μεταξύ Διαχειριστικών Περιοχών (*Inter-domain QoS Provisioning Model – IQPM*)**, το οποίο επεκτείνει την αρχιτεκτονική *DiffServ* με την εισαγωγή σηματοδοσίας για την κατανομημένη διαχείριση των πόρων του δικτύου και ενσωμάτωση μηχανισμών ελέγχου και περιορισμού της αναδρομολογημένης κίνησης. Το μοντέλο *IQPM* έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει αυστηρές εγγυήσεις απόδοσης κατά την μεταφορά κίνησης υψηλής προτεραιότητας και βελτιώνει το αντίστοιχο μοντέλο για την παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* που εφαρμόζεται στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Η εγκατάσταση νέων συνδέσεων πραγματοποιείται σε διαδοχικές φάσεις κατά τη διάρκεια των οποίων

πραγματοποιείται έλεγχος των διαθέσιμων πόρων στο δίκτυο με χρήση μηχανισμών *MBAC* και ενεργοποιούνται μηχανισμοί ελέγχου της κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών. Επίσης, η εισαγωγή μηνυμάτων παρακολούθησης επιτρέπει τον έλεγχο του μονοπατιού που ακολουθούν οι ροές και τον χρωματισμό τους εφόσον αυτές αναδρομολογηθούν. Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου *IQPM* είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα κλιμάκωσης, επιτρέπει την εγκατάσταση νέων συνδέσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα και περιορίζει τις συνέπειες προκαλούνται ύστερα από μεταβολή στην τοπολογία του δικτύου και αναδρομολόγηση μέρους της κίνησης.

Το μοντέλο *IQPM* παρουσιάζει ομοιότητες με το μοντέλο για παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* και το μοντέλο *Resource Management in DiffServ (RMD)* που επεξεργάζεται στο IETF. Η χρήση σηματοδοσίας στο μοντέλο *IQPM* μειώνει το χρόνο και ελαχιστοποιεί το διαχειριστικό κόστος για την εγκατάσταση νέων συνδέσεων σε σχέση με το μοντέλο *Premium IP*. Επίσης, με βάση αποτελέσματα από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το μοντέλο *IQPM* κατορθώνει να βελτιώσει τις υπηρεσίες που παρέχονται σε κίνηση υψηλής προτεραιότητας σε περιόδους συμφόρησης. Τέλος, τα μοντέλα *IQPM* και *RMD* εμφανίζουν ομοιότητες ως προς τη χρήση της σηματοδοσίας αλλά διαφέρουν στο τρόπο που το κάθε μοντέλο διαχειρίζεται την πλεονάζουσα κίνηση σε περιόδους συμφόρησης. Το μοντέλο *IQPM* κατορθώνει να χρωματίζει μικρότερο ποσοστό από ροές σε κλάση υπηρεσίας χαμηλότερης προτεραιότητας, όπως παρουσιάσαμε με τη χρήση παραδείγματος.

Η λειτουργικότητα του μοντέλου *IQPM* μπορεί να επεκταθεί αν εφαρμοστεί σε περιβάλλον που υποστηρίζει το πρωτόκολλο *IPv6* επιτρέποντας, μεταξύ άλλων, τον έλεγχο αποδοχής των αναδρομολογημένων ροών και την βελτίωση των παρεχομένων υπηρεσιών μετά από αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου.

5 Συμπεράσματα

Η υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (*Quality of Service- QoS*) είναι βασική απαίτηση σε προηγμένα δίκτυα μεταγωγής πακέτων IP. Η λειτουργία σύγχρονων δικτυακών εφαρμογών, όπως εφαρμογές μεταφοράς πολυμεσικού (*multimedia*) υλικού ή εικονικής συνεργασίας (*virtual collaboration*), απαιτούν την παροχή εγγυήσεων κατά τη μεταφορά της κίνησης για συνδέσεις που διασχίζουν *πολλαπλές ανεξάρτητες διαχειριστικές περιοχές*. Παρόλη την προσπάθεια της ερευνητικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια, οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές παροχής *QoS* που έχουν προταθεί κατά καιρούς αποδεικνύονται ανεπαρκείς να ικανοποιήσουν τις παραπάνω ανάγκες. Πολλές από τις προτεινόμενες μεθόδους για την εγκατάσταση νέων συνδέσεων είτε αποτυγχάνουν να παρέχουν εγγυήσεις κατά τη μεταφορά των πακέτων IP είτε δεν κλιμακώνονται αποδοτικά σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων.

Η αρχιτεκτονική Ενοποιημένων Υπηρεσιών (*Integrated Services - IntServ*) βασίζεται στη χρήση σηματοδοσίας για τη δέσμευση δικτυακών πόρων και τη διατήρηση πληροφοριών κατάστασης στους δρομολογητές κορμού για τις εγκατεστημένες ροές. Παρόλο που η αρχιτεκτονική *IntServ* κατορθώνει να παρέχει εγγυήσεις κατά τη μεταφορά της κίνησης, προβλήματα κλιμάκωσης αποτρέπουν την εφαρμογή της σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Η αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (*Differentiated Services – DiffServ*), αντιθέτως, χειρίζεται ροές με αντίστοιχες απαιτήσεις απόδοσης ως συναθροίσεις κίνησης (*traffic aggregates*), τις οποίες αντιστοιχίζει σε περιορισμένο αριθμό από κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Παρόλο που η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής *DiffServ* δεν παρουσιάζει περιορισμούς κλιμάκωσης, έχει σχεδιαστεί για να παρέχει εγγυήσεις απόδοσης στην συναθροισμένη κίνηση αγνοώντας τις υπηρεσίες που τελικά λαμβάνουν οι μεμονωμένες ροές. Επίσης, η αρχιτεκτονική *DiffServ* στερείται τη χρήση σηματοδοσίας για τη δέσμευση των δικτυακών πόρων και τη διαχείριση των μηχανισμών *QoS* στους δρομολογητές κορμού. Για το λόγο αυτό, αρκετές

διαδικασίες κατά την παροχή των υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος αποδοχής νέων ροών, πραγματοποιείται από τον αρμόδιο διαχειριστή με αποτέλεσμα την εισαγωγή καθυστερήσεων.

5.1 Σύνοψη διατριβής - Αποτελέσματα

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου *SEQUIN* ορίσαμε την υπηρεσία υψηλής προτεραιότητα *Premium IP*, την οποία και εφαρμόσαμε δοκιμαστικά στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs. Η υπηρεσία *Premium IP* προϋποθέτει την παροχή αυστηρών εγγυήσεων ποιότητας κατά τη μεταφορά των πακέτων IP, οι οποίες προσομοιώνουν την εγκατάσταση «εικονικού» κυκλώματος μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Στο έργο *SEQUIN* ορίσαμε αναλυτικά τις εγγυήσεις απόδοσης που οφείλει να παρέχονται στους συνδρομητές της υπηρεσίας, περιγράψαμε την εφαρμογή συγκεκριμένων μηχανισμών ελέγχου και προστασίας της κίνησης που μεταφέρεται μεταξύ ανεξάρτητων διαχειριστικών περιοχών, καθορίσαμε το μοντέλο συνεργασίας των αρμόδιων τεχνικών υπευθύνων που συμμετέχουν στην εγκατάσταση νέων συνδέσεων, προσδιορίσαμε τις βασικές αρχές για την παρακολούθηση των εγγυήσεων απόδοσης και την επιβεβαίωση των συμβολαίων *SLA* και εκτελέσαμε δοκιμές πάνω από το δίκτυο που αποδεικνύουν την βελτίωση των παρεχομένων υπηρεσιών κατά την μεταφορά της κίνησης.

Η εμπειρία από την εφαρμογή της υπηρεσίας *Premium IP* στο δικτυακό περιβάλλον GÉANT/NRENs έδειξε ότι η εγκατάσταση νέων συνδέσεων έχει σημαντικό διαχειριστικό κόστος και απαιτεί μεγάλη χρονική διάρκεια εγκατάστασης. Η έλλειψη αυτοματοποιημένων διαδικασιών, αφενός, για τη δέσμευση των δικτυακών πόρων ανά σύνδεση και, αφετέρου, για τη συγκρότηση των μηχανισμών ελέγχου είναι μερικοί από τους κυριότερους λόγους που προκαλούν καθυστερήσεις κατά την παροχή της υπηρεσίας. Στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας *GN2-SA3*, το μοντέλο για παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* ενισχύεται με την εφαρμογή ενός μεσίτη εύρους ζώνης (*bandwidth broker - BB*). Ο μεσίτης επιτρέπει την κεντρική διαχείριση των δικτυακών πόρων σε μία διαχειριστική περιοχή και εκτελεί τον έλεγχο αποδοχής για τις υπό εγκατάσταση ροές. Ταυτόχρονα, λαμβάνει και διεκπεραιώνει αιτήματα από γειτονικές διαχειριστικές περιοχές. Όπως ισχύει σε κάθε κεντροποιημένη αρχιτεκτονική, το μοντέλο που προδιαγράφεται στο *GN2-SA3* για παροχή της υπηρεσίας *Premium IP* ενδέχεται να παρουσιάσει προβλήματα κλιμάκωσης εφόσον ο αριθμός των υποβαλλόμενων αιτημάτων είναι μεγάλος.

Αξιοποιώντας την εμπειρία που αποκτήσαμε στο ερευνητικό έργο *SEQUIN* προδιαγράψαμε το μοντέλο για την Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας μεταξύ Διαχειριστικών Περιοχών (*Inter-domain QoS Provisioning Model - IQPM*). Το μοντέλο *IQPM* εισάγει τη χρήση της σηματοδοσίας κατά τη εξυπηρέτηση συνδέσεων υψηλής προτεραιότητας αυτοματοποιώντας τις περισσότερες διαχειριστικές λειτουργίες που προδιαγράφονται στο μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP*. Η δέσμευση των

δικτυακών πόρων πραγματοποιείται καταναμημένα από τους δρομολογητές κορμού με εφαρμογή μηχανισμών *Measurement-based Admission Control (MBAC)*. Επιπλέον, το μοντέλο *IQPM* ενσωματώνει μηχανισμούς παρακολούθησης των μονοπατιών που ακολουθούν οι εγκατεστημένες ροές και μπορεί να αναγνωρίσει όσες ροές αναδρομολογούνται ύστερα από αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Η δυνατότητα αυτή, επιτρέπει στο μοντέλο *IQPM* τον έλεγχο της αναδρομολογημένης κίνησης και κατορθώνει να περιορίσει τις συνέπειες που προκαλεί η αναδρομολογημένη κίνηση σε γραμμές με αυξημένο βαθμό συμφόρησης. Οι προσομοιώσεις που εκτελέσαμε με χρήση της τοπολογίας του GÉANT έδειξαν ότι το μοντέλο *IQPM* μπορεί να μειώσει τον αριθμό των ροών που επηρεάζονται μετά από σφάλμα στις γραμμές διασύνδεσης σε σχέση με το μοντέλο *Premium IP*.

Το μοντέλο *IQPM* παρουσιάζει ομοιότητες με το μοντέλο *Resource Management in DiffServ (RMD)* που αναπτύσσεται από το IETF. Η δέσμευση των δικτυακών πόρων στο *RMD* πραγματοποιείται καταναμημένα με χρήση σηματοδosis και πολλές διαχειριστικές λειτουργίες για την εγκατάσταση νέων συνδέσεων έχουν αυτοματοποιηθεί. Το μοντέλο *RMD* εμφανίζει, όμως, σημαντικές διαφορές με το μοντέλο *IQPM* στη μέθοδο που εφαρμόζει για τη διαχείρισης της κίνησης σε περιόδους συμφόρησης, ιδιαίτερα κατά την περίπτωση που η συμφόρηση οφείλεται από αναδρομολογημένες ροές. Το μοντέλο *IQPM* χρωματίζει μόνο την αναδρομολογημένη κίνηση σε κλάση υπηρεσίας χαμηλότερης προτεραιότητας ενώ το μοντέλο *RMD* χρωματίζει όλες ανεξαιρέτως τις ροές αντιμετωπίζοντας συνθήκες συμφόρησης στο δίκτυο. Όπως δείξαμε με τη χρήση ενός αναλυτικού παραδείγματος, το μοντέλο *IQPM* απαιτεί το χρωματισμό μικρότερου ποσοστού ροών σε περιόδους συμφόρησης σε σχέση με το μοντέλο *RMD* και επομένως μπορεί να διασφαλίσει τις παρεχόμενες υπηρεσίες για μεγαλύτερο αριθμό ροών.

Από όσα μοντέλα αναφέρθηκαν παραπάνω, μόνο το μοντέλο παροχής της υπηρεσίας *Premium IP* έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε δίκτυα παραγωγής⁴⁹. Το μοντέλο *RMD* βρίσκεται ακόμα σε φάση προτυποποίησης από την αρμόδια ομάδα εργασίας στο IETF. Η παρούσα διατριβή προτείνει το μοντέλο *IQPM* ως εναλλακτική πρόταση για τη παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα IP διευκολύνοντας, αφενός, την εγκατάσταση συνδέσεων που εκτείνονται κατά μήκος πολλαπλών διαχειριστικών περιοχών και, αφετέρου, περιγράφοντας πρωτότυπο τρόπο για την παρακολούθηση των παρεχομένων υπηρεσιών.

⁴⁹ Η ερευνητική δραστηριότητα *GN2-SA3* βρίσκεται σε φάση υλοποίησης ενός πειραματικού μεσίτη (*bandwidth broker*).

5.2 Κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα

Οι επόμενες παράγραφοι περιγράφουν πιθανές κατευθύνσεις για τη συνέχιση της έρευνας με στόχο τη βελτίωση του μοντέλου *IQPM* και την παροχή *QoS* σε προηγμένα δίκτυα υπερ-υψηλών ταχυτήτων.

5.2.1 Συνδέσεις υψηλής προτεραιότητας διπλής κατεύθυνσης

Το μοντέλο *IQPM* υποστηρίζει την εγκατάσταση ροών υψηλής προτεραιότητας και προσφέρει εγγυήσεις για τη μεταφορά της κίνησης προς τη μία μόνο κατεύθυνση, δηλαδή για κίνηση που μεταφέρεται από το *κόμβο Πηγή* προς το *κόμβο Προορισμού*. Εφόσον απαιτηθεί η παροχή εγγυήσεων για κίνηση που μεταφέρεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, η διαδικασία που προδιαγράφει το μοντέλο *IQPM* οφείλει να επαναληφθεί.

Αρκετές εφαρμογές επιθυμούν τη λήψη εγγυήσεων κατά τη μεταφορά της κίνησης και προς τις δύο κατευθύνσεις και, εφόσον αυτό δεν είναι εφικτό, προτιμούν την απόρριψη εγκατάστασης της ροής. Για να υποστηριχθεί η παραπάνω λειτουργικότητα, το μοντέλο *IQPM* οφείλει να επεκταθεί ώστε να διαχειριστεί την ταυτόχρονη δέσμευση δικτυακών πόρων και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το μοντέλο μπορεί να εκμεταλλευτεί το γεγονός ότι τα μηνύματα σηματοδοσίας ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι και προς τις δύο κατευθύνσεις. Θα πρέπει, όμως, να εξεταστεί με ποιο τρόπο θα πραγματοποιείται επιτυχημένη ή αποτυχημένη δέσμευση των δικτυακών πόρων ενώ θα πρέπει να προβλεφθεί η διαδικασία με την οποία εγκαθίστανται και ανανεώνονται οι πληροφορίες κατάστασης για τις εγκατεστημένες ροές στους ακραίους δρομολογητές. Τέλος, θα απαιτηθούν αλλαγές στη διαδικασία παρακολούθησης των μονοπατιών κίνησης και ο τρόπος χρωματισμού των αναδρομολογημένων ροών.

5.2.2 Υποστήριξη υπηρεσιών εγγυημένης προώθησης με το μοντέλο *IQPM*

Το μοντέλο *IPQM* μπορεί να επεκταθεί ώστε να υποστηρίξει υπηρεσίες που βασίζονται στη συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο «εγγυημένης προώθησης» (*assured forwarding per hop behaviour, AF-PHB*). Εφόσον η κίνηση υψηλής προτεραιότητας⁵⁰ και εγγυημένης προώθησης καταλαμβάνουν ξεχωριστές ουρές⁵¹ στους δρομολογητές του δικτύου, η διασφάλιση διαφορετικών επιπέδου εγγυήσεων είναι εφικτή.

⁵⁰ «Επισπεύδουσα» κίνηση (*expedite forwarding –EF- traffic*)

⁵¹ Διαφορετικοί αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού (*scheduling*) μπορούν να υλοποιηθούν στους δρομολογητές κορμού για την εξυπηρέτηση κίνησης υψηλής προτεραιότητας (§3.2.1).

Η υπηρεσία ποιότητας εγγυημένης προώθησης (*assured forwarding*) παρέχει χρονικές καθυστερήσεις παρόμοιες με αυτές που λαμβάνει η κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*) όταν το δίκτυο εμφανίζει χαμηλό βαθμό συμφόρησης. Η κίνηση εγγυημένης προώθησης χαρακτηρίζεται κατά την εισαγωγή της σε μια διαχειριστική περιοχή είτε «εντός προφίλ» (*in profile*) είτε «εκτός προφίλ» (*out of profile*). Η «εντός προφίλ» κίνηση οφείλει να προωθηθεί με ελάχιστη απώλεια πακέτων σε αντίθεση με την υπόλοιπη κίνηση που μπορεί να απορριφθεί σε περιόδους συμφόρησης στο δίκτυο. Η κίνηση εγγυημένης προώθησης, ανεξάρτητα από το χρωματισμό που φέρουν τα διαφορετικά πακέτα που τη συνθέτουν, εξυπηρετείται συνήθως στους δρομολογητές κορμού από μία μόνο ουρά, η οποία εφαρμόζει το μηχανισμό διαχείρισης συμφόρησης *RED In Out (RIO)* [CF98]. Η χρήση μίας ουράς αποτρέπει την μεταβολή της σειράς των πακέτων (*packet reordering*) στο δίκτυο και διευκολύνει στον έλεγχο της χωρητικότητας που καταλαμβάνει η κίνηση εγγυημένης προώθησης σε μία γραμμή διασύνδεσης.

Η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας με χρήση της συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο εγγυημένης προώθησης (*AF PHB*). απαιτεί να ξεπεραστούν αρκετά τεχνικά προβλήματα [GMV03], όπως ακολούθως:

- οι ροές που βασίζονται στο πρωτόκολλο μεταφοράς *TCP* ενδέχεται να επιτύχουν χαμηλό βαθμό ρυθμαπόδοσης (*throughput*) εξαιτίας της απώλειας των «εκτός προφίλ» πακέτων της ίδιας ροής και παρόλο που η «εντός προφίλ» κίνηση μπορεί να παρουσιάζει αμελητέο βαθμό απώλειας πακέτων.
- οι ροές *UDP* επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση από ροές *TCP*, οι οποίες μειώνουν τον ρυθμό τους σε ύστερα από την απώλεια πακέτων κατά την μεταφορά.
- εμφανίζεται συχνά πρόβλημα άνισης κατανομής της διαθέσιμης χωρητικότητας για την εξυπηρέτηση της «εκτός προφίλ» κίνησης μεταξύ των ανταγωνιζόμενων ροών εγγυημένης προώθησης.

Η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας εγγυημένης προώθησης μπορούν να υποστηριχθούν με χρήση του μοντέλου *IQPM* εξαιτίας των παρακάτω λόγων:

- Το μοντέλο *IQPM* επιτρέπει την καταναεμημένη διαχείριση των πόρων του δικτύου με χρήση σηματοδοσίας και μηχανισμών *MBAC*. Δεδομένου ότι οι υπηρεσίες εγγυημένης προώθησης επιτρέπουν την περιορισμένη απώλεια πακέτων, το κατώφλι ελέγχου αποδοχής για την κίνηση εγγυημένης προώθησης μπορεί να είναι υψηλότερο από το κατώφλι για την κίνηση υψηλής προτεραιότητας, επιτρέποντας αύξηση του βαθμού χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου για κίνηση διαφορετική από την κίνηση βέλτιστης προσπάθειας.

- Η εξυπηρέτηση της κίνησης εγγυημένης προώθησης μπορεί υποστηριχθεί με τους ίδιους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη ροών υψηλής προτεραιότητας. Σε κάθε περίπτωση η κίνηση εγγυημένης προώθησης και η κίνηση υψηλής προτεραιότητας χρησιμοποιούν διαφορετικές ουρές εξόδου στους δρομολογητές κορμού ενώ δεν υπάρχει καμία εξάρτηση στο τρόπο που πραγματοποιείται η διαχείριση των καταχωρητών (*buffers*) για την κάθε υπηρεσία.
- Το μοντέλο *IQPM* επιτρέπει τη διαχείριση των ελεγκτών κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών. Εκτιμάται, όμως, ότι ο ελεγκτής κίνησης στα όρια των διαχειριστικών περιοχών για τη κίνηση εγγυημένης προώθησης θα είναι πιο σύνθετος [HG99] ώστε να εξυπηρετήσει καλύτερα τις ανάγκες της υπηρεσίας.
- Το μοντέλο *IQPM* επιτρέπει το χρωματισμό των πακέτων από το δρομολογητή *DSR*, σε περίπτωση που ο διαχωρισμός της κίνησης δεν πραγματοποιηθεί από τον κόμβο Πηγή. Χρωματισμός της κίνησης ενδέχεται να πραγματοποιείται και από τους ακραίους δρομολογητές εισόδου μιας διαχειριστικής περιοχής ανάλογα με τα στοιχεία που μπορούν να μεταφέρονται από τα πακέτα παρακολούθησης.
- Η χρήση των πακέτων παρακολούθησης που προβλέπονται από το μοντέλο *IQPM* μπορεί να επιτρέψει τη δυναμική αλλαγή του ποσοστού των «εντός ->» και «εκτός προφίλ» κίνησης από τον ακραίο δρομολογητή εισόδου σε μια διαχειριστική περιοχή [Giacco2003] με χρήση πληροφοριών που παρέχονται από τους εσωτερικούς δρομολογητές σε μια διαχειριστική περιοχή.
- Το μοντέλο *IQPM* επιτρέπει να «αποχρωματιστούν» τα «εκτός προφίλ» πακέτα κατά την έξοδό τους από μια διαχειριστική περιοχή. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει στον επόμενο δρομολογητή εισόδου να χρωματίσει εκ νέου τα πακέτα λαμβάνοντας υπόψη την απώλεια πακέτων στην προηγούμενη διαχειριστική περιοχή.

Το μοντέλο *IQPM* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση κίνησης *AF* αλλά οφείλει να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής και περιορισμού της κίνησης για ροές που παράγουν πακέτα που χαρακτηρίζονται «εντός» και «εκτός προφίλ». Επίσης, θα πρέπει να μελετηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ της αναδρομολογημένης κίνησης υψηλής προτεραιότητας – κίνηση *EF* - και της μη αναδρομολογημένης «εντός προφίλ» κίνησης *AF* σε περιόδους συμφόρησης, π.χ. ύστερα από αποτυχία των γραμμών διασύνδεσης.

5.2.3 Υποστήριξη υπηρεσιών σε κινούμενους χρήστες

Οι τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* [UMTS], Wi-Fi [WiFi] κλπ, σε συνδυασμό με την εξάπλωση της τεχνολογίας *IPv6* αναμένεται να

δημιουργήσουν την ανάγκη για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε κινούμενους χρήστες (*mobile users*). Οι τελευταίοι θα μπορούν να επιλέξουν διαφορετικό δίκτυο πρόσβασης καθώς κινούνται στο χώρο με αποτέλεσμα να απαιτείται συνεχής δέσμευση και αποδέσμευση δικτυακών πόρων πάνω σε συνεχώς μεταβαλλόμενα μονοπάτια διασύνδεσης. Το μοντέλο *IQPM* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ταχεία δέσμευση πόρων σε συνδέσεις που διασχίζουν πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές. Οι μηχανισμοί, όμως, παρακολούθησης του μονοπατιού των εγκατεστημένων ροών οφείλουν να βελτιωθούν ώστε να αναγνωρίζουν αν η απουσία λήψης πακέτων παρακολούθησης οφείλεται σε μετακίνηση του τελικού χρήστη σε άλλο δίκτυο πρόσβασης ή σε αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου λόγω σφαλμάτων.

5.2.4 Ποιότητα υπηρεσίας σε προηγμένα δίκτυα νέας γενιάς

Τα προηγμένα δίκτυα νέας γενιάς θα εμφανίζουν υπερ-υψηλές ταχύτητες διασύνδεσης ενώ η εφαρμογή της τεχνολογίας για την πολυπλεξία μηκών κύματος (*wavelength division multiplexing - WDM*) [ITU02b] θα αυξήσει σημαντικά τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Το δίκτυο GÉANT2, για παράδειγμα, σχεδιάζεται να υποστηρίζει ταυτόχρονα την μεταγωγή οπτικών κυκλωμάτων (*circuit switching*) για τη δημιουργία *Optical Private Networks (OPN)* και συνδέσεις μεταγωγής πακέτων IP (*packet switching*). Συνδρομητές με αυξημένες ανάγκες σε χωρητικότητα ή με απαιτήσεις για ελάχιστη καθυστέρηση κατά τη μεταφορά της πληροφορίας θα μπορούν να εγκαθιστούν απευθείας συνδέσεις με χρήση λάμδα (*lambda*), κυκλωμάτων *SONET/SDH*, συνδέσεων *Gigabit Ethernet*, εικονικών συνδέσεων *MPLS VPNs*, κλπ. Ήδη έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη τεχνολογιών και εργαλείων για τη διαχείριση της διαθέσιμης χωρητικότητας στα μελλοντικά υβριδικά δίκτυα όπως:

- το σύστημα *Dynamic Resource Allocation Controller (DRAC)* [DRAC], το οποίο επιδιώκει να επιτρέψει στις δικτυακές εφαρμογές να διαχειριστούν αυτοματοποιημένα τους πόρους του δικτύου κάτω από σαφώς καθορισμένες πολιτικές πρόσβασης
- το μοντέλο *User Control Lightpath Provision (UCLP)* [UCLP], που επιδιώκει την ανάπτυξη συστήματος βασισμένου στην τεχνολογία *Web Services* και θα παρέχει τη δυνατότητα σε τελικούς χρήστες να εγκαθιστούν και να διαχειρίζονται από άκρο-σε-άκρο οπτικές συνδέσεις.
- το *middleware* που αναπτύσσεται στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας *GN2-JRA3 "Bandwidth of Demand"* [GN2c], και η οποία σχεδιάζει να παρέχει υπηρεσία που θα εγκαθιστά και διαχειρίζεται οπτικά κυκλώματα υψηλής χωρητικότητας πάνω από το δικτυακό περιβάλλον του GÉANT/NRENs.

Η μελέτη της μεθοδολογίας για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε κίνηση υψηλής προτεραιότητας σε δίκτυα IP, δηλαδή για δημιουργία «εικονικών κυκλωμάτων» στο επίπεδο IP, μπορεί να φανεί χρήσιμη σε ερευνητές που σχεδιάζουν υπηρεσίες για δυναμική (σχεδόν σε πραγματικό χρόνο) παροχή οπτικών κυκλωμάτων εγγυημένης χωρητικότητας. Παρόλο που

εμφανίζονται θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών που εμφανίζουν οι ροές υψηλής προτεραιότητας IP και τα οπτικά κυκλώματα, η διαχείρισή τους πραγματοποιείται με ανάλογους μηχανισμούς. Ανοικτά ζητήματα που τίθενται από κοινού σε για δίκτυα IP που προσφέρουν υπηρεσίες QoS και οπτικά δίκτυα που διαχειρίζονται δυναμικές οπτικές συνδέσεις είναι η συλλογή πληροφοριών για την κατάσταση και την τοπολογία του δικτύου, η αυτοματοποίηση διαδικασιών για παροχή των υπηρεσιών, η βελτιστοποίηση των διαθέσιμων πόρων, κλπ. Προτείνεται, λοιπόν, να διευκρινιστεί κατά πόσο ο συνδυασμός μηχανισμών QoS και μηχανισμών για την εγκατάσταση οπτικών κυκλωμάτων μπορεί να επιτρέψει την ικανοποίηση των απαιτήσεων που τίθενται από σύγχρονες δικτυακές εφαρμογές.

6 Αναφορές – Βιβλιογραφία

- [Abile] “Abilene - Internet2 high-performance backbone network”, <http://abilene.internet2.edu/>.
- [Ader+01] L. Andersson, P. Doolan, N. Feldman, A. Fredette, B. Thomas, “LDP Specification”, IETF RFC 3036, January 2001.
- [AKZ99a] G. Almes, S. Kalidindi, M. Zekauskas, “A One-way Delay Metric for IPPM”, IETF RFC 2679, September 1999.
- [AKZ99b] G. Almes, S. Kalidindi, M. Zekauskas, “A One-way Packet Loss Metric for IPPM”, IETF RFC 2680, September 1999.
- [AKZ99c] G. Almes, S. Kalidindi, M. Zekauskas, “Round Trip Delay Metric for IPPM”, IETF RFC 2680, September 1999.
- [ATMF94] “ATM User Network Interface (UNI) Specification Version 3.1”, AF-UNI0010.002, ATM Forum, 1994.
- [ATMF96] “Traffic Management Specification Version 4.0”, af-tm-0056.000, ATM Forum Technical Committee, April 1996.
- [Ava+05] A. Varvitsiotis, V. Siris, D. Primpas, G. Fotiadis, A. Liakopoulos, C. Bouras, “Techniques for DiffServ-based QoS in Hierarchically Federated MAN Networks – the GRNET Case”, 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, September 2005.
- [Bade+05] At. Bader et al., “RMD-QOSM - The Resource Management in Diffserv QOS Model”, draft-ietf-nsis-rmd-03.txt, work in progress.
- [Bake+01] F.Baker et al., “Aggregation of RSVP for IPv4 and IPv6 reservations”, RFC3175, September 2001.
- [BCP00] G. Bianchi, A. Capone, C. Petrioli, “Throughput Analysis of End-to-End Measurement-Based Admission Control in IP”, IEEE Infocom 2000.
- [BCS94] R.Braden, D.Clark, S.Shenker. “Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview”, IETF RFC1633, June 1994.
- [Bell03] G. Bell, “Failure to Thrive: QoS and the Culture of Operational Networking”, Proceeding ACM SIGCOM Workshop on Revisiting IP QoS, August 2003.

- [Bern+00] Y. Bernet et al., “A framework for Integrated Services Operation over DiffServ Networks”, IETF RFC 2998, November 2000.
- [Bhat03] Bhattacharyya S., “An overview of Source-Specific Multicast (SSM)”, IETF RFC3569 July 2003.
- [BJS00] L.Breslau, S. Jamin, S. Shenker, “Comment on the Performance of Measurement-Based Admission Control Algorithms”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000.
- [Blake+98] Steven Blake, David Black, Mark Carlson, Elwyn Davies, Zheng Wang, and Walter Weiss, “An Architecture for Differentiated Services”, IETF RFC2475, December 1998.
- [BPS02] H. Balakrishnan, V.N. Padmanabhan, M. Sooriyabandara, “TCP Performance Implications of Network Path Assymetry”, IETF RFC3449, December 2002.
- [Brad+97] Braden, R. et al., “Resource Reservation Protocol – Version 1 Functional Specifications”, IETF RFC2205, September 1997.
- [CANet4] “Canadian Internet Research and Education Network”, <http://www.canarie.ca/canet4/index.html>.
- [Casp03] “Flow Based Routing: Rationale and Benefits”, Caspian Network Inc, <http://www.caspiannetworks.com/>.
- [CB00] A. Charny, JY Le Boudec, “Delay Bounds in a Network With Aggregate Scheduling”, Technical Report, April 2000.
- [CCMW01] E. Christensen, F. Curbera, G. Meredith, S. Weerawarana, “Web Services Description Language (WSDL) 1.1”, W3C TR, Mar 2001, (<http://www.w3.org/TR/wsdl/>).
- [CF98] D. Clark, W. Fang, “Explicit allocation of best effort packet delivery service, IEEE/ACM Transactions on Networking”, Vol. 6, No. 4, 1998.
- [Chan+01] K.Chan et al., “COPS Usage for Policy Provisioning” IETF RFC 3084, March 2001.
- [Chan+05] K.Chan, et al., “Configuration Guidelines for DiffServ Service Classes”, IETF Transport Area Working Group (tsvwg), work in progress.
- [Char+02] A. Charny et al, “Supplemental Information for the new definition of EF PHB (Expedited Forwarding PHB), IETF RFC 3247, March 2002.
- [Cisco] Cisco Systems Inc, <http://www.cisco.com>.
- [CiscoA] “Cisco 12000 Series Routers”, Cisco Systems Inc., <http://www.cisco.com>.
- [CiscoB] “Cisco 12000 10-Port Gigabit Ethernet Line Card”, Cisco Systems Inc., <http://www.cisco.com>.
- [CiscoC] “Cisco 12000 Series 4-Port Gigabit Ethernet ISE Line Card”, Cisco Systems Inc., <http://www.cisco.com>.
- [CiscoD] “BGP Policy Accounting”, Cisco Systems Inc., <http://www.cisco.com>.
- [CiscoE] “Carrier Routing System – CRS”, Cisco Systems Inc., <http://www.cisco.com>.
- [CK00] C. Cetinkaya, E. Knightly, “Egress Admission Control”, in Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv, Israel, March 2000.
- [CLAR] “The CLARA organization - Latin American Cooperation of Advanced Networks”, <http://www.redclara.net>.

- [CMRW93] J. Case, K. McCloghrie, M. Rose, S. Waldbusser, “Structure of Management Information for version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)”, IETF RFC 1442, April 93.
- [CNET] “China Research and Education Network”, <http://www.edu.cn>.
- [Crow03] J. Crowcroft et al., “QoS's Downfall: At the bottom, or not at all!”, Proceeding ACM SIGCOM Workshop on Revisiting IP QoS, August 2003.
- [Davie+02] B. Davie et al., “An expedited forwarding PHB”, IETF RFC 3246, March 2002.
- [DC02] C. Demichelis, P. Chimento, “IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)”, IETF RFC 3393, November 2002.
- [DH98] S. Deering, R. Hinden, “Internet Protocol, Version 6 (IPv6)”, IETF RFC2460, December 1998.
- [DRAC] “Dynamic Resource Allocation Controller (DRAC)”, Nortel Inc., <http://www.nortel.com/drac/>.
- [Durh+00] D. Durham et al., “The COPS (Common Open Policy Service) Protocol”, IETF RFC 2748, January 2000.
- [DWS] “Dante World Service”, Delivery of Advanced Network Technology to Europe (DANTE), <http://www.dante.net>.
- [Ele+00] V. Elek et al., “Admission Control Based on End-to-End Measurements” Proceeding of IEEE INFOCOM'00, March 2000.
- [Eng+03] T. Engel et al., “AQUILA: Adaptive Resource Control for QoS Using an IP-Based Layered Architecture”, IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 1, January 2003.
- [EAET] “Εθνικό Δίκτυο Έρευνας & Τεχνολογίας (Greek Research & Technology Network)”, <http://www.grnet.gr>.
- [EAET6] “Υπηρεσίες Διασύνδεση με το πρωτόκολλο IP (IPv4 & IPv6)”, Εθνικό δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας, <http://www.grnet.gr/ipv6>.
- [Eumed] “The EUMEDCONNECT Network”, European Commission's EUMEDIS (EUro-MEDiterranean Information Society) Programme, <http://www.eumedconnect.net/>.
- [ESnet] “The Energy Sciences Network, (ESnet)”, <http://www.es.net/>
- [Estr+98] D. Estrin et al., Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification, IETF RFC 2117, June 1998.
- [Fair99] “Throughput Fairness Index: An Explanation”, ATM Forum/99-0045, February 1999.
- [Fauc05] F. Le Faucheur, “Protocol Extensions for Support of Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering”, IETF RFC 4124, June 2005.
- [FK99] I. Foster, C. Kesselman, “The Grid: Blueprint for a Future Computing Infrastructure, Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [Floyd96] S. Floyd, “Comments on Measurement-based Admission Control for Controlled-Load Service”, Computer Communication Review, 1996.
- [Fos+04] I. Foster et al., “End-to-End Quality of Service for High End Applications”, Computer Communications, 27(14):1375-1388, 2004.
- [FRSW99] I. Foster, A. Roy, V. Sander, L. Winkler, “End-to-End Quality of Service for High-End Applications,” technical report, Argonne National Laboratory, 1999.
- [GB99] M. Gunter, T. Braun. “Evaluation of Bandwidth Broker Signaling”, Proceedings of the International Conference on Network Protocols ICNP'99, IEEE Computer Society, November 1999.

- [GEANT] “GEANT: The Trans-European Research and Education Network”, <http://www.geant.net>.
- [GGF] “The Global Grid Forum (GGF)”, <http://www.ggf.org/>.
- [GJS03] J. Gozdecki, A. Jajszczyk, R. Stankiewicz, “Quality of Service Terminology in IP Networks”, IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 3, March 2003.
- [GKK95] R.Gibbens, F.Kelly, P.Key. “A Decision-Theoretic Approach to Call Admission Control in ATM Networks”, IEEE Journal in Selected Areas in Communications, August 1995.
- [GLOB] “The Globus Alliance”, <http://www.globus.org/>.
- [GMV03] P. Giacomazzi, L.Musumeci, G.Verticale “Transport of TCP/IP Traffic over Assured Forwarding IP-Differentiated Services”, Vol15, No 5, IEEE Network, September/October 2003.
- [GN2] “GÉANT2: The pan-European Research and Education network”, co-funded by the European Commission and Europe's National Research & Education Networks, <http://www.geant2.net/>.
- [GN2a] “GÉANT2 Joint Research Activity 1 (GN2-JRA1): Performance Measurements and Monitoring”, <http://www.geant2.net/server/show/nav.754>.
- [GN2b] “DJ1.2.1: General Framework Design - Single Domain”, GN2-JRA1, June 2005.
- [GN2c] “GÉANT2 Joint Research Activity 3 (GN2-JRA3): Bandwidth Allocation and Reservation”, <http://www.geant.net/server/show/nav.538>.
- [GN2d] “GÉANT2 Service Activity 3 (GN2-SA3): End-to-End Service Provision”, <http://www.geant2.net/server/show/nav.893>.
- [H.323] “H.323 - Packet-based multimedia communications systems”, Recommendation H.323 (07/03), International Telecommunications Union (ITU), July 2003.
- [HBWW99] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski, “Assured forwarding PHB”, IETF RFC 2597, 1999.
- [HD98] R. Hinden, S. Deering, "IP Version 6 Addressing Architecture", IETF RFC 2373, July 1998.
- [HG99] J. Heinanen, R. Guerin, “A Two Rate Three Color Marker”, IETF RFC 2698, September 1999.
- [Hiw+05] Howarth M. et al., “Provisioning for Inter-domain Quality of Service: The MESCAL Approach”, IEEE Communications Magazine, Vol. 43, No 6, June 2005.
- [HKLB05] R. Hancock, G. Karagiannis, J. Loughney, S. Van den Bosch, “Next Steps in Signaling (NSIS): Framework”, IETF RFC 4080, June 2005.
- [HLMS06] A. Hanemann, A. Liakopoulos, M. Molina, M. Swany, “A Study On Network Performance Metrics and Their Composition”, submitted to TERENA conference 2006.
- [HM02] J. Hodges, R. Morgan, “Lightweight Directory Access Protocol (v3):Technical Specification”, IETF RFC 3377, November 2002.
- [IEEE99] “802.3ab-1999™, Physical Layer Parameters and Specifications for 1000 Mb/s Operation Over 4 Pair of Category 5 Balanced Copper Cabling, Type 1000BASE-T”, IEEE, 1999.
- [IETF] “The Internet Engineering Task Force”, <http://www.ietf.org/>
- [IETF6] “IP Version 6 Working Group (ipv6)”, IETF, <http://www.ietf.org/html.charters/ipv6-charter.html>
- [IJD01] G. Iannaccone, S. Jaiswal, C. Diot, “Packet Reordering inside the Sprint backbone”, Tech. Report, TR01-ATL-062917, Sprint ATL, Jun. 2001.

- [ITU01] “End-User Multimedia QoS Categories”, Recommendation G.1010, International Telecommunications Union (ITU-T), November 2001.
- [ITU02] “Network Performance Objectives for IP-Based Services”, Recommendation Y.1541, International Telecommunications Union (ITU-T), May 2002.
- [ITU02b] “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”, Recommendation G.694.1, International Telecommunications Union, June 2002.
- [ITU88] “ITU-T G.707: Network Node Interface for the Synchronous Digital Hierarchy (SDH)”, International Telecommunications Union, 1988.
- [ITU91] “ITU I.321: B-ISDN protocol reference model and its Applications”, International Communication Union Telecommunication Union (ITU-T), 1991.
- [ITU96] “Methods for subjective determination of transmission quality”, Recommendation P.800, International Telecommunications Union, 1996.
- [JDSZ97] S. Jamin, P.Dnazig, S.Shenker, L.Zhang, “A Measurement-based Admission Control Algorithm for Integrated Services Packet Networks (Extended Version)”, ACM/IEEE Transactions on Networking, Feb1997.
- [JPA04] D. Jonhson, C. Perkins, J. Arkko, “Mobility Support for IPv6”, IETF RFC 3775, June 2004.
- [Juniper] Juniper Networks, Inc. <http://www.junipernetworks.com>.
- [JuniperA] “Source Class Usage (SCU) / Destination Class Usage (DCU)”, Juniper Networks, Inc. <http://www.junipernetworks.com>.
- [JuniperB] “Juniper Networks T-series Core Platforms”, Juniper Networks, Inc. <http://www.junipernetworks.com>.
- [KA98] S. Kent, R. Atkinson, “Security Architecture for the Internet Protocol”, IETF RFC 2401, November 1998.
- [Lev+05] P. Levis et al., “A New Perspective for a Global QoS-based Internet”, Journal of Communications Software and Systems, 4th quarter 2005.
- [Liak+05] A. Liakopoulos, D.Kalogeras, V. Maglaris, D.Primpas, C. Bouras, “QoS experiences in native IPv6 GRNET and 6NET networks”, International Conference on Communication Systems, Modeling and Analysis, November 2005.
- [Liak+05b] A. Liakopoulos, J. Sanchez-P, C. Kotsokalis, D. Kalogeras, A. Polyrakis, G.V. de Velde, “IPv6 interconnection Services using 6PE over Carrier Supporting Carrier – The SEEREN Case”, International Conference on Communication and Information 2005, Beijing, June2005.
- [Liak+b] A. Liakopoulos, D.Kalogeras, V. Maglaris, D.Primpas, C. Bouras, “QoS experiences in native IPv6 networks”, submitted to Telecommunication Systems (Modeling, Analysis, Design and Management), Springer US, <http://springerlink.metapress.com/>.
- [LKM06] A. Liakopoulos, D.Kalogeras, V. Maglaris, “Inter-domain QoS Provisioning in DiffServ Networks via per-Flow Admission Control”, submitted to IEEE International Conference on Communications (ICC2006), June 2006.
- [LMBS04] A.Liakopoulos, B. Maglaris, C. Bouras, A. Sevasti, “Providing and Verifying Advanced IP Services in Hierarchical DiffServ Networks – The case of GEANT“, International Journal of Communication Systems, Wiley InterScience, January 2004.
- [LW04] Y. Liu, J. Wong, “Admission Control in Deadline-Based Network Resource Management”, Proceedings of the 23rd IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC'2004), April 2004.
- [MBS] “Υπηρεσία Διαχειριζόμενης Χωρητικότητας (MBS)”, Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας, <http://www.grnet.gr>.

- [MRSP05] A.Morton, G. Ramachandran, S.Shalunov, J.Perser, “Packet Reordering Metric for IPPM”, IETF Internet Draft , draft-ietf-ippm-reordering-10.txt, work in progress.
- [MS01] R.Mameli, S.Salsano, “Use of COPS for IntServ Operations over DiffServ: Architectural Issues”, Protocol Design and Testbed Implementations, ICC2001, Finland.
- [MTRG] “The Multi Router Traffic Grapher - MRTG”, <http://people.ee.ethz.ch/~oetiker/webtools/mrtg/>
- [Netp] “The Network Performance tool – Netperf”, <http://www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html>.
- [Noll05] Tom Nolle, “A New Business Layer For IP Networks”, Business Communications Review, July 2005.
- [NJZ99] K. Nichols, V. Jacobson, L.Zhang, “A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet”, IETF RFC2638, July 1999.
- [NSIS] “Next Step in Signalling - NSIS”, IETF Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/nsis-charter.html>.
- [NS-2] “The Network Simulator -2”, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [MA01] M. Mathis, M. Allman, “A Framework for Defining Empirical Bulk Transfer Capacity Metrics”, IETF RFC 3148, July 2001.
- [Mez+94] K. Mezger, D. Petr, T. Kelley, “Weighted Fair Queuing vs. Weighted Round Robin: A Comparative Analysis”, IEEE Wichita Conference on Communications, Networks and Signal Processing, 1994.
- [Mill96] D. Mills, “Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI” IETF RFC 2030, October 1996.
- [Moor+01] B. Moore et al., “Policy Core Information Model – Version 1 Specification”, IETF RFC 3060, February 2001.
- [Moor+03] B. Moore et al., “Policy Core Information Model – Extensions”, IETF RFC 3460, January 2003.
- [MP99] J. Mahdavi, V. Paxson, “IPPM Metrics for Measuring Connectivity”, IETF RFC 2678, September 1999.
- [Myko+03] E. Mykoniati et al., “Admission Control for Providing QoS in DiffServ Networks: The TEQUILA Approach”, IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 1, January 2003.
- [NGN] “Next Generation Networking - TF-NGN”, <http://www.terena.nl/tech/task-forces/tf-ngn/>.
- [NTP] The NTP *FAQ* and *HOWTO*, <http://www.ntp.org/ntpfaq/NTP-a-faq.htm>.
- [Pare92] A. Parekh, “A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks, Ph.D. Thesis, MIT, 1992.
- [PHS00] P. Pan, E. Hahne, and H. Schulzrinne, "BGRP: A Tree-Based Aggregation Protocol for Inter-domain Reservations", Journal of Communications and Networks, Vol. 2, No. 2, June 2000.
- [PIPStat] “Premium IP reservation tool”, GÉANT network, <http://stats.geant.net/index.phtml>.
- [Post80] J. Postel, “User Datagram Protocol - UDP”, IETF RFC 768, August 1980.
- [Post81] J. Postel, “Internet Control Message Protocol (ICMP)”, IETF RFC 792, September 1981.
- [PSA05] P. Pan, G. Swallow, A. Atlas, “Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels”, IETF RFC 4090, May 2005.
- [Qbon] Internet2 QoS Working Group, “Internet2 Qbone Architecture”, <http://qbone.internet2.edu/arch-dt.shtml>.

- [QK00] J.Qui, W. Knightly, “Measurement-Based Admission Control with Aggregate Traffic Envelopes”, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.9, No 2, April 2001.
- [RCCD04] J. Rajahalme, A. Conta, B. Carpenter, S. Deering, “IPv6 Flow Label Specification”, IETF RFC 3697, March 2004.
- [RIPE] Réseaux IP Européens Network Coordination Centre Network Coordination Center (RIPE NCC), <http://www.ripe.net/>.
- [RIPEb] Test Traffic Measurements Service, RIPE, <http://www.ripe.net/projects/ttm/index.html>.
- [RIPEc] “Autonomous System (AS) Number Assignment Policies and Procedures”, RIPE Document Store, <http://www.ripe.net/ripe/docs/asn-assignment.html>.
- [Roth+03] R. Roth, M. Campanella, S. Leinen, R. Sabatino, N. Simar, M. Przybylski and S. Trocha, A. Liakopoulos, A. Sevasti “IP QoS Across Multiple Management Domains: Practical Experiences for the Pan-European Experiments”, IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 1, January 2003.
- [Rude] “Real-time UDP Data Emitter (RUDE) / Collector for RUDE (CRUDE)”, <http://rude.sourceforge.net/>.
- [RVC01] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon, “Multiprotocol Label Switching Architecture”, IETF RFC 3031, January 2001.
- [RWL95] Y. Rekhter, T.J. Watson, T. Li, “A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)”, IETF RFC 1771, March 1995.
- [Sbit] “SmartBit Traffic Generators and Analysers”, Spirent Communications Inc., <http://www.spirentcom.com/>.
- [Seer] “South-East European Research and Education Networking project - SEEREN”, IST Programme, IST-2001-38830, <http://www.seeren.org/>.
- [SEQUA] “Service QUality across Independently managed Networks - SEQUIN“, EC IST Programme, IST-1999-20841, <http://archive.dante.net/sequin/>.
- [SEQUB] “Deliverable D5.1 - Proof of Concept Testbed”, SEQUIN IST-1999-20841, <http://archive.dante.net/sequin/>.
- [SEQUC] “Deliverable D5.1 - Proof of Concept Testbed - Addendum”, SEQUIN IST-1999-20841, <http://archive.dante.net/sequin/>.
- [Sinet] “Science Information Network - SINET”, <http://www.sinet.ad.jp>.
- [Snir+03] Y. Snir et al., “Policy QoS Information Model”, IETF RFC 3644, November 2003.
- [SPG97] S. Shenker, C. Partridge, R. Guerin, “Specification of the Guaranteed Quality of Service”, RFC 2212, September 1997.
- [SV95] M. Shreedhar and G. Varghese, “Efficient Fair Queuing using Deficit Round Robin”, in Proc. SIGCOMM '95, Cambridge, USA, 1995.
- [SZ99] I. Stoica, H. Zhang, “Providing Guaranteed Services without per Flow Management”, Proceedings ACM SIGCOM'99, August 1999.
- [Stoi00] I. Stoica, “Stateless Core: A Scalable Approach for Quality of Service in the Internet”, CMU-CS-00-176, Carnegie Mellon University, December 2000.
- [Tan96] Andrew S. Tanenbaum, “Computer Networks”, 3rd Edition, Prentice-Hall, 1996.
- [TCP81] DARPA, “Transmission Control Protocol – TCP”, IETF RFC 793, September 1981.
- [TEIN] “The TEIN2 Project”, <http://www.tein2.net/>.
- [TENE] “Tertiary Education Network – TENET”, <http://www.tenet.ac.za/>.

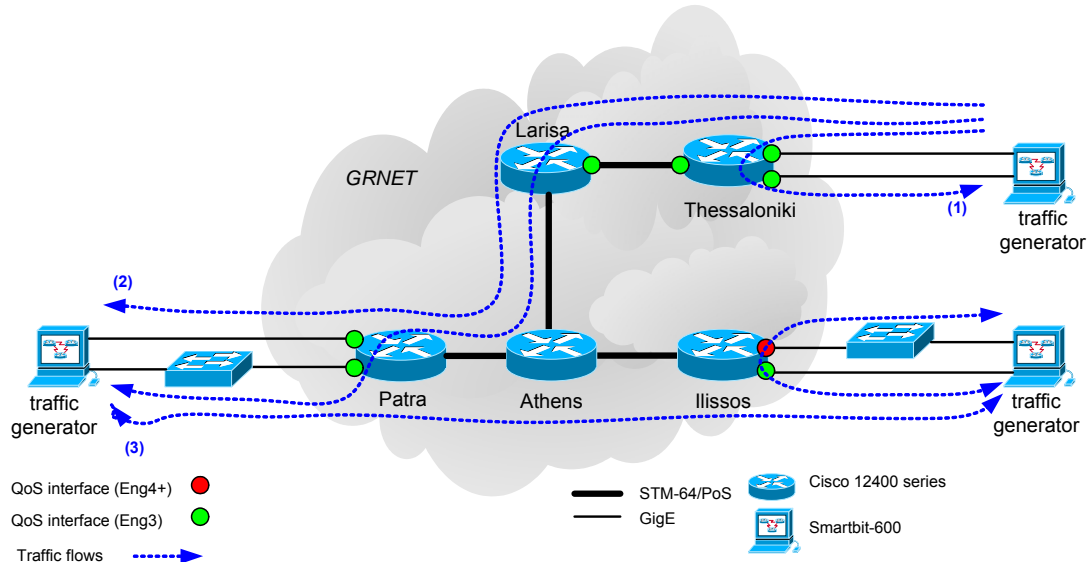
- [TERENA] “Trans-European Research and Education Networking Association - TERENA”, <http://www.terena.nl/>.
- [TEN155] “TEN-155: The European Research Network”, <http://archive.dante.net/ten-155.html>.
- [TN96] S. Thomson T. Narten, “IPv6 Stateless Address Autoconfiguration”, IETF RFC 1971, August 1996.
- [TS02] B. Teitelbaum, S. Shalunov, “Why Premium IP Service Has Not Deployed (and Probably Never Will)”, Internet2 QoS Working Group Informational Document, May 2002.
- [UCLP] “User Controlled LightPath (UCLP)”, CANARIE, <http://www.canarie.ca/canet4/uclp/>.
- [UMTS] “The Universal Mobile Telecommunication System”, The UMTS Forum, <http://www.umts-forum.org/>.
- [West+01] A.Westerinen et al., “Terminology for Policy-Based Measurement, RFC 3198, November 2001.
- [West+02] Westberg, L., et al., "Resource Management in Diffserv (RMD): A Functionality and Performance Behavior Overview", IFIP PFHSN'02.
- [WiFi] “Wireless Fidelity - WiFi”, WiFi Alliance, <http://www.wi-fi.org/>.
- [Wroc97] J. Wroclawski, "The Use of RSVP with IETF Integrated Services", IRTF RFC 2210, September 1997.
- [Wroc97b] J. Wroclawski, “Specification of the Controlled-Load Network Element Service”, RFC 2211, September 1997.
- [Yava+00] R. Yavatkar et al. “SBM (Subnet Bandwidth Manager): A Protocol for RSVP-based Admission Control over IEEE 802-style networks”, IEEE RFC 2814, May 2000.
- [Zafe+04] Τάσος Ζαφειρόπουλος, “Μελέτη Μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής Ροών Βασισμένων σε Μετρήσεις ”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, ΕΜΠ, Ιούνιος 2004.
- [ZDH00] Z. Zhang, Z. Duan, Y. T. Hou, “Virtual Time Reference System: A unifying Scheduling Framework for Scalable Support of Guaranteed Services”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Special Issue on QoS), 2000.

7 Παράρτημα Α: Δοκιμές απόδοσης για κίνηση *Premium IPv6* στο δίκτυο ΕΔΕΤ

Το πρωτόκολλο IPv6 υιοθετείται ολοένα και περισσότερο από τα σύγχρονα δίκτυα παραγωγής [GÉANT][ΕΔΕΤ6][Liak+05b] και ήδη οι σημαντικότεροι κατασκευαστικοί οίκοι δικτυακού εξοπλισμού παρέχουν προϊόντα που μετάγουν IPv6 και IPv4 κίνηση [Cisco] [Juniper]. Στοχεύοντας να εκτιμήσουμε τις εγγυήσεις ποιότητας που μπορούν να προσφερθούν σε ροές υψηλής προτεραιότητας σύμφωνα με την υπηρεσία *Premium IP*, εκτελέσαμε πλήθος δοκιμών [Liak+05] [Liak+b] στο δίκτυο διπλής στοίβας (*dual stack*) του ΕΔΕΤ. Στη συνέχεια αναφέρουμε τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

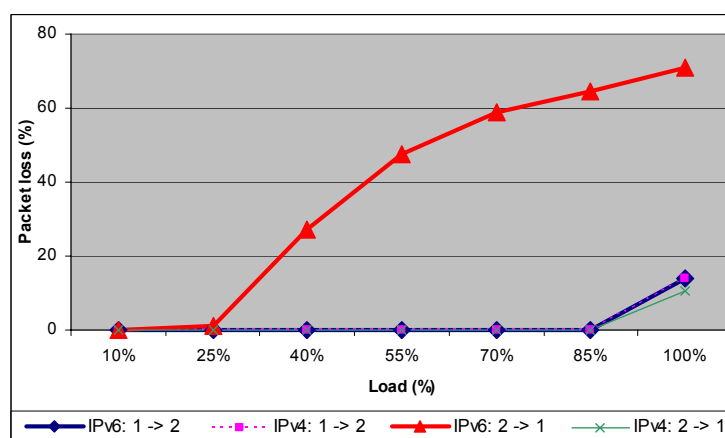
Η τοπολογία του δικτύου ΕΔΕΤ κατά τη διάρκεια των δοκιμών φαίνεται στο Σχήμα 52, όπου σημειώνονται οι ροές κίνησης και οι κάρτες πρόσβασης που χρησιμοποιήθηκαν. Το δίκτυο ΕΔΕΤ αποτελείται από δρομολογητές κορμού της σειράς *GSR12400* [CiscoA] του κατασκευαστικού οίκου Cisco Systems [Cisco] που επιτρέπουν την ταχεία μεταγωγή πακέτων IPv4/6. Οι γραμμές κορμού υποστηρίζουν ταχύτητες διασύνδεσης στα 2,5 Gbps ενώ οι γραμμές πρόσβασης υποστηρίζουν ταχύτητες μέχρι 1 Gbps. Οι κάρτες πρόσβασης *10xGE (Eng4+) Tango* [CiscoB] στους δρομολογητές επιτρέπουν τη μεταγωγή από το υλικό πακέτων IPv4 στο μέγιστο ρυθμό των θυρών σύνδεσης (*line rate*) ενώ η μεταγωγή πακέτων IPv6 πραγματοποιείται σε χαμηλότερο ρυθμό με χρήση λογισμικού. Οι κάρτες *4xGE (Eng3) Tetra* [CiscoC] επιτρέπουν τη μεταγωγή της IPv4/6 κίνησης από το υλικό σε υψηλές ταχύτητες αλλά εμφανίζουν περιορισμένη υπερκάλυψη πόρων (*oversubscription*) κατά την μεταγωγή της κίνησης στο μέγιστο ρυθμό των ρυθμών σύνδεσης (*line rate*). Οι μετρήσεις

πραγματοποιήθηκαν με χρήση γεννητριών κίνησης *Smartbit 600* [Sbit] ενώ τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν από την εφαρμογή *SmartFlow* έκδοση 3.0. Η γεννήτρια κίνησης μπορούσε να παράγει μίγμα κίνηση IPv4 ή/και IPv6 με ρυθμό μέχρι 1 Gbps, επιτρέποντας τη δημιουργία συνθηκών συμφόρησης στις θύρες πρόσβασης.



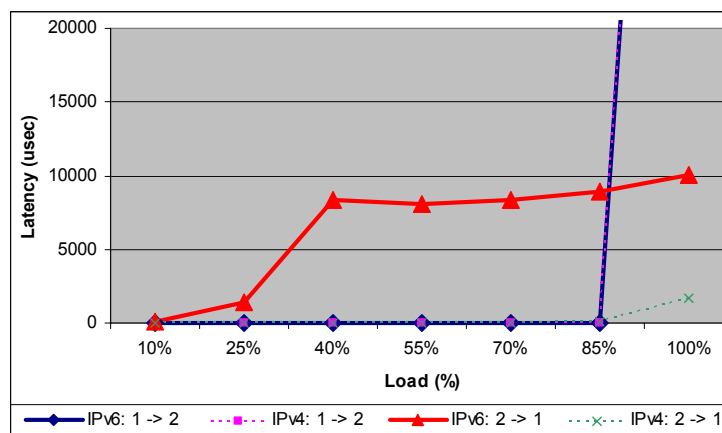
Σχήμα 52: Τοπολογία δικτύου ΕΔΕΤ για τη μέτρηση εγγυήσεων απόδοσης για κίνηση *Premium IPv6*.

Οι αρχικές δοκιμές αφορούσαν τη μέτρηση του ποσοστού απώλειας πακέτων και την καθυστέρηση μεταγωγής για κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*). Εγκαταστάθηκαν ροές και προς τις δύο κατευθύνσεις των θυρών πρόσβασης του δρομολογητή *ilissos*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 52, ενώ το φορτίο κίνησης αυξήθηκε σταδιακά μέχρι ρυθμό 1 Gbps ανά κατεύθυνση. Η κίνηση IPv6 που εισέρχονταν στο δρομολογητή από τη κάρτα *Tango* (κατεύθυνση 2->1) εμφάνισε σημαντική απώλεια πακέτων σε αντίθεση με την κίνηση IPv4, όπως φαίνεται στο Σχήμα 53. Αντιθέτως, η κίνηση που εισέρχονταν από τη κάρτα *Tetra* (κατεύθυνση 1->2) εμφάνισε ισόποση απώλεια πακέτων για τα δύο πρωτόκολλα IPv4 και IPv6.



Σχήμα 53: Απώλεια πακέτων για την κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*).

Η κίνηση IPv4 και IPv6 εμφάνισαν την ίδια καθυστέρηση καθώς μεταγόταν από την κάρτα *Tetra*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 54. Ακόμα και όταν παρατηρήθηκε απώλεια πακέτων κατά την εισαγωγή κίνησης με ρυθμό στο 100% της ταχύτητας που μπορούσε να εξυπηρετήσει η θύρα διασύνδεσης, η καθυστέρηση παρέμενε η ίδια για τα δύο πρωτόκολλα. Αντιθέτως, η κίνηση IPv6 που εισέρχονταν στην κάρτα *Tango* παρουσίαζε διπλάσια τουλάχιστον καθυστέρηση σε σχέση με την καθυστέρηση που παρουσίαζε η κίνηση IPv4. Ακόμα και με μικρό βαθμό συμφόρησης στις θύρες διασύνδεσης, δηλαδή για φορτίο 10% και με μηδενική απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση για την κίνηση IPv6 ήταν αυξημένη σε σχέση με την κίνηση IPv4. Όταν η συμφόρηση στις θύρες διασύνδεσης αυξάνονταν και εμφανίζονταν απώλεια πακέτων, η διαφορά αυξάνονταν τουλάχιστον ~200 φορές. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε για τις μέγιστες τιμές καθυστέρησης που μετρήθηκαν στις κάρτες *Tetra* και *Tango*, χωρίς τα αποτελέσματα να αποτυπώνονται στο Σχήμα 54.



Σχήμα 54: Μέση καθυστέρηση για κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*) με χρήση πρωτοκόλλων IPv4/6.

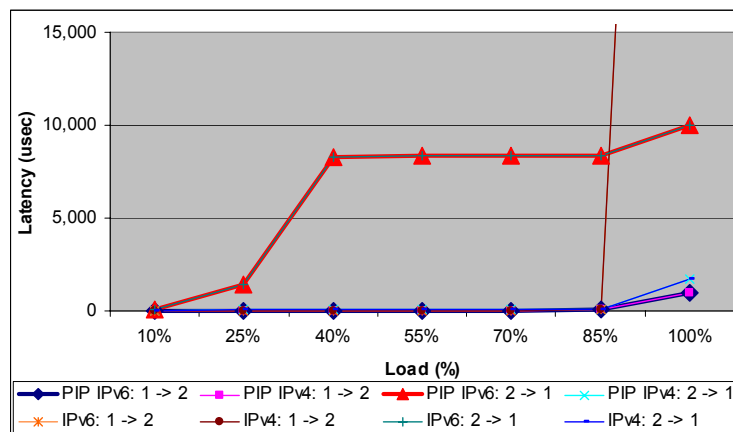
Οι προηγούμενες δοκιμές έδειξαν ότι οι κάρτες *Tango* αδυνατούν να μεταγουν κίνηση IPv6 το ίδιο αποδοτικά με την κίνηση IPv4. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη καθώς τα πακέτα IPv6 μεταγούνται με λειτουργίες που υλοποιούνται στο λογισμικό (*software*) σε αντίθεση με τα πακέτα IPv4 που μεταγούνται με χρήση υλικού (*hardware*). Σε αντίθεση με τις κάρτες *Tango*, οι κάρτες *Tetra* δεν εμφάνισαν καμία διαφορά στις παρεχόμενες υπηρεσίες για την κίνηση από τα δύο πρωτόκολλα.

Οι επόμενη σειρά δοκιμών που εκτελέστηκαν αφορούσαν κίνηση υψηλής προτεραιότητας *Premium IP*. Για άλλη μια φορά μετρήσαμε την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων για κίνηση IPv4 και IPv6 σε συνθήκες υψηλής συμφόρησης. Η κίνηση *Premium IP* καταλάμβανε το 2% της διαθέσιμης χωρητικότητας και εξυπηρετούνταν από την ουρά υψηλής προτεραιότητας. Για τη δημιουργία συνθηκών συμφόρησης, κίνηση βέλτιστης προσπάθειας εισάχθηκε στο δίκτυο με σταδιακά αυξανόμενο ρυθμό από 100 Mbps ως 1 Gbps.

Η απώλεια πακέτων για την κίνηση *Premium IP* που εισέρχονταν την κάρτα *Tetra* (κατεύθυνση 1->2) είναι πάντοτε μηδενική. Αντιθέτως, η κίνηση *Premium IPv6* που εισέρχονταν από

τη κάρτα *Tango* (κατεύθυνση 2->1) εμφανίζει τον ίδιο βαθμό απώλειας πακέτων με την κίνηση βέλτιστης προσπάθειας φτάνοντας μέχρι το ποσοστό 72%. Αυτό μας έκανε να συμπεράνουμε ότι η κίνηση *Premium IPv6* δεν «αναγνωρίζονταν» από τη κάρτα *Tango* και επομένως ο μηχανισμός κατηγοριοποίησης αποτύγχανε να διαχωρίσει την εισερχόμενη κίνηση IPv6 σε διαφορετικές προτεραιότητες.

Η κίνηση *Premium IP* και βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*) που εισέρχονταν στην κάρτα *Tetra* (κατεύθυνση 1->2) εμφάνιζε την ίδια καθυστέρηση εφόσον δεν υπήρχε απώλεια πακέτων, δηλαδή εφόσον το συνολικό φορτίο ήταν μικρότερο από το 85% της διαθέσιμης χωρητικότητας (Σχήμα 55). Όταν εμφανίζονταν απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση για την κίνηση *Premium IP* αυξανόταν απότομα (~20 φορές) αλλά παρέμενε τουλάχιστον ~100 φορές χαμηλότερη από την αντίστοιχη καθυστέρηση για την κίνηση *best effort*. Για την κίνηση που εισέρχονταν από τη κάρτα *Tango* (κατεύθυνση 2->1), η καθυστέρηση *Premium IP* ήταν τουλάχιστον ~100 φορές υψηλότερη από την καθυστέρηση για κίνηση *Premium IP* στην κάρτα *Tetra* για φορτίο 100%. (Σχήμα 55).



Σχήμα 55: Καθυστέρηση για την κίνηση *Premium IP* και βέλτιστης προσπάθειας (*best effort*) με χρήση πρωτοκόλλων IPv4/6.

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που εκτελέσαμε στο δίκτυο του ΕΔΕΤ με κίνηση *Premium IP* απέδειξαν ότι οι δρομολογητές υπό δοκιμή υποστηρίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό μηχανισμούς για τη διαχείριση της κίνησης IPv6. Ιδιαίτερα για τις κάρτες *Tetra*, οι εγγυήσεις ποιότητας που μπορούν να προσφερθούν για κίνηση IPv6 είναι ακριβώς οι ίδιες με τις εγγυήσεις για την κίνηση IPv4. Αντιθέτως, οι κάρτες *Tango* μετάγουν την κίνηση IPv6 με χρήση λογισμικού και επομένως οι υπηρεσίες που παρέχονται είναι σαφώς χαμηλότερης ποιότητας σε σχέση με τις προσφερόμενες υπηρεσίες για την κίνηση IPv4. Καθώς η κίνηση IPv6 στο δίκτυο παραγωγής του ΕΔΕΤ είναι σημαντικά χαμηλότερη από την κίνηση IPv4, κρίναμε ότι είναι εφικτή η χρήση κοινού μοντέλου υποστήριξης υπηρεσιών *Premium IP* στο δίκτυο παραγωγής του ΕΔΕΤ λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω.

8 Παράρτημα Β: Όροι

Αλγόριθμος Διαρρέοντος Κάδου	<i>Leaky bucket</i>
Αναδιάταξη σειράς των πακέτων	<i>Packet reordering</i>
Αξιοπιστία	<i>Reliability</i>
Από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι	<i>End-to-end path</i>
Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών	<i>Differentiated Services Architecture</i>
Αρχιτεκτονική Ενοποιημένων Υπηρεσιών	<i>Integrated Services Architecture</i>
Αστυνόμευσης κίνησης	<i>Traffic policing</i>
Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
Μορφοποίηση κίνησης	<i>Traffic shaping</i>
Διαχειριστική περιοχή	<i>Administrative domain</i>
Ακραίος / εσωτερικός δρομολογητής	<i>Edge / Internal router</i>
Δρομολογητής εισόδου / εξόδου	<i>Ingress / Egress router</i>
Δρομολογητής κορμού / πρόσβασης	<i>Core / Access router</i>
Μονάδα πληροφορίας (δυφίο)	<i>Bit</i>
Εθνικό Ερευνητικό και Εκπαιδευτικό Δίκτυο	<i>National Research and Education Network</i>
Εικονική Μισθωμένη Γραμμή	<i>Virtual Lease Line</i>
Ελαστικές εφαρμογές	<i>Elastic applications</i>

Έλεγχος Αποδοχής (ή Εισόδου)	<i>Admission Control</i>
Ενεργητική παρακολούθηση	<i>Active monitoring</i>
Επίπεδο Δεδομένων	<i>Control Plane</i>
Επίπεδο Διαχείρισης	<i>Management Plane</i>
Επίπεδο Ελέγχου	<i>Data Plane</i>
Επιλεγμένος Δρομολογητής Πηγής	<i>Designated Source Router</i>
Εύρος ζώνης	<i>Bandwidth</i>
Εφαρμογές πραγματικού χρόνου	<i>Real-time applications</i>
Κάδος με κουπόνι	<i>Token bucket</i>
Καθυστέρηση διαδρομής με επιστροφή	<i>Round Trip Time - RTT</i>
Καταχωρητής	<i>Buffer</i>
Κινητικότητα	<i>Mobility</i>
Κλάση Υπηρεσίας	<i>Class of Service</i>
Κόμβος Πηγή	<i>Source Node</i>
Κόμβος Προορισμού	<i>Destination Node</i>
Μέγιστη Μονάδα Μεταφοράς	<i>Maximum Transfer Unit - MTU</i>
Μεταγωγής Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων	<i>Multi Protocol Label Switching - MPLS</i>
Μνήμη Παρακολούθησης	<i>Monitoring Cache</i>
Μοντέλο για Παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας μεταξύ Διαφορετικών Διαχειριστικών Περιοχών	<i>Inter-domain QoS Provisioning Model</i>
Παθητική παρακολούθηση	<i>Passive Monitoring</i>
Πακέτα Εκτίμησης Πόρων Μονοπατιού	<i>Path Resource Estimation Packets</i>
Ποιότητα Υπηρεσίες	<i>Quality of Service</i>
Προδιαγραφή Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας	<i>Service Level Specification - SLS</i>
Προδιαγραφή ροής	<i>Flow Specification</i>
Ρυθμιστής κυκλοφορίας	<i>Traffic conditioner</i>
Σηματοδοσία	<i>Signalling</i>
Στατιστική πολυπλεξία	<i>Statistical multiplexing</i>

Στρώμα δικτύου	<i>Network layer</i>
Στρώμα ζεύξης δεδομένων	<i>Data link layer</i>
Συγκρότηση δρομολογητή	<i>Router configuration</i>
Συμπεριφορά ανά Κόμβο	<i>Per-Hop Behaviour - PHB</i>
Σύμβαση Διασφάλισης Επιπέδου Ποιότητας Υπηρεσίας	<i>Service Level Agreement – SLA</i>
Συμφόρηση	<i>Congestion</i>
Συνάθροιση κίνησης	<i>Traffic aggregate</i>
Σύνδεση από άκρο-σε-άκρο	<i>End-to-end connection</i>
Ταξινομητής πακέτων	<i>Packet classifier</i>
Υπερκάλυψη πόρων	<i>Oversubscription</i>
Υπερ-προσφορά πόρων	<i>Overprovision</i>
Υπηρεσία Βέλτιστης Προσπάθειας	<i>Best Effort (BE) Service</i>
Υπηρεσία Πολλαπλών Προορισμών	<i>Multicast Service</i>
Υπηρεσία Υπερέχοντος IP	<i>Premium IP Service</i>
Φυσικό στρώμα	<i>Physical layer</i>
Χαρακτηριστικά κίνησης	<i>Traffic profile</i>
Χρωματισμός πακέτων	<i>Packet marking</i>
Χρονοπρογραμματισμός	<i>Scheduling</i>
Χρόνος απόκρισης	<i>Response time</i>

9 Παράρτημα Γ: Συντομογραφίες

ACA	<i>Admission Control Agent</i>
AF	<i>Assured Forwarding</i>
AQUILA	<i>Adaptive Resource Control for QoS Using an IP-Based Layered Architecture</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BB	<i>Bandwidth Broker</i>
BE	<i>Best Effort</i>
BGRP	<i>Border Gateway Reservation Protocol</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CoS	<i>Class of Service</i>
C-MBAC	<i>Colour MBAC</i>
DSCP	<i>DiffServ Code Point</i>
DSR	<i>Designated Source Router</i>
EAC	<i>End Admission Control</i>
EF	<i>Expedite Forwarding</i>
GARA	<i>General-purpose Architecture for Resource Reservation</i>
GRNET	<i>Greek Research & Technology Network</i>
GMPLS	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>

HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IntServ	<i>Integrated Services</i>
IPv4/6	<i>Internet Protocol version 4 / 6</i>
IQPM	<i>Inter-domain QoS Provisioning Model</i>
LDAP	<i>Lightweight Directory Access Protocol</i>
MBAC	<i>Measurement-based Admission Control</i>
MBS	<i>Management Bandwidth Service</i>
MESCAL	<i>End-to-End Quality of Service Across the Internet at Large</i>
MC	<i>Monitoring Cache</i>
MCU	<i>Multi-point Conference Unit</i>
MDRR	<i>Modified Deficit Round Robin</i>
MDT	<i>Mean Down Time</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
MPLS	<i>Multi Protocol Label Distribution</i>
MTU	<i>Maximum Transfer Unit</i>
NREN	<i>National Research & Education Network</i>
NS	<i>Network Simulator</i>
NSIS	<i>Next Steps in Signalling</i>
PBN	<i>Policy Based Networking</i>
PDR	<i>Per-Domain Reservation</i>
PEP	<i>Policy Enforcement Point</i>
PHB	<i>Per-Hop Behaviour</i>
PHR	<i>Per-Hop Reservation</i>
PREP	<i>Path Estimation Packets</i>
PIP	<i>Premium IP</i>
PQ	<i>Priority Queue</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>

Q-FLIB	<i>QoS-Flow Information Base</i>
RCA	<i>Resource Control Agent</i>
RFC	<i>Request For Comments</i>
RMD	<i>Resource Management in DiffServ</i>
RSVP	<i>Resource Reservation Protocol</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SBM	<i>Subnet Bandwidth Management (protocol)</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SEQUIN	<i>SErvice QUality across Independently managed Networks</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SLS	<i>Service Level Specifications</i>
SSM	<i>Source Specific Multicast</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
ToS	<i>Type of Service</i>
TTR	<i>Time to Repair</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VTRS	<i>Virtual Time Reference System</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WFQ	<i>Weighted Fair Queuing</i>
WRR	<i>Weighted Round Robin</i>
WS	<i>Web Services</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>