ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μηχανισμοί υλοποίησης Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας για Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα τα οποία εκτείνονται εντός διαφορετικών Παρόχων

Σωτήριος Μπούρος

Διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού διπλώματος Ειδίκευσης του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης

Επιβλέπων: καθηγητής Μιχαήλ Πατεράκης
Εξεταστική Επιτροπή: Μιχαήλ Πατεράκης (καθηγητής ΗΜΜΥ Π.Κ)
Λεωνίδας Γεωργιάδης (καθηγητής ΗΜΜΥ Α.Π.Θ)
Νικόλαος Σιδηρόπουλος (καθηγητής ΗΜΜΥ Π.Κ)

Χανιά 2009

Τίτλος Διατριβής

Μηχανισμοί υλοποίησης Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας για Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα τα οποία εκτείνονται εντός διαφορετικών Παρόχων

1. Εισαγωγή

Η διατριβή ασχολείται με τους μηχανισμούς Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσίας σε Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα (ΕΙΔ – VPN στην διεθνή βιβλιογραφία) που εκτείνονται σε πολλούς Παρόχους. Στα επόμενα κεφάλαια θα εξεταστούν αναλυτικά οι παράγοντες ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) και ο τρόπος με τον οποίο επιτρέπουν την δημιουργία Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement) μεταξύ Πελατών και Παρόχων.

Η διατριβή περιλαμβάνει στο κεφ 1 τις επεξηγήσεις των όρων ΕΙΔ, QoS, SLA και τις αρχιτεκτονικές (IntServ, DiffServ) που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση προβλημάτων διασύνδεσης με συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Στο κεφ 2 επιχειρείται η κατάδειξη της λειτουργίας του πρωτοκόλλου MPLS/BGP για την υποστήριξη ΕΙΔ που εκτείνεται σε ένα και μοναδικό Πάροχο ακολουθώντας την RFC 2547bis. Στο κεφ 3 παρουσιάζονται οι υλοποιήσεις των Παρόχων για την διασύνδεση τοποθεσιών ΕΙΔ που εκτείνονται σε περισσότερους του ενός Παρόχου και τα προβλήματα αυτών των υλοποιήσεων. Στα κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάζοντα συνδυασμοί αρχιτεκτονικών για την επίλυση προβλημάτων ποιότητας υπηρεσίας. Ιδιαίτερα αναλύονται οι μηχανισμοί του traffic engineering σε συνδυασμό με αρχιτεκτονικές Diffserv και MPLS. Στο κεφ. 6 παρουσιάζεται μια επίσημη μοντελοποίηση κατά Bush-Griffin των ΕΙΔ που ακολουθούν την RFC 2547bis.

Στο κεφ 7 που αποτελεί τον πυρήνα της διατριβής παρουσιάζονται τα παρακάτω:

1. Επεξήγηση της δυσκολίας εφαρμογής των μηχανισμών ΣΕΥ σε συνάρτηση με υπάρχουσες εργασίες για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα μεταξύ πολλαπλών Παρόχων.
2. Μοντέλα αντιστοίχησης των τύπων κίνησης του Πελάτη σε κλάσεις κίνησης του Παρόχου.
3. Νέος αλγόριθμος και μηχανισμός για την δημιουργία και εφαρμογή ΣΕΥ μεταξύ Πελάτη και πολλαπλών Παρόχων. Ο νέος αλγόριθμος ενσωματώνει ερευνητική εργασία από προηγούμενες δημοσιεύσεις και προγράμματα την οποία συνθέτει με νέα στοιχεία ώστε να προτείνει μια νέα λύση και αντιμετώπιση των ΣΕΥ κάτω από νέα οπτική γωνία. Τέλος προτείνονται σχετικές επεκτάσεις πάνω στον αλγόριθμο και πιθανές μελλοντικές εργασίες.

Η διατριβή συμπληρώνεται με σχετικό λεξικό όρων και παραρτήματα που διευκολύνουν την ανάγνωση και την κατανόηση του κυρίου μέρους της διατριβής.

1.1. Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα (Virtual Private Networks - VPN)

Η ανάγκη επικοινωνίας υπολογιστών που βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία ή σε απομακρυσμένες μεταξύ τους τοποθεσίες δημιούργησε τα δίκτυα υπολογιστών. Στην περίπτωση των απομακρυσμένων τοποθεσιών οι δυνατότητες διασύνδεσης καθορίζονται από την ύπαρξη δημοσίων ή ιδιωτικών δικτύων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον σκοπό.

Για πολλά χρόνια υπήρχε μια ξεκάθαρη διαφορά μεταξύ των ιδιωτικών και δημοσίων δικτύων δεδομένων. Στα δημόσια δίκτυα δεδομένων επιτρεπόταν η επικοινωνία όλων με όλους, χωρίς ιδιαίτερους φραγμούς και όρια επικοινωνίας εκτός ίσως του κόστους. Δημόσια δίκτυα δεδομένων ήταν τα δίκτυα βασισμένα

σε πρωτόκολλα X.25, όπως το HellasPac, όπου αρκούσε η ύπαρξη του κατάλληλου εξοπλισμού και του αριθμού κλήσης ώστε ένας κόμβος του δικτύου να επικοινωνήσει με κάποιο άλλο κατ' απολύτως ανάλογο τρόπο με το δίκτυο τηλεφωνίας.
Στα ιδιωτικά δίκτυα αντιθέτως υπήρχαν ιδιωτικές αποκλειστικές γραμμές δεδομένων που ένωναν τις τοποθεσίες (υποκαταστήματα) κάποιας εταιρίας ή οργανισμού απ' ευθείας μεταξύ τους, χωρίς την δυνατότητα παρεμβολής τρίτου. Η διαχείριση ενός τέτοιου παραδοσιακού ιδιωτικού δικτύου (ΠΙΔ) ήταν αποκλειστική ευθύνη του οργανισμού ή της εταιρίας στην οποία ανήκαν τα υποκαταστήματα και όλη η δικτυακή υποδομή εξυπηρετούσε τις ανάγκες ενός και μόνου οργανισμού η εταιρίας. Θέματα ασφαλείας και πρόσβασης θεωρούνται λυμένα σε ένα ΠΙΔ, γιατί δεν υπάρχει τρόπος ανεπιθύμητης πρόσβασης από τρίτα δίκτυα, επειδή το ΠΙΔ ανήκει αποκλειστικά σε ένα και μόνο οργανισμό και γίνεται αποκλειστική χρήση της δικτυακής υποδομής. Συνεπώς ένα ΠΙΔ είναι ένα ασφαλές, απομονωμένο δίκτυο. Επίσης παρ' όλο που το ΠΙΔ ενώνει απομακρυσμένες τοποθεσίες εξασφαλίζει στους χρήστες όλες τις δικτυακές υπηρεσίες που είναι διαθέσιμες σε ένα τοπικό δίκτυο υπολογιστών (μοίρασμα των πόρων του δικτύου, κατανομή της επεξεργαστικής ισχύος, εύκολη και γρήγορη ανταλλαγή δεδομένων).
Χαρακτηριστικό παράδειγμα ΠΙΔ είναι σήμερα τα δίκτυα τραπεζών που συνδέουν τα υποκαταστήματά τους μεταξύ τους και με το κεντρικό με αποκλειστικές γραμμές δεδομένων.
Η ολοένα και μεγαλύτερη διάδοση του Διαδικτύου (Internet), έδωσε έναυσμα στην δημιουργία των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων (Virtual Private Networks), τα οποία υλοποιούνται πάνω από μοιραζόμενη δικτυακή υποδομή και διαθέτουν ένα σύνολο πλεονεκτημάτων έναντι των ΠΙΔ.
Σε γενική θεώρηση ένα ΕΙΔ είναι ένα δίκτυο εταιρίας ή οργανισμού που υλοποιείται πάνω από μοιραζόμενη δικτυακή υποδομή, αλλά με τις ίδιες παραμέτρους ασφαλείας και πρόσβασης που έχει ένα ΠΙΔ. Σε μια σύγκριση ΠΙΔ και ΕΙΔ τα ΕΙΔ υπερτερούν στα ακόλουθα σημεία:

- Μικρότερο κόστος δικτυακής υποδομής, αφού πλέον χρησιμοποιείται το δίκτυο κορμού κάποιου Παρόχου Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP) και όχι ακριβές αποκλειστικές γραμμές δεδομένων μεταξύ των τοποθεσιών της εταιρίας.
- Δυνατότητα χρήσης του Διαδικτύου για περισσότερες υπηρεσίες μεταξύ των τοποθεσιών της εταιρίας.
- Απαλλαγή από το κόστος συντήρησης και διαχείρισης της δικτυακής υποδομής το οποίο αναλαμβάνεται από τον Πάροχο.
- Δυνατότητα τεχνικής υποστήριξης 7x24x365 από τον Πάροχο σε πολύ μικρότερο κόστος από την υλοποίηση με ΠΙΔ.

Τα ΕΙΔ έχουν πλέον δεκάχρονη ιστορία στο χώρο του Διαδικτύου και όπως είναι φυσικό έχουν προταθεί και υλοποιηθεί αρκετά μοντέλα λειτουργίας που ικανοποιούν διαφορετικές ανάγκες των υποψηφίων πελατών. Οι ανάγκες αυτές έχουν να κάνουν με διαφορετικές απαιτήσεις ασφαλείας, αριθμό συνδεδεμένων τοποθεσιών, αριθμό χρηστών, πολυπλοκότητα δρομολόγησης, ποιότητα υπηρεσίας, είδος κίνησης, όγκος κίνησης και κρίσιμες εφαρμογές. Επίσης ιδιαίτερες απαιτήσεις πελατών όπως η δυνατότητα outsourcing προσθέτουν επιπλέον πινελιές στη μοντελοποίηση των ΕΙΔ.

Από τα μοντέλα που έχουν προταθεί μία περίπου χρονολογική κατάταξη είναι:

- Παραδοσιακά ΕΙΔ βασισμένα στο επίπεδο 2 (Layer 2 VPN)
  ΕΙΔ τεχνολογίας Frame Relay
  ΕΙΔ τεχνολογίας ATM
- ΕΙΔ υλοποιημένα από τον Εξοπλισμό Πελάτη (CPE – based VPN)
  ΕΙΔ τεχνολογίας L2TP και PPTP (επίπεδο 2)
  ΕΙΔ τεχνολογίας IPSec (επιπέδου 3)
- ΕΙΔ προβλεπόμενα από Πάροχο Υπηρεσιών (Provider Provisioned VPN, PP-VPNs, ΠΠ-ΕΙΔ)
  ΕΙΔ τεχνολογίας MPLS επιπέδου 2
  BGP/MPLS VPN επιπέδου 3

Τα PP-VPNs (ΠΠ-ΕΙΔ) επίσης ονομάζονται Virtual Private Routed Networks και είναι αυτά που παρουσιάζουν σήμερα το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Ιδιαίτερα τα ΠΠ-ΕΙΔ τεχνολογίας BGP/MPLS υλοποιούνται κατά την IETF RFC 2547bis και πάνω σε αυτού του είδους ΕΙΔ θα επικεντρωθεί η παρούσα διατριβή.

Συνοπτικά οι τεχνολογίες διασύνδεσης με τα πλεονεκτήματά τους παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα. Τα ΠΠ-ΕΙΔ τεχνολογίας BGP/MPLS συνδυάζουν όλα τα πλεονεκτήματα του πίνακα

ATM/Frame Relay	***ΠΙΔ***	***IP***
Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)	Υψηλές Χωρητικότητες	Οικονομικά συμφέρουσα λύση
Ασφάλεια	Ασφάλεια	Εύκολη διαχείριση δικτύου
Ελάχιστη χρονική καθυστέρηση μετάδοσης	Ελάχιστη χρονική καθυστέρηση μετάδοσης	Εύκολη Αναβάθμιση
Εγγυημένη Χωρητικότητα	Εγγυημένη Χωρητικότητα	Ευελιξία
Ευελιξία		
Σημείο σε πολλαπλά σημεία		

Η αρχιτεκτονική MPLS (Multiprotocol Label Switching) παρουσιάζεται εκτενώς στην σχετική RFC 3031 της IETF. Σύμφωνα με την RFC η κίνηση μέσα στο δίκτυο γίνεται με τη χρήση ετικετών (labels, αρχικά ονομαζόμενες ως tags) πάνω σε Μονοπάτια Μεταγωγής Ετικετών (MME-Label Switched Paths). Η χρήση ετικετών σκόπευε αρχικά στην γρηγορότερη δρομολόγηση πακέτων IP από τους παραδοσιακούς δρομολογητές με ταχύτητα περίπου όση των μεταγωγέων ATM. Στην πραγματικότητα όμως η διαφορά ταχύτητας ήταν αρκετά μικρότερη των προσδοκιών και δεν συνετέλεσε στην ευρεία αποδοχή της αρχιτεκτονικής.

Η ουσιαστική συνεισφορά της αρχιτεκτονικής MPLS που την κατέστησε ευρέως αποδεκτή είναι ο χειρισμός των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων και η εφαρμογή αποτελεσματικού Traffic Engineering (βλ. κεφ 4)

Παραδοσιακά η δρομολόγηση πακέτου IP βασίζεται στην ανάγνωση από τον δρομολογητή της IP διευθύνσεως προορισμού και η εύρεση της κατάλληλης διεπαφής αποστολής από τον πίνακα δρομολογήσεων. Με βάση τον πίνακα δρομολογήσεων πραγματοποιείται μια αντιστοίχηση της διεύθυνσης προορισμού του πακέτου με τα προθέματα διευθύνσεων IP, τα οποία έχουν μεταβλητό μήκος, και την κατάλληλη διεπαφή αποστολής. Ο δρομολογητής θα προσπαθήσει να στείλει το πακέτο IP επιλέγοντας τον «συντομότερο δρόμο» προς τον προορισμό. Στην επιλογή του «συντομότερου δρόμου» (δηλαδή της κατάλληλης διεπαφής αποστολής) μπορεί να συνεισφέρουν και άλλοι παράγοντες όπως η πολιτική ασφαλείας και η ποιότητα υπηρεσίας. Όλοι οι παράγοντες επιλογής δρομολογήσεων αναφέρονται γενικά σαν Forward Equivalency Class - FEC (Προώθηση Κλάσης Ισοδυναμίας). Η κατηγοριοποίηση πακέτου κατά FEC υπολογίζεται ξανά σε κάθε δρομολογητή πάνω στο μονοπάτι παραδοσιακής δρομολόγησης.
Στην περίπτωση του MPLS η προώθηση IP πακέτου δεν γίνεται βάση της διευθύνσεως προορισμού IP που βρίσκεται στην επικεφαλίδα του πακέτου. Η προώθηση γίνεται με βάση την ετικέτα μεταγωγής που έχει συγκεκριμένο μήκος σε αντίθεση με την παραδοσιακή δρομολόγηση βάσει των προθεμάτων IP διευθύνσεων που έχουν μεταβλητό μήκος . Η ετικέτα μεταγωγής αποτελεί δείκτη των παραγόντων FEC που επηρεάζουν την δρομολόγηση του πακέτου. Στην περίπτωση του MPLS οι παράγοντες FEC υπολογίζονται μία φορά στην αρχή και δεν υπολογίζονται ξανά σε κάθε δρομολογητή πάνω στο μονοπάτι μεταγωγής. Σύμφωνα με την RFC 3031:

Στην προώθηση MPLS, εφ' όσον ένα πακέτο έχει μια φορά κατηγοριοποιηθεί κατά FEC, δεν γίνεται πλέον ανάλυση της επικεφαλίδας του από τους επόμενους δρομολογητές στην σειρά – όλη η προώθηση βασίζεται στις ετικέτες.

Στο 2^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία της αρχιτεκτονικής σε δίκτυο Παρόχου Υπηρεσιών.

Μέσα στην αρχιτεκτονική προβλέπεται η δυνατότητα χρήσης πρωτοκόλλων σηματοδοσίας για τη δημιουργία ΜΜΕ βασισμένων σε αυστηρή δρομολόγηση. Τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας που χρησιμοποιούνται εδώ μεταφέρουν πληροφορίες δέσμευσης εύρους ζώνης, δέσμευσης πόρων και μέγιστου εύρους ζώνης, ώστε να μπορεί κάποιος κόμβος ή δρομολογητής να προχωρήσει σε αποφάσεις δρομολόγησης. Θεωρητικά η δρομολόγηση σε δίκτυο MPLS ανάγεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών παραμέτρων με πολλαπλούς περιορισμούς. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι με δεδομένους περιορισμούς που επιβάλλονται από την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που επιθυμεί ο πελάτης όπως συγκεκριμένο εύρος ζώνης, μέγιστη καθυστέρηση, αριθμός ενδιάμεσων κόμβων (hops), πρέπει να βελτιστοποιηθούν παράμετροι traffic engineering όπως είναι το ποσοστό χρήσης των πόρων, η ρύθμιση του φόρτου (load balancing) και η ελάττωση ή αποφυγή της πιθανότητας συμφόρησης. Το συνολικό μοντέλο τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά είναι προφανώς εξαιρετικά πολύπλοκο και μέχρι στιγμής οι λύσεις που έχουν προταθεί και λειτουργούν βασίζονται σε απλουστεύσεις.

Στο θέμα της επιλογής δρομολόγησης έχουν προταθεί λύσεις off-line και on-line, άλλοτε συγκεντρωτικές και άλλοτε κατανεμημένες. Στην δημοσίευση [*An off-line traffic engineering model for MPLS networks- Proceedings of IEEE LCN 2002- Erbas, Mathar*] προτείνεται μια λύση βασισμένη σε πίνακες περιγραφής των απαιτήσεων του δικτύου σε κίνηση από άκρη σε άκρη. Η λύση συνίσταται στην ικανοποίηση των απαιτήσεων μέσω βελτιστοποίησης της χρήσης των πόρων του δικτύου. Στις λύσεις on-line λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η τρέχουσα κατάσταση του δικτύου (χωρίς πληροφορία εκ των προτέρων, ούτε μελλοντικές απαιτήσεις), για την εύρεση του καλύτερου μονοπατιού για κάθε ξεχωριστή απαίτηση. Ενώ οι λύσεις off-line παρουσιάζουν ανοχές στους υπολογισμούς, οι λύσεις on-line έχουν αυστηρές υπολογιστικές απαιτήσεις.

1.2. Ποιότητα Υπηρεσίας και σχεδιασμός δικτύων

Η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στο δίκτυο ενός Παρόχου είναι βασικός παράγοντας υποστήριξης συγκεκριμένων συμφωνιών επιπέδου υπηρεσίας (ΣΕΥ – SLA), γιατί επιτρέπει την κατηγοριοποίηση της κίνησης σε κλάσεις υπηρεσίας, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταβίβαση συγκεκριμένων κλάσεων κίνησης που περιορίζονται από παράγοντες καθυστέρησης, εύρους ζώνης, διακύμανσης της καθυστέρησης και χασίματος πακέτων. Η ποιότητα υπηρεσίας και ο σχεδιασμός του δικτύου είναι μηχανισμοί διαχείρισης της απόδοσης του δικτύου. Και οι δύο μηχανισμοί στοχεύουν στην εξυπηρέτηση των εφαρμογών που δρομολογούνται πάνω από το δίκτυο, ώστε οι χρήστες του δικτύου να είναι απόλυτα ικανοποιημένοι με την χρήση του μέσου σε συνάρτηση με το χρηματικό κόστος που καταβάλλουν. Ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της ποιότητας υπηρεσίας και του σχεδιασμού του δικτύου, από τις οποίες οι κυριότερες είναι οι παρακάτω:

Ο σχεδιασμός του δικτύου είναι κατά κανόνα μηχανισμός διαχείρισης offline. Ο σχεδιαστής του δικτύου πρέπει να προβλέψει τον σωστό αριθμό συνδέσεων, κόμβων και δυναμικότητας κόμβων (πρακτικά ισχύ των δρομολογητών και υποστηριζόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης), ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση του δικτύου.
Η ποιότητα υπηρεσίας είναι μηχανισμός διαχείρισης της απόδοσης του δικτύου on-line. Στηρίζεται στον καθορισμό κλάσεων υπηρεσίας ανάλογα με το είδος κίνησης που καταφθάνει σε κάθε κόμβο, με τον καθορισμό της συμπεριφοράς της ουράς πακέτων σε κάθε κόμβο και σύνδεσμο και φυσικά τους μηχανισμούς σηματοδοσίας για την επικοινωνία ανάμεσα σε κόμβους αλλά και μεταξύ εφαρμογών εντός του δικτύου.
Ο σχεδιασμός του δικτύου προσπαθεί να ελέγξει την απόδοση του δικτύου από σκοπιά δικτυακή, ενώ η ποιότητα υπηρεσίας προσπαθεί να ελέγξει την απόδοση του δικτύου από την σκοπιά των εφαρμογών. Για να γίνει ποιο κατανοητή η διαφορά αυτή, θεωρείται δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται για μεταφορά αρχείων *[Supporting SLAs on IP Networks, Dinesh Verma]*. Ο σχεδιασμός του δικτύου θα εξασφαλίσει ότι ο μέσος όρος μεταφοράς δεδομένων συμβαίνει σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο. Η ποιότητα υπηρεσίας θα εξασφαλίσει ότι μια συγκεκριμένη μεταφορά αρχείων, ουσιαστικά μια *συγκεκριμένη κλάση* μεταφοράς αρχείων, θα ολοκληρωθεί εντός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου. Ο σχεδιασμός του δικτύου προσπαθεί να βελτιστοποιήσει δικτυακά χαρακτηριστικά όπως το κόστος του δικτύου, η μέση χρήση των συνδέσμων και η μέση καθυστέρηση του δικτύου. Δεν μπορεί να απαντήσει σε ερωτήματα σχετικά με την καθυστέρηση συγκεκριμένης εφαρμογής που εκτελείται πάνω στο δίκτυο. Η ποιότητα υπηρεσίας φροντίζει για την θέση ορίων

στην καθυστέρηση συγκεκριμένης εφαρμογής ή τουλάχιστον κλάσης εφαρμογών που εκτελούνται πάνω από το δίκτυο.
Ο σχεδιασμός του δικτύου τείνει να ομογενοποιεί τις απαιτήσεις απόδοσης των εφαρμογών καταλήγοντας σε συνολικά μοντέλα αντιμετώπισης του προβλήματος απόδοσης. Η ποιότητα υπηρεσίας αντίθετα θεωρεί ότι συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί συγκεκριμένη απόδοση από το δίκτυο και τείνει προς την θεώρηση ανομοιογένειας στην απόδοση του δικτύου.
Από τις διαφορές και τις ομοιότητες των μηχανισμών ελέγχου της απόδοσης του δικτύου είναι φανερό ότι ο σχεδιασμός του δικτύου και η ποιότητα υπηρεσίας είναι μηχανισμοί συμπληρωματικοί για την επίτευξη της εξυπηρέτησης χρηστών και εφαρμογών.
Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην ποιότητα υπηρεσίας για την απόδοση του δικτύου και την σχέση της ποιότητας υπηρεσίας με τον καταρτισμό Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας.

1.3. Προϋποθέσεις εφαρμογής Ποιότητας Υπηρεσίας

Στα σημερινά δίκτυα με τις υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (n x Gbps) θα μπορούσε κάποιος να υποτιμήσει την σημασία της ποιότητας υπηρεσίας και να θεωρήσει ότι είχε εφαρμογή σε δίκτυα αργών συνδέσεων. Η απλούστευση αυτή ξεκινάει από το γεγονός της προσφοράς ενός σχετικά μεγάλου εύρους ζώνης έναντι παλαιοτέρων υλοποιήσεων.
Η εμπειρία και οι έλεγχοι έχουν αποδείξει ότι η εφαρμογή της ποιότητας υπηρεσίας είναι αναγκαία σε οποιοδήποτε δίκτυο συνυπάρχουν διάφοροι τύποι κίνησης όπως δεδομένα, ήχος και video, η συνύπαρξη τους δε είναι διάφανη στον τελικό χρήστη. Η συνύπαρξη διαφορετικών τύπων κίνησης πάνω στο ίδιο δίκτυο δημιουργεί την ανάγκη προστασίας του διατιθέμενου εύρους ζώνης, ώστε κάθε τύπος κίνησης να μην επηρεάζεται από τους υπόλοιπους. Υπάρχουν εφαρμογές αλλά και χρήστες που τείνουν να χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο εύρος δικτύου με πλήρη αδιαφορία για τις υπόλοιπες εφαρμογές ή τους υπόλοιπους χρήστες.
Πολλές φορές έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές περιορισμού της κίνησης (traffic shaping, traffic rating) ώστε ακόμα και σε περιπτώσεις που διακινείται μόνο ένας τύπος κίνησης (π.χ απλά δεδομένα) να μην είναι δυνατή η μονοπώληση του μέσου από έναν χρήστη ή εφαρμογή. Χαρακτηριστική εφαρμογή είναι το μοίρασμα των γραμμών σύνδεσης των Ελληνικών Παρόχων Υπηρεσιών Διαδικτύου (ΠΥΔ) με το εξωτερικό. Επειδή το εύρος ζώνης με το εξωτερικό πληρώνεται αρκετά ακριβά, κάθε κατηγορία χρηστών δεν έχει πρόσβαση σε όλο το εύρος ζώνης, αλλά σε μόνο σε σαφώς καθορισμένο εύρος. Με αυτό τον τρόπο άλλο εύρος ζώνης απολαμβάνουν οι χρήστες ADSL, άλλο οι χρήστες γραμμών δεδομένων (n x E1, n x E3), άλλο οι χρήστες VoIP κτλ.

Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε ένα δίκτυο καθορίζεται πολύ απλά από το παρακάτω παλιό κλισέ:
Είναι τόσο ισχυρή όσο η πιο αδύνατη σύνδεση.
Πριν από την εφαρμογή QoS θα πρέπει η δικτυακή υποδομή να έχει υψηλή διαθεσιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο θα έχει διαθεσιμότητα πέντε εννέα (99,999) δηλαδή λιγότερο από 5 λεπτά της ώρας εκτός λειτουργίας ανά έτος. Συνεπώς δεν νοείται εφαρμογή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα που βρίσκονται εκτός λειτουργίας σε συχνή βάση, ακόμα και αν όταν βρίσκονται εντός λειτουργίας ικανοποιούν αυξημένες απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Συνεπώς η ποιότητα υπηρεσίας είναι μέτρο της διαθεσιμότητας και της ποιότητας μεταφοράς διαφορετικών ειδών κίνησης μέσα σε ένα δίκτυο. Οι βασικοί παράγοντες –αλλά όχι μοναδικοί- που καθορίζουν την ποιότητα υπηρεσίας σύμφωνα με τους Παρόχους Υπηρεσιών είναι οι ακόλουθοι:

Χάσιμο πακέτων (Packet Loss)

Είναι ο αριθμός των πακέτων που μεταφέρονται επιτυχώς προς τον συνολικό αριθμό πακέτων και εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Ο παράγοντας αυτός δεν έχει σχέση με την απόρριψη πακέτων εξαιτίας μη λειτουργίας του δικτύου, αλλά με την απόρριψη πακέτων εξαιτίας συμφόρησης.

Καθυστέρηση (latency)

Είναι ο πεπερασμένος χρόνος που χρειάζεται ένα πακέτο να μεταβιβαστεί από τον αποστολέα στον λήπτη. Η καθυστέρηση διακρίνεται σε σταθερή καθυστέρηση δικτύου και μεταβλητή καθυστέρηση δικτύου. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που το δίκτυο μεταφέρει και φωνή η σταθερή καθυστέρηση δικτύου αναλύεται στις παρακάτω:

- Καθυστέρηση πακετοποίησης – Ο χρόνος που χρειάζεται για να ψηφιοποιηθεί και να κωδικοποιηθεί η φωνή σε πακέτα.
- Καθυστέρηση σειριακοποιήσης – Ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταδοθούν τα bits των πακέτων πάνω στο φυσικό μέσο και εξαρτάται από το ρυθμό του ρολογιού της προσαρμογής.
- Καθυστέρηση διάδοσης – Ο χρόνος που χρειάζονται τα ηλεκτρικά σήματα για να μεταδοθούν από το ένα σημείο στο άλλο και εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του μέσου και το μήκος.

Διακύμανση καθυστέρησης (jitter)

Η καθυστέρηση αυτή είναι η διαφορά της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο μεταξύ συνεχόμενων πακέτων. Αναφέρεται και ως καθυστέρηση μεταξύ των πακέτων . Για παράδειγμα εάν ένα πακέτο χρειάζεται 100 msec από τον αποστολέα στο λήπτη και το αμέσως επόμενο χρειάζεται 125 msec τότε η διακύμανση της καθυστέρησης είναι 25 msec. Κάθε τελικός σταθμός σε ένα δίκτυο VoIP ή ViIP (video over IP) διαθέτει απομονωτές jitter που είναι είτε σταθερού είτε μεταβλητού μεγέθους. Στιγμιαίες μεταβολές στο χρόνο άφιξης των πακέτων που είναι μεγαλύτερες από τις δυνατότητες εξομάλυνσης που παρέχουν οι απομονωτές jitter, οδηγούν σε buffer overrun ή underrun.

Οι τρεις παραπάνω παράγοντες είναι μετρήσιμοι μέσω εργαλείων επίβλεψης του δικτύου και χρησιμοποιούνται από του Παρόχους Υπηρεσιών για την κατάρτιση Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement – SLA). Όπως θα γίνει φανερό σε επόμενα κεφάλαια οι τρεις αυτοί παράγοντες δεν είναι μοναδικοί, αλλά ανάλογα με τις απαιτήσεις του Πελάτη και τις δυνατότητες του Παρόχου μπορούν να προστεθούν και άλλοι ή να αφαιρεθούν κάποιοι από τους τρεις βασικούς.

Η εφαρμογή Ποιότητας Υπηρεσίας καλύπτει τέσσερις συνιστώσες:

- Κατηγοριοποίηση της κίνησης

- Καθορισμός προτεραιότητας της κίνησης
- Διαχείριση του εύρους ζώνης και
- Συνεχής επίβλεψη της κίνησης

Σκοπός της κατηγοριοποίησης της κίνησης είναι ο διαχωρισμός της κίνησης του δικτύου (εφαρμογές, πληροφορίες δρομολόγησης, σηματοδοσία) με τρόπο ανάλογο με την σημασία κάθε διαφορετικού είδους κίνησης. Τα διαφορετικά είδη κίνησης επισημαίνονται με κάποιο τρόπο είτε σε επίπεδο 2 (IEEE 802.1p), είτε σε επίπεδο 3 (αρχιτεκτονικές που θα περιγραφούν παρακάτω) του OSI.
Ο καθορισμός της προτεραιότητας της κίνησης (συχνά αναφερόμενη ως κλάση υπηρεσίας – Class of Service) εξασφαλίζει ότι η κίνηση που έχει σημανθεί ως υψηλής σπουδαιότητας στο προηγούμενο βήμα (κατηγοριοποίηση της κίνησης) λαμβάνει υψηλότερη προτεραιότητα διακίνησης μέσα στο δίκτυο Η προτεραιότητα της κίνησης λαμβάνει υπόψη την κρισιμότητα της εφαρμογής (σχετικά με τον Πελάτη) και την ανεκτικότητα της εφαρμογής στους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα υπηρεσίας (καθυστέρηση, χάσιμο πακέτων, διακύμανση καθυστέρησης). Η κλάση υπηρεσίας μπορεί να καθοριστεί είτε στο επίπεδο 2 (IEEE 802.1p) είτε στο επίπεδο 3 με εφαρμογή διαφοροποίησης υπηρεσίας που θα περιγραφεί παρακάτω.
Η διαχείριση του εύρους ζώνης στοχεύει στην παραχώρηση ικανού εύρους ζώνης, ώστε όλες οι εφαρμογές να ολοκληρώνονται και να μεταβιβάζονται μέσω του δικτύου σε αποδεκτό επίπεδο ποιότητας. Στο επίπεδο δικτύου η διαχείριση του εύρους ζώνης πρέπει να εξασφαλίζει αρκετό εύρος ζώνης για τις εφαρμογές χαμηλής προτεραιότητας ακόμη και όταν οι εφαρμογές υψηλής προτεραιότητας καταναλώνουν το 100% του δικού τους εύρους ζώνης. Συνηθισμένες πρακτικές είναι οι πολιτικές που δεν επιτρέπουν σε συγκεκριμένο είδος κίνησης να υπερβεί συγκεκριμένο όριο εύρους ζώνης (traffic policing). Στο επίπεδο εφαρμογής θα πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος που αντιδρά η εφαρμογή σε περιπτώσεις ελαττωμένου εύρου ζώνης. Ως κλασικό παράδειγμα για την διαχείριση του εύρους ζώνης μπορεί να αναφερθεί η συμπεριφορά του δικτύου ικανότητας μεταφοράς 500 τηλεφωνικών κλήσεων, όταν καταφθάνει η $501^{η}$ κλήση. Εάν η νέα κλήση αφεθεί να εισχωρήσει στο δίκτυο, τότε θα υποβαθμιστούν όλες οι υπόλοιπες τρέχουσες κλήσεις. Εναλλακτικές επιλογές είναι είτε σήμα κατειλημμένο στον συνδρομητή που αρχικοποίησε την κλήση, είτε η αναδρομολόγηση της κλήσης μέσω του δικτύου PSTN (με κόστος βέβαια του Παρόχου).
Η επίβλεψη της κίνησης και της συμπεριφοράς του δικτύου επιβάλλεται στα σημερινά περιβάλλοντα που μεταβάλλονται δυναμικά μέσα στον χρόνο. Αλλαγές, αναβαθμίσεις, προσθαφαιρέσεις κόμβων, πελατών και εξοπλισμού έχουν καταλυτικό ρόλο στην συμπεριφορά του δικτύου, ο οποία ανακλάται στην ποιότητα παροχής υπηρεσίας.

Η ανάγκη ποιότητας υπηρεσίας άνοιξε τον δρόμο στην θεώρηση συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που επιλύουν προβλήματα κάτω από συγκεκριμένες αρχές. Η θεώρηση νέων αρχιτεκτονικών συνεχίζεται μέχρι σήμερα στα διεθνή φόρα. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν δύο αρχιτεκτονικές οι οποίες έχουν ήδη πρακτικά εφαρμοστεί, ώστε να φανούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Οι δύο αρχιτεκτονικές είναι η αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών (IntServ) και η αρχιτεκτονική διαφοροποίησης υπηρεσιών (Diffserv) και περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

1.4. Αρχιτεκτονική IntServ

Το μοντέλο IntServ (ολοκληρωμένων υπηρεσιών) αναλογεί ως προς την λειτουργία με ταχυδρομική υπηρεσία courier με συγκεκριμένες παραμέτρους εγγύησης παράδοσης και χασίματος γραμμάτων και πακέτων.

Ειδικότερα το μοντέλο καθορίζει τα ακόλουθα:

- Παράμετροι εκπομπής (Transmission Specification – TSpec), δηλαδή τι στέλνει ο αποστολέας (ρυθμός μετάδοσης, μέγιστη μονάδα μεταφοράς - MTU κτλ).
- Παράμετροι λήψης (Receiver Specification – RSpec), δηλαδή τι αναμένει να λάβει ο λήπτης (εύρος ζώνης, MTU κτλ).
- Πως πραγματοποιείται η σηματοδοσία στο δίκτυο από τον αποστολέα και το λήπτη (ουσιαστικά με τη χρήση πρωτοκόλλου δέσμευσης πόρων όπως το RSVP).
- Η επικοινωνία των εφαρμογών αποστολέα – παραλήπτη με συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσίας αντιμετωπίζεται ως ροή με ορίσματα διευθύνσεις πηγής και προορισμού, το πρωτόκολλο μεταφοράς, τη θύρα πηγής και προορισμού.

Η αρχιτεκτονική IntServ περιλαμβάνει 3 κύριες κλάσεις υπηρεσιών:

- Εγγυημένες υπηρεσίες (RFC 2212) – Η κλάση αυτή προβάλλει αυστηρά όρια (με μαθηματικό τρόπο αποδεδειγμένα) στις καθυστερήσεις των πακέτων σε βάση από άκρη σε άκρη και πραγματοποιεί την υπηρεσία με εγγυημένη καθυστέρηση και εύρος ζώνης.
- Ελεγχόμενος φόρτος (RFC 2211) – Η κλάση αυτή εφοδιάζει την ροή της εφαρμογής με ποιότητα υπηρεσίας πολύ κοντά στην QoS που η ίδια ροή θα έπαιρνε από ένα μη φορτωμένο στοιχείο δικτύου. Για να γίνει αυτό εφικτό χρησιμοποιείται έλεγχος χωρητικότητας ώστε να εξασφαλιστεί η ποιότητα υπηρεσίας ακόμα και όταν το δικτυακό στοιχείο είναι υπερφορτωμένο.
- Best effort – Η κλάση δεν εγγυείται κανένα επίπεδο υπηρεσίας.

Το μοντέλο κρατήσεων που ακολουθείται από το πρωτόκολλο RSVP βασίζεται στην έννοια της απλής ροής *[Supporting SLAs on IP Networks]*. Η ροή ορίζεται από τη διεύθυνση προορισμού, το πρωτόκολλο μεταφοράς της εφαρμογής και τον αριθμό θύρας (port number) της εφαρμογής. Σε πρακτικές περιπτώσεις το πρωτόκολλο μεταφοράς είναι TCP ή UDP και η ροή είναι κίνηση δεδομένων μεταξύ ενός αποστολέα και ενός λήπτη (unicast), χωρίς να αποκλείεται σε ειδικές περιπτώσεις η κίνηση multicast.
Στην αρχιτεκτονική IntServ ο δρομολογητής εισόδου μόλις λαμβάνει ροή με απαίτηση QoS αρχικοποιεί τη δημιουργία μονοπατιού με την αποστολή μηνύματος PATH στο δρομολογητή εξόδου από το δίκτυο (οι δρομολογητές εισόδου / εξόδου εδώ μπορεί να είναι είτε ΑΠΑ (Άκρο ΠΑρόχου), είτε ΑΠΕ(Άκρο ΠΕλάτη) ανάλογα με το που βρίσκονται τα όρια του τομέα IntServ). Το μήνυμα PATH στέλνεται με την ειδική επιλογή Router Alert του πρωτοκόλλου IP. Η επιλογή αυτή επιβάλλει την σύλληψη και επεξεργασία του μηνύματος PATH σε κάθε δρομολογητή πάνω στο μονοπάτι της ροής. Στο μήνυμα PATH

υπάρχει επίσης ο καθορισμός της κίνησης (Tspec – Traffic specification) όπως δημιουργείται από τον αποστολέα και η διεύθυνση με τον αριθμό θύρας του αποστολέα (καθορισμός αποστολέα).
Ο καθορισμός της κίνησης (Tspec) ενημερώνει το δίκτυο για την πρόθεση του αποστολέα να δημιουργήσει συγκεκριμένη ροή που απαιτεί τη δέσμευση συγκεκριμένων πόρων του δικτύου. Ο καθορισμός της κίνησης ενημερώνει επίσης το δίκτυο ότι η συγκεκριμένη ροή θα βρίσκεται εντός των ακόλουθων παραμέτρων:

- Ρυθμός αιχμής σε bytes/sec p
- Μέγεθος bucket σε bytes b
- Ρυθμός bucket σε bytes/sec r
- Μέγιστο μήκος datagram M
- Ελάχιστη μονάδα τροποποίησης m

Οι παράμετροι αυτές ενημερώνουν το δίκτυο ότι η εφαρμογή μπορεί να στείλει δεδομένα με μακροπρόθεσμο μέσο ρυθμό αποστολής r bytes/sec. Ο ρυθμός αιχμής της εφαρμογής για μικρό χρονικό διάστημα θα είναι p bytes/sec και μπορεί να στείλει το πολύ b bytes με αυτόν τον ρυθμό αιχμής στο δίκτυο. Όταν η εφαρμογή έχει εξαντλήσει τα b bytes με ρυθμό αιχμής θα πρέπει να μειώσει το ρυθμό της στον μακροπρόθεσμο μέσο όρο r.
Ο επίσημος ορισμός της συμφωνίας (conformance) είναι ότι σε οποιαδήποτε χρονικό διάστημα t, ο αριθμός των bytes που στέλνει η εφαρμογή θα είναι μικρότερος του
pt + M
και του
b + rt
Τα δύο παραπάνω όρια προκύπτουν από τον ολικό αριθμό bytes που μπορεί να στείλει η εφαρμογή είτε σε ρυθμό αιχμής είτε σε μέσο ρυθμό. Η μονάδα τροποποίησης χρησιμοποιείται για τη στρογγυλοποίηση των πακέτων IP που έχουν μικρότερο αριθμό bytes από m σε m.
Η σηματοδοσία με το πρωτόκολλο RSVP στέλνει στο μήνυμα PATH την περιγραφή των χαρακτηριστικών απόδοσης του μονοπατιού μέχρι τον λήπτη. Η περιγραφή αυτή ονομάζεται καθορισμός ανακοίνωσης (ADspec- Advertisement specification), επειδή ανακοινώνει στον λήπτη τα χαρακτηριστικά του μονοπατιού. Στον καθορισμό ανακοίνωσης εκτός από την πληροφορία που είναι χαρακτηριστική για κάθε ξεχωριστή κλάση υπηρεσίας περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Αριθμός αλμάτων RSVP κατά μήκος του μονοπατιού
- Πληροφορία για πιθανά άλματα στα οποία δεν υποστηρίζεται RSVP. Η πληροφόρηση αυτή γίνεται πρακτικά από κάποιον δρομολογητή που υποστηρίζει RSVP και ξέρει για την ύπαρξη δρομολογητών που δεν υποστηρίζουν RSVP.
- Ελάχιστο εύρος ζώνης μονοπατιού που είναι διαθέσιμο σαν ένα πάνω όριο στο εύρος ζώνης που μπορεί να δεσμευθεί κατά μήκος του μονοπατιού. Εάν ένας δρομολογητής δεν μπορεί να υπερβεί αυτό το όριο κρατήσεων ελαττώνει το όριο κρατήσεων στο επίπεδο εύρους ζώνης που μπορεί να δεσμεύσει.

- Καθυστέρηση μονοπατιού (path latency) που καθορίζει τη συσσωρευμένη ελάχιστη καθυστέρηση στο μονοπάτι. Εδώ συμπεριλαμβάνεται η καθυστέρηση διάδοσης και ο ελάχιστος χρόνος επεξεργασίας ανά δρομολογητή.
- Το μέγιστο μέγεθος πακέτου IP το οποίο μπορεί να μεταφερθεί στο μονοπάτι χωρίς να κατατμηθεί.

Ο δρομολογητής εξόδου απαντά με μήνυμα RESV στον δρομολογητή εισόδου και προσπαθεί να δεσμεύσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης πάνω στο μονοπάτι μέχρι τον πηγαίο δρομολογητή εισόδου. Οι δρομολογητές που βρίσκονται στον πυρήνα του δικτύου και πάνω στο μονοπάτι προσαρμόζουν τους μηχανισμούς τους ελέγχου κίνησης ώστε να εγγυηθούν την εξυπηρέτηση της ποιότητας υπηρεσίας που απαιτεί η συγκεκριμένη ροή.
Το μήνυμα RESV περιέχει καθορισμό ροής και καθορισμό φίλτρου. Στον καθορισμό ροής εκτός από τον καθορισμό κίνησης (Tspec) περιλαμβάνεται καθορισμός κράτησης (Rspec - Reservation specification), ο οποίος είναι ο ρυθμός λήψης που επιθυμεί να λαμβάνει ο λήπτης από το μονοπάτι. Τα μηνύματα PATH και RESV ανανεώνονται ανά περιοδικά διαστήματα για να ανανεώσουν την κράτηση πόρων. Εάν ένας δρομολογητής δεν λάβει τα μηνύματα ανανέωσης της κράτησης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τότε ακυρώνει την κράτηση και διαγράφει την πληροφορία για την ροή. Η ροή έχει τη δυνατότητα να αναδρομολογηθεί σε άλλο μονοπάτι.

Η αρχιτεκτονική IntServ διαθέτει δύο κλάσεις υπηρεσιών σε ένα δίκτυο IP:

- Εγγυημένη υπηρεσία
  - Η εγγυημένη υπηρεσία εγγυάται ποσοτικά άνω όρια στην καθυστέρηση επικοινωνίας που βλέπει η εφαρμογή. Συνεπώς είναι άμεσα αντιληπτή από την εφαρμογή και καταναλώνει πόρους του δικτύου.
- Ελεγχόμενος φόρτος
  - Ο ελεγχόμενος φόρτος δεν εγγυάται ποσοτικές καθυστερήσεις αλλά ποιοτική βεβαίωση ότι η απόδοση του δικτύου δεν θα είναι πολλή χειρότερη από την απόδοση του δικτύου που θα βλέπει η εφαρμογή όταν το δίκτυο δεν είναι φορτωμένο. Ο ελεγχόμενος φόρτος δεν είναι άμεσα αντιληπτός από την εφαρμογή αλλά επιτρέπει καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου.

Η υπόλοιπη κίνηση του δικτύου η οποία δεν ανήκει στους δύο παραπάνω τύπους υπηρεσιών είναι κίνηση κατά δυνάμει εφικτή και έχει χαμηλότερη προτεραιότητα έναντι της κίνησης των τύπων υπηρεσίας.

1.4.1. Εγγυημένη υπηρεσία

Η εγγυημένη υπηρεσία ως κλάση υπηρεσίας προσφέρει εγγυημένη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και συγκεκριμένη ρυθμαπόδοση σε επικοινωνούσες εφαρμογές.

Επειδή πρόκειται για συγκεκριμένη κλάση υπηρεσίας ο καθορισμός ανακοίνωσης (ADspec) πέρα από τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω περιλαμβάνει δύο επιπλέον όρους:

- Συσσωρευμένη καθυστέρηση ουράς εξαρτώμενη από το ρυθμό κατά μήκος του μονοπατιού που συμβολίζεται με Ctot.
- Συσσωρευμένη καθυστέρηση ουράς μη εξαρτώμενη από το ρυθμό κατά μήκος του μονοπατιού που συμβολίζεται με Dtot.

Εάν μια ροή έχει δεσμευμένο ρυθμό r bps στο δίκτυο τότε η μεταβλητή καθυστέρηση d σε msec ενός πακέτου της ροής σε ένα δρομολογητή λαμβάνει τιμή στο διάστημα [0, D+C/r] :

$d \in [0, D+C/r]$,

όπου C η εξαρτώμενη από το ρυθμό συνεισφορά στην καθυστέρηση της ουράς και D η μη εξαρτώμενη από το ρυθμό συνεισφορά στην καθυστέρηση της ουράς [*Supporting SLAs on IP Networks*]. Για ροή με Tspec (p,b,r,M) πρέπει να κρατηθεί ρυθμός μετάδοσης R :

$R \in [r, p]$

Τότε η συνολική καθυστέρηση ουράς ToDe είναι:

$ToDe \leq [(b – M)/R \times (p – R) / (p – r)] + (M + Ctot) / R + Dtot$

Εάν R > p τότε

$ToDemax \leq (M + Ctot) / R + Dtot$

Βασικά πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής IntServ είναι:

- Σχεδιαστική απλότητα που διευκολύνει την ολοκλήρωση μαζί με τη διαχείριση των πολιτικών δικτύου.
- Διακριτή ανά ροή ποιότητα υπηρεσίας, που ταιριάζει ιδιαίτερα στις κλήσεις φωνής.
- Δυνατότητες ελέγχου εισόδου (Call Admission Control – CAC), που μπορεί να δράσουν ενδεικτικά στα άκρα της μετάδοσης σχετικά με το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Τα μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής IntServ είναι:

- Όλα τα στοιχεία δικτύου πρέπει να διατηρούν πληροφορία κατάστασης και να ανταλλάσσουν σηματοδοσία ανά ροή, πράγμα που απαιτεί σημαντικό μέρος του εύρους ζώνης σε ένα μεγάλο δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό οδηγεί στην αδυναμία κλιμάκωσης της αρχιτεκτονικής IntServ
- Χρησιμοποιούνται περιοδικά μηνύματα ανανέωσης, που απαιτούν προστασία από το χάσιμο πακέτων για να διατηρηθούν οι σύνοδοι ανέπαφες.
- Όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι πρέπει να υποστηρίζουν το πρωτόκολλο RSVP.

1.5. Αρχιτεκτονική DiffServ

Η αρχιτεκτονική DiffServ μπορεί εύκολα να συγκριθεί με τα επίπεδα υπηρεσίας που παρέχει μια ταχυδρομική υπηρεσία όπως κανονικό, συστημένο, προτεραιότητα, γρήγορο. Κάθε υπηρεσία διαθέτει συγκεκριμένες παραμέτρους παράδοσης και το γράμμα ή πακέτο σφραγίζεται σε κάθε ενδιάμεσο ταχυδρομικό κόμβο για να επιβεβαιωθεί ότι λαμβάνει την απαιτούμενη υπηρεσία. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη σύνδεση του αποστολέα του πακέτου με την μεταχείριση που αυτό λαμβάνει από το ταχυδρομικό δίκτυο. Η ιδέα της αρχιτεκτονικής αυτής είναι πολύ απλή:

Προσφέρει διαφορετικά επίπεδα δικτυακής υπηρεσίας σε ένα πακέτο με τέτοιο τρόπο ώστε *«επιτρέπει κλιμακωτή επιλογή υπηρεσίας στο Διαδίκτυο χωρίς να χρειάζεται η ανά ροή κατάσταση και σηματοδοσία σε κάθε άλμα» [RFC 2474]*. Τα πακέτα κάθε διακριτής υπηρεσίας ανήκουν σε διακριτή κλάση και η μεταχείριση της κάθε κλάσης περιγράφεται από τις συμπεριφορές ανά άλμα (Per Hop Behavior – PHB) με τις οποίες κάθε κόμβος πρέπει να συμμορφώνεται. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι υπηρεσίες περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό των παρακάτω:

- Ρύθμιση πεδίου στην επικεφαλίδα IP στην είσοδο του δικτύου ή σε όρια δικτύου.
- Χρήση αυτού του πεδίου για τον καθορισμό των κόμβων που θα προωθηθούν τα πακέτα μέσα στο δίκτυο.
- Ρύθμιση των πακέτων που έχουν ήδη σημανθεί (σε συγκεκριμένο πεδίο εντός της επικεφαλίδας του πακέτου IP) στα όρια του δικτύου σύμφωνα με τους κανόνες κάθε κλάσης ή υπηρεσίας.
- Στην αρχιτεκτονική DiffServ οι ροές που φτάνουν στο σύνορο του δικτύου ομαδοποιούνται σε μικρό αριθμό κλάσεων και οι δρομολογητές μέσα στο δίκτυο υλοποιούν μια σειρά μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού / απομόνωσης (scheduling / buffering) βασισμένο στις κλάσεις, δηλαδή τελικά στις συμπεριφορές ανά άλμα.

Άρα η ουσία της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι ο καθορισμός των συμπεριφορών ανά άλμα (PHB) που μια εφαρμογή μπορεί να λάβει από το δίκτυο. Οι συμπεριφορές ανά άλμα έχουν περιγραφεί και εκτενώς αναλυθεί σε συγκεκριμένες συστάσεις RFC της IEEE και είναι:

<u>Expedited Forwarding (EF-RFC3246, RFC 2598)</u>

Η κλάση αυτή παρέχει αυστηρή προτεραιότητα υπηρεσίας (όπως η κατεπείγουσα ταχυδρομική υπηρεσία), δηλαδή ελάχιστη καθυστέρηση και ελάχιστη απόρριψη. Από πρακτική άποψη αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια ουρά αποκλειστικά για την κίνηση EF για την οποία ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι μικρότερος του χρόνου εξυπηρέτησης, έτσι ώστε η καθυστέρηση, η διακύμανση της καθυστέρησης και η απόρριψη εξ αιτίας συμφόρησης είναι αδύνατο να συμβούν. Η φωνή είναι τυπικό παράδειγμα κίνησης που σε απαιτεί συγκεκριμένο εύρος ζώνης και υποχρεώνει συνήθως τον Πάροχο Υπηρεσίας να δεσμεύσει εύρος ζώνης .

Assured Forwarding (AF – RFC 2597)

Η κλάση αυτή παρέχει ποιοτική εγγύηση παράδοσης (όπως η υπηρεσία συστημένων) και φροντίζει για την πρόβλεψη εύρους ζώνης σε περιπτώσεις υπερκρατήσεων της υπηρεσίας (ειδικά κατάδειξη και απόρριψη υπερβάλλοντος κίνησης). Η κλάση αυτή χαρακτηρίζεται από δώδεκα συμπεριφορές ανά άλμα (PHB). Κάθε PHB καθορίζεται από ένα αριθμό ουράς και μια προτίμηση απόρριψης. Η IETF συστήνει τη χρήση τεσσάρων διαφορετικών ουρών με τρία επίπεδα προτίμησης η καθεμιά. Συμβατικά κάθε PHB αυτής της κλάσης ονομάζεται με AFxy όπου x ο αριθμός ουράς και y το επίπεδο προτίμησης απόρριψης. Συνεπώς όλα τα πακέτα με PHB AF1y θα τοποθετηθούν στην ίδια ουρά για προώθηση κάνοντας βέβαιο ότι όλα τα πακέτα μιας μοναδικής εφαρμογής δεν θα αναδιαταχτούν εάν διαφέρουν μόνο στην προτίμηση απόρριψης. Οι συμπεριφορές AF είναι κατάλληλες για κίνηση που απαιτεί βεβαιότητα ρυθμού, ενώ δέχεται ελαστικότερα όρια από την κλάση EF στην καθυστέρηση ή στην διακύμανση της καθυστέρησης.

Class Selectors (CS – RFC 2474)

Η κλάση αυτή παρέχει κωδικούς για προς τα πίσω συμβατότητα με μοντέλα προτεραιότητας IP, δηλαδή την χρήση του πεδίου προτεραιότητας στο byte ToS (Type of Service) της επικεφαλίδας του πακέτου IP. Χαρακτηριστικές συμπεριφορές CS είναι η CS3 που αντιστοιχίζεται στην σηματοδοσία των κλήσεων και η CS6 που αντιστοιχίζεται στην κίνηση δρομολόγησης.

Best Effort (BE)

Η κλάση αυτή παρέχει παράδοση οποτεδήποτε είναι δυνατό (όπως η κανονική υπηρεσία ταχυδρομείου). Συνήθως στην κλάση αυτή αντιστοιχίζεται μη κρίσιμη κίνηση για τον Πελάτη όπως π.χ η πλοήγηση στο Διαδίκτυο.

Στο παράρτημα Β παρατίθεται αναλυτική περιγραφή όλων των συμπεριφορών ανά άλμα.

Στην αρχιτεκτονική DiffServ δεν χρησιμοποιείται πρωτόκολλο σηματοδοσίας για να δεσμεύει πόρους στην φορά της κίνησης όπως γίνεται με την αρχιτεκτονική IntServ.
Η αποφυγή του πρωτοκόλλου σηματοδοσίας γίνεται με τη σήμανση της κλάσης πάνω στο πακέτο IP. Χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό το πεδίο τύπος υπηρεσίας (Type of Service – ToS) που υπάρχει στην επικεφαλίδα των πακέτων IP και έχει μήκος 8 bits. Για την αποτελεσματική χρήση του πεδίου ToS η IETF επανακαθόρισε τη σημασία του χωρίζοντας το σε δύο υποπεδία μήκους 6 και 2 bits. Το πρώτο υποπεδίο ονομάζεται DiffServ Code Point – DSCP (πεδίο κωδικοποίησης DiffServ) και το δεύτερο υποπεδίο ονομάζεται Explicit Congestion Notification (ECN). Το πεδίο DSCP καθορίζει τη συμπεριφορά ενός πακέτου ως προς την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε συγκεκριμένο κόμβο του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο ορίζεται τελικά πάνω στο πακέτο η συμπεριφορά ανά άλμα δηλαδή η PHB και είναι δυνατή πλέον η λήψη αποφάσεων σχετικά με το χρονοπρογραμματισμό και την προτίμηση απόρριψης για το συγκεκριμένο πακέτο.

Από την άποψη της υλοποίησης η συμπεριφορά ανά άλμα (PHB) μεταφράζεται στην επιλογή της ουράς πακέτων για προώθηση, την πιθανότητα απόρριψης όταν η ουρά ξεπερνάει κάποιο συγκεκριμένο όριο, τους πόρους (απομονωτές και εύρος ζώνης)

που παραχωρούνται σε κάθε ουρά και τη συχνότητα εξυπηρέτησης της ουράς *[MPLS DiffServ Traffic Engineering, Ina Minei JUNIPER White Paper]*.

Η IETF δίνει την δυνατότητα επαναπροσδιορισμού της αντιστοίχησης μεταξύ των τιμών του πεδίου DSCP και των συμπεριφορών ανά άλμα (PHB) στους Παρόχους Υπηρεσιών. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η δημιουργία συμπεριφορών ανά άλμα PHB πέρα των καθιερωμένων εντός του δικτύου του Παρόχου. Η ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνει το πακέτο καθώς περνά από τους κόμβους του δικτύου καθορίζεται από την συμπεριφορά PHB και συνεπώς είναι αναγκαίο να υπάρχει συνέπεια στην αντιστοίχηση DSCP-PHB. Η αναγκαιότητα αυτή οδηγεί στον προσδιορισμό του τομέα υπηρεσιών DiffServ *[MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering – Ina Minei, Juniper Networks 2004]* που είναι ένα σύνολο κόμβων με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Κοινό σύνολο καθορισμένων PHB για όλους τους κόμβους
- Κοινή αντιστοίχηση DSCP-PHB
- Ενιαία πολιτική διάθεσης και υποστήριξης υπηρεσιών

Τα παραπάνω σε μαθηματική γλώσσα γράφονται:

DiffServ Domain=DD={n | n ∈ ΠΥ}, όπου ∀ n ∈ DD (n κόμβος του δικτύου):

1. $PHB(n_1) = PHB(n_2) = \ldots = PHB(n_n)$, όπου PHB(n) = {x | x οι υποστηριζόμενες συμπεριφορές στον κόμβο n}

2. $DSCP(x_1) = DSCP(x_2) = \ldots = DSCP(x_n)$, όπου DSCP(x) αντιστοίχηση DSCP-PHB σε κάθε κόμβο

3. $P(n_1) = P(n_2) = \ldots = P(n_n)$, όπου P(n) πολιτική υπηρεσιών στον κόμβο n.

Συνεπώς η αρχιτεκτονική DiffServ δημιουργεί υπηρεσίες από τις συμπεριφορές ανά άλμα με τη κατηγοριοποίηση των πακέτων σε κλάσεις στην άκρη ή στο όριο του δικτύου και προχωρεί στην ανάλογη σήμανση των πακέτων.

Ο πυρήνας του δικτύου υλοποιεί τις συμπεριφορές ανά άλμα (PHB) και ανάλογα με τον τρόπο που έχει σημανθεί ένα πακέτο αποφασίζεται η προώθηση και η απόρριψη. Τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι:

Κλιμάκωση – Δεν χρειάζεται να κρατείται πληροφορία κατάστασης ή ροής στους κόμβους του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι απλοποιείται η λειτουργικότητα των δρομολογητών και ελαττώνεται ο αριθμός των καταστάσεων που πρέπει να διατηρούνται από τους δρομολογητές.

Απόδοση – Το πακέτο εξετάζεται μόνο μια φορά, κατηγοριοποιείται, λαμβάνει την ανάλογη σήμανση που τοποθετείται στο πεδίο ToS και από κει και πέρα όλες οι αποφάσεις για ποιότητα υπηρεσίας λαμβάνονται ανάλογα με την τιμή που έχει το σχετικό πεδίο στην επικεφαλίδα του πακέτου. Η κατηγοριοποίηση ανά κλάσεις εξαλείφει την σηματοδοσία της ποιότητας υπηρεσίας ανά ροή.

Συμβατότητα – Όλοι οι κατασκευαστικοί οίκοι υποστηρίζουν IP και άρα μέσω της κωδικοποίησης στο πεδίο ToS μπορεί να υποστηριχτεί η αρχιτεκτονική DiffServ χωρίς μεγάλες αλλαγές στο λογισμικό.

Προσαρμοστικότητα – Η αρχιτεκτονική DiffServ δεν επιβάλλει κανένα ξεχωριστό χαρακτηριστικό στους κόμβους του δικτύου, που είναι ελεύθεροι να επιλέξουν οτιδήποτε χαρακτηριστικά βελτιώνουν το υλικό και την αρχιτεκτονική στα πλαίσια των αναμενόμενων συμπεριφορών (PHB).

Τα μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι:

Δεν γίνονται κρατήσεις εύρους ζώνης από άκρη σε άκρη. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιθανό οι εγγυήσεις των υπηρεσιών να μην μπορούν να εκτελεστούν από κόμβους του δικτύου που είτε δεν μπορούν να υλοποιήσουν τις απαιτούμενες συμπεριφορές σωστά σε περιβάλλον συμφόρησης, είτε δεν έχουν προετοιμαστεί κατάλληλα για την αντιμετώπιση συγκεκριμένης κλάσεως κίνησης.
Η έλλειψη ελέγχου της άδειας εισόδου CAC (Call Admission Control) ανά ροή ή ανά σύνοδο στην είσοδο του δικτύου, μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση μεταξύ των εφαρμογών. Εάν για παράδειγμα υπάρχει αρκετό εύρος ζώνης για 10 φωνητικές κλήσεις και επιτραπεί η είσοδος σε 11, τότε και οι 11 κλήσεις θα υποφέρουν από επιδείνωση της ποιότητας υπηρεσίας.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω η αρχιτεκτονική DiffServ παρέχει διαφορετική μεταχείριση προώθησης στην κίνηση με αποτέλεσμα την επιβολή QoS ανά διαφορετικό είδος κίνησης. Η αρχιτεκτονική είναι κλιμακωτή και δεν χρειάζεται σηματοδοσία ροών και διατήρηση της κατάστασης στον πυρήνα του δικτύου. Όμως η αρχιτεκτονική DiffServ δεν παρέχει εγγυήσεις QoS εάν το μονοπάτι της κίνησης δεν διαθέτει τους πόρους που χρειάζονται ώστε να εξυπηρετηθούν οι απαιτήσεις QoS.

1.6. Περιγραφή Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement)

Η Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement) είναι επίσημος ορισμός της σχέσης μεταξύ δύο οργανισμών, όπου ο πρώτος έχει το ρόλο του παρόχου υπηρεσιών και ο δεύτερος το ρόλο του πελάτη *[Supporting SLA on IP Networks – Dinesh Verma]*. Τυπικά σε μία ΣΕΥ περιέχονται χωρίς να αποκλείονται άλλα τα κάτωθι:

- Ο τύπος και το είδος της παρεχόμενης υπηρεσίας, δηλαδή η περιγραφή της υπηρεσίας, οι ευκολίες διαχείρισης, οι υπηρεσίες δικτύου (π.χ πρόσβαση μέσω επιλεγομένου δικτύου, χρήση γραμμών δεδομένων, υπηρεσίες τείχους ασφαλείας, φιλοξενία ιστοσελίδων, φιλοξενία υπολογιστών και εφαρμογών κτλ) ή υπηρεσία βοήθειας (help desk).

- Αναμενόμενο επίπεδο υπηρεσίας καθοριζόμενο από την αξιοπιστία και την ανταπόκριση. Η αξιοπιστία θέτει όρια διαθεσιμότητας και μη της υπηρεσίας στο χρονικό πλαίσιο, ενώ η ανταπόκριση περιλαμβάνει τη συχνότητα εφαρμογής της υπηρεσίας σε κανονική ροή λειτουργίας. Η αξιοπιστία σε περιβάλλον δικτύου Η/Υ μετριέται συνήθως με το χρόνο που βρίσκεται το δίκτυο σε αδιάκοπη λειτουργία (uptime), ενώ η ανταπόκριση καθορίζεται από

τους περιορισμούς στην καθυστέρηση round-trip μεταξύ δύο τοποθεσιών του πελάτη.

- Η διαδικασία αναφοράς προβλημάτων η οποία περιγράφει τα άτομα ή το τμήμα του Παρόχου που πρέπει να ειδοποιηθεί σε περίπτωση προβλήματος, τον τρόπο ειδοποίησης (π.χ τηλεφωνικώς, με ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, FAX κτλ), τον τρόπο περιγραφής του προβλήματος (π,χ λίστα με πιθανά προβλήματα, όπου ο πελάτης τσεκάρει την περιγραφή που ταιριάζει στο πρόβλημα) και τα βήματα αντιμετώπισης των προβλημάτων. Η σαφώς καθορισμένη διαδικασία αναφοράς προβλημάτων εξασφαλίζει την συντόμευση του χρόνου αντιμετώπισης, την ελαχιστοποίηση του χρόνου από την αναφορά μέχρι την ανάληψη δράσης από τον πάροχο και τον μέγιστο χρόνο για την επαναφορά της υπηρεσίας σε κανονική ροή.

- Η διαδικασία επίβλεψης και αναφοράς του επιπέδου υπηρεσίας, όπου περιγράφονται οι υπεύθυνοι επίβλεψης και αναφοράς, το είδος των στατιστικών που θεωρούνται από τους εμπλεκόμενους στη συμφωνία νόμιμα και ενδεικτικά, η συχνότητα συλλογής στοιχείων και ο τρόπος με τον οποίο θα γίνεται η πρόσβαση στα στοιχεία επίβλεψης και αναφοράς. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται κοινώς αποδεκτά εργαλεία ή προγράμματα όπως τα εργαλεία διαχείρισης δικτύων Η/Υ.

- Οι ρήτρες για τον Πάροχο υπηρεσιών στις περιπτώσεις που παραβιάσει τα συμφωνημένα επίπεδα εξυπηρέτησης. Σε περιβάλλον Παρόχων υπηρεσιών συνήθως ο πελάτης πιστώνεται με δωρεάν χρόνο χρήσης των υπηρεσιών σε περιπτώσεις παραβίασης των επιπέδων εξυπηρέτησης. Υπάρχουν βέβαια και αυστηρότερες ρήτρες στις οποίες ο Πάροχος υποχρεούται στην καταβολή χρηματικών ποσών για τις πιθανές ζημίες που υπέστη ο πελάτης από τη διακοπή παροχής των υπηρεσιών.

- Περιπτώσεις στις οποίες το επίπεδο υπηρεσιών δεν είναι στο επιθυμητό επίπεδο εξαιτίας αδυναμιών ή σφαλμάτων του πελάτη ή/και παρεμβολής ή επίδρασης τρίτων (π.χ ΟΤΕ) ή φυσικών φαινομένων και καταστροφών (πλημμύρα, φωτιά, σεισμός, πολεμική ή τρομοκρατική ενέργεια).

Στο παράρτημα Α παρατίθεται μια τυπική Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσιών για υπηρεσίες ΕΙΔ σε τεχνολογίες Frame Relay και Lan2Lan μαζί με τα σχόλια του Πελάτη.

Από τα περιεχόμενα της συμφωνίας επιπέδου υπηρεσιών προκύπτει ότι περιέχει τεχνικά, νομικά και οικονομικά στοιχεία. Τα τεχνικά στοιχεία αναφέρονται σε αδιάκοπη λειτουργία, ανταπόκριση, διαθεσιμότητα και υπηρεσία. Υπάρχει επομένως μία σχέση μεταξύ της Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσιών που επιθυμεί ο Πελάτης και της Ποιότητας Υπηρεσίας του Δικτύου του Παρόχου:

Συνεπώς σε τεχνικό επίπεδο εάν η ποιότητα υπηρεσίας που επιθυμεί ο πελάτης είναι QoS, με δεδομένο ότι το δίκτυο του Παρόχου ή των Παρόχων μπορεί να την υποστηρίξει, τότε ορίζεται η Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας μεταξύ του Παρόχου και του Πελάτη ως :

SLA= f : Πάροχος $\rightarrow$ Πελάτης = F(QoS) $\Rightarrow \forall$ είδος κίνησης του Πελάτη $\exists$ τουλάχιστον μια τριάδα (latency, jitter, packet_loss) με χαρακτηριστικά:

Latency = l $\leq$ t, όπου l ο χρόνος καθυστέρησης, συνήθως σε msec.
Jitter = t1 $\leq$ j $\leq$ t2 , όπου j η διακύμανση της καθυστέρησης στο δίκτυο του Παρόχου
Packet loss = pl $\leq$ k %, όπου pl το ποσοστό χαμένων πακέτων από την είσοδο στο δίκτυο του Παρόχου μέχρι την έξοδο από αυτό.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν ότι η κίνηση του Πελάτη θα περάσει μέσα από το δίκτυο του Παρόχου ή των Παρόχων και θα μεταβεί σε άλλο σημείο του ΕΙΔ του Πελάτη χωρίς μεταβολές εξ' αιτίας της κατάστασης του δικτύου. Από την τριάδα (latency, jitter, packet_loss) υπάρχουν χαρακτηριστικά που είναι συναρτήσεις της σχεδίασης του δικτύου. Για παράδειγμα η καθυστέρηση latency εξαρτάται από την αρχική σχεδίαση του δικτύου και είναι συνάρτηση του πλήθους των συνδέσμων, του πλήθους των κόμβων, της χωρητικότητας των συνδέσμων και της ισχύος των κόμβων. Η ισχύς των κόμβων αναλύεται σε ποσότητα και είδος δρομολογητών, επεξεργαστική ισχύ των δρομολογητών, μνήμες των δρομολογητών, αριθμός θυρών κτλ. Συνεπώς η καθυστέρηση είναι ένα μέγεθος προβλέψιμο κατά την σχεδίαση του δικτύου και μπορεί σε περίπτωση που οι ανάγκες του Πελάτη το επιβάλλουν να μειωθεί με τις κατάλληλες αναβαθμίσεις και προσθήκες. Τα άλλα δύο μεγέθη της τριάδας, είναι χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται δυναμικά ανάλογα με την κίνηση και τον φόρτο του δικτύου.
Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας δεν περιορίζονται στην παραπάνω τριάδα. Ανάλογα με το δίκτυο του Παρόχου ή των Παρόχων και τις απαιτήσεις του Πελάτη είναι δυνατόν να αλλάζουν, να προστίθενται και να αφαιρούνται παράγοντες ποιότητας υπηρεσίας. Στα παρακάτω κεφάλαια θα δοθούν παραδείγματα και άλλων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας.

1.7. Άλλες προτάσεις και αρχιτεκτονικές

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφούν αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί για να ελαχιστοποιήσουν τα μειονεκτήματα των αρχιτεκτονικών IntServ και DiffServ. Οι προτάσεις αυτές προέρχονται είτε από RFCs, είτε από ερευνητικές εργασίες που έχουν παρουσιαστεί σε άρθρα περιοδικών ή σε συνέδρια. Σημαντικό είναι εδώ να τονισθεί ότι όλες αυτές οι προσπάθειες γίνονται για την εξασφάλιση QoS μέσα σε ένα δίκτυο, που τελικά οδηγεί στην εξυπηρέτηση των συμφωνιών υπηρεσίας που τίθενται από τους πελάτες.

Στην RFC 2998 έχει προταθεί ο συνδυασμός των αρχιτεκτονικών IntServ και Diffserv σε μια προσπάθεια αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων και υποβάθμισης των αντίστοιχων μειονεκτημάτων των δύο αρχιτεκτονικών. Ο συνδυασμός ονομάζεται IntServ over DiffServ και η κεντρική ιδέα είναι η χρήση IntServ στα άκρα του δικτύου εκεί που δεν χρειάζεται ιδιαίτερη κλιμάκωση και η χρήση DiffServ στον πυρήνα του δικτύου εκεί που υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός συνυπαρχόντων ροών και η κλιμάκωση είναι αναγκαία. Οι δρομολογητές εισόδου είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο εισόδου (Admission Control) ξεχωριστών ροών και την αντιστοίχηση υπηρεσίας από τον τύπο κίνησης IntServ σε κλάση κίνησης DiffServ. Οι δρομολογητές του πυρήνα δεν αναγνωρίζουν ξεχωριστές ροές, αλλά κλάσεις κίνησης και μπορεί να έχουν ή να μην έχουν επίγνωση του πρωτοκόλλου RSVP.
Το εύρος ζώνης μπορεί να προβλεφθεί στατικά ή δυναμικά με τη χρήση RSVP.

Στην στατική πρόβλεψη επιπέδου υπηρεσιών το δίκτυο στον πυρήνα παρέχει ένα προκαθορισμένο σύνολο επιπέδου υπηρεσιών στους πελάτες και με στατικό τρόπο διαθέτει εύρος ζώνης ανάλογα με τα επίπεδα υπηρεσίας. Στον κάθε δρομολογητή εισόδου υπάρχει ένας πίνακας για το εύρος ζώνης που έχει προβλεφθεί για κάθε κλάση κίνησης που υποστηρίζει ο συγκεκριμένος δρομολογητής εισόδου. Με βάση τον πίνακα αυτό και την αντιστοίχηση των κλάσεων κίνησης ο δρομολογητής εισόδου δίνει ή αποτρέπει την είσοδο σε εισερχόμενες σε αυτόν ροές IntServ. Συνεπώς σε αντίθεση με την καθαρή αρχιτεκτονική DiffServ στην περίπτωση αυτή υπάρχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για τις εισερχόμενες ροές με την εξέταση της άδειας εισόδου στα σύνορα του δικτύου.
Τα μειονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι α) δεν επιτρέπει εύκολα την πρόσθεση νέων επιπέδων υπηρεσίας επειδή το εύρος ζώνης έχει προβλεφθεί στατικά και β) η αξιοποίηση του εύρους ζώνης είναι χαμηλή επειδή το εύρος ζώνης συχνά υπερπροβλέπεται για αντιμετωπίσει καταιγίδες ροών.

Στην δυναμική πρόβλεψη όταν το εύρος ζώνης για ένα συγκεκριμένο μονοπάτι δεν επαρκεί για να υποστηρίξει νέες ροές τότε ξεκινάει διαδικασία σηματοδοσίας RSVP για τη δυναμική επαναρύθμιση του εύρους ζώνης. Η σηματοδοσία γίνεται όχι για κάθε συγκεκριμένη ροή αλλά για συσσωμάτωση ροών στα όρια του δικτύου. Η διαδικασία ελέγχου εισόδου επεμβαίνει και αποτρέπει την είσοδο νέων ροών όταν δεν υπάρχει αρκετό εύρος ζώνης για να ρυθμιστεί δυναμικά.
Συνεπώς στη δυναμική πρόβλεψη της αρχιτεκτονικής IntServ over DiffServ συνυπάρχουν έλεγχος εισόδου (Admission Control), από άκρη σε άκρη κράτηση εύρους ζώνης και αναγνώριση ξεχωριστών ροών στα όρια του δικτύου και κλάσεων κίνησης στον πυρήνα του δικτύου.

Τα μειονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι δύο:
α) η συσσωμάτωση των ροών για την ελαχιστοποίηση του φόρτου σηματοδοσίας RSVP έχει κόστος στην βέλτιστη αξιοποίηση του υφιστάμενου εύρους ζώνης και
β) όταν το προβλεπόμενο εύρος ζώνης σε ένα μονοπάτι χρησιμοποιείται μόνο από μία ροή, τότε η αρχιτεκτονική χάνει τα πλεονεκτήματά της και υποβαθμίζεται σε IntServ.

Σε ερευνητικές εργασίες [*V. Elek, G. Karlsson, R. Rönngren, "Admission Control Based onEnd-to-End Measurements," INFOCOM 2000, G. Bianchi, N. Blefari-Melazzi, "A Migration Path to provide End-to-End QoS over Stateless Networks by Means of a Probing-drivenAdmission Control," Internet Draft, November 2001, M.*

Grossglauser , David N. C. Tse, "A Framework for Robust Measurement-based Admission Control," IEEE/ACM Transactionson Networking (TON), v.7 n.3, p.293-309, June 1999G. Bianchi, A. Capone, C. Petrioli, "Packet Management Techniques for Measurement Based End-to-end Admission Control in IPNetworks," KICS/IEEE Journal of Communications and Networks(special issue on QoS in Internet), July 2000]
έχει προταθεί έλεγχος εισόδου βασισμένου στα άκρα τερματισμού (EndPoint Admission Control), δηλαδή στον κόμβο εισόδου και κόμβο εξόδου του δικτύου αρχιτεκτονικής DiffServ.
Η κεντρική ιδέα της πρότασης EAC (EndPoint Admission Control) βασίζεται στην θεώρηση ότι η άδεια εισόδου μπορεί να υλοποιηθεί με τη συμμετοχή μόνο των ακραίων κόμβων στο μονοπάτι μετάδοσης. Κατά το χρόνο της συστάσεως της σύνδεσης κάθε ζεύγος αφετηρία – προορισμός εισέρχεται σε φάση ανίχνευσης του δικτύου για την επερχόμενη μετάδοση. Ο κόμβος αφετηρία στέλνει αναγνωριστικά πακέτα με τα ίδια χαρακτηριστικά που θα έχει και η πραγματική κίνηση. Άμα τη λήψη του πρώτου αναγνωριστικού πακέτου ο κόμβος προορισμού αρχίζει να κρατάει στατιστικά (π.χ χρόνος μεταξύ διαδοχικών πακέτων, ποσοστό χασίματος πακέτων) για τα ανιχνευτικά πακέτα για μια σταθερή χρονική περίοδο. Στο τέλος του χρόνου μετρήσεων ο κόμβος προορισμού αποφασίζει για την αποδοχή ή την απόρριψη της σύνδεσης βασιζόμενος στις μετρήσεις και πληροφορεί ανάλογα την αφετηρία.
Χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των αρχιτεκτονικών EAC είναι ότι επιτρέπουν μεγάλη κλιμάκωση, αφού στην διαδικασία δεν συμμετέχουν οι κεντρικοί κόμβοι. Τα μειονεκτήματα τους σύμφωνα με το *" End-to-End QoS Framework with On-Demand Bandwidth Reconfiguration" Mei Yang, Yan Huang, Jaime Kim, Meejeong Lee, Tatsuya Suda, Matsubara Daisuke, IEEE INFOCOM 2004* είναι:

- ✓ Τα στατιστικά που συλλέγει ο κόμβος προορισμού εξαρτώνται πολύ από το χρόνο των μετρήσεων. Μεγάλος χρόνος μετρήσεων οδηγεί σε καθυστέρηση της διαδικασίας αδειοδότησης εισόδου, ενώ μικρός χρόνος μετρήσεων μπορεί να οδηγήσει σε λάθος εκτίμηση για το δίκτυο, γιατί είναι δυνατό να διαφύγει η συμπεριφορά του δικτύου σε συνθήκες συμφόρησης.

- ✓ Τα ανιχνευτικά πακέτα επιβαρύνουν το φόρτο κίνησης του δικτύου και αφού έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με την επερχόμενη κίνηση μπορούν να οδηγήσουν το δίκτυο σε συμφόρηση, εμποδίζοντας υπάρχουσα κίνηση που χρησιμοποιεί τις ίδιες συμπεριφορές ανά άλμα.

Στο συνέδριο IEEE –Infocom 2004 η εργασία*" End-to-End QoS Framework with On-Demand Bandwidth Reconfiguration" των Mei Yang, Yan Huang, Jaime Kim, Meejeong Lee, Tatsuya Suda, Matsubara Daisuke, IEEE INFOCOM 2004*, προτείνει την αρχιτεκτονική ODP (On Demand QoS Path) τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

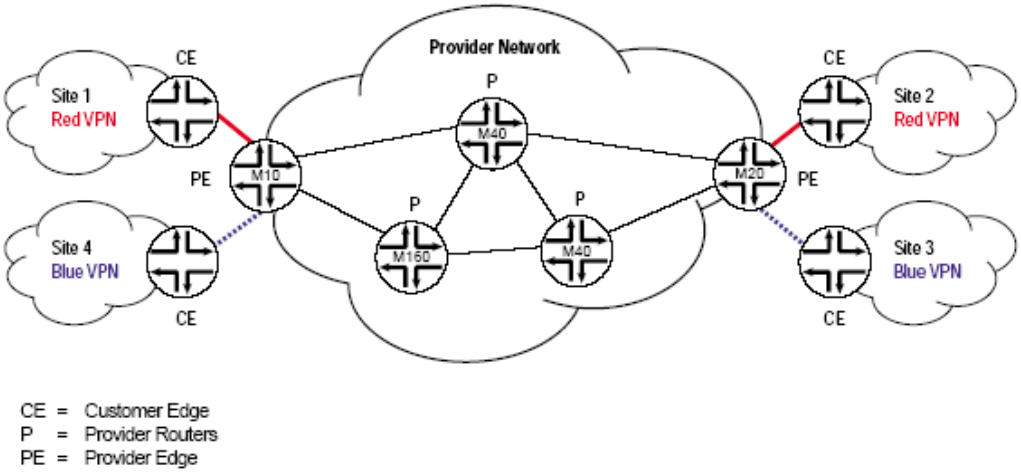
- Εφαρμογή ελέγχου εισόδου και κράτηση εύρους ζώνης από άκρη σε άκρη του δικτύου για κάθε ροή εφαρμοζόμενη στο σύνορο του δικτύου.
- Εφαρμογή κατηγοριοποίησης ανά κλάσεις στον πυρήνα του δικτύου που αποτελείται από δρομολογητές DiffServ.

Στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου κάθε φυσική σύνδεση χωρίζεται στατικά σε πολλαπλούς προβλεπόμενους συνδέσμους (ΠΣ). Κάθε ΠΣ αντιστοιχίζεται σε μία κλάση κίνησης και το σύνολο των ΠΣ είναι ο αριθμός των κλάσεων κίνησης που

μπορεί να υποστηρίξει η φυσική σύνδεση. Κάθε ΠΣ χωρίζεται με τη σειρά του σε πολλαπλές δέσμες, όπου η κάθε δέσμη υποστηρίζει ροές της ίδιας κλάσης που ξεκινούν από τον ίδιο δρομολογητή εισόδου. Συνεπώς ο δρομολογητής εισόδου αποφασίζει για την είσοδο ροών στο δίκτυο βάσει του εύρους ζώνης που απαιτούν οι δέσμες που έχει ήδη στείλει στο δίκτυο και οι δέσμες που περιμένουν για μετάδοση, χωρίς να σηματοδοτεί το μονοπάτι μέσα στο δίκτυο.
Το συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου παραχωρείται με στατικό τρόπο στους προβλεπόμενους συνδέσμους, με μακροχρόνια πρόβλεψη που γίνεται από κεντρική μονάδα διαχείρισης του δικτύου στην αρχικοποίηση του δικτύου. Σε περίπτωση που χρειαστεί βραχύχρονη αλλαγή του εύρους ζώνης γίνεται δυναμικά με την ανακατανομή του εύρους ζώνης ανάμεσα στις δέσμες (μια δέσμη που δεν καταναλώνει εύρος ζώνης, το παραχωρεί σε άλλη που το χρειάζεται).
Η πρόταση αυτή δουλεύει καλά για όσο χρόνο η αλλαγή του εύρους ζώνης εξυπηρετείται εντός των δεσμών του ίδιου ΠΣ. Βασικό πλεονέκτημα της πρότασης αυτής είναι η σημαντική μείωση του φόρτου έναντι της αρχιτεκτονικής IntServ και εγγυάται QoS από άκρη σε άκρη για ξεχωριστές ροές.
Τα μειονεκτήματα είναι ότι μπορεί να χρειαστεί να μεταφερθεί εύρος ζώνης μεταξύ των ΠΣ, αλλά και μεταξύ των φυσικών συνδέσεων ώστε να εξυπηρετηθούν συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.

2. Αρχιτεκτονική Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων με BGP/MPLS

Στο τρέχον κεφάλαιο θα παρουσιαστεί με αναλυτικό τρόπο η λειτουργία του μοντέλου των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων (ΕΙΔ), όπως προβλέπεται από την θεωρία και όπως υλοποιείται στην πράξη. Το μοντέλο λειτουργίας των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων προβλεπόμενων από τον πάροχο (ΠΠ-ΕΙΔ, Provider Provisioned VPN) περιγράφεται εκτενώς στην RFC 2547bis.
Στην RFC περιγράφονται ΕΙΔ στα οποία διάφοροι πελάτες επικοινωνούν με τα υποκαταστήματά τους ή τις τοποθεσίες όπου έχουν εξοπλισμό μέσω ενός Παρόχου Υπηρεσιών και όχι απ' ευθείας με τη δημιουργία ΠΙΔ πάνω από αποκλειστικής χρήσεως γραμμών δεδομένων. Σύμφωνα με τη RFC 2547bis ορίζεται ότι ένα ΕΙΔ είναι ένα σύνολο πολιτικών που ελέγχουν τη συνδεσιμότητα μεταξύ ενός συνόλου τοποθεσιών. Μια τοποθεσία πελάτη συνδέεται στο δίκτυο υπηρεσιών του Παρόχου με μία ή περισσότερες θύρες διασύνδεσης, όπου σε κάθε τέτοια θύρα αντιστοιχίζεται από τον Πάροχο ένας πίνακας δρομολόγησης ΕΙΔ. Στο πλαίσιο της RFC 2547 ο πίνακας δρομολόγησης ονομάζεται πίνακας δρομολόγησης και προώθησης ΕΙΔ (VPN routing and forwarding table – VRF). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα δομικά στοιχεία (CE-Costumer Edge, PE-Provider Edge, P-Provider router) ενός ΠΠ-ΕΙΔ τεχνολογίας BGP/MPLS, τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.



Customer Edge (CE) – Άκρο Πελάτη (ΑΠΕ)

Το δομικό στοιχείο Άκρο Πελάτη, ΑΠΕ, παρέχει πρόσβαση των τοποθεσιών του πελάτη στο δίκτυο του Παρόχου πάνω από σύνδεσμο δεδομένων σε ένα ή σε περισσότερους δρομολογητές Άκρου Παρόχου (ΑΠΑ). Χρησιμοποιείται ο γενικός όρος τοποθεσία αντί του κόμβου Πελάτη για να δηλώσει ότι πέρα από κάθε άκρο Πελάτη μπορεί να βρίσκεται ένα άλλο δίκτυο με δικά του δομικά στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο μπορεί να κλιμακωθεί περαιτέρω. Τυπικά το στοιχείο ΑΠΕ είναι ένας δρομολογητής IP που στηρίζει τη γειτονικότητα με τους απ' ευθείας συνδεμένους δρομολογητές ΑΠΑ (φυσικά το στοιχείο ΑΠΕ, μπορεί να είναι υπολογιστής ή μεταγωγέας). Ο σύνδεσμος δεδομένων στην γενική περίπτωση είναι μια γραμμή διασύνδεσης υλοποιημένη σε οποιοδήποτε μέσο (ενσύρματη, ασύρματη κτλ). Αφού συσταθεί η γειτονικότητα ο δρομολογητής ΑΠΕ, γνωστοποιεί τις τοπικές

δρομολογήσεις του ΕΙΔ στο δρομολογητή ΑΠΑ και μαθαίνει απομακρυσμένες δρομολογήσεις ΕΙΔ από τον δρομολογητή ΑΠΑ.

Provider Edge (PE) – Άκρο Παρόχου (ΑΠΑ)

Οι δρομολογητές ΑΠΑ ανταλλάσσουν πληροφορία με δρομολογητές ΑΠΕ με τη χρήση στατικής δρομολόγησης ή δυναμικής δρομολόγησης μέσω πρωτοκόλλων όπως RIPv.2, OSPF ή EGBP. Οι δρομολογητές ΑΠΑ κρατούν πληροφορίες δρομολόγησης μόνο για τα ΕΙΔ στα οποία είναι απ' ευθείας συνδεδεμένοι. Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει κλιμάκωση του μοντέλου RFC 2547, γιατί εξαλείφει την ανάγκη διατήρησης όλων των δρομολογήσεων για όλα τα ΕΙΔ του Παρόχου σε κάθε δρομολογητή ΑΠΑ. Συνεπώς σε αυτό το μοντέλο οι δρομολογητές που βρίσκονται στα άκρα του Παρόχου δεν επιβαρύνονται με την συνολική γνώση της δρομολόγησης όλων των Πελατών.

Κάθε δρομολογητής ΑΠΑ διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF για κάθε απ' ευθείας συνδεδεμένη τοποθεσία. Κάθε σύνδεση πελάτη (όπως Frame Relay, ATM PVC και VLAN) αντιστοιχίζεται σε έναν καθορισμένο πίνακα VRF. Συνεπώς υπάρχει αντιστοίχηση θύρας ΑΠΑ και όχι τοποθεσίας με συγκεκριμένο VRF και μάλιστα μπορούν περισσότερες από μία θύρες να αντιστοιχούν σε μοναδικό VRF. Αυτό γίνεται γιατί η τοποθεσία του Πελάτη μπορεί να συνδέεται με περισσότερους του ενός συνδέσμους με το δίκτυο του Παρόχου, άρα χρησιμοποιούνται περισσότερες θύρες. Η δρομολόγηση όμως αυτών των θυρών αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο Πελάτη και άρα μπορεί να αποθηκευτεί στον συγκεκριμένο για αυτόν τον Πελάτη πίνακα VRF. Οι δρομολογητές ΑΠΑ έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν πολλαπλούς πίνακες προώθησης με αποτέλεσμα να υποστηρίζεται ο διαχωρισμός και η απομόνωση της πληροφορίας δρομολόγησης για κάθε ΕΙΔ.

Συνεπώς ενώ το Άκρο Πελάτη είναι μοναδικό και χαρακτηρίζει τον κάθε Πελάτη, το Άκρο Παρόχου δεν συνδέει αποκλειστικά έναν και μόνο Πελάτη, αλλά έχει την δυνατότητα να συνδέει περισσότερους του ενός Πελάτη. Το Άκρο Παρόχου αντιστοιχεί στην γενικότερη μορφή στο σημείο παρουσίας (PoP, Point of Presence) του Παρόχου, όπου καταλήγουν οι γραμμές διασύνδεσης των Πελατών που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφικά περιοχή. Η εξυπηρέτηση ενός Άκρου Παρόχου μπορεί να γίνει τόσο από έναν δρομολογητή, όσο και από φάρμα δρομολογητών που είναι επιφορτισμένοι με την διασύνδεση των Πελατών στο δίκτυο του Παρόχου.

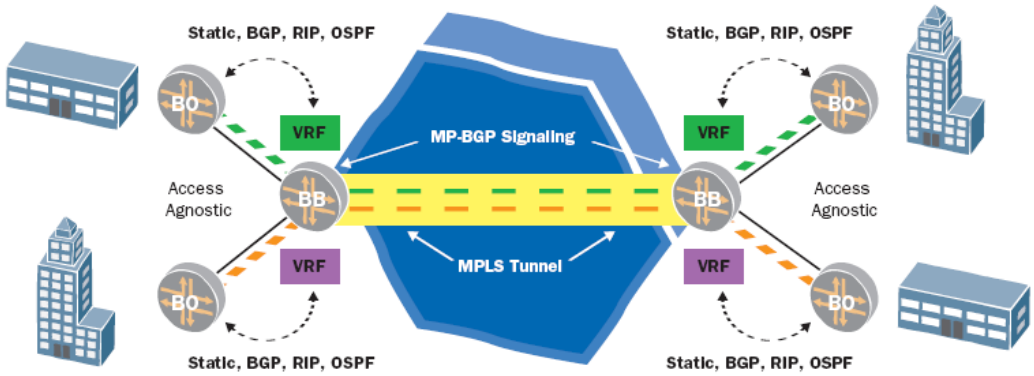
Η λειτουργία του δρομολογητή ΑΠΑ είναι ως εξής:

Ο δρομολογητής ΑΠΑ μαθαίνει δρομολογήσεις από τους δρομολογητές ΑΠΕ και στη συνέχεια ανταλλάσσει πληροφορίες δρομολόγησης με άλλους δρομολογητές ΑΠΑ με την χρήση, κάποιου πρωτοκόλλου δρομολόγησης όπως π.χ το IBGP. Επίσης οι δρομολογητές ΑΠΑ μπορούν να διατηρήσουν συνόδους δρομολόγησης IBGP σε ανακλαστήρες δρομολόγησης σαν εναλλακτική λύση έναντι του πλήρους πλέγματος IBGP (full mesh IBGP). Η ανάπτυξη ανακλαστήρων δρομολόγησης βελτιώνει ακόμη περισσότερο την κλιμάκωση του μοντέλου RFC 2547, γιατί απαλείφει την ανάγκη διατήρησης όλων των δρομολογήσεων σε μοναδικό στοιχείο δικτύου. Με τη χρήση του πρωτοκόλλου MPLS για τη κίνηση δεδομένων στο δίκτυο κορμού του Παρόχου ο δρομολογητής εισόδου ΑΠΑ, λειτουργεί ως Δρομολογητής Μεταγωγής Ετικετών (Label Switch Router - LSR) εισόδου και αντιστοίχως ο δρομολογητής εξόδου ΑΠΑ, λειτουργεί ως Δρομολογητής Μεταγωγής Ετικετών εξόδου.

Provider Router (P) – Δρομολογητής Παρόχου (Π)

Ως δρομολογητής Παρόχου ορίζεται οποιοσδήποτε δρομολογητής στο δίκτυο του Παρόχου που δεν συνδέεται σε δρομολογητές Πελατών ΑΠΕ. Οι δρομολογητές Π λειτουργούν στην περίπτωση του MPLS σαν ενδιάμεσοι δρομολογητές μεταγωγής ετικετών όταν προωθούν ΕΙΔ κίνηση μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΑ. Επειδή κίνηση προωθείται στο δίκτυο κορμού με τη χρήση στοίβας ετικετών δύο επιπέδων στο πλαίσιο του MPLS, οι δρομολογητές Π απαιτείται να διατηρούν δρομολογήσεις μόνο προς τους δρομολογητές ΑΠΑ. Δεν απαιτείται να διατηρούν συγκεκριμένη πληροφορία δρομολόγησης ΕΙΔ για κάθε τοποθεσία πελάτη με αποτέλεσμα την ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία του μοντέλου.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω έχουμε το παρακάτω γενικό σχήμα πρωτοκόλλων σε κάθε σημείο ενός τυπικού ΕΙΔ επιπέδου 3, συμφώνου προς RFC 2547bis:



Στο σχήμα αυτό σκόπιμα έχουν απαλειφθεί οι δρομολογητές Π και παρουσιάζονται μόνο δρομολογητές ΑΠΑ (BB) και δρομολογητές ΑΠΕ (BO), δηλαδή δρομολογητές στους οποίους γίνεται μεταγωγή ετικετών MPLS και δρομολογητές στους οποίους δεν γίνεται μεταγωγή ετικετών MPLS. Χαρακτηριστικό του παραπάνω σχήματος είναι η ενσωμάτωση δρομολογήσεων από άλλα πρωτόκολλα στους πίνακες VRF. Οι δρομολογήσεις αυτές όπως ειπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι απολύτως διάφανες για τον πυρήνα του Παρόχου.

2.1. Μοντέλο Λειτουργίας

Σε ένα BGP/MPLS ΕΙΔ υπάρχουν δύο θεμελιώδεις ροές κίνησης, μία για τα δεδομένα και μία δεύτερη για τον έλεγχο της κίνησης:

Η ροή δεδομένων χρησιμοποιείται για την προώθηση της κίνησης του πελάτη.

Η ροή ελέγχου της κίνησης χρησιμοποιείται για τη διανομή της δρομολόγησης ΕΙΔ και για τη σύσταση των Μονοπατιών Μεταγωγής Ετικετών (MME) LSP (Label Switched Path).

Η ροή ελέγχου της κίνησης είναι γνωστή επίσης και ως πληροφορία ή κίνηση δρομολόγησης. Σε κάθε δίκτυο πρέπει πάντα να υπάρχει ένα ελάχιστο εύρος ζώνης αφιερωμένο στην ροή ελέγχου.

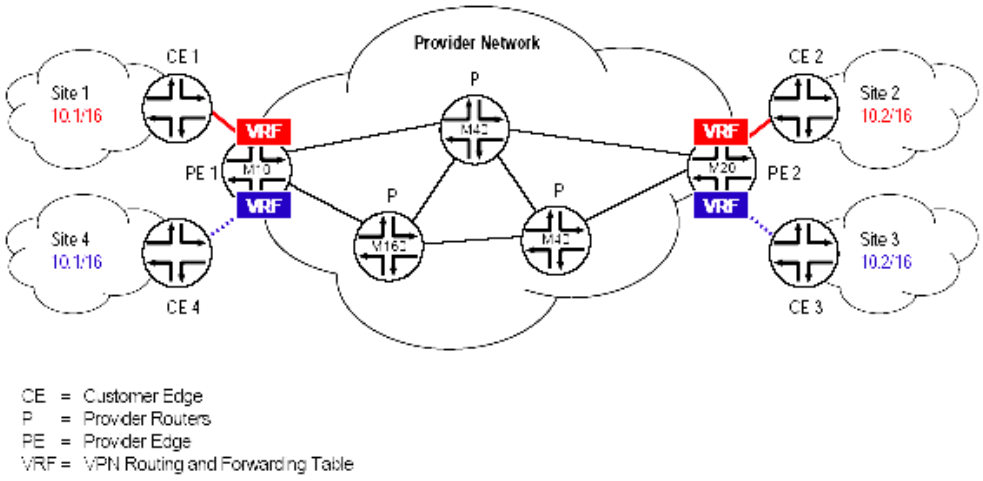
2.1.1. Ροή Ελέγχου

Η ροή ελέγχου σε ένα ΕΙΔ βασισμένο σε BGP/MPLS αποτελείται από δύο υπορροές:

- Η πρώτη υπορροή ελέγχου είναι υπεύθυνη για την ανταλλαγή πληροφορίας δρομολόγησης μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΑ και ΑΠΕ στις παρυφές του δικτύου κορμού του Παρόχου και για την ανταλλαγή πληροφορίας δρομολόγησης μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΑ που βρίσκονται συνδεδεμένοι στο δίκτυο του Παρόχου.

- Η δεύτερη υπορροή ελέγχου είναι υπεύθυνη για τη σύσταση των Μονοπατιών Μεταγωγής Ετικετών LSP, διαμέσου του δικτύου κορμού του Παρόχου, μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΑ.

Έστω το ακόλουθο παράδειγμα δικτύου



Το δίκτυο Παρόχου είναι δίκτυο υπηρεσιών ΕΙΔ που βασίζεται σε BGP/MPLS για την διασύνδεση των πελατών. Στο απλοποιημένο δίκτυο του παραδείγματος υπάρχουν δύο δρομολογητές ΑΠΑ που συνδέονται σε τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες πελατών. Η συνδεσιμότητα των τοποθεσιών ακολουθεί τις παρακάτω πολιτικές:

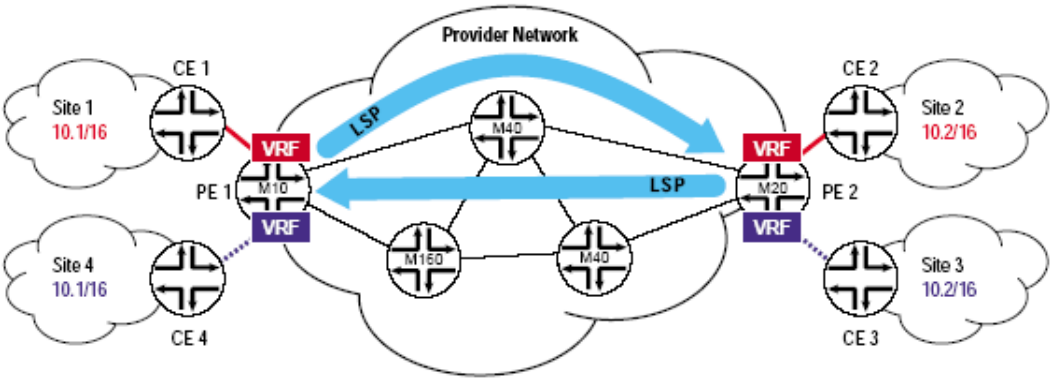
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 1 (site 1) μπορεί να επικοινωνήσει με κάθε υπολογιστή στην τοποθεσία 2 (site 2).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 2 (site 2) μπορεί να επικοινωνήσει με κάθε υπολογιστή στην τοποθεσία 1 (site 1).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 3 (site 3) μπορεί να επικοινωνήσει με κάθε υπολογιστή στην τοποθεσία 4 (site 4).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 4 (site 4) μπορεί να επικοινωνήσει με κάθε υπολογιστή στην τοποθεσία 3 (site 3).

2.1.2. Πληροφορία Δρομολόγησης

Στον δρομολογητή ΑΠΑ1 υπάρχουν δύο πίνακες δρομολόγησης και προώθησης, ο VRF Red και ο VRF Blue. Ο δρομολογητής ΑΠΑ1 έχει ρυθμιστεί να σχετίζει τον πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF Red με τη διεπαφή ή την υποδιεπαφή πάνω από την οποία μαθαίνει δρομολογήσεις από το δρομολογητή ΑΠΕ1. Συνοπτικά η ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης γίνεται ως εξής:
Όταν ο δρομολογητής ΑΠΕ1 ανακοινώνει δρομολόγηση για το πρόθεμα IP διευθύνσεων 10.1/16 στον δρομολογητή ΑΠΑ1, τότε ο ΑΠΑ1 εισάγει στον πίνακα δρομολογήσεων μια τοπική δρομολόγηση για το πρόθεμα 10.1/16 στον πίνακα VRF Red. Πριν ανακοινώσει περαιτέρω τη νέα δρομολόγηση ο ΑΠΑ1 επιλέγει μια ετικέτα MPLS (π.χ 222) από το σύνολο των διαθέσιμων ετικετών για τη συγκεκριμένη δρομολόγηση και τοποθετεί τη διεύθυνση βρόγχου (loopback) του σαν το επόμενο άλμα (hop) BGP για τη δρομολόγηση.
Στη συνέχεια ο ΑΠΑ1 ανακοινώνει τη δρομολόγηση για το πρόθεμα 10.1/16 στον ΑΠΑ2 με τη χρήση πρωτοκόλλου IBGP. Η RFC 2547 bis υποστηρίζει επικαλυπτόμενο εύρος διευθύνσεων. Ο όρος επικαλυπτόμενο εύρος διευθύνσεων χρησιμοποιείται για να δείξει ότι το ίδιο εύρος διευθύνσεων μπορεί να αποδοθεί σε διαφορετικά, απομονωμένα μεταξύ τους ΕΙΔ. Οι διευθύνσεις ακολουθούν την ιδιωτική διευθυνσιοδότηση σύμφωνα με RFC 1918. Ο διαχωρισμός του επικαλυπτόμενου εύρους διευθύνσεων γίνεται με την χρήση διακεκριμένης δρομολόγησης και της οικογένειας διευθύνσεων VPN-IPv4. Ο μηχανισμός διευθυνσιοδότησης σύμφωνα με VPN-IPv4 αναλύεται στην παράγραφο 2.2.1.
Ο περιορισμός της διανομής της πληροφορίας δρομολόγησης μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΑ γίνεται με τη χρήση φιλτραρίσματος βασισμένου στα κατηγορήματα επαυξημένης κοινότητας BGP(BGP extended community attributes). Τα κατηγορήματα επαυξημένης κοινότητας BGP αναλύονται στην παράγραφο 2.3.1.

2.1.3. Σύσταση Μονοπατιού Μεταγωγής Ετικετών (Label Switched Path)

Το Μονοπάτι Μεταγωγής ετικετών (ΜΜΕ) συστήνεται μεταξύ του δρομολογητή ΑΠΑ που μαθαίνει τη νέα δρομολόγηση από τον αντίστοιχό του ΑΠΕ στον ένα άκρο του δικτύου του Παρόχου και του δρομολογητή ΑΠΑ που ανακοινώνει τη νέα δρομολόγηση στον αντίστοιχό του ΑΠΕ στο άλλο άκρο του δικτύου του Παρόχου:



Το πρωτόκολλο σύστασης και υποστήριξης των MME μέσα στο δίκτυο του Παρόχου μπορεί να είναι το Πρωτόκολλο Διαμονής Ετικετών (Label Distribution Protocol – LDP) ή το Πρωτόκολλο Κρατήσεων Πόρων (Resource Reservation Protocol – RSVP). Η απόφαση για το πρωτόκολλο αυτό εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του δικτύου του Παρόχου, αλλά και από το είδος της κίνησης που θα μετακινηθεί μεταξύ των τοποθεσιών του Πελάτη.

Τα δύο αυτά πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται συνήθως για διαφορετικούς σκοπούς. Στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη σύστασης ενός MME για κίνηση best-effort, χωρίς ανάγκες ποιότητας υπηρεσίας χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο LDP και το MME ακολουθεί το δρόμο της κίνησης best-effort.

Στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη σύστασης ενός MME με συγκεκριμένο εύρος ζώνης, ή γίνεται χρήση traffic engineering, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο RSVP για να οριστεί ένα συγκεκριμένο μονοπάτι μέσα στο δίκτυο του Παρόχου. Τα MME που βασίζονται σε RSVP υποστηρίζουν καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και συγκεκριμένους περιορισμούς traffic engineering.

Ως traffic engineering ορίζεται η διαδικασία επιλογής των μονοπατιών που θα ακολουθήσει η κίνηση μέσα στο δίκτυο. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει συγκεκριμένους σκοπούς, όπως για παράδειγμα να μην υπάρχουν στο δίκτυο σύνδεσμοι ή δρομολογητές υπερφορτωμένοι ή υποφορτωμένοι. Σε πιο πρακτικό επίπεδο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί traffic engineering από ένα Πάροχο για τον έλεγχο και καθορισμό του μονοπατιού που ακολουθούν τα πακέτα φωνής μέσα σε ένα δίκτυο, ώστε να τηρούνται συγκεκριμένα επίπεδα καθυστέρησης και χασίματος πακέτων. Συνεπώς η εφαρμογή traffic engineering μεταξύ αποστολέα και λήπτη δημιουργεί ένα μονοπάτι υποκείμενο σε ένα σύνολο περιορισμών και προωθεί την κίνηση πάνω σε αυτό το μονοπάτι. Για τους μηχανισμούς Traffic Engineering και την χρήση τους σε δίκτυα MPLS αναφέρεται αναλυτικά το κεφάλαιο 4.

Η σωστή λειτουργία περιβάλλοντος πολλαπλών κατασκευαστών επιβάλλει την υποστήριξη τουλάχιστον του LDP σε όλους τους δρομολογητές ΑΠΑ και Π.

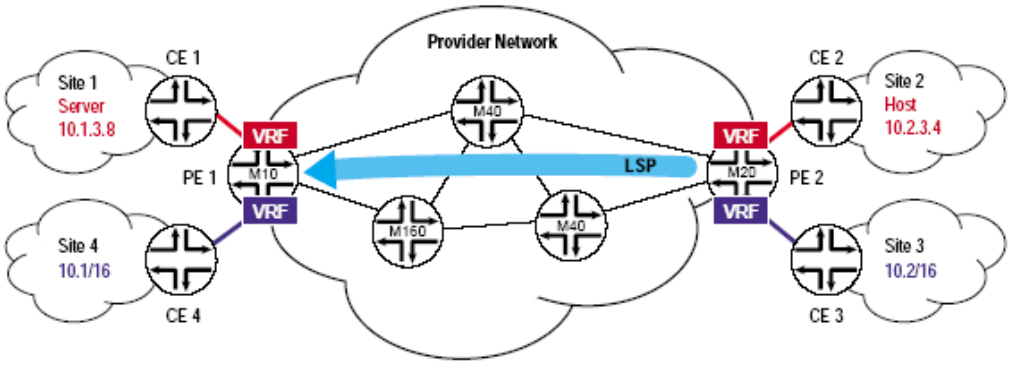
Εάν ο Πάροχος υποστηρίζει το LDP, τότε δημιουργείται πλήρες πλέγμα (full mesh) MME στο δίκτυο κορμού για να υποστηριχτεί η συνδεσιμότητα μεταξύ των παρυφών του δικτύου Παρόχου (ΑΠΑ προς ΑΠΑ).

Εάν ο Πάροχος επιλέξει το RSVP, τότε είναι προφανές ότι τα MME RSVP έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα από τα MME LDP. Υπάρχει η δυνατότητα για κάποιο ζεύγος δρομολογητών ΑΠΑ να συσταθούν τόσο MME-RSVP, όσο και MME-LDP και ανάλογα με το είδος της κίνησης ή το

συμβόλαιο υπηρεσίας (SLA) να ακολουθείται ο ανάλογος δρόμος μέσα στο δίκτυο του Παρόχου. Σαφώς πέραν από τη δυνατότητα σύστασης μοναδικού MME μεταξύ ΑΠΑ, υπάρχει η δυνατότητα σύστασης πολλαπλών MME το καθένα με διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας.

2.1.4. Ροή Δεδομένων

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ροή των δεδομένων ΕΙΔ από τον υπολογιστή 10.2.3.4 της τοποθεσίας 2 στον εξυπηρετητή 10.1.3.8 της τοποθεσίας 1:



Η λειτουργία των μηχανισμών ΕΙΔ είναι η ακόλουθη:

Ο υπολογιστής 10.2.3.4 προωθεί όλα τα πακέτα που προορίζονται για τον εξυπηρετητή 10.1.3.8 στην διεύθυνση που έχει ως προεπιλεγμένη πύλη (default gateway). Αυτό γίνεται από τους τυπικούς μηχανισμούς της στοίβας πρωτοκόλλων TCP/IP που υποστηρίζει το λειτουργικό σύστημα του υπολογιστή. Η διεύθυνση της προεπιλεγμένης πύλης αντιστοιχεί σε κάποια διεπαφή του δρομολογητή ΑΠΕ 2 (CE2 στο σχήμα). Ο ΑΠΕ 2 λαμβάνει το πακέτο, εξετάζει τη διεύθυνση προορισμού, ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF Red που διαθέτει και προωθεί το πακέτο στον ΑΠΑ 2 (PE2 στο σχήμα).

Ο ΑΠΑ 2 λαμβάνει το πακέτο, ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης για το VRF Red και αποκτά την ακόλουθη πληροφορία:

- ✓ Την ετικέτα (222) MPLS που έδωσε ο ΑΠΑ 1 κατά την σύσταση των MME, φάση ανταλλαγής πληροφοριών δρομολόγησης (παρ. 2.1.2).
- ✓ Τον επόμενο δρομολογητή BGP (next hop BGP) για τη δρομολόγηση που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η διεύθυνση βρόγχου (loopback) του ΑΠΑ 1.
- ✓ Την υποδιεπαφή εξόδου για το μονοπάτι MME από τον ΑΠΑ 2 στο ΑΠΑ 1.
- ✓ Την αρχική ετικέτα MPLS για το MME από ΑΠΑ 2 σε ΑΠΑ 1.

Η κίνηση δεδομένων προωθείται από τον ΑΠΑ 2 στον ΑΠΑ 1 με τη χρήση διεπίπεδης στοίβας ετικετών. Για τη κίνηση δεδομένων ΑΠΑ 2 → ΑΠΑ 1 ο δρομολογητής εισόδου για το MME είναι πλέον ο ΑΠΑ 2 και ο

δρομολογητής εξόδου για το ΜΜΕ ο ΑΠΑ 1. Πριν από την αποστολή κάθε πακέτου αυτής της ροής, ο ΑΠΑ 2 τοποθετεί στο βάθος της στοίβας ετικετών την ετικέτα 222, καθιστώντας αυτή την εσωτερική ετικέτα. Τονίζεται εδώ πως η ετικέτα αυτή εκχωρείται στον πίνακα δρομολόγησης – προώθησης VRF Red, μόλις ο ΑΠΑ 2 λαμβάνει την ανακοίνωση IGBP από τον ΑΠΑ 1 για τη δρομολόγηση προς το δίκτυο10.1 / 16.
Στη συνέχεια ο ΑΠΑ 2 τοποθετεί στην κορυφή της στοίβας ετικετών την εξωτερική ετικέτα σχετιζόμενη με το μονοπάτι ΜΜΕ προς τον ΑΠΑ 1 (που βασίζεται σε πρωτόκολλο LDP ή RSVP).
Τώρα το πρώτο πακέτο MPLS μαζί με τις ετικέτες του είναι έτοιμο για προώθηση στον πρώτο δρομολογητή Π που βρίσκεται στο ΜΜΕ ΑΠΑ 2 → ΑΠΑ 1. Οι δρομολογητές Π μετάγουν το πακέτο στο δίκτυο κορμού με βάση την εξωτερική ετικέτα. Ο τελευταίος Π του ΜΜΕ πριν τον ΑΠΑ 1, βγάζει από την στοίβα την εξωτερική ετικέτα και προωθεί το πακέτο στον ΑΠΑ 1. Στη συνέχεια ο ΑΠΑ 1, αφού λάβει το πακέτο ελέγχει και αφαιρεί την ετικέτα από τη στοίβα που είναι πλέον η 222. Από τον έλεγχο της ετικέτας ο ΑΠΑ 1 διαπιστώνει ότι ο επόμενος δρομολογητής (next hop) για το δίκτυο 10.1 / 16 είναι ο απ' ευθείας συνδεδεμένος ΑΠΕ 1. Με την αφαίρεση της ετικέτας το πακέτο είναι πλέον απλό πακέτο IPv4 και προωθείται στον ΑΠΕ 1 που με τη σειρά του το προωθεί στον εξυπηρετητή 10.1.3.8 στην τοποθεσία 1.

2.2. Πλεονεκτήματα των ΕΙΔ βασισμένων σε τεχνολογία BGP/MPLS

Η χρήση ΕΙΔ που βασίζονται σε πρωτόκολλα BGP/MPLS έχει σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία εν συντομία παρατίθενται στην συνέχεια:

Δεν υπάρχουν περιορισμοί στη χρήση διευθύνσεων IP σε κάθε ΕΙΔ. Ο πελάτης μπορεί να έχει εντελώς μοναδικό εύρος διευθύνσεων για όλο το Διαδίκτυο ή να ακολουθεί ιδιωτική διευθυνσιοδότηση. Επίσης ο Πάροχος είναι ελεύθερος να χρησιμοποιεί επικαλυπτόμενες διευθύνσεις σε διαφορετικούς πελάτες.

Οι δρομολογητές του πελάτη (ΑΠΕ) δεν ανταλλάσσουν απ' ευθείας πληροφορίες δρομολόγησης με άλλους ΑΠΕ. Συνεπώς οι πελάτες αγνοούν και δεν ασχολούνται καθόλου με τα θέματα δρομολόγησης στο δίκτυο κορμού, η οποία είναι υπευθυνότητα του Παρόχου.

Οι πελάτες δεν διαχειρίζονται ένα δίκτυο κορμού ή έστω ένα Εικονικό δίκτυο κορμού, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να έχουν διαχειριστική πρόσβαση σε δρομολογητές ΑΠΑ και Π.

Οι Πάροχοι δεν διαχειρίζονται ξεχωριστό δίκτυο κορμού ή ξεχωριστό Εικονικό δίκτυο κορμού ένα για κάθε ξεχωριστό πελάτη, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να έχουν διαχειριστική πρόσβαση σε δρομολογητές ΑΠΕ.

Οι πολιτικές που καθορίζουν εάν μια συγκεκριμένη τοποθεσία ανήκει σε ΕΙΔ πελάτη, είναι πολιτικές που καθορίζονται είτε από τον πελάτη, είτε από τον Πάροχο είτε με τη συνεργασία πελάτη – Παρόχου.

Η RFC 2547bis δεν εμποδίζει την δημιουργία BGP/MPLS ΕΙΔ που εκτείνονται σε πολλούς Παρόχους.

Οι Πάροχοι υπηρεσιών μπορούν με τη χρήση κοινής υποδομής να εξυπηρετήσουν τόσο ανάγκες σύνδεσης ΕΙΔ, όσο και ανάγκες σύνδεσης στο Διαδίκτυο.
Επιτρέπεται η χρήση κλιμακωτής και ευέλικτης ποιότητας υπηρεσίας (QoS) με τη χρήση πειραματικών bits στην επικεφαλίδα του MPLS, ή με τη χρήση traffic engineering στα MME (χρήση RSVP).

Το μοντέλο είναι ανεξάρτητο από τεχνολογίες δευτέρου επιπέδου.

Επίσης το μοντέλο RFC 2547bis λύνει αρκετά προβλήματα και προκλήσεις στη δημιουργία ΕΙΔ, όπως ακολούθως:

- Υποστήριξη επικαλυπτόμενων διευθύνσεων στον πελάτη
- Περιορισμός συνδεσιμότητας δικτύου
- Διατήρηση και ανανέωση δρομολόγησης των ΕΙΔ
- Προστασία του εύρους ζώνης στο δίκτυο κορμού και της απόδοσης των δρομολογητών ΑΠΑ.

2.2.1. Οικογένεια διευθύνσεων VPN-IPv4

Είναι γνωστό ότι το πρωτόκολλο BGP *[RFC 1771, A Border Gateway Protocol 4, Rechter and Li]* θεωρεί ότι κάθε διεύθυνση IPv4 είναι ξεχωριστή και μοναδική με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει σε πελάτες ΕΙΔ να χρησιμοποιούν επικαλυπτόμενες διευθύνσεις. Συνεπώς για να είναι δυνατή η χρήση επικαλυπτόμενων ιδιωτικών διευθύνσεων στους πελάτες (ακόμα και όταν είναι συμβατές με RFC 1918), πρέπει να χρησιμοποιηθούν μηχανισμοί μετατροπής των επικαλυπτόμενων διευθύνσεων των πελατών σε ξεχωριστές και μοναδικές διευθύνσεις στο δίκτυο κορμού.
Το ιδιωτικό εύρος ζώνης σύμφωνα με τα οριζόμενα στην RFC 1918 και τις αποφάσεις της IANA είναι:

Εύρος διευθύνσεων IP	Πλήθος διευθύνσεων IPs	Υποστήριξη κλάσεων	Χωρίς κλάσεις (CIDR blocks)
10.0.0.0- 10.255.255.255	16.777.216	single class A	10.0.0.0/8
172.16.0.0– 172.31.255.255	1.048.576	16 contiguous class Bs	172.16.0.0/12
192.168.0.0– 192.168.255.255	65.536	256 contiguous class Cs	192.168.0. 0/16

Οι μηχανισμοί μετατροπής συνδυάζουν την οικογένεια διευθύνσεων VPN-IPv4 με την εφαρμογή των επεκτάσεων του BGP4 που περιγράφονται στην *[RFC 2283, Multiprotocol Extensions for BGP4 Bates, Chandra, Katz and Rekher, 1998]*.

Στη περίπτωση του απλού BGP, όταν ο δρομολογητής μάθει δύο διαφορετικούς δρόμους για το ίδιο πρόθεμα IPv4 (όπου το πρόθεμα έχει δοθεί σε διαφορετικά ΕΙΔ), ο δρομολογητής θεωρεί ότι τα προθέματα είναι τα ίδια και καταχωρεί μόνο τη μία δρομολόγηση. Συνεπώς το ένα από τα δύο ΕΙΔ είναι πλέον απροσπέλαστο. Απαιτείται λοιπόν ένας τρόπος διαχωρισμού των προθεμάτων, ώστε ο δρομολογητής να καταχωρήσει δύο διαφορετικές δρομολογήσεις για τα δύο ΕΙΔ. Η RFC 2547 bis υποστηρίζει αυτή τη δυνατότητα με τον ορισμό της οικογένειας διευθύνσεων VPN-IPv4.
Σύμφωνα με την RFC 2547 bis μια διεύθυνση VPN-IPv4 αποτελείται από 12 bytes από τα οποία τα 8 πρώτα είναι bytes διακριτικού δρομολόγησης (RD – Route Distinguisher) και τα υπόλοιπα 4 είναι τα bytes προθέματος IP:

8 Bytes Route Distinguisher (διακριτικό δρομολόγησης)			**4 Bytes για την διεύθυνση IPv4**
Πεδίο τύπου (Type Field)	Υποπεδίο Διαχείρισης	Υποπεδίο Εκχωρημένου αριθμού (Assigned number Subfield)	Πρόθεμα διευθύνσεως IPv4
2 bytes για το πεδίο τύπου	6 bytes για το πεδίο τιμών		

Τα 8 bytes του διακριτικού δρομολόγησης (Route Distinguisher) χωρίζονται στα 2 bytes του πεδίου Τύπου (Type Field) και στα 6 bytes του πεδίου Τιμής (Value Field). Το πεδίο Τύπος καθορίζει τα μήκη των υποπεδίων Διαχείρισης (Administrator Subfield) και Εκχωρημένου Αριθμού (Assigned Number). Οι πιθανές τιμές του πεδίου τύπου είναι σήμερα 0 και 1:

Ο τύπος 0 σημαίνει ότι το υποπεδίο Διαχείρισης έχει μήκος 2 bytes και το υποπεδίο Καταχωρημένου Αριθμού έχει μήκος 4 bytes. Το υποπεδίο Διαχείρισης περιέχει τον Αριθμό Αυτόνομου Συστήματος (ASN), ο οποίος δεν πρέπει να είναι αριθμός από το ιδιωτικό εύρος αριθμών αυτόνομων συστημάτων. Το υποπεδίο Εκχωρημένου Αριθμού περιέχει μια τιμή από το αριθμητικό εύρος του Παρόχου που διαθέτει την υπηρεσία ΕΙΔ και στο οποίο έχει εκχωρηθεί ο Αριθμός Αυτόνομου Συστήματος.

Ο τύπος 1 σημαίνει ότι το υποπεδίο Διαχείρισης έχει μήκος 4 bytes και το υποπεδίο Καταχωρημένου Αριθμού έχει μήκος 2 bytes. Το υποπεδίο Διαχείρισης περιέχει μια διεύθυνση IPv4, η οποία πάλι δεν πρέπει να ανήκει στο ιδιωτικό εύρος διευθύνσεων. Το υποπεδίο Εκχωρημένου Αριθμού περιέχει μια τιμή από το αριθμητικό εύρος του Παρόχου που διαθέτει την υπηρεσία ΕΙΔ και στο οποίο έχει εκχωρηθεί ο Αριθμός Αυτόνομου Συστήματος. Μια συνήθης ρύθμιση για το τύπου 1 διαχωριστικό δρομολόγησης RD είναι η χρήση της διεύθυνσης βρόγχου (loopback) του ΑΠΑ δρομολογητή που δημιουργεί τη δρομολόγηση για τη

υποπεδίο 4 bytes της Διαχείρισης και η επιλογή ενός τοπικού αριθμού για τον ΑΠΑ για το υποπεδίο 2 bytes του Εκχωρημένου Αριθμού.

Η RFC 2547bis δεν απαιτεί να έχουν όλες οι δρομολογήσεις ενός ΕΙΔ το ίδιο διακριτικό RD και σε πραγματικές συνθήκες κάθε πίνακας VRF μέσα σε ένα ΕΙΔ μπορεί να χρησιμοποιεί το δικό του RDF. Ο Πάροχος πρέπει όμως να εξασφαλίσει ότι κάθε διακριτικό δρομολόγησης RD είναι σφαιρικά μοναδικό. Για αυτό το λόγο αποφεύγεται και δεν συστήνεται η χρήση ιδιωτικών διευθύνσεων ή ιδιωτικών ASN στα υποπεδία του διακριτικού δρομολόγησης. Η μοναδικότητα του διακριτικού δρομολόγησης επιτρέπει σε κάθε Πάροχο να διαχειρίζεται το εύρος διευθύνσεων που διαθέτει και να δημιουργεί ξεχωριστές διευθύνσεις VPN-IPv4, χωρίς να έρχεται σε σύγκρουση με άλλους Παρόχους σε επίπεδο διευθύνσεων. Συνεπώς η χρήση εντελώς μοναδικών διακριτικά δρομολόγησης υποστηρίζει τα παρακάτω:

- Δημιουργία ξεχωριστών δρομολογήσεων για το ίδιο πρόθεμα.
- Δημιουργία πολλαπλών μοναδικά ξεχωριστών δρομολογήσεων για το ίδιο σύστημα.
- Χρήση πολιτικών για την απόφαση ποια πακέτα ακολουθούν την κάθε δρομολόγηση.

Επίσης προκειμένου να αποφευχθούν παρανοήσεις σχετικά με το σχήμα διευθύνσεων VPN-IPv4 είναι ανάγκη να τονισθούν τα ακόλουθα:

- Οι διευθύνσεις VPN-IPv4 χρησιμοποιούνται μόνο στο δίκτυο του Παρόχου.
- Οι πελάτες ΕΙΔ αγνοούν την ύπαρξη των διευθύνσεων VPN- IPv4.
- Οι διευθύνσεις VPN-IPv4 μεταφέρονται σε πρωτόκολλα δρομολόγησης που τρέχουν στο δίκτυο κορμού του Παρόχου.
- Οι διευθύνσεις VPN-IPv4 δεν μεταφέρονται στις επικεφαλίδες της κίνησης δεδομένων ΕΙΔ που περνά τα όρια του δικτύου κορμού του Παρόχου.

2.3. Επεκτάσεις για την υποστήριξη του Multiprotocol BGP (MP-BGP extensions)

Το πρωτόκολλο BGP στην αρχική του μορφή σχεδιάστηκε για να μεταφέρει μόνο διευθύνσεις της οικογένειας IPv4. Συνεπώς για τη μεταφορά και άλλου είδους διευθύνσεων (π.χ IPv6, IPX, VPN-IPv4 κτλ) χρειάζεται επέκταση στο πρότυπο BGP. Οι επεκτάσεις αυτές περιγράφονται στην IETF RFC 2283 του 1998 και αναθεωρήθηκαν στην IETF RFC 2858 του 2000. Με βάση αυτές τις RFC έγινε δυνατό η μεταφορά διαφόρων πρωτοκόλλων επιπέδου δικτύου (επίπεδο 3). Συνεπώς για την εφαρμογή των ΕΙΔ βασισμένων σε πρωτόκολλα BGP/MPLS με διανομή διευθύνσεων της νέας οικογένειας VPN-IPv4, επιβάλλεται η υποστήριξη των επεκτάσεων MP-BGP.
Σε πραγματικό περιβάλλον πριν την ανταλλαγή πληροφορίας δρομολογήσεων για διευθύνσεις VPN-IPv4 μεταξύ των ομότιμων δρομολογητών BGP (BGP peers), γίνεται διαπραγμάτευση για να διαπιστωθεί η υποστήριξη των επεκτάσεων MP-BGP. Σε περίπτωση που κάποιος από τους δρομολογητές δεν υποστηρίζει

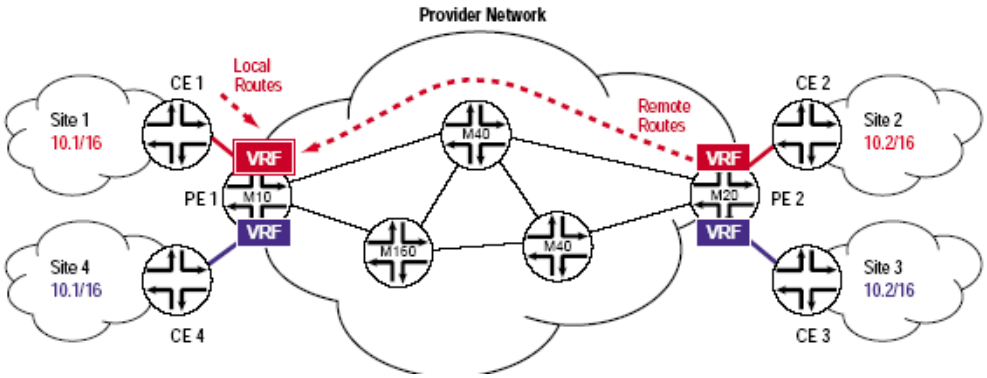
επεκτάσεις MP-BGP, η επικοινωνία συνεχίζεται με απλό BGP, γιατί το MP-BGP είναι συμβατό με το απλό BGP. Η περίπτωση όπου ένας από τους ομότιμους δρομολογητές δεν υποστηρίζει MP-BGP, αλλά απλό BGP μπορεί να συμβεί μόνο στις παρυφές του δικτύου Παρόχου, με συνήθη ύποπτο τον δρομολογητή του Πελάτη ΑΠΕ.

2.3.1. Περιορισμός της συνδεσιμότητας δικτύου

Ο περιορισμός της συνδεσιμότητας δικτύου χρησιμοποιείται από τους Παρόχους για την αποτελεσματικό έλεγχο της κίνησης δεδομένων των πελατών ΕΙΔ. Ο περιορισμός βασίζεται στη θεμελιώδη παραδοχή για τη δρομολόγηση IP που αναφέρει ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει εξ ορισμού (default) δρομολόγηση σε ένα πίνακα δρομολογήσεων ενός δρομολογητή τότε κάθε προορισμός (δίκτυο) που δεν περιέχεται στον πίνακα δεν μπορεί να προσπελαστεί από το συγκεκριμένο δρομολογητή. Οι μηχανισμοί που περιορίζουν την ροή της πληροφορίας δρομολόγησης στο μοντέλο ΕΙΔ βασισμένο σε BGP/MPLS είναι δύο:

- Πολλαπλοί πίνακες προώθησης
- Κατηγορήματα επεκταμένης κοινότητας BGP

Κάθε δρομολογητής που βρίσκεται στις παρυφές του δικτύου του Παρόχου (ΑΠΑ) διατηρεί έναν ή περισσότερους πίνακες δρομολόγησης / προώθησης για κάθε τοποθεσία που είναι γνωστοί ως VRF (VPN routing and forwarding table). Κατά τη ρύθμιση ενός ΑΠΑ δρομολογητή, καθένας από τους πίνακες VRF σχετίζεται με μια ή περισσότερες θύρες (διεπαφές/υποδιεπαφές) που συνδέουν τον ΑΠΑ δρομολογητή απ' ευθείας στους πελάτες. Στην περίπτωση που μια τοποθεσία περιέχει υπολογιστές που ανήκουν σε πολλαπλά ΕΙΔ ο πίνακας VRF για τη συγκεκριμένη τοποθεσία περιέχει δρομολογήσεις για όλα τα ΕΙΔ στα οποία ανήκει η τοποθεσία.
Εάν υποτεθεί ότι ένας δρομολογητής ΑΠΑ λαμβάνει πακέτο πελάτη που εξέρχεται από έναν απ' ευθείας συνδεδεμένο δρομολογητή ΑΠΕ, τότε με βάση την υποδιεπαφή λήψης του πακέτου, καθορίζεται ο σχετικός πίνακας VRF για την τοποθεσία πάνω στον οποίο γίνεται έλεγχος για να δρομολογηθεί σωστά το πακέτο στη διεύθυνση προορισμού. Η υποστήριξη πολλαπλών πινάκων προώθησης στους δρομολογητές ΑΠΑ κάνει εύκολο το διαχωρισμό της πληροφορίας δρομολόγησης για κάθε ΕΙΔ.
Για την κατανόηση των παραπάνω έστω το παρακάτω δίκτυο υπηρεσιών ΕΙΔ:



Ο ΑΠΑ 1 (PE1 στο σχήμα) μαθαίνει τις δρομολογήσεις για το ΕΙΔ Red από τον ΑΠΕ 1 (CE1 στο σχήμα) και τις καταχωρεί στον πίνακα VRF Red.
Οι απομακρυσμένες δρομολογήσεις μαθαίνονται μέσω πρωτοκόλλου MP-IGMP από άλλους δρομολογητές ΑΠΑ που συνδέονται απ' ευθείας με τοποθεσίες που ανήκουν στο ΕΙΔ Red.
Ο ΑΠΑ 1 μαθαίνει τις δρομολογήσεις για την τοποθεσία 2 (site 2) από τον ΑΠΑ 2 (PE2 στο σχήμα) που τις έχει μάθει από τον ΑΠΕ 2 (CE2 στο σχήμα) και τις τοποθετεί στον πίνακα VRF Red. Η εισαγωγή των απομακρυσμένων δρομολογήσεων γίνεται διαχειριστικά με τη χρήση των επεκτάσεων BGP για τα κατηγορήματα της κοινότητας της δρομολόγησης στόχου.
Οι τοπικές δρομολογήσεις στον ΑΠΑ 1 για το ΕΙΔ Blue της τοποθεσίας 4 (site 4) και οι απομακρυσμένες δρομολογήσεις του ΕΙΔ Blue της τοποθεσίας 3 (site 3) δεν σχετίζονται με το ΕΙΔ Red και κατά συνέπεια δεν εισάγονται στον πίνακα VRF Red, αλλά στον ξεχωριστό πίνακα VRF Blue.

Τα πλεονεκτήματα υποστήριξης πολλαπλών πινάκων προώθησης είναι τα ακόλουθα:

- Διαφορετικές τοποθεσίες Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων που εξυπηρετούνται από τον ίδιο δρομολογητή ΑΠΑ, μπορούν να έχουν επικαλυπτόμενες διευθύνσεις.
- Η επιλογή συγκεκριμένου πίνακα προώθησης και δρομολόγησης VRF για την κίνηση δεδομένων γίνεται βάσει πολιτικής (αντιστοίχηση υποδιεπαφής δρομολογητή με VRF) και όχι βάσει του περιεχομένου του πακέτου.
- Οι πολλαπλοί πίνακες προώθησης εμποδίζουν την επικοινωνία μεταξύ τοποθεσιών που δεν έχουν κοινά ΕΙΔ.
- Η κλιμάκωση είναι επαυξημένη γιατί δεν χρειάζεται οι ΑΠΑ δρομολογητές να διατηρούν αποκλειστικό πίνακα VRF για όλα τα ΕΙΔ του Παρόχου. Ο κάθε δρομολογητής ΑΠΑ απαιτείται να διατηρεί ένα πίνακαVRF μόνο για την καθεμία, απ' ευθείας συνδεδεμένη σε αυτόν τοποθεσία.
- Το δίκτυο κορμού μπορεί να διατηρεί πολλαπλές διαφορετικές δρομολογήσεις για το ίδιο σύστημα, όπου η δρομολόγηση για ένα πακέτο καθορίζεται από την τοποθεσία από την οποία προήλθε το πακέτο μπαίνοντας στο δίκτυο κορμού του Παρόχου.

Η διανομή της πληροφορίας δρομολόγησης περιορίζεται επίσης με τη χρήση των κατηγορημάτων επεκταμένης κοινότητας BGP(BGP extended community attributes), τα οποία μεταφέρονται στα μηνύματα BGP. Τα κατηγορήματα κατατάσσουν την κάθε δρομολόγηση σε συγκεκριμένη ομάδα δρομολογήσεων, η οποία ομάδα θα λάβει την ίδια μεταχείριση σύμφωνα με την πολιτική δρομολόγησης. Κάθε επεκταμένη κοινότητα BGP πρέπει να είναι καθ' όλο το δίκτυο μοναδική (περιέχει μοναδική δημόσια IP ή αριθμό ASN) και χρησιμοποιείται από μόνο ένα ΕΙΔ. Εντούτοις ένα συγκεκριμένο ΕΙΔ εντός Παρόχου μπορεί να κάνει χρήση πολλαπλών καθ' όλο το δίκτυο μοναδικών επεκταμένων κοινοτήτων BGP για να βοηθήσει στον έλεγχο της διατήρησης πληροφορίας δρομολόγησης.
Τα Εικονικά Ιδιωτικά δίκτυα βασισμένα σε BGP/MPLS χρησιμοποιούν τις επεκταμένες κοινότητες BGP με μήκος 32 bit, αντί για τις συμβατικές

κοινότητες των 16 bit του BGP. Συνεπώς υπάρχει επαυξημένη κλιμάκωση, γιατί αυξάνεται ο αριθμός των κοινοτήτων που μπορεί να υποστηρίξει ο Πάροχος. Επειδή κάθε κατηγόρημα περιέχει τον μοναδικό στο Διαδίκτυο αριθμό αυτόνομου συστήματος (ASN) του Παρόχου, ο Πάροχος μπορεί να ελέγξει την τοπική εκχώρηση αριθμών, διατηρώντας ταυτόχρονα τη μοναδικότητα του δικού του αριθμού.
Η RFC 2547bis ορίζει τρεις διαφορετικούς τύπους κατηγορημάτων επεκταμένης κοινότητας BGP:

- Το κατηγόρημα στόχος δρομολόγησης (route target) ορίζει μια ομάδα τοποθεσιών (ουσιαστικά πίνακας VRF), στις οποίες ο δρομολογητής ΑΠΑ διανέμει πληροφορίες για δρομολογήσεις. Με άλλα λόγια ο δρομολογητής ΑΠΑ χρησιμοποιεί το κατηγόρημα αυτό για να περιορίσει την εισαγωγή απομακρυσμένων δρομολογήσεων στους δικούς του πίνακες VRF.
- Το κατηγόρημα ΕΙΔ προέλευσης (VPN-of-origin) καθορίζει μια ομάδα τοποθεσιών και συστήνει τη σχετική δρομολόγηση από μία από αυτές τις τοποθεσίες στο σύνολο.
- Το κατηγόρημα τοποθεσία προέλευσης (site-of-origin) ορίζει την συγκεκριμένη τοποθεσία από την οποία ένας δρομολογητής ΑΠΑ μαθαίνει μια δρομολόγηση. Με αυτό το κατηγόρημα αποφεύγονται οι βρόγχοι δρομολόγησης.

2.4. Μοντέλο λειτουργίας

Πριν από τη διανομή των τοπικών δρομολογήσεων σε άλλους δρομολογητές ΑΠΑ, ο ΑΠΑ εισόδου τοποθετεί ένα κατηγόρημα στόχος σε δρομολόγηση που έχει μάθει από τις απ' ευθείας συνδεδεμένες τοποθεσίες. Το κατηγόρημα στόχος για κάθε δρομολόγηση εξαρτάται από την πολιτική εξαγωγής που έχει καθοριστεί στον πίνακα VRF. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει μεγάλη ευελιξία στην ανάθεση κατηγορημάτων στόχων από τον δρομολογητή ΑΠΑ σε συγκεκριμένη δρομολόγηση:

Ο δρομολογητής εισόδου ΑΠΑ μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να αναθέτει ένα μοναδικό κατηγόρημα στόχος σε όλες τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Ο δρομολογητής εισόδου ΑΠΑ μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να αναθέτει ένα κατηγόρημα στόχος σε ένα σύνολο δρομολογήσεων που έχουν γίνει γνωστές από μια τοποθεσία και άλλα κατηγορήματα στόχος σε άλλα σύνολα δρομολογήσεων που έχει μάθει από την ίδια τοποθεσία.

Εάν η επικοινωνία ΑΠΑ-ΑΠΕ στηρίζεται στο EBGP, ο δρομολογητής ΑΠΕ μπορεί να ορίσει έναν ή περισσότερους στόχους δρομολόγησης ανά δρομολόγηση. Αυτού του είδους ο σχεδιασμός δίνει την ευκαιρία στον πελάτη να υλοποιεί πολιτικές ΕΙΔ, αντί του Παρόχου.

Ο κάθε πίνακας προώθησης / δρομολόγησης VRF σε δρομολογητή εξόδου ΑΠΑ πριν να εισάγει απομακρυσμένες δρομολογήσεις από άλλον ΑΠΑ, ρυθμίζεται με

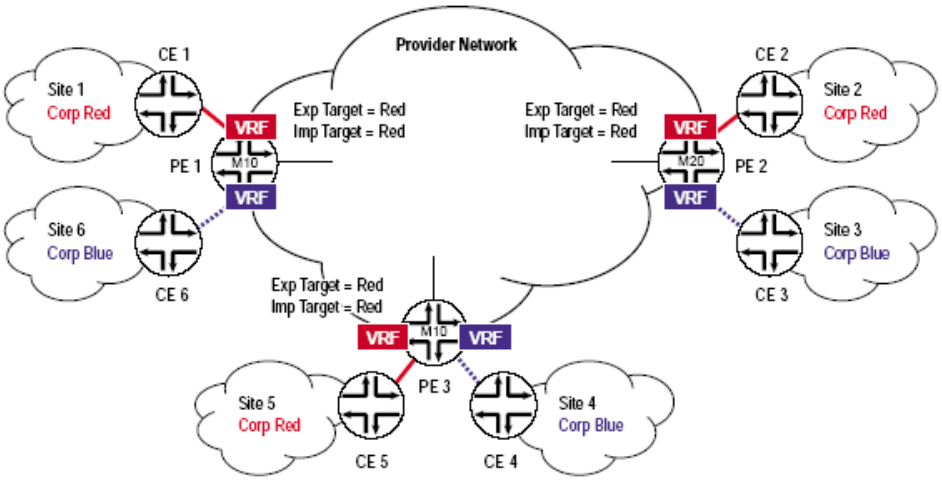
πολιτική εισαγωγής στόχου. Με την προσεκτική ρύθμιση των πολιτικών εισόδου / εξόδου οι Πάροχοι Υπηρεσιών δημιουργούν διαφορετικές τοπολογίες υποστήριξης ΕΙΔ. Οι μηχανισμοί υλοποίησης των τοπολογιών είναι συνήθως αποκλειστικότητα του Παρόχου και δεν παρεμβαίνει σε αυτούς ο πελάτης.

2.5. Παραδείγματα τοπολογιών

Η υλοποίηση των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων ακολουθεί συγκεκριμένες τοπολογίες που έχουν αναπτυχθεί για να εξυπηρετήσουν συγκεκριμένες ανάγκες είτε των Πελατών, είτε των Παρόχων. Οι τοπολογίες πολλές φορές αντικατοπτρίζουν την αρχιτεκτονική των εφαρμογών (π.χ εφαρμογές πελάτη – εξυπηρετητή, ιεραρχικά μοντέλα, ομότιμα μοντέλα). Σε άλλες περιπτώσεις οι απαιτήσεις απόδοσης, τα οικονομικά στοιχεία αλλά και η πολιτική του Πελάτη ή του Παρόχου οδηγούν στην υιοθέτηση συγκεκριμένης τοπολογίας. Για παράδειγμα στα δορυφορικά δίκτυα δεδομένων η επικρατούσα τοπολογία στηρίζεται στην ύπαρξη του κεντρικού αναμεταδότη (hub) ο οποίος συνδέει τις επιμέρους τοποθεσίες. Στην συνέχεια παρουσιάζονται δύο από τις τοπολογίες που χρησιμοποιούνται περισσότερο στα ΕΙΔ.

2.5.1. Τοπολογία πλήρους διασύνδεσης (full-mesh)

Στην τοπολογία πλήρους διασύνδεσης όλες οι τοποθεσίες ενός ΕΙΔ μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους και απ' ευθείας χωρίς την παρεμβολή μιας κατά κάποιον τρόπο κεντρικής τοποθεσίας. Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τοπολογίας πλήρους διασύνδεσης:



Η εταιρία Red απαιτεί από τον Πάροχο Υπηρεσιών τη δημιουργία ενός δικτύου ΕΙΔ βασισμένου σε πρωτόκολλα BGP/MPLS με τοπολογία πλήρους διασύνδεσης. Στην τοπολογία αυτή κάθε τοποθεσία της εταιρίας Red μπορεί να επικοινωνεί με οποιαδήποτε άλλη τοποθεσία της εταιρίας Red απ' ευθείας, ενώ άλλες εταιρίες που υπάρχουν συνδεδεμένες στον Πάροχο, όπως η Blue δεν λαμβάνουν, ούτε μεταδίδουν δεδομένα από και προς την εταιρία Red.

Κάθε τοποθεσία της Red σχετίζεται με τον πίνακα VRF Red στον αντίστοιχο δρομολογητή ΑΠΑ. Μια μοναδική δρομολόγηση στόχος (Red) ορίζεται σε κάθε πίνακα VRF Red σαν δρομολόγηση στόχος εισόδου και εξόδου. Αυτή η

δρομολόγηση στόχος δεν ανατίθεται σε κανένα άλλο πίνακα VRF και συνεπώς δημιουργείται η τοπολογία πλήρους διασύνδεσης των τοποθεσιών της εταιρίας Red.

Η τοπολογία που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα δεν είναι δεσμευτική για τον Πάροχο, ούτε για τους άλλους Πελάτες του Παρόχου.

2.5.2. Τοπολογία Hub-and-Spoke

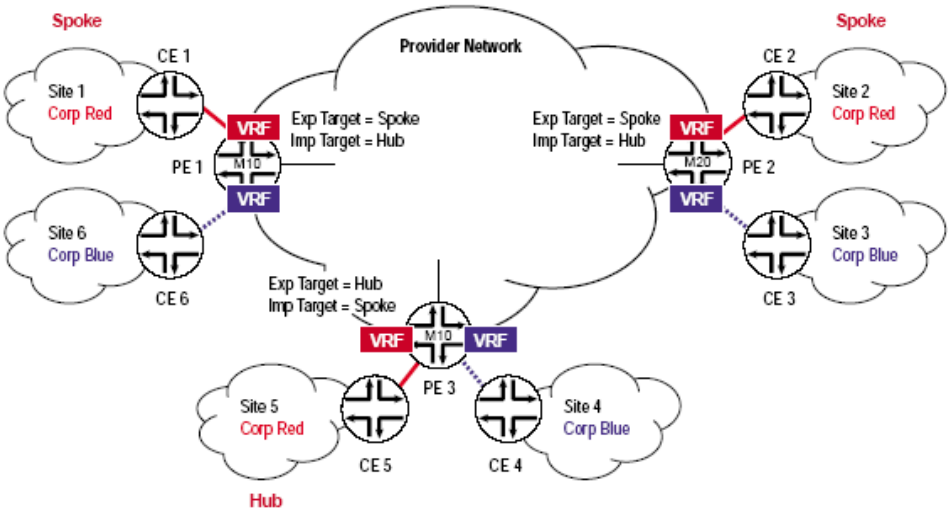
Στην τοπολογία Hub-and-Spoke όλες οι τοποθεσίες ενός ΕΙΔ δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους απ' ευθείας χωρίς την παρεμβολή μιας κατά κάποιον τρόπο κεντρικής τοποθεσίας η οποία παίζει τον ρόλο του συγκεντρωτή / αναμεταδότη (hub). Χαρακτηριστικό παράδειγμα τοπολογίας Hub-and-Spoke έχουν τα τραπεζικά δίκτυα που τα πάντα εξαρτώνται από τον κεντρικό κόμβο του κεντρικού τραπεζικού καταστήματος.

Στην περίπτωση αυτή η εταιρία Red απαιτεί από τον Πάροχο Υπηρεσιών τη δημιουργία ενός δικτύου ΕΙΔ βασισμένου σε πρωτόκολλα BGP/MPLS με τοπολογία Hub-and-Spoke. Η συνδεσιμότητα μεταξύ των τοποθεσιών της εταιρίας Red συνοψίζεται στις παρακάτω πολιτικές:

Η τοποθεσία 1 (site 1) μπορεί να επικοινωνεί απ' ευθείας με την τοποθεσία 5 (site 5), αλλά όχι απ' ευθείας με την τοποθεσία 2 (site 2). Η επικοινωνία site1→site2 μπορεί να γίνει μόνο διαμέσου της τοποθεσίας 5.

Η τοποθεσία 2 (site 2) μπορεί να επικοινωνεί απ' ευθείας με την τοποθεσία 5 (site 5), αλλά όχι απ' ευθείας με την τοποθεσία 1 (site 1). Η επικοινωνία site2→site1 μπορεί να γίνει μόνο διαμέσου της τοποθεσίας 5.

Η τοποθεσία 5 μπορεί να επικοινωνεί απ' ευθείας με τις τοποθεσίες 1 και 2.
Για τη δημιουργία τοπολογίας hub-and-spoke απαιτούνται δύο καθ' όλο το δίκτυο μοναδικές δρομολογήσεις στόχοι: hub και spoke.



Ο πίνακας VRF για την τοποθεσία 5 που αποτελεί τον hub, ρυθμίζεται να έχει δύο δρομολογήσεις στόχους:
Η δρομολόγηση στόχος εξόδου λαμβάνει την τιμή hub, ενώ η δρομολόγηση στόχος εισόδου λαμβάνει την τιμή spoke. Ο δρομολογητής ΑΠΑ 3 στην τοποθεσία 5 (hub) διανέμει όλες τις δρομολογήσεις που υπάρχουν στον πίνακα VRF Red με κατηγόρημα hub, ώστε να μπορούν να τις δεχτούν οι τοποθεσίες που έχουν χαρακτηριστεί ως spoke (site1, site2). Επίσης ο δρομολογητής ΑΠΑ 3 στην τοποθεσία 5 (hub) δέχεται και τοποθετεί στον πίνακα VRF Red όλες τις απομακρυσμένες δρομολογήσεις με κατηγόρημα spoke.
Αντίθετα σε κάθε τοποθεσία spoke, αντιστρέφονται οι δρομολογήσεις στόχοι με τη δρομολόγηση στόχος εξόδου να λαμβάνει την τιμή spoke και τη δρομολόγηση στόχος εισόδου να λαμβάνει την τιμή hub. Ο κάθε δρομολογητής ΑΠΑ σε κάθε τοποθεσία spoke διανέμει τις δρομολογήσεις με κατηγόρημα spoke με αποτέλεσμα οι δρομολογήσεις αυτές να γίνονται αποδεκτές από την τοποθεσία hub και να απορρίπτονται από τις άλλες τοποθεσίες spoke.

Διατήρηση και ανανέωση δρομολόγησης των ΕΙΔ

Η ρύθμιση των δρομολογητών που βρίσκονται στις παρυφές του δικτύου του Παρόχου (ΑΠΑ) με την προσθήκη νέων πινάκων VRF ή την προσθήκη νέων πολιτικών σε υπάρχον VRF δημιουργεί την ανάγκη ανανέωσης της πληροφορίας δρομολόγησης. Το πρόβλημα δυσκολεύει περισσότερο από άποψη ταχύτητας μετάδοσης των αλλαγών δρομολόγησης με το συμβατικό stateful BGP 4 που δεν υποστηρίζει την ανταλλαγή μηνυμάτων απαίτησης ανανέωσης δρομολόγησης. Από τη στιγμή που οι ομότιμοι του BGP συγχρονιστούν στο επίπεδο των πινάκων δρομολόγησης δεν ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης μέχρι να συμβεί αλλαγή σε αυτές τις πληροφορίες δρομολόγησης.
Μια λύση στο σχεδιαστικό πρόβλημα αυτό είναι η χρήση της δυνατότητας ανανέωσης δρομολόγησης του BGP. Κατά τη διάρκεια της σύστασης συνόδου MP-IBGP, ο ομιλητής BGP που επιθυμεί να λάβει ανανέωση δρομολόγησης από τον ομότιμό του ή από κάποιο ανακλαστήρα δρομολογήσεων, γνωστοποιεί τη δυνατότητα ανανέωσης δρομολόγησης με σχετική γνωστοποίηση. Η δυνατότητα ανανέωσης δρομολόγησης διατυπώνει το αίτημα ενός ομιλητή BGP που μπορεί να στείλει μήνυμα ανανέωσης δρομολόγησης σε έναν ομότιμο ή ανακλαστήρα δρομολογήσεων, μόνο εάν έχει λάβει γνωστοποίηση της δυνατότητας ανανέωσης δρομολογήσεων από τον ομότιμο ή τον ανακλαστήρα.

Προστασία του εύρους ζώνης στο δίκτυο κορμού και της απόδοσης των δρομολογητών ΑΠΑ

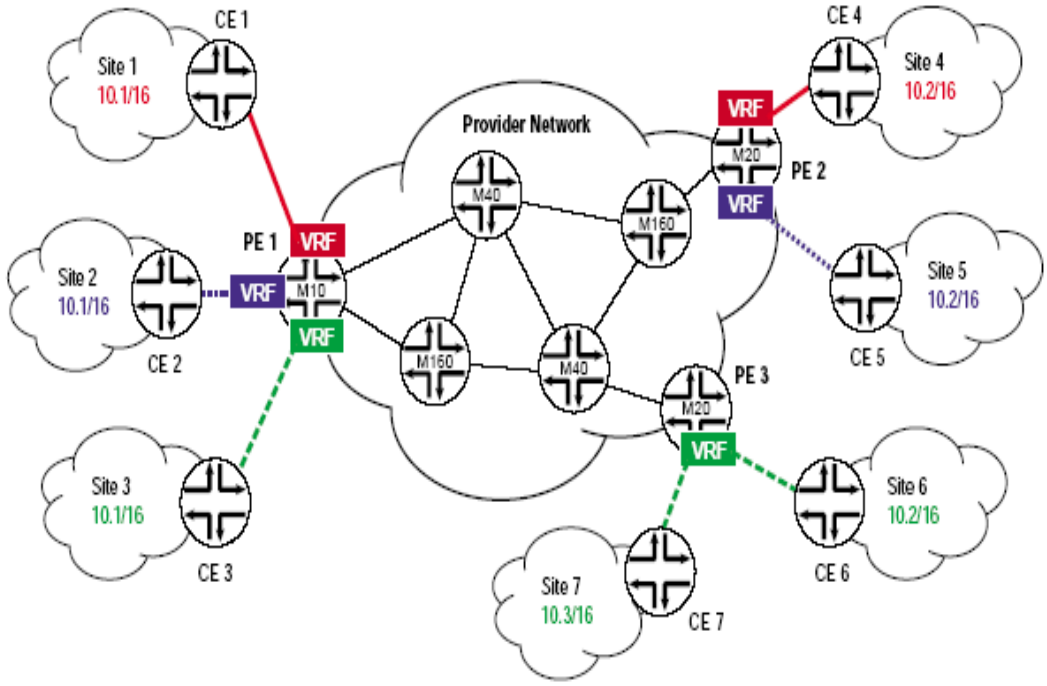
Κατά τη διάρκεια των εγγραφών των δρομολογήσεων στους πίνακες VRF, ο ομιλητής BGP λαμβάνει δρομολογήσεις από ομότιμους ή ανακλαστήρες που πιθανώς δεν τις θέλει. Σε αυτή την περίπτωση φιλτράρει τις δρομολογήσεις βάσει των αρχικών πολιτικών που έχουν ρυθμιστεί για κάθε πίνακα VRF. Επειδή η δημιουργία, μετάδοση και επεξεργασία των ανανεώσεων της δρομολόγησης καταναλώνει εύρος ζώνης στο δίκτυο κορμού και επεξεργαστική ισχύ στους

δρομολογητές είναι αναγκαίο να περιορίζονται οι ανανεώσεις στις απολύτως αναγκαίες.
Για τον περιορισμό των ανανεώσεων χρησιμοποιείται η νέα δυνατότητα του BGP για φιλτράρισμα των δρομολογήσεων που στηρίζεται στην εφαρμογή φίλτρων εξερχόμενων δρομολογήσεων (outbound route filters – ORF).

2.6. Μελέτη Δικτύου Παρόχου

Για την περαιτέρω κατανόηση της λειτουργίας των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων θα ακολουθήσει ανάλυση των μηχανισμών σε τυπικό δίκτυο Παρόχου (το υλικό που χρησιμοποιείται στην συνέχεια προέρχεται από δημοσιεύσεις των εταιρειών Juniper και Cisco με συμπληρώματα και διευκρινήσεις του γράφοντος):

Έστω ότι ένας Πάροχος Υπηρεσιών χρησιμοποιεί ένα δίκτυο κορμού βασισμένο στο πρωτόκολλο IP για να δώσει υπηρεσίες BGP/MPLS ΕΙΔ σε διαφορετικές εταιρίες. Στο παρακάτω σχήμα υπάρχουν τρεις δρομολογητές ΑΠΑ που συνδέονται σε επτά διαφορετικές τοποθεσίες πελατών:

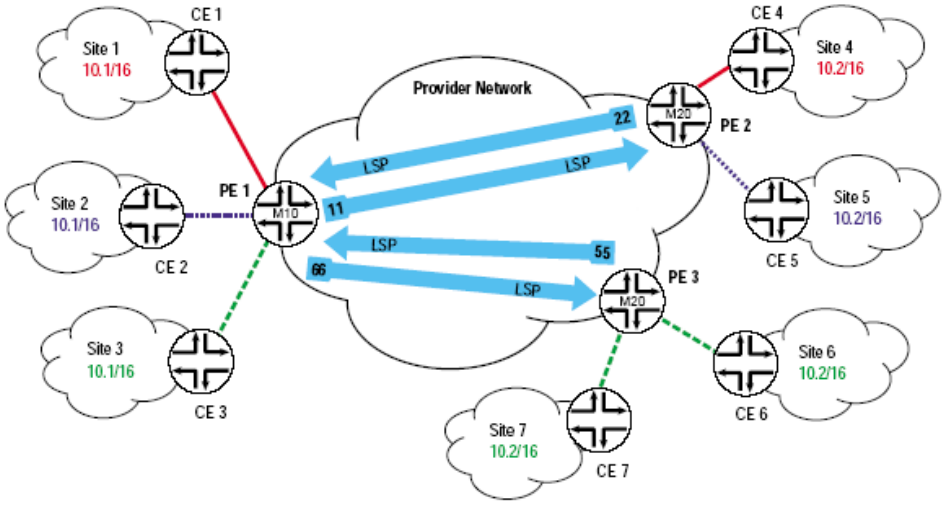


Οι πολιτικές διασύνδεσης όπως έχουν καθοριστεί μεταξύ των πελατών και του Παρόχου είναι οι ακόλουθες:

- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 1 (site1) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 4 (site 4).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 2 (site2) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 5 (site 5).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 3 (site3) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 6 (site 6) και στην τοποθεσία 7 (site7).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 4 (site4) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 1 (site 1).

- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 5 (site5) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 2(site 2).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 6 (site6) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 3 (site 3) και στην τοποθεσία 7 (site7).
- Κάθε υπολογιστής στην τοποθεσία 7 (site7) μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε υπολογιστή στην τοποθεσία 3 (site 3) και στην τοποθεσία 6 (site6).

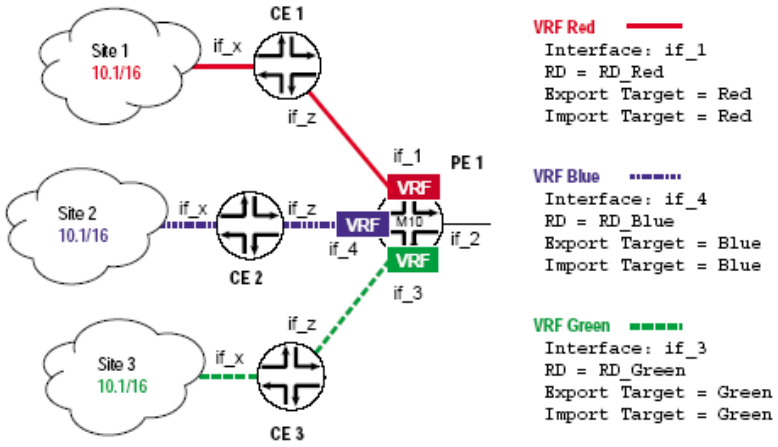
Ο Πάροχος χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων RSVP για τη σύσταση Μονοπατιών Μεταγωγής Ετικετών (MME) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



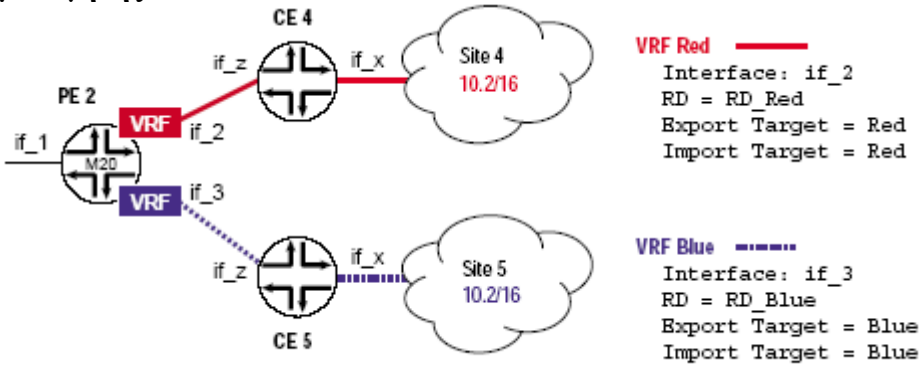
Οι ετικέτες στην είσοδο κάθε MME είναι οι ετικέτες που προσάπτουν οι ΑΠΑ για την προώθηση της κίνησης στους απομακρυσμένους ΑΠΑ που βρίσκονται στην έξοδο κάθε MME (προσοχή πρόκειται για τις εξωτερικές ετικέτες στη στοίβα δύο επιπέδων που δημιουργούν οι ΑΠΑ, οι εσωτερικές ετικέτες θα δημιουργηθούν με μηχανισμούς που περιγράφονται στη συνέχεια).

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι ρυθμίσεις διαχωρισμού δρομολόγησης (Route Distinguisher), τα κατηγορήματα στόχος για τα τρία ΕΙΔ, οι διεπαφές των δρομολογητών ΑΠΑ 1, 2,3 για κάθε ΕΙΔ και οι αντίστοιχοι πίνακες προώθησης και δρομολόγησης VRF:

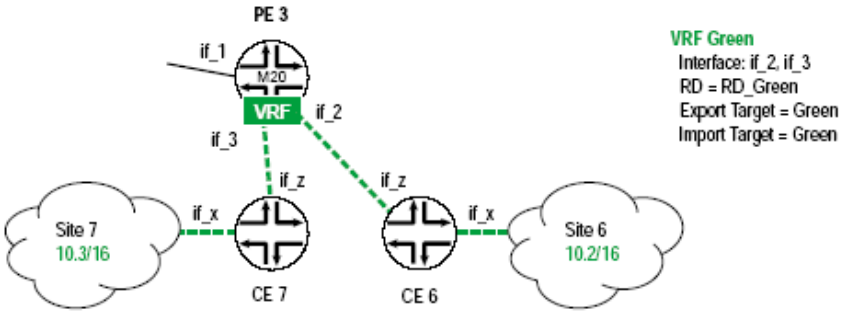
Δρομολογητής ΑΠΑ 1



Δρομολογητής ΑΠΑ 2



Δρομολογητής ΑΠΑ 3



2.6.1. Διανομή των πληροφοριών δρομολόγησης

Πριν τη ανταλλαγή κίνησης δεδομένων πρέπει να γίνει ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ των απομακρυσμένων τοποθεσιών του πελάτη που ανήκουν στο ίδιο ΕΙΔ. Αυτό προϋποθέτει την ανακοίνωση των προθεμάτων διευθύνσεων IPv4 από τους δρομολογητές ΑΠΕ στους δρομολογητές ΑΠΑ. Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα με τα οποία μπορεί να γίνει αυτή η ανακοίνωση από τους ΑΠΕ στους ΑΠΑ, όπως στατική

δρομολόγηση, χρήση RIPv2, OSPF και άλλων πρωτοκόλλων της κατηγορίας Interior Gateway Protocols ή με τη χρήση EGBP.
Ο κάθε ΑΠΑ δημιουργεί και συντηρεί έναν πίνακα VRF για κάθε μία τοποθεσία που συνδέεται απ' ευθείας πάνω του και ανήκει σε διαφορετικό Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο. Ο ΑΠΑ ελέγχει κάθε εισερχόμενη δρομολόγηση από τους δρομολογητές των πελατών ΑΠΕ με βάσει τις πολιτικές που έχουν ρυθμιστεί για το πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταξύ των ΑΠΑ, ΑΠΕ. Οι δρομολογήσεις που περνούν επιτυχώς από τον έλεγχο καταχωρούνται σε πίνακες VRF σαν δρομολογήσεις IPv4. Ο ΑΠΑ επίσης πρέπει να αποτρέψει την εισαγωγή αυτών των δρομολογήσεων στο εσωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης του Παρόχου που τρέχει στο δίκτυο κορμού. Πριν ο ΑΠΑ ανακοινώσει μια δρομολόγηση της τοποθετεί μια ετικέτα MPLS που αποτελεί την εσωτερική ετικέτα σε στοίβα ετικετών δύο επιπέδων. Η στοίβα δύο επιπέδων θα χρησιμοποιεί για την μεταγωγή των ετικετών στο δίκτυο του Παρόχου.
Σε περίπτωση που η δρομολόγηση γίνεται γνωστή πάνω από σύνδεσμο σημείο προς σημείο (point-to-point), η ετικέτα MPLS βασίζεται στην εισερχόμενη λογική διεπαφή του ΑΠΑ και συνεπώς όλες οι δρομολογήσεις που μαθαίνονται από τον σύνδεσμο σημείο προς σημείο λαμβάνουν την ίδια ετικέτα.
Σε περίπτωση που η σύνδεση ΑΠΑ – ΑΠΕ δεν είναι point-to-point, αλλά βασίζεται σε κάποιο μέσο unicast / multicast (π.χ Ethernet), τότε η ετικέτα βασίζεται στον συγκεκριμένο ΑΠΕ που ανακοινώνει το πρόθεμα IP, με συνέπεια όλες οι δρομολογήσεις που μαθαίνονται από τον ίδιο ΑΠΕ να έχουν την ίδια ετικέτα. Ευνόητο είναι πως οι δρομολογήσεις που μαθαίνονται από διαφορετικούς ΑΠΕ, λαμβάνουν διαφορετικές ετικέτες.

Εσωτερικές ετικέτες
Έστω ότι ο ΑΠΑ 1 εκχωρεί τις ακόλουθες εσωτερικές ετικέτες :

1001 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 1
1002 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 2
1003 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 3

Με αυτό τον τρόπο πολύ εύκολα όταν ο ΑΠΑ 1 λάβει πακέτο από το δίκτυο κορμού με εσωτερική ετικέτα 1001 θα την αφαιρέσει και θα προωθήσει το πακέτο IPv4 που απομένει στο δρομολογητή ΑΠΕ1. Ομοίως εάν λάβει πακέτο από το δίκτυο κορμού με εσωτερική ετικέτα 1002 θα την αφαιρέσει και θα προωθήσει το πακέτο IPv4 που απομένει στο δρομολογητή ΑΠΕ2, ενώ τα πακέτα με ετικέτα 1003 προωθούνται στον ΑΠΕ3.

Συνεπώς οι πίνακες προώθησης και δρομολόγησης VRF του δρομολογητή ΑΠΑ 1 έχουν τις καταχωρήσεις:

VRF Red				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	Απ' ευθείας	if_1	1001	-

VRF Blue				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	Απ' ευθείας	if_4	1002	-

VRF Green				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	Απ' ευθείας	if_3	1003	-

Στον δρομολογητή ΑΠΑ1 διατηρείται ο πίνακας προώθησης MPLS ο οποίος θα έχει την ακόλουθη μορφή αν θεωρηθεί δεδομένο ότι συνδέεται στο δίκτυο κορμού μέσω της διεπαφής if_2:

Πίνακας MPLS ΑΠΑ 1			
Διεπαφή δικτύου κορμού	**Ετικέτα**	**Ενέργεια**	**Προώθηση σε**
if_2	1001	Αφαίρεση	if_1
if_2	1002	Αφαίρεση	if_4
if_2	1003	Αφαίρεση	if_3

Έστω ότι ο ΑΠΑ 2 εκχωρεί τις ακόλουθες εσωτερικές ετικέτες :

1004 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 4
1005 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 5

Με αυτό τον τρόπο πολύ εύκολα όταν ο ΑΠΑ 2 λάβει πακέτο από το δίκτυο κορμού με εσωτερική ετικέτα 1004 θα την αφαιρέσει και θα προωθήσει το πακέτο IPv4 που απομένει στο δρομολογητή ΑΠΕ4. Ομοίως εάν λάβει πακέτο από το δίκτυο κορμού με εσωτερική ετικέτα 1005 θα την αφαιρέσει και θα προωθήσει το πακέτο IPv4 που απομένει στο δρομολογητή ΑΠΕ5. Συνεπώς οι πίνακες VRF στον ΑΠΑ 2 έχουν τις καταχωρήσεις:

VRF Red				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.2/16	Απ' ευθείας	if_2	1004	-

VRF Blue				
Προορισμός	BGP next hop	Διεπαφή	Εσωτερική ετικέτα	Εξωτερική ετικέτα
10.2/16	Απ' ευθείας	if_3	1005	-

Και ο πίνακας προώθησης MPLS για τον ΑΠΑ 2 θα είναι (με δεδομένο ότι συνδέεται στο δίκτυο κορμού με τη διεπαφή if_2):

Πίνακας MPLS ΑΠΑ 2			
Διεπαφή δικτύου κορμού	**Ετικέτα**	**Ενέργεια**	**Προώθηση σε**
if_1	1004	Αφαίρεση	if_2
if_1	1005	Αφαίρεση	if_3

Έστω ότι ο ΑΠΑ 3 εκχωρεί τις ακόλουθες εσωτερικές ετικέτες :

1006 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 6
1007 για τις δρομολογήσεις που μαθαίνει από την τοποθεσία 7

Με αυτό τον τρόπο πολύ εύκολα όταν ο ΑΠΑ 3 λάβει πακέτο από το δίκτυο κορμού με εσωτερική ετικέτα 1006 θα την αφαιρέσει και θα προωθήσει το πακέτο IPv4 που απομένει στο δρομολογητή ΑΠΕ6. Ομοίως εάν λάβει πακέτο από το δίκτυο κορμού με εσωτερική ετικέτα 1007 θα την αφαιρέσει και θα προωθήσει το πακέτο IPv4 που απομένει στο δρομολογητή ΑΠΕ7. Συνεπώς οι πίνακες VRF στον ΑΠΑ 3 έχουν τις καταχωρήσεις:

VRF Green				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.2/16	Απ' ευθείας	if_2	1006	-
10.3/16	Απ' ευθείας	if_3	1007	-

Και ο πίνακας προώθησης MPLS για τον ΑΠΑ 3 θα είναι (με δεδομένο ότι συνδέεται στο δίκτυο κορμού με τη διεπαφή if_1):

Πίνακας MPLS ΑΠΑ 3			
Διεπαφή δικτύου κορμού	**Ετικέτα**	**Ενέργεια**	**Προώθηση σε**
if_1	1006	Αφαίρεση	if_2
if_1	1007	Αφαίρεση	if_3

2.7. Δρομολόγηση στο δίκτυο κορμού

Οι δρομολογητές εισόδου ΑΠΑ χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο MP-IBGP για να διανέμουν δρομολογήσεις από τις απ' ευθείας συνδεδεμένες τοποθεσίες στους δρομολογητές εξόδου ΑΠΑ. Συνεπώς χρειάζεται η διατήρηση πλήρους πλέγματος MP-IBGP ή η χρήση ανακλαστήρων για να εξασφαλιστεί η διανομή της πληροφορίας δρομολόγησης σε όλους τους δρομολογητές ΑΠΑ.
Πριν τη διανομή δρομολογήσεων από τα τοπικά ΕΙΔ προς τον ομότιμο MP-IBGP ΑΠΑ εξόδου, ο ΑΠΑ εισόδου μετατρέπει κάθε πρόθεμα IPv4 σε πρόθεμα VPN-

IPv4 με τη χρήση των διακριτικών δρομολόγησης RD, που έχουν καθοριστεί για κάθε VRF. Η ανακοίνωση για κάθε δρομολόγηση περιλαμβάνει:

- Το πρόθεμα VPN-IPv4 για τη δρομολόγηση.
- Το επόμενο άλμα BGP που περιέχει τη διεύθυνση βρόχου του δρομολογητή ΑΠΑ εισόδου. Αυτή η διεύθυνση κωδικοποιείται σαν VPN-IPv4 με διακριτικό δρομολόγησης 0, επειδή το πρωτόκολλο MP-BGP απαιτεί το επόμενο άλμα να ανήκει στην ίδια οικογένεια διευθύνσεων όπως η δρομολόγηση που ανακοινώνεται.
- Την εσωτερική ετικέτα που αποδίδεται από τον ΑΠΑ εισόδου.
- Το κατηγόρημα στόχος δρομολόγησης που βασίζεται στην πολιτική εξαγωγής της δρομολόγησης για τον συγκεκριμένο πίνακα VRF του ΑΠΑ εισόδου. Στο παράδειγμα έχουμε τρία κατηγορήματα στόχος δρομολόγησης τα Red, Blue, Green.
- Προαιρετικά την τοποθεσία προέλευσης (site-of-origin). Η τοποθεσία προέλευσης μπορεί να κωδικοποιηθεί σαν επεκταμένη κοινότητα προέλευσης δρομολόγησης.

Ο δρομολογητής εισόδου ΑΠΑ, μπορεί να επιλέξει να μεταφέρει στους ομότιμους του, όλες τις δρομολογήσεις που έχει μάθει από όλες τις απ' ευθείας συνδεδεμένες τοποθεσίες με μια ανακοίνωση. Μπορεί, όμως να επιλέξει να κάνει μία ξεχωριστή ανακοίνωση για κάθε ομότιμο ο οποίος συνδέεται σε τοποθεσίες του ίδιου πελάτη όπως ο ΑΠΑ εισόδου. Η δεύτερη επιλογή γίνεται δυνατή μέσω των φίλτρων εξερχόμενων δρομολογήσεων (outbound route filters–ORF) και οδηγεί στον περιορισμό της πληροφορίας δρομολόγησης στο δίκτυο δρομολόγησης.
Όταν ο δρομολογητής εξόδου ΑΠΑ λάβει από τον ομότιμό του ΑΠΑ εισόδου μια δρομολόγηση VPN-IPv4, συγκρίνει τη δρομολόγηση με τις πολιτικές εισόδου των πινάκων VRF για όλα τα ΕΙΔ που είναι απ' ευθείας συνδεδεμένα σ΄ αυτόν τον ΑΠΑ εξόδου. Εάν η δρομολόγηση συμφωνεί με τις πολιτικές εισαγωγής τότε εισάγεται στον βάση δρομολόγησης VPN_IPv4.RIB (Routing Information Base) του ΑΠΑ εξόδου. Η βάση δρομολόγησης είναι ουσιαστικά ένας μεγάλος πίνακας δρομολογήσεων που περιέχει όλες τις δρομολογήσεις που συμφωνούν τουλάχιστον με τη πολιτική εισαγωγής ενός από τους πίνακες VRF που διατηρεί ο ΑΠΑ. Η βάση είναι ο μοναδικός πίνακας δρομολογήσεων που χρησιμοποιεί το διακριτικό δρομολόγησης ΔΔ (RD, route distinguisher), για να διαχωρίσει τις δρομολογήσεις, επειδή περιέχει όλες τις δρομολογήσεις που καταφθάνουν από τους ομότιμους ΑΠΑ. Οι δρομολογήσεις αυτές λόγω των συνολικά ξεχωριστών ΔΔ είναι συνολικά ξεχωριστές μεταξύ τους.
Η επιλογή μονοπατιού BGP γίνεται στη βάση δρομολόγησης πριν δοθούν οι δρομολογήσεις στους πίνακες VRF. Για αυτό το λόγο το λάθος ρύθμισης στα ΔΔ (π.χ ίδιες διευθύνσεις VPN-IPv4), οδηγεί στην απόρριψη δρομολόγησης από τη βάση και κατά συνέπεια προώθηση μόνο της μιας δρομολόγησης σε πίνακα VRF.
Η RFC 2547 συστήνει τη χρήση μοναδικών δημοσίων αριθμών ASN και διευθύνσεων IPv4, ώστε ένα ΕΙΔ BGP/MPLS να μπορεί να επεκταθεί σε πολλούς Παρόχους αφού οι διευθύνσεις VPN-IPv4 θα είναι μοναδικές σε όλο το Διαδίκτυο.
Η επιλογή μονοπατιού BGP για κάθε πρόθεμα VPN-IPv4 οδηγεί στο καλύτερο κατά BGP μονοπάτι μέσα στο δίκτυο κορμού και στην εισαγωγή της καλύτερης δρομολόγησης στον πίνακα VRF σαν δρομολόγηση IPv4.

2.7.1. Ανακοινώσεις δρομολογήσεων από τους ΑΠΑ εισόδου

ΑΠΑ 1			
Προορισμός	**Ετικέτα**	**BGP next hop**	**Στόχος δρομολόγησης**
RD_Red:10.1/16	1001	ΑΠΑ 1	Red
RD_Blue:10.1/16	1002	ΑΠΑ 1	Blue
RD_Green:10.1/16	1003	ΑΠΑ 1	Green

ΑΠΑ 2			
Προορισμός	**Ετικέτα**	**BGP next hop**	**Στόχος δρομολόγησης**
RD_Red:10.2/16	1004	ΑΠΑ 2	Red
RD_Blue:10.2/16	1005	ΑΠΑ 2	Blue

ΑΠΑ 3			
Προορισμός	**Ετικέτα**	**BGP next hop**	**Στόχος δρομολόγησης**
RD_Green:10.2/16	1006	ΑΠΑ 3	Green
RD_Green:10.3/16	1007	ΑΠΑ 3	Green

2.7.2. Εισαγωγή δρομολογήσεων από τους ΑΠΑ εξόδου

	ΑΠΑ 1				
Ομότιμος	**Προορισμός**	**Ετικέτα**	**BGP next hop**	**Στόχος δρομολόγησης**	**Πίνακας εισαγωγής**
ΑΠΑ 2	RD_Red:10.2/16	1004	ΑΠΑ 2	Red	VRF Red
ΑΠΑ 2	RD_Blue:10.2/16	1005	ΑΠΑ 2	Blue	VRF Blue
ΑΠΑ 3	RD_Green:10.2/16	1006	ΑΠΑ 3	Green	VRF Green
ΑΠΑ 3	RD_Green:10.3/16	1007	ΑΠΑ 3	Green	VRF Green

Μετά την ανταλλαγή των δρομολογήσεων οι πίνακες VRF του ΑΠΑ 1 περιέχουν:

VRF Red				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	Απ' ευθείας	if_1	1001	-
10.2/16	ΑΠΑ 2	if_2	1004	11

VRF Blue				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	Απ' ευθείας	if_4	1002	-
10.2/16	ΑΠΑ 2	if_2	1005	11

VRF Green				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	Απ' ευθείας	if_3	1003	-
10.2/16	ΑΠΑ 3	if_2	1006	11
10.3/16	ΑΠΑ 3	if_2	1007	66

	ΑΠΑ 2				
Ομότιμος	**Προορισμός**	**Ετικέτα**	**BGP next hop**	**Στόχος δρομολόγησης**	**Πίνακας εισαγωγής**
ΑΠΑ 1	RD_Red:10.1/16	1001	ΑΠΑ 1	Red	VRF Red
ΑΠΑ 1	RD_Blue:10.1/16	1002	ΑΠΑ 1	Blue	VRF Blue

Μετά την ανταλλαγή των δρομολογήσεων οι πίνακες VRF του ΑΠΑ 2 περιέχουν:

VRF Red				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	ΑΠΑ 1	if_1	1001	22
10.2/16	Απ' ευθείας	if_2	1004	-

VRF Blue				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	ΑΠΑ 1	if_1	1002	22
10.2/16	Απ' ευθείας	if_2	1005	-

	ΑΠΑ 3				
Ομότιμος	**Προορισμός**	**Ετικέτα**	**BGP next hop**	**Στόχος δρομολόγησης**	**Πίνακας εισαγωγής**
ΑΠΑ 1	RD_Green:10.1/16	1003	ΑΠΑ 1	Green	VRF

					Green

Μετά την ανταλλαγή των δρομολογήσεων οι πίνακες VRF του ΑΠΑ 3 περιέχουν:

VRF Green				
Προορισμός	**BGP next hop**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
10.1/16	ΑΠΑ 1	if_1	1003	55
10.2/16	Απ' ευθείας	if_2	1006	-
10.3/16	Απ' ευθείας	if_3	1007	-

2.7.3. Διανομή δρομολογήσεων από τους ΑΠΑ εξόδου στους ΑΠΕ

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί για να μάθει δρομολογητής ΑΠΕ από τον δρομολογητή ΑΠΑ εξόδου τις δρομολογήσεις που τον αφορούν και περιέχονται στον αντίστοιχο πίνακα VRF:

- Πρωτόκολλο IGP (RIPv2, OSPF) μεταξύ ΑΠΕ-ΑΠΑ.
- Σύσταση σύνδεσης EBGP μεταξύ ΑΠΕ-ΑΠΑ.

Εναλλακτικά ο δρομολογητής ΑΠΑ μπορεί να κάνει τα παρακάτω:

- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης από τον ΑΠΑ προς τον ΑΠΕ, μπορεί να διανείμει μια εξ΄ ορισμού δρομολόγηση (default route) που δείχνει στον δρομολογητή ΑΠΑ.
- Ο δρομολογητής ΑΠΕ μπορεί να έχει στατική εξ΄ ορισμού δρομολόγηση που να δείχνει στον δρομολογητή ΑΠΑ.

Μετά τη διανομή δρομολογήσεων από του δρομολογητές εξόδου ΑΠΑ στους δρομολογητές ΑΠΕ, οι πίνακες δρομολόγησης των ΑΠΕ περιέχουν την ακόλουθη πληροφορία δρομολόγησης:

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 1		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x
10.2/16	ΑΠΑ1	if_z

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 2		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x
10.2/16	ΑΠΑ1	if_z

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 3		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x
10.2/16	ΑΠΑ1	if_z
10.3/16	ΑΠΑ1	if_z

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 4		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	ΑΠΑ2	if_z
10.2/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 5		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	ΑΠΑ2	if_z
10.2/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 6		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	ΑΠΑ3	if_z
10.2/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x

10.3/16	ΑΠΑ3	if_z

Πίνακας δρομολόγησης ΑΠΕ 7		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
10.1/16	ΑΠΑ3	if_z
10.2/16	ΑΠΑ3	if_z
10.3/16	Απ' ευθείας σύνδεση	if_x

2.8. Προώθηση της κίνησης ΕΙΔ των πελατών στο δίκτυο κορμού BGP/MPLS

Μετά τη διανομή των δρομολογήσεων σε όλο το δίκτυο κορμού μπορεί να γίνει η προώθηση της κίνησης από μια περιοχή του ΕΙΔ σε άλλη περιοχή του ΕΙΔ πάνω από το δίκτυο κορμού. Για να γίνει η μεταφορά των δεδομένων απαιτούνται αποφάσεις προώθησης που επηρεάζονται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Απόφαση προώθησης από τον πηγαίο δρομολογητή ΑΠΕ στον αντίστοιχο δρομολογητή εισόδου ΑΠΑ.
- Απόφαση προώθησης της κίνησης από τον δρομολογητή εισόδου ΑΠΑ.
- Απόφαση προώθησης της κίνησης σε κάθε δρομολογητή παρόχου Π.
- Απόφαση προώθησης της κίνησης από τον δρομολογητή εξόδου ΑΠΕ στον δρομολογητή προορισμού του πελάτη ΑΠΕ.

Αναλυτικά η διαδικασία των αποφάσεων προώθησης είναι:

2.8.1. Απόφαση προώθησης από τον πηγαίο δρομολογητή ΑΠΕ στον αντίστοιχο δρομολογητή εισόδου ΑΠΑ

Ο δρομολογητής ΑΠΕ λαμβάνει ένα εξερχόμενο πακέτο από την τοποθεσία του πελάτη στην οποία είναι συνδεδεμένος. Το πακέτο είναι σύμφωνο με IPv4, ο δρομολογητής συμβουλεύεται τους πίνακες δρομολόγησης και προωθεί το πακέτο στον απ' ευθείας συνδεδεμένο μαζί του δρομολογητή ΑΠΑ.

Απόφαση προώθησης της κίνησης από τον δρομολογητή εισόδου ΑΠΑ

Ο δρομολογητής εισόδου στο δίκτυο του Παρόχου λαμβάνει το πακέτο IPv4 από κάποια υποδιεπαφή η οποία όμως σχετίζεται με τον πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF της συγκεκριμένης τοποθεσίας του πελάτη. Συνεπώς η διεύθυνση προορισμού του πακέτου συγκρίνεται με βάση το πρόθεμα IPv4 στον πίνακα VRF του ΑΠΑ. Εάν βρεθεί σχετική

καταχώρηση τότε επιστρέφεται η διεύθυνση του επόμενου άλματος και μια υποδιεπαφή εξόδου και το πακέτο προωθείται προς την έξοδο.
Υπάρχει περίπτωση η υποδιεπαφή εξόδου να σχετίζεται με τον ίδιο πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF όπως και το εισερχόμενο πακέτο. Σε αυτήν την περίπτωση πολύ απλά είτε το επόμενο άλμα είναι ένας άλλος (διαφορετικός από τον πηγαίο) δρομολογητής ΑΠΕ της ίδιας τοποθεσίας, είτε είναι ένας δρομολογητής ΑΠΕ από μια διαφορετική τοποθεσία του ίδιου ΕΙΔ που είναι απ' ευθείας συνδεμένη στον ίδιο δρομολογητή ΑΠΑ.
Η επόμενη περίπτωση υπό εξέταση περιλαμβάνει την πιθανότητα οι υποδιεπαφές εισόδου και εξόδου του δρομολογητή του Παρόχου (ΑΠΑ) να σχετίζονται με δύο διαφορετικούς πίνακες VRF. Τότε υπάρχουν δύο τοποθεσίες που είναι απ' ευθείας συνδεδεμένες στον ΑΠΑ και έχουν τουλάχιστον ένα κοινό ΕΙΔ – αλλά και κάθε τοποθεσία διαθέτει ξεχωριστό πίνακα προώθησης. Για να προωθηθεί το πακέτο θα μπορούσε να είναι αναγκαία η σύγκριση της διεύθυνσης προορισμού με τις καταχωρήσεις του πίνακα VRF της υποδιεπαφής εξόδου.
Τέλος το εξερχόμενο πακέτο από τον πελάτη δεν έχει κάποια σχέση προθέματος με τους πίνακες VRF του ΑΠΑ που υπάρχουν για κάθε υποδιεπαφή εξόδου. Σε αυτήν την περίπτωση το πακέτο θα κινηθεί στο δίκτυο κορμού του Παρόχου εκτελώντας τουλάχιστον ένα άλμα σε δρομολογητή Π. Μετά τον πρώτο δρομολογητή Π το πακέτο είτε θα βρεθεί με ένα άλλο άλμα σε άλλο δρομολογητή Π, είτε σε δρομολογητή ΑΠΑ. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν τουλάχιστον δύο άλματα, το ένα εξ' αυτών είναι BGP και το έτερο IGP.

- Το επόμενο άλμα BGP είναι ο δρομολογητής εισόδου που αρχικά ανακοίνωσε την δρομολόγηση συμβατή με VPN-IPv4. Στο άλμα BGP καθορίζεται και διανέμεται μια ετικέτα με πρωτόκολλο MP-IBGP η οποία στην συνέχεια χαρακτηρίζει την απ' ευθείας συνδεδεμένη τοποθεσία που ανακοίνωσε την δρομολόγηση. Ο δρομολογητής εισόδου ΑΠΑ συνεπώς τοποθετεί στην στοίβα ετικετών την ετικέτα του πακέτου που γίνεται η εσωτερική ετικέτα για αυτό το πακέτο.
- Το επόμενο άλμα IGP είναι το πρώτο άλμα στο μονοπάτι ΜΜΕ προς το επόμενο άλμα BGP. Στο άλμα IGP το πακέτο αποκτά την εξωτερική ετικέτα μέσω πρωτοκόλλου LDP ή RSVP, η οποία τοποθετείται στην κορυφή της στοίβας ετικετών.

Με περαιτέρω απλοποίηση των παραπάνω βημάτων και με ορολογία MPLS, ο δρομολογητής εισόδου ΑΠΑ στο δίκτυο του Παρόχου γίνεται ο δρομολογητής εισόδου για τη μεταγωγή των ετικετών (ingress Label Switching Router). Το επόμενο άλμα BGP είναι ο δρομολογητής εξόδου για τη μεταγωγή των ετικετών (egress Label Switching Router) για το μονοπάτι ΜΜΕ εντός του δικτύου του Παρόχου. Εάν συμβεί τα δύο άλματα BGP και IGP να είναι ο ίδιος δρομολογητής, τότε το πακέτο μπορεί να μεταδοθεί με μόνο την εσωτερική ετικέτα (με δεδομένο ότι το προτελευταίο άλμα δεν υπολογίζεται).

Απόφαση προώθησης της κίνησης σε κάθε δρομολογητή παρόχου Π

Το δίκτυο κορμού MPLS προωθεί το πακέτο με τις ετικέτες ανταλλάσσοντας κάθε φορά την ετικέτα που βρίσκεται στην κορυφή της στοίβας ετικετών σε κάθε άλμα. Η ετικέτα που βρίσκεται στην κορυφή της στοίβας θα αφαιρεθεί

πριν από τελευταίο άλμα εντός του δικτύου του Παρόχου από τον τελευταίο δρομολογητή Π στον δρομολογητή εξόδου από το δίκτυο Παρόχου ΑΠΑ.

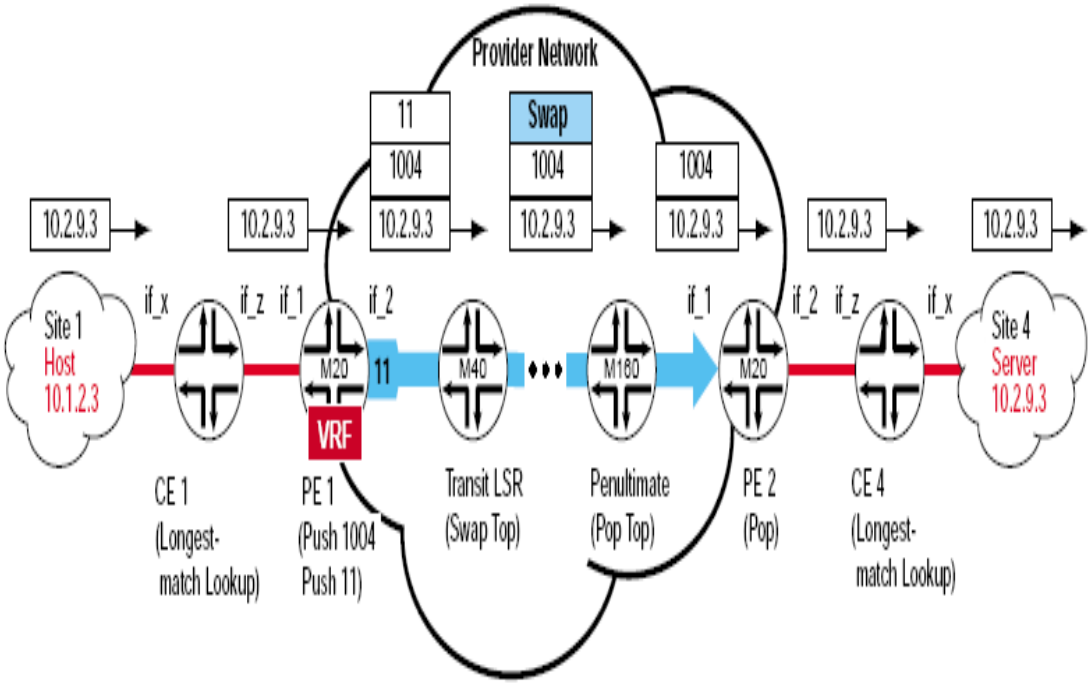
2.8.2. Απόφαση προώθησης της κίνησης από τον δρομολογητή εξόδου ΑΠΕ στον δρομολογητή προορισμού του πελάτη ΑΠΕ.

Σε συμφωνία με το προηγούμενο βήμα το πακέτο έχει φτάσει στον δρομολογητή εξόδου ΑΠΑ από το δίκτυο του Παρόχου με την εσωτερική ετικέτα στην κορυφή πλέον της στοίβας. Ο δρομολογητής ΑΠΑ με βάση την δρομολόγηση MPLS ελέγχει την εσωτερική ετικέτα εάν αντιστοιχεί σε κάποιο από τα ζευγάρια (ετικέτα, υποδιεπαφή) που έχει. Εάν η ετικέτα ταιριάζει αφαιρεί την εσωτερική ετικέτα από το πακέτο και το προωθεί αμέσως στην αντίστοιχη υποδιεπαφή του ζεύγους. Το ταίριασμα των ετικετών σημαίνει ότι υπάρχει στην υποδιεπαφή του ΑΠΑ απ' ευθείας συνδεδεμένος δρομολογητής ΑΠΕ που σχετίζεται με την εν λόγω ετικέτα. Συνεπώς υπάρχει τοποθεσία πελάτη απ' ευθείας συνδεδεμένη με τον δρομολογητή ΑΠΑ. Στην περίπτωση αυτή η προώθηση του πακέτου γίνεται αμέσως χωρίς ο δρομολογητής ΑΠΑ να συμβουλευτεί τον πίνακα VRF.

Συμπέρασμα
Μετά τις ανακοινώσεις δρομολογήσεων εντός του δικτύου του Παρόχου τα πακέτα των ΕΙΔ προωθούνται μεταξύ των δρομολογητών του Παρόχου με βάση τις ετικέτες MPLS και όχι τις διευθύνσεις IP.

2.8.3. Παράδειγμα κίνησης πακέτων σε ΕΙΔ BGP/MPLS

Ο υπολογιστής host με IP 10.1.2.3 της τοποθεσίας 1 θέλει να στείλει ένα πακέτο στην τοποθεσία 4 στον εξυπηρετητή με IP 10.2.9.3. Οι τοποθεσίες 1 και 4 ανήκουν σε ΕΙΔ που χαρακτηρίζεται από τον «κόκκινο» πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF.



Ο δρομολογητής ΑΠΕ CE1 μόλις λάβει το πακέτο IPv4 από την τοποθεσία 1 συμβουλεύεται τον πίνακα προώθησης IP που διαθέτει. Στον πίνακα προώθησης που διαθέτει ο ΑΠΕ CE1 υπάρχει η παρακάτω καταχώρηση που ταιριάζει με το πρόθεμα του προορισμού του πακέτου IPv4:

Πίνακας προώθησης ΑΠΕ CE1		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
xxxxx	xxxxx	xxxx
10.2/16	**PE1**	**if_z**
xxxxx	xxxxx	xxxx

Με βάση την παραπάνω καταχώρηση το πακέτο προωθείται στον δρομολογητή ΑΠΑ PE1. Ο δρομολογητής PE1 σχετίζει οτιδήποτε καταφθάνει στην διεπαφή if_z με τον πίνακα δρομολόγησης και προώθησης κόκκινο VRF που με τη σειρά του χαρακτηρίζει το «κόκκινο» ΕΙΔ. Ο δρομολογητής PE1 συμβουλεύεται τον πίνακα κόκκινο VRF για να βρει την καλύτερη καταχώρηση που μπορεί να εξυπηρετήσει το πρόθεμα 10.2/16 . Έστω ότι η καλύτερη καταχώρηση είναι :

Δρομολογητής PE1 Πίνακας προώθησης και δρομολόγησης VRF Red				
Προορισμός	**Επόμενο**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική**	**Εξωτερική**

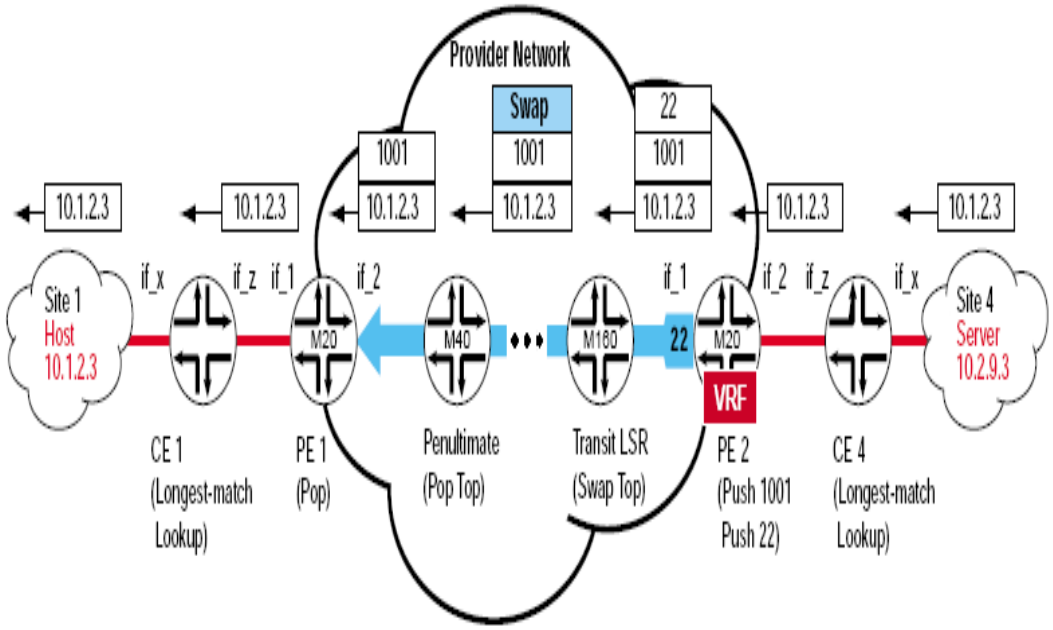
	άλμα BGP		**ετικέτα**	**ετικέτα**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	xxxxx
10.2/16	**PE2**	**if_2**	**1004**	**11**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	xxxxx

Η διεπαφή if_2 δεν σχετίζεται με τοπικό πίνακα VRF και το πακέτο θα πρέπει να διασχίσει το δίκτυο κορμού του Παρόχου στο επόμενο άλμα. Το δίκτυο κορμού είναι βασισμένο σε πρωτόκολλο MPLS και συνεπώς ο δρομολογητής PE1 δημιουργεί ένα πακέτο MPLS στο οποίο τοποθετεί το πακέτο IP εφοδιασμένο με επικεφαλίδα MPLS και με εσωτερική ετικέτα 1004. Η ετικέτα 1004 δεν είναι τυχαία, αλλά είναι η ετικέτα που καθορίστηκε από τον δρομολογητή ΑΠΑ PE2 (στο άλλο άκρο του σχήματος) , όταν ανακοίνωσε ότι γνωρίζει τη δρομολόγηση για το δίκτυο 10.2/16 και άρα τον δρόμο για την τοποθεσία 4 (βλ. ανακοίνωση δρομολογήσεων παραπάνω κεφ. 2.6).

Μετά την τοποθέτηση στην στοίβα της χαρακτηριστικής εσωτερικής ετικέτας 1004, ο PE1 τοποθετεί την δεύτερη ετικέτα 11 στην κορυφή της στοίβας η οποία είναι πλέον η εξωτερική ετικέτα για το πακέτο. Το πακέτο ακολουθεί το μονοπάτι μεταγωγής ετικετών (MME) από τον PE1 στον PE2, περνώντας από τους δρομολογητές Παρόχου. Σε κάθε άλμα η εξωτερική ετικέτα ανταλλάσσεται, μέχρι τον τελευταίο δρομολογητή Π πριν τον δρομολογητή ΑΠΑ PE2. Εκεί αφαιρείται (στο σχήμα αναφέρεται ως penultimate router) η εξωτερική ετικέτα και το πακέτο με μοναδική ετικέτα την 1004 στέλνεται στον PE2. Ο δρομολογητής PE2 άμα τη λήψη του πακέτου στην διεπαφή if_1 συμβουλεύεται τον πίνακα προώθησης MPLS που διαθέτει και ψάχνει πλέον καταχώρηση που να αναφέρεται στην ετικέτα 1004 και να την συσχετίζει με συγκεκριμένη διεπαφή:

Δρομολογητής PE2 Πίνακας προώθησης MPLS			
Διεπαφή Εισόδου	**Ετικέτα**	**Ενέργεια**	**Διεπαφή Εξόδου**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx
if_1	**1004**	**POP**	**if_2**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx

Με βάση τον πίνακα προώθησης ο δρομολογητής ΑΠΑ PE2 αφαιρεί την ετικέτα 1004 και προωθεί το απλό πλέον πακέτο IPv4 στην διεπαφή εξόδου if_2 όπου είναι συνδεδεμένος ο δρομολογητής ΑΠΕ CE4. Ο δρομολογητής CE4 ξέρει με τη σειρά του ότι η τοποθεσία με διευθυνσιοδότηση 10.2/16 είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη στην διεπαφή if_x και προωθεί το πακέτο μέσω αυτής της διεπαφής στον εξυπηρετητή 10.2.9.3.
Ο εξυπηρετητής 10.2.9.3 λαμβάνει το πακέτο από τον υπολογιστή 10.1.2.3 και στέλνει την απάντηση ή την ανταπόκριση στον 10.1.2.3:



Ο δρομολογητής ΑΠΕ CE4 λαμβάνει το πακέτο IPv4 από τον εξυπηρετητή 10.2.9.3 και συμβουλεύεται τον πίνακα προώθησης για να στείλει το πακέτο στον προορισμό του. Το καλύτερο ταίριασμα για το πρόθεμα 10.1/16 βρίσκεται με άλμα στον ΑΠΑ PE2 πάνω από τη διεπαφή if_z:

Πίνακας προώθησης ΑΠΕ CE4		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
xxxxx	xxxxx	xxxx
10.1/16	**PE2**	**if_z**
xxxxx	xxxxx	xxxx

Το πακέτο προωθείται στον PE2 που το λαμβάνει από την διεπαφή του if_2.Η διεπαφή if_2 σχετίζεται με τον πίνακα προώθησης και δρομολόγησης VRF κόκκινο που αντιστοιχεί στο ΕΙΔ «κόκκινο». Στον πίνακα VRF υπάρχει η παρακάτω καταχώρηση που ταιριάζει περισσότερο με δίκτυο προορισμού:

Δρομολογητής PE1 Πίνακας προώθησης και δρομολόγησης VRF Red				
Προορισμός	**Επόμενο άλμα BGP**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	xxxxx
10.1/16	**PE1**	**if_1**	**1001**	**22**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	xxxxx

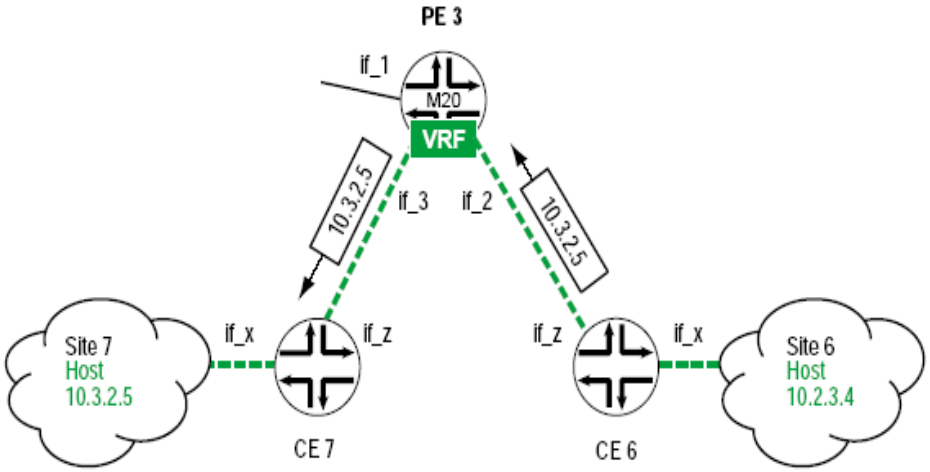
Η διεπαφή if_1 του δρομολογητή PE2 δεν σχετίζεται με τοπικό πίνακα VRF, οπότε το πακέτο πρέπει να σταλεί στον προορισμό του μέσα από το δίκτυο κορμού MPLS του Παρόχου.
Συνεπώς ο PE2 δημιουργεί ένα πακέτο MPLS στο οποίο τοποθετεί εκτός από την επικεφαλίδα MPLS, το πακέτο IPv4 και την ετικέτα 1001. Η ετικέτα 1001 είχε αρχικά ορισθεί από τον δρομολογητή ΑΠΑ PE1, όταν είχε ανακοινώνει τη δρομολόγηση για το υποδίκτυο 10.1/16. Η ετικέτα 1001 τοποθετείται στη στοίβα ως εσωτερική ετικέτα. Στην συνέχεια ο PE2 τοποθετεί την ετικέτα 22 στην στοίβα του πακέτου ως εξωτερική ετικέτα και με βάση αυτή το πακέτο μπορεί να ξεκινήσει την μεταγωγή του στο MME στο δίκτυο κορμού MPLS του Παρόχου. Η εξωτερική ετικέτα ανταλλάσσεται μεταξύ των δρομολογητών Π του Παρόχου πάνω στο μονοπάτι MME, μέχρι τον προτελευταίο δρομολογητή Π του Παρόχου (ο επόμενος είναι ο τελευταίος δρομολογητής ΑΠΑ του Παρόχου). Εκεί αφαιρείται η εξωτερική ετικέτα και το πακέτο με μοναδική ετικέτα πλέον την 1001 προωθείται στον δρομολογητή ΑΠΑ PE1.
Ο δρομολογητής PE1 συμβουλεύεται τον πίνακα προώθησης MPLS που διαθέτει και αφαιρεί την ετικέτα 1001.

Δρομολογητής PE1 Πίνακας προώθησης MPLS			
Διεπαφή Εισόδου	**Ετικέτα**	**Ενέργεια**	**Διεπαφή Εξόδου**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx
if_2	**1001**	**POP**	**if_1**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx

Μετά την αφαίρεση της ετικέτας 1001 ο δρομολογητής προωθεί το πακέτο IPv4 στον δρομολογητή πελάτη CE1. Ο δρομολογητής πελάτη CE1 διαθέτει απ' ευθείας σύνδεση με την τοποθεσία 1 πάνω από τη διεπαφή if_x, οπότε στέλνει το πακέτο στον προορισμό του στην τοποθεσία 1, στον υπολογιστή 10.1.2.3.

2.8.4. Τοποθεσίες του ίδιου ΕΙΔ συνδεδεμένες στον ίδιο ΑΠΑ

Στο παράδειγμα αυτό που περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα ο υπολογιστής 10.2.3.4 της τοποθεσίας 6 στέλνει πακέτο πληροφορίας στον υπολογιστή 10.3.2.5 στην τοποθεσία 7. Οι δύο τοποθεσίες ανήκουν στο ίδιο VPN (πράσινο) και συνδέονται με το δίκτυο Παρόχου μέσω του ίδιου δρομολογητή ΑΠΑ PE3:



Ο δρομολογητής ΑΠΕ CE6 λαμβάνει το πακέτο IPv4 από την τοποθεσία 6, από τον Η/Υ 10.2.3.4, πάνω από την διεπαφή if_x. Στη συνέχεια συμβουλεύεται τον πίνακα προώθησης IP που διαθέτει για να βρει την πιο ταιριαστή καταχώρηση για το υποδίκτυο προορισμού 10.3/16:

Πίνακας προώθησης ΑΠΕ CE6		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
xxxxx	xxxxx	xxxx
10.3/16	**PE3**	**if_z**
xxxxx	xxxxx	xxxx

Άρα το απλό πακέτο IPv4 προωθείται στον δρομολογητή ΑΠΑ PE3. Ο δρομολογητής PE3 λαμβάνει το πακέτο πάνω στην διεπαφή if_2 η οποία σχετίζεται με τον πίνακα VRF του ΕΙΔ «πράσινο». Συνεπώς συμβουλεύεται τον πίνακα VRF πράσινο για την καλύτερη δυνατή καταχώρηση σχετικά με το υποδίκτυο 10.3/16:

Δρομολογητής PE3 Πίνακας προώθησης και δρομολόγησης VRF Red				
Προορισμός	**Επόμενο άλμα BGP**	**Διεπαφή**	**Εσωτερική ετικέτα**	**Εξωτερική ετικέτα**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	xxxxx
10.3/16	**Απ' ευθείας**	**if_3**	**1008**	**-**
xxxxx	xxxxx	xxxx	xxxxx	xxxxx

Η διεπαφή εξόδου if_3 σχετίζεται με το ΕΙΔ πράσινο και συνεπώς η τοποθεσία προορισμού είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη πάνω στον δρομολογητή PE3. Το πακέτο δεν χρειάζεται να διασχίσει το δίκτυο κορμού του Παρόχου, αλλά από τη διεπαφή if_3 μπορεί να σταλεί σε δρομολογητή ΑΠΕ που είναι το επόμενο άλμα σε αυτή την περίπτωση. Ο δρομολογητής ΑΠΕ είναι ο CE7, ο οποίος λαμβάνει το πακέτο IPv4 (το πακέτο δεν μετατρέπεται σε MPLS πακέτο, αφού δεν διασχίζει το δίκτυο κορμού του Παρόχου). Μόλις το πακέτο IPv4 φτάσει στον CE7, ο CE7 το προωθεί συμβουλευόμενος τον πίνακα προώθησης που διαθέτει στην τοποθεσία 7 με υποδίκτυο 10.3.16 για τον υπολογιστή 10.3.2.5

Πίνακας προώθησης ΑΠΕ CE7		
Προορισμός	**Επόμενο άλμα**	**Διεπαφή**
xxxxx	xxxxx	xxxx
10.3/16	**Απ' ευθείας**	**if_x**
xxxxx	xxxxx	xxxx

2.9. Μηχανισμοί διασύνδεσης με το Internet

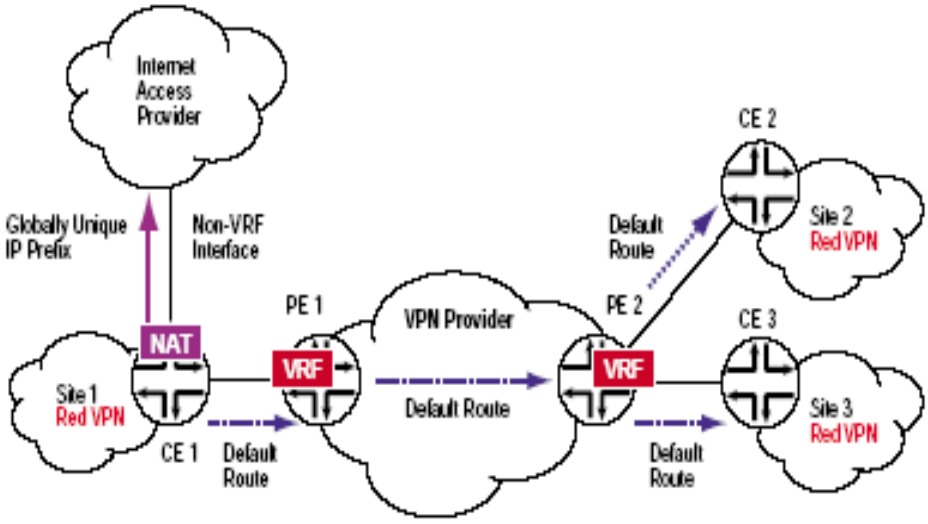
Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η διασύνδεση τοποθεσιών των ΕΙΔ με το Διαδίκτυο, πέρα από τις διασυνδέσεις μεταξύ των τοποθεσιών του ΕΙΔ. Οι μηχανισμοί διευθυνσιοδότησης που μπορούν να ακολουθηθούν είναι οι παρακάτω:

- Όλα τα συστήματα στο ιδιωτικό δίκτυο έχουν πραγματικές καθολικά μοναδικές διευθύνσεις IP. Στην περίπτωση αυτή ο πελάτης έχει δεσμεύσει πραγματικό εύρος IP διευθύνσεων από τον Πάροχο ή απ' ευθείας από κάποιο καταχωρητή διευθύνσεων IP. Σε αυτήν την περίπτωση η επικοινωνία με το Διαδίκτυο διευκολύνεται και κάθε υπολογιστής του ΕΙΔ, μπορεί να επικοινωνήσει απ' ευθείας με άλλους υπολογιστές οπουδήποτε στο Διαδίκτυο.
- Κάποια από τα συστήματα του ΕΙΔ έχουν πραγματικές καθολικά μοναδικές διευθύνσεις IP, ενώ τα περισσότερα συστήματα του ΕΙΔ έχουν ιδιωτικές IP διευθύνσεις μη δρομολογήσιμες απ' ευθείας στο Διαδίκτυο. Χαρακτηριστική

περίπτωση τέτοιων συστημάτων είναι ο εξυπηρετητής ιστοσελίδων και ο εξυπηρετητής ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μιας επιχείρησης, οι οποίοι μπορεί να έχουν πραγματικές IP διευθύνσεις, ενώ όλοι οι άλλοι υπολογιστές της επιχείρησης έχουν ιδιωτικές.

- Όλοι οι υπολογιστές του ΕΙΔ διαθέτουν ιδιωτικές IP διευθύνσεις. Στην περίπτωση αυτή για να είναι δυνατή η επικοινωνία με το Διαδίκτυο χρειάζεται η λειτουργία εξυπηρετητή NAT (Network Address Translator) που μετατρέπει τις ιδιωτικές IP διευθύνσεις σε πραγματικές. Ο εξυπηρετητής NAT μπορεί να υλοποιηθεί στον δρομολογητή διασύνδεσης του ΕΙΔ με το Διαδίκτυο.

Στην σύσταση RFC 2547bis προτείνεται η μέθοδος της προσπέλασης χωρίς την χρήση πινάκων VRF στο Διαδίκτυο για τοποθεσίες ενός ΕΙΔ βασισμένου σε BGP/MPLS. Οι παραδοχές για αυτό το μοντέλο είναι ότι οι τοποθεσίες του πελάτη μπορούν να έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω μιας πύλης Διαδικτύου (Internet Gateway), η οποία παρέχεται από κάποιον Πάροχο Υπηρεσιών. Ο Πάροχος Υπηρεσιών Διαδικτύου (ΠΥΔ-ISP), μπορεί να είναι ο ίδιος που παρέχει στον πελάτη το ΕΙΔ, αλλά μπορεί να είναι και κάποιος τρίτος με μοναδική υπευθυνότητα την παροχή πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Αυτή καθ' εαυτή η υπηρεσία πύλης στο Διαδίκτυο είναι δυνατό να υλοποιείται πάνω από μια διεπαφή χωρίς πίνακα VRF ενός από τους ΑΠΕ δρομολογητές, αλλά μπορεί επίσης να υλοποιείται σε ειδικό δρομολογητή υπεύθυνο για την πρόσβαση κάπου στο δίκτυο του πελάτη.
Στη συνήθη περίπτωση πάνω από τη διεπαφή πρόσβασης συνυπάρχουν τείχος προστασίας για το Διαδίκτυο μαζί με λειτουργίες εξυπηρέτησης NAT.



Στο παράδειγμα ο δρομολογητής CE1 (ΑΠΕ) του «κόκκινου» ΕΙΔ, παρέχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε όλες τις τοποθεσίες του ΕΙΔ. Για να γίνει η διανομή της δρομολόγησης για το Διαδίκτυο, ο δρομολογητής ΑΠΕ ανακοινώνει μια εξ' ορισμού δρομολόγηση (default route) για το Διαδίκτυο στον δρομολογητή του Παρόχου Υπηρεσιών ΕΙΔ, PE1. Ο PE1 στο παραπάνω σχήμα υλοποιεί τις λειτουργίες ΑΠΑ. Η εξ' ορισμού δρομολόγηση προέρχεται από διεπαφή χωρίς πίνακα VRF του CE1. Στον δρομολογητή του Παρόχου PE1 η ανακοίνωση αυτής της δρομολόγησης καταλήγει σε πίνακα VRF και μάλιστα στον VRF κόκκινο, αφού έχει ανακοινωθεί

από δρομολογητή ΑΠΕ του ΕΙΔ «κόκκινο». Στην συνέχεια με τη χρήση MP-IBGP η δρομολόγηση για το Διαδίκτυο ανακοινώνεται στον δρομολογητή ΑΠΑ PE2, ο οποίος με τη σειρά του θα την καταχωρήσει στον πίνακα δρομολόγησης και προώθησης VRF κόκκινο που διαθέτει. Από τον PE2 η δρομολόγηση ανακοινώνεται στους δρομολογητές ΑΠΕ CE2 και CE3, που συνδέουν τις τοποθεσίες 2 και 3 του πελάτη στο ΕΙΔ κόκκινο. Τώρα είναι πλέον δυνατή η επικοινωνία κάθε τοποθεσίας του ΕΙΔ με το Διαδίκτυο πάνω από τον δρομολογητή ΑΠΕ CE1.

Η χρήση NAT στον δρομολογητή ΑΠΕ CE1 επιβάλλεται για την αντιστοίχηση της πηγαίας ιδιωτικής διεύθυνσης μέσα από το ΕΙΔ σε πραγματική για το Διαδίκτυο πηγαία διεύθυνση.

Η απάντηση από το Διαδίκτυο προς το ΕΙΔ, απαιτεί την προώθηση πακέτων προορισμένων για τις τοποθεσίες του ΕΙΔ «κόκκινο» προς τον δρομολογητή ΑΠΕ CE1. Ο CE1 έχει διπλό ρόλο:

Είναι άκρο πελάτη για το ΕΙΔ «κόκκινο» και δρομολογητής πρόσβασης του ΕΙΔ στο Διαδίκτυο. Για αυτό το λόγο, ενώ κρύβει τις ιδιωτικές διευθύνσεις του ΕΙΔ από το Διαδίκτυο, πρέπει να ανακοινώνει τις πραγματικές δημόσιες διευθύνσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή του NAT. Η ανακοίνωση πραγματικών δημοσίων διευθύνσεων υλοποιείται με κατάλληλο δημόσιο πρόθεμα IP το οποίο είτε ο πελάτης το έχει προμηθευτεί απ' ευθείας από καταχωρητή διευθύνσεων IP, είτε του το έχει εκχωρήσει ο ΠΥΔ. Συνεπώς μόλις ένα πακέτο καταφθάνει στον CE1, από το Διαδίκτυο, φέρει ως διεύθυνση προορισμού το χαρακτηριστικό πραγματικό δημόσιο πρόθεμα για το ΕΙΔ, μαζί με κάποια υποδιεύθυνση υπολογιστή μέσα στο ΕΙΔ. Ο CE1 χρησιμοποιεί την λειτουργία NAT και μεταφράζει την εξωτερική δημόσια διεύθυνση σε εσωτερική ιδιωτική. Εάν η εσωτερική διεύθυνση είναι στην τοποθεσία 1 του δρομολογητή CE1, τότε το πακέτο στέλνεται αμέσως στον προορισμό του. Αλλιώς, εάν από τη μετάφραση NAT προκύψει διεύθυνση προορισμού στις τοποθεσίες 2 και 3, τότε το πακέτο προωθείται πάνω από το δίκτυο κορμού του Παρόχου ΕΙΔ, μέσω του PE1 στους CE2 ή CE3.

2.10. Συμπεράσματα για την αρχιτεκτονική των BGP/MPLS ΕΙΔ

Τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής ΕΙΔ βασισμένων στην τεχνολογία BGP/MPLS με γνώμονα τις δυνατότητες κλιμάκωσης είναι τα ακόλουθα σύμφωνα με το white paper *[RFC 2547/bis: BGP/MPLS VPN Fundamentals-C. Semeria, Juniper Networks, 2001]*:

- Τα ΕΙΔ βασισμένα σε τεχνολογία BGP/MPLS δεν τοποθετούνται πάνω από την υπάρχουσα δικτυακή υποδομή του Παρόχου σαν δίκτυο overlay. Με αυτό τον τρόπο τα προβλήματα κλιμάκωσης του μοντέλου επικάλυψης δεν υφίστανται.
- Οι πολλαπλές διασυνδέσεις μεταξύ τοποθεσίας πελάτη και δρομολογητή ΑΠΑ, αντιστοιχίζονται σε μοναδικό πίνακα προώθησης, ώστε να γίνεται μέγιστη οικονομία των πόρων του δρομολογητή.
- Υποστηρίζεται η εφαρμογή επικαλυπτόμενων διευθύνσεων με συνέπεια την αποτελεσματική χρήση του χώρου ιδιωτικών διευθύνσεων IP.
- Οι δρομολογητές ΑΠΑ διαθέτουν πίνακες δρομολόγησης μόνο για τα ΕΙΔ στα οποία είναι συνδεδεμένοι απ' ευθείας.

- Οι στόχοι δρομολόγησης περιορίζουν την διανομή πληροφορίας δρομολόγησης.
- Οι δρομολογητές ΑΠΑ διαθέτουν καταχωρήσεις δρομολόγησης μόνο για απομακρυσμένους δρομολογητές ΑΠΑ και απ' ευθείας συνδεδεμένους δρομολογητές ΑΠΕ και όχι για απομακρυσμένους δρομολογητές ΑΠΕ.
- Οι δρομολογητές Π που δεν συνδέονται απ' ευθείας με δρομολογητές ΑΠΕ, δεν διαθέτουν πληροφορία δρομολόγησης για τα ΕΙΔ, ενώ προωθούν τα πακέτα βάση της στοίβας δύο επιπέδων.
- Δεν απαιτείται η ύπαρξη μοναδικού συστήματος στο δίκτυο κορμού του Παρόχου που να διατηρεί πληροφορίες για όλα τα ΕΙΔ που υποστηρίζει ο Πάροχος.
- Η διαχείριση διευκολύνεται γιατί δεν υπάρχει ξεχωριστό δίκτυο κορμού ή Εικονικό δίκτυο κορμού για κάθε ΕΙΔ κάθε πελάτη.
- Τα διακριτικά δρομολόγησης (RD) εξασφαλίζουν ότι κάθε Πάροχος διαχειρίζεται το δικό του χώρο διευθύνσεων. Η δημιουργία ξεχωριστών πλήρως μοναδικών διακριτικών δρομολόγησης εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει περίπτωση σύγχυσης με τα διακριτικά δρομολόγησης άλλου Παρόχου.
- Τα φίλτρα εξερχόμενων δρομολογήσεων (ORF) ελαττώνουν την πληροφορία δρομολόγησης που ανακοινώνεται στο δίκτυο κορμού του Παρόχου.
- Η χρήση ανακλαστήρων δρομολόγησης απαλείφει την αναγκαιότητα δημιουργίας συνδέσεων πλήρους βρόγχου MP-IBGP.
- Οι ανακλαστήρες δρομολόγησης (RR route reflector) είναι τα μόνα συστήματα στο δίκτυο τα οποία διαθέτουν καταχωρήσεις για τοποθεσίες οι οποίες δεν είναι απ' ευθείας συνδεδεμένες.
- Η εφαρμογή ΤΕ βασισμένου σε RSVP σε μονοπάτια ΜΜΕ βελτιστοποιούν την συνδεσιμότητα μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΑ.

Τα μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής ΕΙΔ βασισμένων στην τεχνολογία BGP/MPLS είναι τα ακόλουθα σύμφωνα με το white paper *[RFC 2547/bis: BGP/MPLS VPN Fundamentals-C. Semeria, Juniper Networks, 2001]*:

- Είναι κατάλληλη για πελάτες πρόθυμους να μοιραστούν την πολυπλοκότητα της δρομολόγησης των δικτύων τους με τους ΠαρόχουςΥπηρεσιών, η να αναθέσουν σε ΠΥ όλη τη διαχείριση της δρομολόγησης των εσωτερικών του δικτύων. Υπάρχουν πελάτες όμως που για δικούς τους λόγους προτιμούν να έχουν πλήρως τη διαχείριση της δρομολόγησης των δικών τους δικτύων. Πρακτικά η πολυπλοκότητα δρομολόγησης μετακινείται απ τον δρομολογητή του πελάτη ΑΠΕ, στον δρομολογητή ΑΠΑ του Παρόχου, όπου περνά πάνω από την κοινή υποδομή MPLS που μπορεί να συνδέει τόσο ιδιωτικά όσο και δημόσια δίκτυα.
- Η αποδοτικότητα της αρχιτεκτονικής BGP/MPLS ίσως δεν επαρκεί για πολύπλοκες δρομολογήσεις, γιατί προϋποθέτει μια σχετικά απλή σχέση δρομολόγησης μεταξύ των ΑΠΑ και ΑΠΕ.
- Η διαχείριση εν δυνάμει εκατοντάδων πινάκων προώθησης σε ένα μοναδικό δρομολογητή ΑΠΑ δεν είναι πλήρως κατανοητή.
- Δεν υπάρχει υποστήριξη για πρωτόκολλα Multicast
- Υπάρχουν σοβαρά προβλήματα στην υποστήριξη από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας σε περιβάλλον που εμπλέκονται πολλοί Πάροχοι.

- Τα εργαλεία διαχείρισης και υποστήριξης του δικτύου δεν λειτουργούν καλά σε περιβάλλον εξοπλισμού από διαφορετικούς κατασκευαστικούς οίκους.

3. Μηχανισμοί διασύνδεσης Παρόχων για την υποστήριξη ΕΙΔ

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μηχανισμοί διασύνδεσης των Παρόχων για την υποστήριξη Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των υλοποιήσεων.
Στην περίπτωση που το Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο ενός Πελάτη εκτείνεται σε περισσότερους του ενός Παρόχους τότε χρειάζεται επέκταση των θεωρήσεων και πρακτικών που πηγάζουν από την RFC 2547. Οι μηχανισμοί που θα παρουσιαστούν παρακάτω στηρίζονται στις ιδιότητες των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και στις πιθανές επεκτάσεις που μπορεί να δεχτούν χωρίς να παραβιάζονται οι αρχές υλοποίησης των ΕΙΔ που περιγράφονται στην RFC 2547. Σε επίπεδο πρωτοκόλλων θεωρείται ότι κάθε Πάροχος αποτελεί αυτόνομο σύστημα με συγκεκριμένο μοναδικά ορισμένο αριθμό αυτόνομου συστήματος ASN. Εντός του συστήματος (δηλαδή ουσιαστικά εντός του δικτύου κορμού του κάθε Παρόχου) είναι δυνατός ο διαχωρισμός των δρομολογητών σε δρομολογητές Παρόχου (Π) και δρομολογητές Άκρου Παρόχου (ΑΠΑ). Με τη χρήση των δρομολογήσεων στόχων και των αντίστοιχων κατηγορημάτων οι δρομολογητές ΑΠΑ παρέχουν συνδεσιμότητα στις τοποθεσίες του Πελάτη που βρίσκονται εντός του δικτύου του Παρόχου. Η αρχιτεκτονική που έχει περιγραφεί έως τώρα (RFC 2547) δεν επιτρέπει τη μετάδοση δρομολογήσεων εκτός του αυτόνομου συστήματος του ίδιου Παρόχου. Οι επεκτάσεις πρωτοκόλλων που έχουν προταθεί από την Cisco για την επίλυση του προβλήματος είναι :

- ✓ Back to back VRF
- ✓ Εξωτερικό Multiprotocol BGP
- ✓ Multihop MP-eBGP για την ανταλλαγή προθεμάτων VPN-IPv4
- ✓ Multihop MP-eBGP μεταξύ των ανακλαστήρων δρομολόγησης

3.1. Τεχνική Back to back VRF

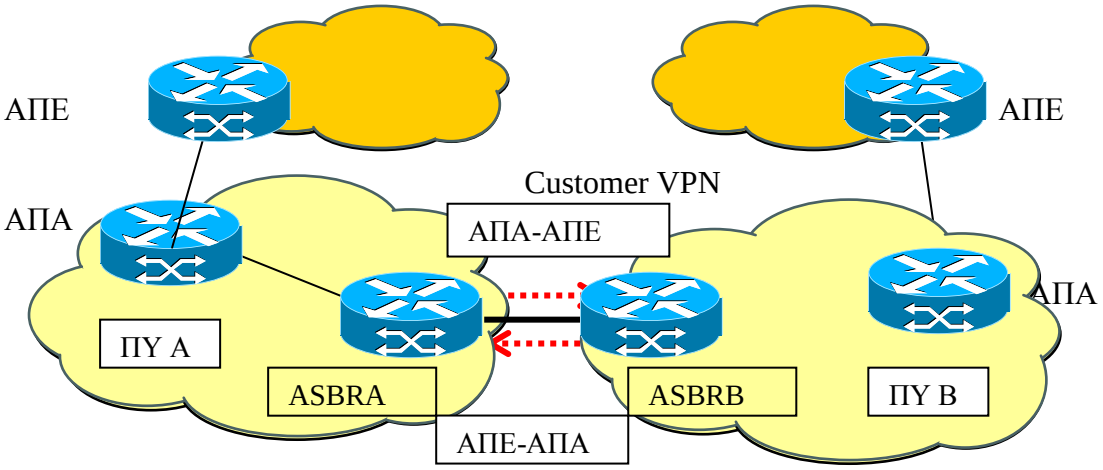
Στην πρόταση αυτή θεωρείται ότι οι τοποθεσίες του πελάτη βρίσκονται σε δύο ή περισσότερους Παρόχους οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές και δρομολογητές. Ο Πάροχος Α διαθέτει για τη διασύνδεσή του με τον Πάροχο Β , τον δρομολογητή ASBRA (Autonomous System Border Router) και αντιστοίχως ο Β διαθέτει τον ASBRB. Οι δύο αυτοί δρομολογητές αποτελούν τους δρομολογητές παρυφής των δύο Παρόχων.

Η απλή λύση συνίσταται στην δημιουργία ζευγαριού ΑΠΑ-ΑΠΕ (Άκρο Παρόχου – Άκρο Πελάτη)μεταξύ των ASBRA και ASBRB, δηλαδή ο ASBRA ανάγει τον εαυτό σε ΑΠΑ και θεωρεί τον ASBRB ως ΑΠΕ και το ανάποδο. Ουσιαστικά μεταξύ δύο Παρόχων δημιουργείται αμφίδρομη σχέση Πελάτη-Παρόχου πάνω στα σημεία διασύνδεσής τους, ώστε να εξυπηρετηθεί συγκεκριμένο ΕΙΔ που έχει τοποθεσίες και στους δύο Παρόχους. Όπως θα γίνει κατανοητό από το παρακάτω παράδειγμα ο μηχανισμός αυτός αποδίδει καλά στην περίπτωση που οι Πάροχοι έχουν φυσική διασύνδεση και ο αριθμός τους είναι σχετικά περιορισμένος. Επίσης το ΕΙΔ του Πελάτη έχει τοποθεσίες σε κάθε ένα από τους φυσικά συνδεδεμένους Παρόχους. Στην περίπτωση που κάποιοι Πάροχοι συνδέονται μέσω τρίτου Παρόχου στον οποίο δεν υπάρχουν τοποθεσίες του Πελάτη ο μηχανισμός χρειάζεται επιπλέον τροποποίηση ώστε να μπορέσει να δρομολογήσει

κίνηση ΕΙΔ το οποίο βρίσκεται εκτός του δικτύου του. Το σαφές πλεονέκτημα απλότητας του μηχανισμού σε αυτήν την περίπτωση χάνεται, γιατί δεν υπάρχει άμεση φυσική διασύνδεση των δύο Παρόχων.

Η μετατροπή του ASBRA σε δρομολογητή ΑΠΑ σημαίνει ότι ο ASBRA μαθαίνει τις δρομολογήσεις για το ΕΙΔ του πελάτη που υπάρχουν εντός του Παρόχου Α. Το ίδιο συμβαίνει και για τον ASBRB, ο οποίος μετατρέπεται σε ΑΠΑ για τον πελάτη εντός του δικτύου του Παρόχου Β.
Ο δρομολογητής στον Πάροχο Α θα έχει τις ρυθμίσεις, σύμφωνα με Cisco IOS:

```
hostname ASBRA
!
 ip vrf customer
 rd 10:4972
 route-target export 20:123
 route-target import 20:123
!
interface POS10/0/0
 description connection to ISP B-router ASBRB
 ip forwading customer
 ip address 192.168.2.37 255.255.255.252
```



Ο δρομολογητής στον Πάροχο Β θα έχει τις ρυθμίσεις:

```
hostname ASBRB
!
 ip vrf customer
 rd 99:5432
 route-target export 20:123
 route-target import 20:123
!
interface POS8/1/0
 description connection to ISP A-router ASBRA
 ip forwading customer
 ip address 192.168.2.38 255.255.255.252
```

Με τον παραπάνω κώδικα οι δύο δρομολογητές ASBRA και ASBRB όχι μόνο επικοινωνούν μέσω του υποδικτύου 192.168.2.36/30 αλλά έχουν γνώση για το ΕΙΔ του πελάτη μέσω των αντιστοίχων πινάκων VRF. Ευνόητο είναι ότι παρόμοιες ρυθμίσεις πρέπει να γίνουν για κάθε πελάτη ΕΙΔ που συμβαίνει να έχει τοποθεσίες στους δύο Παρόχους, όπως και η παραχώρηση λογικής διεπαφής μεταξύ των Παρόχων για κάθε πελάτη. Τώρα αφού ο ASBRA έχει τη δρομολόγηση για το ΕΙΔ customer (όπως άλλωστε και ο γειτονικός του ASBRB) απομένει η διανομή της δρομολόγησης στον γειτονικό δρομολογητή. Εδώ υπάρχει ελευθερία επιλογής πρωτοκόλλου δρομολόγησης και η συνήθης λύση είναι η επιλογή ενός πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης όπως το BGP4. Η στατική δρομολόγηση δεν θεωρείται καλή λύση λόγω του συνεχούς ελέγχου των ρυθμίσεων στους ASBR για συνέπεια και πρόσθεση νέων δρομολογήσεων κάθε φορά που προστίθενται νέοι πελάτες. Επιπλέον το BGP4 έχει πολύ καλή συμπεριφορά από άποψη εφαρμογής πολιτικών και ασφαλείας. Με βάση τη χρήση BGP οι ρυθμίσεις γίνονται:

```
!Πάροχος Α
hostname ASBRA
!
 router bgp 10
 no bgp default ipv4-unicast
 bgp log-neighbor-changes
 neighbor 194.22.15.1 remote-as 10
 neighbor 194.22.15.1 update-source Loopback0
 no auto-summary
!
address-family vpn4
neighbor 194.22.15.1 activate
neighbor 194.22.15.1 send-community extended
exit-address-family
!
address-family ipv4 vrf customer
neighbor 192.168.2.38 remote-as 20
neighbor 192.168.2.38 activate
no auto-summary
no synchronization
exit-address-family

!Πάροχος Β
hostname ASBRB
!
 router bgp 20
 no bgp default ipv4-unicast
 bgp log-neighbor-changes
 neighbor 196.49.1.3 remote-as 20
 neighbor 196.49.1.3 update-source Loopback0
 no auto-summary
!
```

```
address-family vpn4
neighbor 196.49.1.3 activate
neighbor 196.49.1.3 send-community extended
exit-address-family
!
address-family ipv4 vrf customer
neighbor 192.168.2.37 remote-as 20
neighbor 192.168.2.37 activate
no auto-summary
no synchronization
exit-address-family
```

Τώρα πλέον οι δρομολογήσεις μπορούν να γνωστοποιηθούν μέσω του δικτύου κορμού των Παρόχων Α και Β με τη χρήση MPLS και να φτάσουν στους πραγματικούς ΑΠΑ, όπου και θα τοποθετηθούν στους πίνακες δρομολογήσεων. Οι κατά συνθήκη ΑΠΑ-ΑΠΕ πάνω στους ASBR Α και Β δεν χρησιμοποιούν τις ετικέτες MPLS στην μεταξύ τους ανταλλαγή πακέτων για το δίκτυο ΕΙΔ του πελάτη, όπως μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα με τη χρήση traceroute από τοποθεσία του πελάτη εντός του Παρόχου Α σε τοποθεσία του πελάτη εντός του Παρόχου Β.

Η χρήση Back to Back VRF έχει σαφώς το πλεονέκτημα της εύκολης υλοποίησης αλλά περιορίζεται στην κλιμάκωση αφού απαιτεί ξεχωριστό πίνακα VRF και λογική διεπαφή για κάθε ΕΙΔ που ανήκει σε περισσότερους από ένα Παρόχους.

3.2. Τεχνική Εξωτερικό Multiprotocol BGP

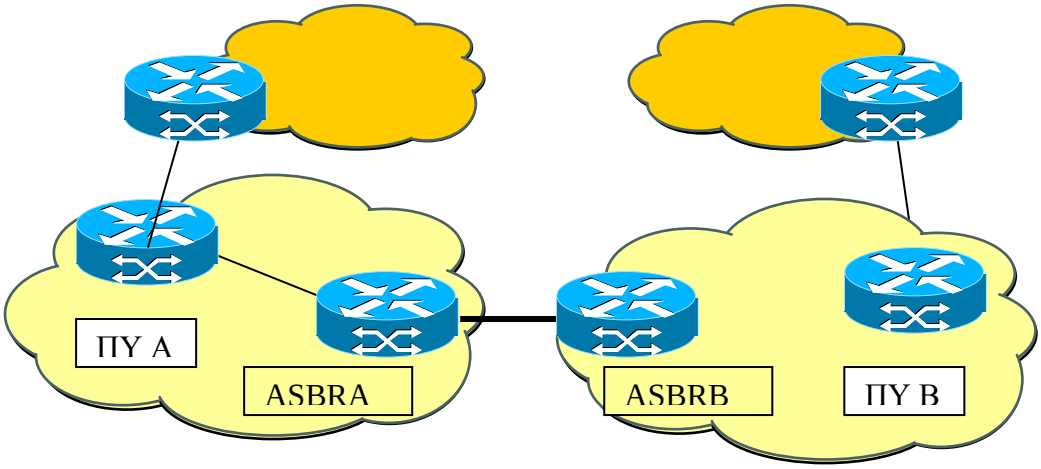
Για να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα της λύσης Back to Back VRF, υπάρχει η επέκταση του Multiprotocol BGP ώστε πέραν των εσωτερικών γειτόνων VPN-IPv4 να υποστηρίζονται και εξωτερικοί γείτονες VPN-IPv4. Με το πρωτόκολλο εξωτερικό Multiprotocol BGP η πληροφορία διευθύνσεων / ετικετών VPN-IPv4 μπορεί να περάσει τα όρια των Παρόχων Υπηρεσιών (ΠΥ).
Στην τεχνική αυτή πάλι υπάρχει η θεώρηση των δρομολογητών παρυφής των Παρόχων (ASBRA και ASBRB).

Η βασική ιδέα του μηχανισμού αυτού είναι ότι ο γνωστοποιών την ύπαρξη ΕΙΔ δρομολογητής ASBR αντικαθιστά την στοίβα ετικετών των προθεμάτων ΕΙΔ με μια τοπική ετικέτα πριν να γνωστοποιήσει τη δρομολόγηση ΕΙΔ. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί με τη χρήση εξωτερικού BGP μεταξύ των ΠΥ ο δρομολογητής ASBR καθίσταται το next hop της δρομολόγησης και τερματίζει το μονοπάτι μεταγωγής ετικετών (MME) για αυτή τη δρομολόγηση. Για να διατηρηθεί το μονοπάτι MME ο δρομολογητής ASBR πρέπει να παραχωρήσει μια τοπική ετικέτα που να αντιστοιχεί στην στοίβα ετικετών που υπάρχει για τη συγκεκριμένη δρομολόγηση εντός του MPLS ΕΙΔ. Στην περίπτωση αυτή οι δρομολογητές ASBR δεν χρειάζεται να ξέρουν τις δρομολογήσεις των πινάκων VRF και η διεπαφή που τους συνδέει βρίσκεται στον κεντρικό πίνακα δρομολόγησης. Επίσης πάνω στη σύνδεση των δύο δρομολογητών το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι το BGP και δεν

χρειάζεται κάποιο άλλο πρωτόκολλο διανομής ετικετών. Συνεπώς οι ρυθμίσεις στον δρομολογητή ASBRA είναι:

```
!Πάροχος Α
hostname ASBRA
!
 interface POS10/0/0
 description connection to ISP B-router ASBRB
 ip address 192.168.2.37 255.255.255.252
!
router bgp 10
 no bgp default ipv4-unicast
 no bgp default route-target filter
 bgp log-neighbor-changes
 neighbor 192.168.2.38 remote-as 20
 neighbor 194.22.15.1 remote-as 10
 neighbor 194.22.15.1 update-source Loopback0
 no auto-summary
!
address-family vpn4
neighbor 192.168.2.38 activate
neighbor 192.168.2.38 send-community extended
neighbor 194.22.15.1 activate
neighbor 194.22.15.1 send-community extended
exit-address-family
!

!Πάροχος Β
hostname ASBRB
!
 interface POS8/1/0
 description connection to ISP B-router ASBRB
 ip address 192.168.2.38 255.255.255.252
!
router bgp 10
 no bgp default ipv4-unicast
 no bgp default route-target filter
 bgp log-neighbor-changes
 neighbor 192.168.2.37 remote-as 10
 neighbor 194.22.15.1 remote-as 20
 neighbor 194.22.15.1 update-source Loopback0
 no auto-summary
!
address-family vpn4
neighbor 192.168.2.37 activate
neighbor 192.168.2.37 send-community extended
neighbor 194.22.15.1 activate
neighbor 194.22.15.1 send-community extended
exit-address-family
```



Η εντολή no bgp default route-target filtel τοποθετείται για να επιτρέψει την ανταλλαγή δρομολογήσεων για τα προθέματα των διευθύνσεων VPN-IPv4 τα οποία γενικώς φιλτράρονται και δεν επιτρέπεται να περνούν τα όρια του αυτόνομου συστήματος όπου ανήκουν. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως η τεχνική αυτή συνίσταται στη δημιουργία νέας ετικέτας για τη μεταγωγή ετικετών μεταξύ των δρομολογητών ASBRA και ASBRB. Ο γνωστοποιών ASBR που βρίσκεται στο ένα δίκτυο κορμού MPLS/VPN γίνεται ο δρομολογητής BGP next-hop για το γειτονικό MPLS/VPN έτσι ώστε όλοι οι ΑΠΑ στο γειτονικό MPLS/VPN να χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη δευτερεύουσα ετικέτα που έχει θέσει ο γνωστοποιών ASBR στη στοίβα ετικετών MPLS. Με αυτό τον τρόπο είναι πλέον αποκαταστημένη η επικοινωνία σε επίπεδο ΕΙΔ μεταξύ των τοποθεσιών του πελάτη.

3.3. Τεχνική Multihop MP-eBGP για την ανταλλαγή προθεμάτων VPN-IPv4

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση που οι ΠΥ έχουν περισσότερες από μία γραμμή διασύνδεσης μεταξύ τους και επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το συνολικό εύρος ζώνης για τα ΕΙΔ των κοινών πελατών τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται καταμερισμός φόρτου μεταξύ των γραμμών διασύνδεσης και ο δρομολογητής next hop για τα δύο δίκτυα κορμού MPLS/BGP φαίνεται πλέον πάνω από δύο γραμμές διασύνδεσης.

3.4. Multihop MP-eBGP μεταξύ των ανακλαστήρων δρομολόγησης

Η τελευταία τεχνική συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων με αποτέλεσμα ακόμη καλύτερη κλιμάκωση, διαγραφή των διπλών (πολλαπλών) βάσεων προώθησης ετικετών που είναι αναγκαία στην περίπτωση δύο (πολλών) διασυνδέσεων μεταξύ των ΠΥ και τη σημαντική δυνατότητα εξάλειψης δρομολογήσεων ολότελα από τους ASBR. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται το εξωτερικό MP-BGP για την ανταλλαγή ετικετών /προθεμάτων μεταξύ των ΠΥ. Η ανταλλαγή αυτή δεν γίνεται από απ' ευθείας συνδεδεμένους ASBR, αλλά μεταξύ ανακλαστήρων δρομολόγησης. Επειδή οι ανακλαστήρες δεν είναι συνδεδεμένοι απ' ευθείας μεταξύ τους απαιτείται η χρήση λειτουργικότητας multihop για την

σύσταση συνόδου BGP. Ο δρομολογητής next-hop για τις δρομολογήσεις VPN-IPv4 που ανταλλάσσονται μεταξύ των ανακλαστήρων γνωστοποιούνται πάνω από τη σύνδεση των ASBR για την επακόλουθη διανομή εντός του γειτονικού Παρόχου. Αυτό σημαίνει ότι οι διευθύνσεις βρόγχου (loopback) των ΑΠΑ δρομολογητών που δημιούργησαν τις δρομολογήσεις για το ΕΙΔ σε ένα αυτόνομο σύστημα πρέπει να γνωστοποιηθούν στο άλλο αυτόνομο σύστημα.

Συνεπώς ο ανακλαστήρας δρομολόγησης εντός συγκεκριμένου Παρόχου μαθαίνει όλες τις τοπικές δρομολογήσεις από τους ΑΠΑ του Παρόχου μέσω MP-BGP. Στη συνέχεια η πληροφορία αυτή πρέπει να ανταλλαγεί μεταξύ των ΠΥ μέσω συνεδρίας Multihop MP-eBGP. Άρα στη λύση αυτή θα πρέπει να υπάρχουν συνδέσεις του ανακλαστήρα με τον δρομολογητή ASBR εντός του κάθε ΠΥ, αλλά και να υπάρχουν πολλαπλοί ανακλαστήρες δρομολόγησης για να εξασφαλίζεται η διασύνδεση των ΕΙΔ σε περιπτώσεις δυσλειτουργίας των ανακλαστήρων.

3.5. Συμπεράσματα επί των επεκτάσεων της RFC 2547

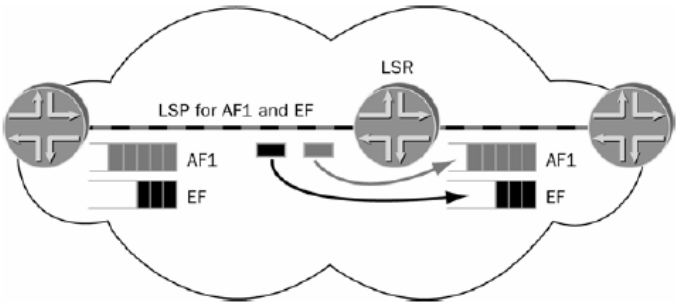
Οι επεκτάσεις της RFC2547 δείχνουν ότι μέσω των πρωτοκόλλων είναι δυνατή η δημιουργία ΕΙΔ που εκτείνονται σε περισσότερους του ενός Παρόχων Υπηρεσιών. Στην περίπτωση που οι απαιτήσεις του Πελάτη περιορίζονται στην μεταβίβαση κίνησης χωρίς ποιότητα υπηρεσίας, δηλαδή μία και μόνη κλάση υπηρεσίας (η εν δυνάμει εφικτή – best effort), τότε οι παραπάνω επεκτάσεις καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες του Πελάτη.
Στις περιπτώσεις όμως που η κίνηση του πελάτη δεν περιορίζεται σε μοναδική κλάση υπηρεσίας, αλλά προϋποθέτει κλιμάκωση σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, τότε η εφαρμογή μόνο των επεκτάσεων δεν είναι σίγουρο ότι θα δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Απαιτείται καθορισμός των απαιτήσεων του Πελάτη ανά Πάροχο και καθορισμός των απαιτήσεων για ποιότητα υπηρεσίας μεταξύ των Παρόχων. Η συμφωνία σε επίπεδο πρωτοκόλλων και δρομολόγησης αποτελεί απλώς την βάση πάνω στην οποία πρέπει να αποφασισθεί η δυνατότητα παροχής ποιότητας υπηρεσίας και εάν είναι αυτή η δυνατότητα εφικτή τότε σε πιο επίπεδο και ποια θα είναι τελικά η Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσιών που θα λάβει ο Πελάτης.

3.6. Αρχιτεκτονική DiffServ/MPLS – RFC 3270

Στη σύσταση RFC 3270, προτείνονται μηχανισμοί για την υποστήριξη DiffServ από το MPLS. Όπως είναι γνωστό τα πακέτα IP ταξιδεύουν μέσα σε πακέτα MPLS και θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος να ανιχνεύονται οι συμπεριφορές ανά άλμα (PHB) μέσα στην επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου MPLS. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί οι δρομολογητές LSR στο MPLS αποφασίζουν την προώθηση των πακέτων εξετάζοντας μόνο την επικεφαλίδα του πακέτου MPLS. Μια τυπική επικεφαλίδα MPLS έχει τρία ελεύθερα bits στο πεδίο EXP (experimental) και η IETF χρησιμοποιεί τα τρία αυτά bits για να μεταφέρει πληροφορία διαφοροποίησης υπηρεσιών σε ένα δίκτυο MPLS.

Το προφανές πρόβλημα εδώ είναι πως θα κωδικοποιηθούν όλες οι δυνατές συμπεριφορές ανά άλμα (PHB) που προκύπτουν από το πεδίο DSCP των 6 bits (64 πιθανές τιμές) που υπάρχει μέσα στο πακέτο IP σε ένα πεδίο 3 bits (8 πιθανές τιμές). Υπάρχουν δύο δυνατές περιπτώσεις:

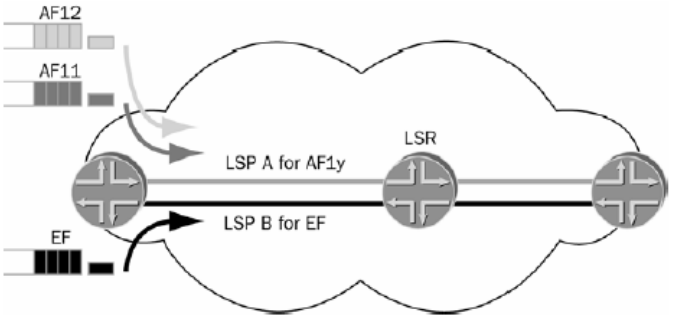
- Στην πρώτη περίπτωση αποφασίζεται από τον Πάροχο ή μεταξύ των Παρόχων ότι το δίκτυο θα υποστηρίζει μέχρι 8 διαφορετικές συμπεριφορές ανά άλμα PHB και συνεπώς κάθε ξεχωριστό πεδίο DSCP από τα οκτώ απεικονίζεται σε ξεχωριστό πεδίο EXP με ακριβώς την ίδια ακολουθία bits και αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη συμπεριφορά PHB (ουσιαστικά σε διαφορετικό χρονοπρογραμματισμό και προτίμηση απόρριψης). Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι το πεδίο EXP δεν είναι απαραίτητο να σηματοδοτηθεί κατά την σύσταση ενός μονοπατιού LSP, αλλά μπορεί να ρυθμιστεί στη συνέχεια.
  Υπάρχουν δύο επιλογές ανάλογα με την προσδοκώμενη QoS από τον πελάτη, αλλά και την προτεινόμενη SLA από τον Πάροχο (ή τους Παρόχους). Είτε αμέσως το πεδίο DSCP του πακέτου IP αντιγράφεται στο πεδίο EXP του MPLS, είτε ο διαχειριστής του δικτύου ρυθμίζει το πεδίο EXP κατά περίπτωση. Τα μονοπάτια LSP στα οποία η συμπεριφορά ανά άλμα προκύπτει από το πεδίο EXP λέγονται μονοπάτια E-LSP. Τα μονοπάτια E-LSP μπορούν να μεταφέρουν πακέτα με μέχρι οκτώ διαφορετικές συμπεριφορές ανά άλμα (PHB). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως ένα μονοπάτι E-LSP μεταφέρει κίνηση πολλαπλών PHB



Από τη λειτουργία του E-LSP προκύπτει ότι ο περιορισμός σε 8 διαφορετικές συμπεριφορές ανά άλμα μέσα στο δίκτυο, αφαιρεί λειτουργικότητα, αλλά προσθέτει απλότητα και είναι θέμα των Παρόχων να εντάξουν την κίνηση του πελάτη στις οκτώ συμπεριφορές που διαθέτει το κοινό δίκτυο. Σημαντικό είναι ότι δεν χρησιμοποιείται σηματοδοσία για τη μετάδοση των PHB, αλλά μεταφέρονται κανονικά εντός του πλαισίου MPLS που έτσι και αλλιώς διακινείται μέσα στο δίκτυο και επιτρέπεται η ρύθμιση τους εν κινήσει. Με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιείται ήδη διαθέσιμος χώρος εντός του πλαισίου του πρωτοκόλλου και δεν δαπανάται επιπλέον χώρος κάπου αλλού.

- Στη δεύτερη περίπτωση επειδή οι υποστηριζόμενες συμπεριφορές ανά άλμα PHB είναι πάνω από 8 το πεδίο EXP δεν επαρκεί και είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί τμήμα της ετικέτας μέσα στην επικεφαλίδα. Τότε η ετικέτα αναλαμβάνει πέρα από την προώθηση του πακέτου και την συμπεριφορά ως προς τον χρονοπρογραμματισμό ενώ το πεδίο EXP, αναλαμβάνει τη συμπεριφορά ως προς την απόρριψη. Επειδή η πληροφορία για τη συμπεριφορά βρίσκεται εν μέρει στην ετικέτα είναι αναγκαίο να μεταβιβαστεί κατά τη σηματοδοσία και σύσταση η συγκεκριμένη συμπεριφορά. Τα μονοπάτια LSR που

χρησιμοποιούν αυτόν τον τρόπο μετάδοσης των συμπεριφορών ονομάζονται L-LSR (επειδή η συμπεριφορά ελέγχεται από την ετικέτα label). Τα μονοπάτια L-LSR μπορούν να μεταφέρουν πακέτα με μοναδική PHB ή με διαφορετικές PHB με ίδια συμπεριφορά ως προς τον χρονοπρογραμματισμό και με διαφορετική συμπεριφορά ως προς την απόρριψη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως τα L-LSP μεταφέρουν κίνηση είτε από μια PHB, είτε από ίδιας συμπεριφοράς ως προς τον χρονοπρογραμματισμό PHB.



Από τη λειτουργία του L-LSP προκύπτει ότι υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών συμπεριφορών ανάλογα με τις απαιτήσεις του πελάτη, αλλά τα μονοπάτια που συστήνονται με αυτόν τον τρόπο μεταφέρουν είτε πακέτα με την ίδια συμπεριφορά ανά άλμα είτε πακέτα με τον ίδιο χρονοπρογραμματισμό. Παρ' όλο που το δίκτυο είναι αρχιτεκτονικής DiffServ υπεισέρχεται παράγοντας διατήρησης κατάστασης στους κόμβους μέσω της μεταφοράς πληροφορίας για το μονοπάτι και τον χρονοπρογραμματισμό στην ετικέτα MPLS.
Η χρήση του μοντέλου E-LSP ή του μοντέλου L-LSP δεν αποκλείει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν και τα δύο εντός του κοινού δικτύου εάν αυτό απαιτηθεί από τις εφαρμογές.

4. Traffic Engineering και EuroNGI (Next Generation Internet)

Σύμφωνα με RFC 2702 και 3272 Traffic Engineering (TE) στο Διαδίκτυο ορίζεται η διάσταση του Internet Network Engineering που ασχολείται με την αξιολόγηση της απόδοσης και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε λειτουργικά δίκτυα IP. Το TE εμπεριέχει την εφαρμογή της τεχνολογίας και τις επιστημονικές παραδοχές για τις μετρήσεις, το χαρακτηρισμό, τη προτυποποίηση (modeling) και τον έλεγχο της κίνησης του Internet.
Αναλυτικότερα η βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός λειτουργικού δικτύου σε επίπεδα κίνησης και πηγών είναι κύριο αντικείμενο του TE. Συνεπώς το TE προσπαθεί να βελτιστοποιήσει ταυτόχρονα την απόδοση , ενώ οι πόροι του δικτύου χρησιμοποιούνται οικονομικά και αξιόπιστα. Στους μετρητές της απόδοσης σύμφωνα πάντα με τις RFC 2702 και 3272 περιλαμβάνονται η καθυστέρηση, η διακύμανση της καθυστέρησης, η ρυθμαπόδοση και το χάσιμο πακέτων. Αντικείμενο επίσης του TE είναι η διευκόλυνση της αξιόπιστης λειτουργίας των δικτύων με την προσφορά μηχανισμών που επιτρέπουν την ακεραιότητα του δικτύου και εμπεριέχουν πολιτικές που επιτρέπουν την επιβιωσιμότητα του δικτύου. Σύμφωνα με την IETF RFC 3346 οι *«…τεχνικές εφαρμογής του TE περιλαμβάνουν, χωρίς να περιορίζονται :*

- *Χειρισμό του κόστους IGP (metrics)*
- *Αυστηρή δρομολόγηση με τη χρήση τεχνικών μεταγωγής virtual circuit switching υπό περιορισμούς (όπως είναι τα κυκλώματα ATM ή Frame Relay SVC.*
- *Αυστηρή δρομολόγηση με τη χρήση τεχνικών καθορισμού του μονοπατιού όπως το MPLS…»*

Από την άλλη πλευρά το MPLS επιτρέπει μεν την προώθηση της κίνησης με αυθαίρετο τρόπο σε κάποιο μονοπάτι, αλλά διαθέτει δυνατότητες αυστηρής δρομολόγησης (explicit routing) δε που δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού του μονοπατιού MME από την αρχή. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μέχρι τον λήπτη του πακέτου δεν έχουν τότε τη δυνατότητα να αποφασίσουν για τη δρομολόγηση των πακέτων τα οποία προωθούνται βάσει της ετικέτας. *Οι αυστηρές δρομολογήσεις μπορούν να υπολογιστούν offline και να μετά να φορτωθούν στους δρομολογητές με κατάλληλο μηχανισμό, ή τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του μονοπατιού MME (όπως άκρα, εύρος, κατηγορήματα συνάφειας) ρυθμίζονται σε κάποιο δρομολογητή που με κατάλληλο αλγόριθμο υπολογίζει το μονοπάτι μέσα στο δίκτυο [IETF RFC 3346].*

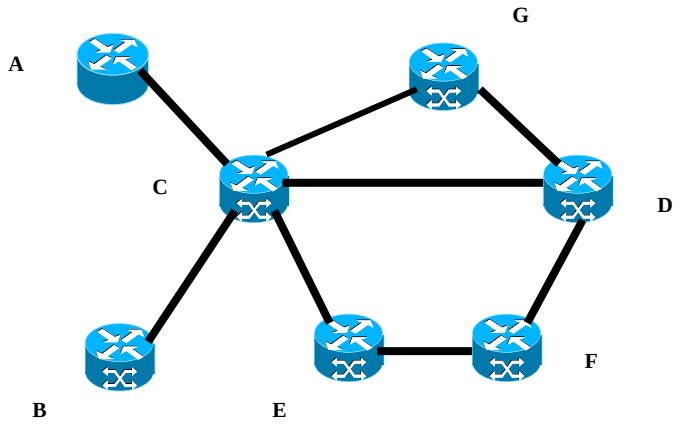
Σύμφωνα με την ερευνητική εργασία στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος για το Διαδίκτυο Επόμενης Γενεάς (Next Generation Internet) euroNGI / FGI *[http://eurongi.enst.fr/en_accueil.html]* ο συνδυασμός διαφοροποιημένων υπηρεσιών με MPLS/TE παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

Η διαφοροποίηση υπηρεσίας (DiffServ) επιτρέπει την σχεδίαση δικτύων με κλιμάκωση και πολλαπλές κλάσεις υπηρεσίας. Η λειτουργία TE του MPLS επιτρέπει τη δέσμευση δικτυακών πόρων, την ανοχή σε σφάλματα και την βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων του δικτύου. Η χρήση αρχιτεκτονικής διαφοροποίησης υπηρεσίας μαζί με τη χρήση MPLS επιτρέπει την εφαρμογή των πλεονεκτημάτων και των δύο αρχιτεκτονικών στη σχεδιασμό δικτύων. Στις αρχιτεκτονικές DiffServ και MPLS υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά όπως η προσπάθεια μετάθεσης της πολυπλοκότητας

του δικτύου στις άκρες. Οι δρομολογητές ΑΠΑ έχουν λιγότερο φόρτο από τους δρομολογητές του δικτύου κορμού και μπορούν να αντεπεξέλθουν ευκολότερα στην πολυπλοκότητα των αρχιτεκτονικών. Οι αρχιτεκτονικές DiffServ και MPLS είναι συμπληρωματικές γιατί η μεν DiffServ καθορίζει τις συμπεριφορές ανά άλμα σε ένα δρομολογητή ενώ η δε MPLS καθορίζει τα μονοπάτια μεταγωγής μεταξύ των δικτυακών κόμβων.

Οι λόγοι εφαρμογής ΤΕ σε δίκτυα IP είναι οι παρακάτω:

Συμφόρηση συνδέσμου – Σε αρκετές περιπτώσεις προκύπτει από την εφαρμογή του πρωτοκόλλου IGP η υπέρχρηση μονοπατιών τα οποία θεωρούνται ως τα καλύτερα, ενώ ταυτόχρονα άλλα μονοπάτια υποχρησιμοποιούνται ή δεν χρησιμοποιούνται καθόλου.
Στο παρακάτω σχήμα η κίνηση από το Α στο Δ ακολουθεί πάντα το μονοπάτι ACD που έχει τα λιγότερα άλματα.



Υπάρχει περίπτωση το IGP να συνυπολογίσει το εύρος ζώνης των συνδέσμων για τον υπολογισμό ενός νέου μονοπατιού στο πλαίσιο της έννοιας SFP (Shortest Path First) από το Α στο D με περισσότερα άλματα. Ο υπολογισμός όμως αυτός πάλι δεν λαμβάνει υπ' όψιν την πιθανή συμφόρηση σε κάποιο σύνδεσμο. Στην εφαρμογή ΤΕ η ερώτηση που θα πρέπει να απαντηθεί είναι πιο είναι το καλύτερο μονοπάτι προς ένα προορισμό πάνω στο οποίο υπάρχουν Ν ελεύθερα Mbps.

Καταμερισμός φόρτου – Στις περιπτώσεις καταμερισμού φόρτου πάνω σε μονοπάτια κίνησης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι τα εναλλακτικά μονοπάτια να έχουν την ίδια χωρητικότητα. Αυτό καταλήγει στην χρήση του συνδέσμου με το ελάχιστο εύρος ζώνης σαν οδηγού για τη δημιουργία καταμερισμού φόρτου. Στο παραπάνω σχήμα υπάρχουν τρία εναλλακτικά μονοπάτια από το Α στο D:
ACGD, ACD, ACEFD

Το μονοπάτι ACGD είναι χωρητικότητας {10, 5, 40} δηλαδή AC 10 Mbps, CG 5 Mbps, GD 100 Mbps.
Το μονοπάτι ACD είναι χωρητικότητας {10, 60}
Το μονοπάτι ACEFD είναι χωρητικότητας {10, 10,10,50}

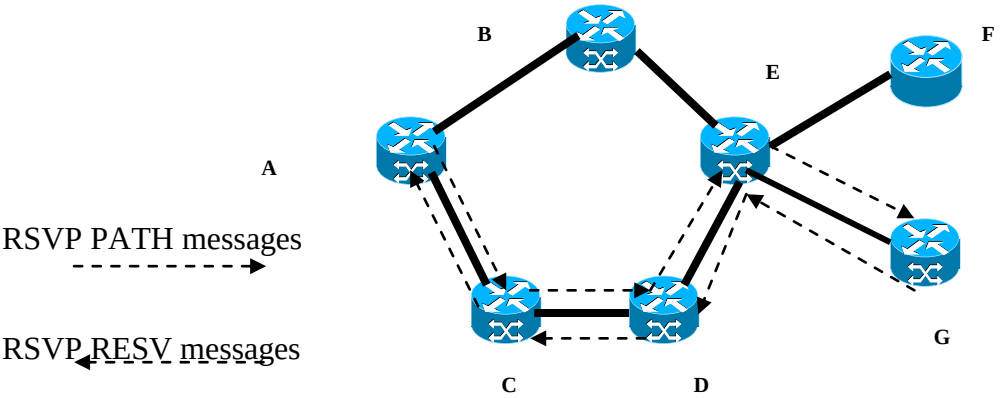
Λόγω της χωρητικότητας 5 Mbps ο δρομολογητής C σε περίπτωση που εφαρμόσει κατανομή του φόρτου δεν θα λάβει υπ' όψιν τις χωρητικότητες των συνδέσμων CD (60Mbps) και CE (10 Mbps).

Προστασία διασύνδεσης – Στις περιπτώσεις όπου κάποιος σύνδεσμος ή συσκευή βγει εκτός λειτουργίας πάνω στο κύριο μονοπάτι μεταγωγής δεδομένων, απαιτείται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ο υπολογισμός εκ νέου του συντομότερου δρόμου.

Η εφαρμογή ΤΕ έρχεται να επιλύσει τα παραπάνω προβλήματα με προϋπόθεση ότι το δίκτυο κορμού είναι τεχνολογίας MPLS. Η εφαρμογή του ΤΕ ξεκινά με την δημιουργία ενός MME που ονομάζεται σήραγγα (tunnel) εντός του πυρήνα MPLS. Κάθε πακέτο που εμφανίζεται στην άκρη της σήραγγας θα προωθηθεί από τον ίδιο δρόμο μέχρι το τέλος της σήραγγας. Ενώ στην αυστηρή δρομολόγηση IP υπάρχει η έννοια του προκαθορισμένου μονοπατιού το ΤΕ δεσμεύει εύρος ζώνης για τη σήραγγα σε κάθε δρομολογητή μεταγωγής ετικετών.

Ο μηχανισμός ΤΕ εφαρμόζεται ως εξής:

Στους δρομολογητές εφαρμόζεται πρωτόκολλο κατάστασης συνδέσμου, το οποίο δέχεται στον υπολογισμό της δρομολόγησης το δεσμευμένο εύρος ζώνης πάνω στους συνδέσμους (π,χ όπως οι επεκτάσεις στο OSPF – RFC 3630). Η κατάσταση των συνδέσμων σε κάθε δρομολογητή μεταγωγής ετικετών είναι απαραίτητα να είναι γνωστή για να μπορεί να εφαρμοστεί ΤΕ. Με τη γνωστοποίηση της κατάστασης κάθε δρομολογητής μεταγωγής ετικετών ξέρει την τοπολογία του δικτύου και την χρησιμοποιεί ως βάση για τον υπολογισμό του καλύτερου μονοπατιού.



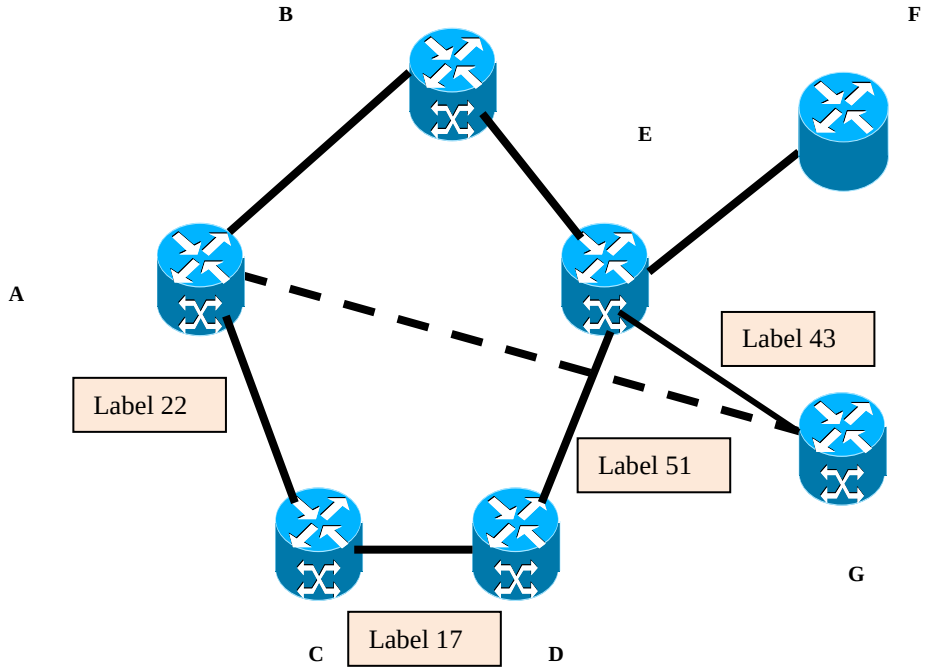
Ο δρομολογητής Α τρέχει μια τροποποιημένη μορφή του αλγορίθμου SPF (Shortest Path First) που ονομάζεται CSPF (εξηγείται αναλυτικά παρακάτω) και υπολογίζει το καλύτερο μονοπάτι προς τον G με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης πάνω στους συνδέσμους. Με την υπόθεση ότι απαιτείται διαθέσιμο εύρος ζώνης 40 Mbps, βρίσκεται με την χρήση του αλγορίθμου CSPF ότι το μονοπάτι είναι το ACDEG. Σε άλλη χρονική στιγμή επειδή οι διαθεσιμότητες των συνδέσμων αλλάζουν είναι δυνατόν ο αλγόριθμος να δώσει άλλο μονοπάτι.

Στην συνέχεια ο δρομολογητής Α στέλνει ένα μήνυμα δέσμευσης του διαθέσιμου εύρους 40 Mbps στο μονοπάτι ACDEG με το πρωτόκολλο RSVP.

Κάθε δρομολογητής πάνω στο μονοπάτι ελέγχει εάν μπορεί να δώσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης και ενημερώνει ανάλογα το μήνυμα δέσμευσης.
Το άκρο G στέλνει στην αντίθετη φορά του μονοπατιού μήνυμα RSVP RESV.

Κάθε δρομολογητής πάνω στο μονοπάτι που λαμβάνει το μήνυμα RSVP RESV, δεσμεύει το απαιτούμενο εύρος ζώνης και παραχωρεί μια ετικέτα για την σήραγγα. Η ετικέτα κοινοποιείται στον επόμενο δρομολογητή στο μονοπάτι (πάντα κατά την αντίστροφη φορά κίνησης) μέσα στο μήνυμα RSVP.

Η σήραγγα έχει δημιουργηθεί και για να χρησιμοποιηθεί πρέπει να καταχωρηθεί στους πίνακες δρομολόγησης (είτε με στατική δρομολόγηση, είτε με IGP). Η νέα τοπολογία έχει δημιουργηθεί και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μαζί με τις ετικέτες σε κάθε άλμα και με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η σήραγγα από το A στο G. Η ίδια διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί για την δημιουργία της σήραγγας G-A κατά το ανάστροφο μονοπάτι, ώστε η επικοινωνία A, G να είναι αμφίδρομη.

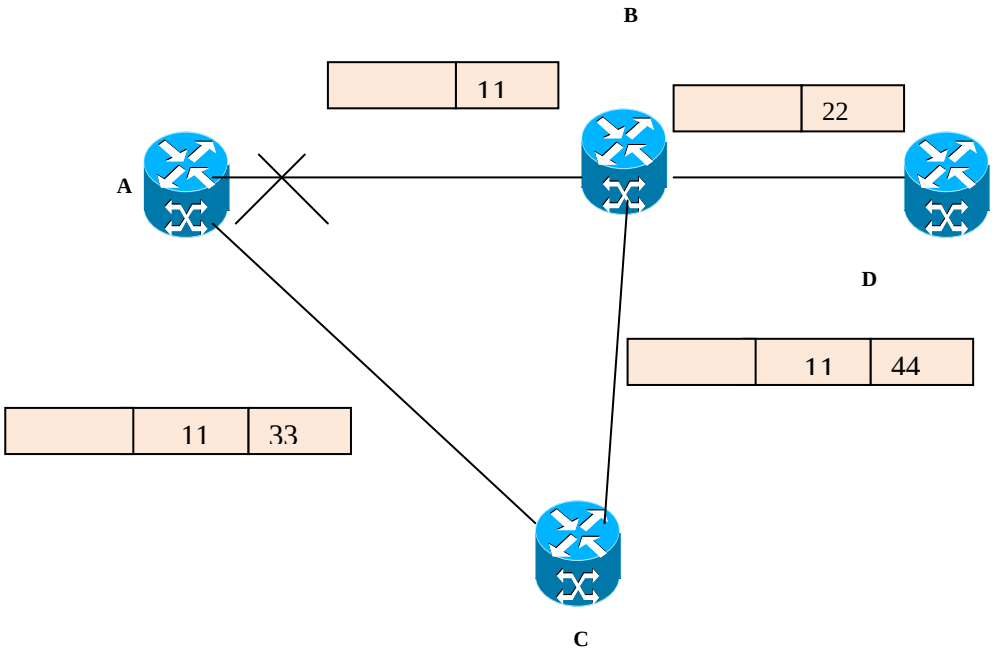


Με την εφαρμογή TE στο παραπάνω σχήμα τα προβλήματα συμφόρησης, φόρτου και προστασίας διασύνδεσης επιλύονται ως εξής:

Συμφόρηση συνδέσμου – Το μονοπάτι ACDEG χρησιμοποιείται παρ' όλο που τα άλματα είναι περισσότερα από το μονοπάτι ABEG, γιατί το μονοπάτι αυτό έχει περισσότερο ελεύθερο εύρος ζώνης από τον εναλλακτικό δρόμο και αποφεύγεται η συμφόρηση.

Καταμερισμός φόρτου – Στο παραπάνω σχήμα υπάρχουν δύο δρόμοι από το Α προς το F. Το πρώτο μονοπάτι ABDF έχει χωρητικότητα {10, 60, 20} και το δεύτερο ACDEF έχει χωρητικότητα {10,40,20}. Ο δρομολογητής Α βλέπει τη διαφορά χωρητικότητας και στέλνει 60% της κίνησης στο μονοπάτι ABDF και 40% της κίνησης στο μονοπάτι ACDEF.

Προστασία διασύνδεσης – Στις περιπτώσεις όπου κάποιος σύνδεσμος ή συσκευή βγει εκτός λειτουργίας πάνω στο κύριο μονοπάτι μεταγωγής δεδομένων, απαιτείται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ο υπολογισμός εκ νέου του συντομότερου δρόμου. Το πρόβλημα λύνεται με τον ορισμό εφεδρικού μονοπατιού και την χορήγηση επιπλέον ετικέτας. Ο μηχανισμός περιγράφεται στο ακόλουθο σχήμα:



Όπως φαίνεται στο σχήμα στην περίπτωση που ο σύνδεσμος AB έχει πρόβλημα η κίνηση θα δρομολογηθεί μέσω του C. Στο εναλλακτικό μονοπάτι τοποθετείται μια επιπλέον ετικέτα ανά άλμα. Η ετικέτα αυτή αφαιρείται πριν το τελευταίο άλμα του εναλλακτικού μονοπατιού ώστε να μείνει μόνο η κανονική ετικέτα και τα πακέτα να μπορούν να συνεχίσουν κανονικά τον δρόμο τους.

Σε προγραμματισμό Cisco IOS η ρύθμιση των στοών γίνεται όπως παρακάτω:

```
!Enable TE globally
mpls traffic-eng tunnels

!Enable TE on all relevant  interfaces

interface ATM0/1/0
…….
```

```
        mpls traffic-eng tunnels
        ip rsvp 10000 10000
! TE OSPF RFC 3630
router ospf 100
        mpls traffic-eng router-id Loopback0
        mpls traffic-eng area 0
```

Στον δρομολογητή που βρίσκεται στην αρχή της σήραγγας πρέπει να ρυθμιστεί η διεπαφή της σήραγγας:

```
interface Tunnel0
        ip unnumbered Loopback0
        tunnel mode mpls traffic-eng
        tunnel source Loopback
        tunnel destination 10.1.1.1
        tunnel mpls traffic-eng autoroute
        tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
```

5. Αρχιτεκτονική DiffServ-TE

Στην σύσταση IETF RFC 3564 έχουν αναπτυχθεί περιπτώσεις κίνησης που δεν μπορούν να επιλυθούν με τη χρήση μόνο διαφοροποίησης υπηρεσίας (DiffServ) ή τη χρήση μόνο Traffic Engineering. Τα σενάρια αυτά αποτελούν ουσιαστικά τις απαιτήσεις για τη δημιουργία της αρχιτεκτονικής DiffServ-TE που ουσιαστικά εισάγει την διαφοροποίηση υπηρεσιών σε ένα δίκτυο TE.

Περίπτωση 1η :

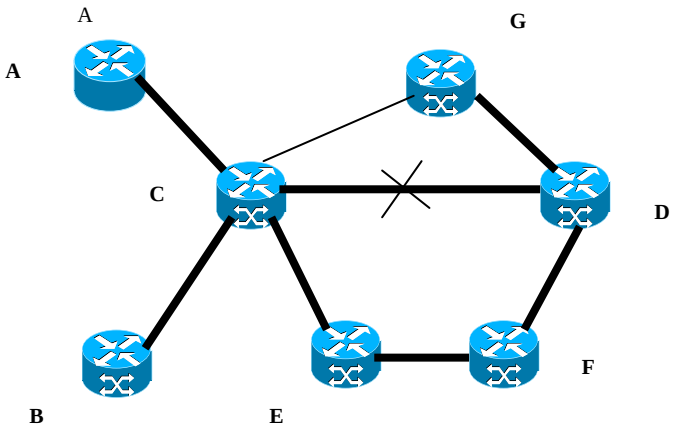
Περιορισμός της αναλογίας κίνησης συγκεκριμένης κλάσης πάνω σε ένα σύνδεσμο

Στο πρώτο σενάριο θεωρείται ένα δίκτυο στο με δύο τύπους κίνησης φωνή και δεδομένα. Ο σκοπός είναι να περάσει η φωνή από το δίκτυο σε καλή ποιότητα, ενώ ταυτόχρονα να εξυπηρετηθούν τα δεδομένα. Η μεταφορά της φωνής σημαίνει χαμηλή καθυστέρηση, χαμηλή διακύμανση της καθυστέρησης και χαμηλή αναλογία χαμένων πακέτων.

Σε περιβάλλον διαφοροποίησης υπηρεσιών (DiffServ) ανατίθεται η κίνηση της φωνής σε μια συγκεκριμένη συμπεριφορά ανά άλμα (PHB), με εγγυημένη χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή αναλογία πακέτων όπως η EF (Expedited Forwarding). Το πρόβλημα εδώ είναι ότι η καθυστέρηση που αντιλαμβάνονται οι χρήστες της φωνής, είναι το άθροισμα της καθυστέρησης διάδοσης του πακέτου καθώς διατρέχει το δίκτυο συν την καθυστέρηση της ουράς και της μετάδοσης σε κάθε κόμβο. Η καθυστέρηση διάδοσης και η καθυστέρηση μετάδοσης ανά κόμβο είναι σταθερές, οπότε απαιτείται περιορισμός της διακύμανσης της καθυστέρησης που εξαρτάται όμως από την καθυστέρηση στην ουρά. Άρα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση στην ουρά, που οδηγεί στην δημιουργία μικρών ουρών αναμονής. Οι μικρές ουρές αναμονής σε πρακτικό επίπεδο σημαίνει ότι μια περιορισμένη αναλογία των απομονωτών αναμονής (queue buffers) μπορούν να χρησιμοποιούν για την κίνηση φωνής. Συνεπώς η απαίτηση γίνεται πλέον «περιορισμός της αναλογίας κίνησης φωνής σε κάθε σύνδεσμο».

Οι Πάροχοι Υπηρεσιών παλαιότερα για να ικανοποιήσουν την παραπάνω απαίτηση χρησιμοποιούσαν υπερπρόβλεψη (overprovisioning) του εύρους ζώνης, έτσι ώστε να υπάρχει πάντα περισσότερο εύρος ζώνης από ότι πραγματικά χρειάζεται. Πέρα από το προφανές κόστος μιας τέτοιας πολιτικής δεν υπάρχουν εγγυήσεις ότι θα αντεπεξέλθει σε περιπτώσεις δυσλειτουργίας.

Στο παρακάτω σχήμα όλοι οι σύνδεσμοι είναι των 155 Mbps εκτός του συνδέσμου CG που είναι των 50 Mbps. Σε κανονικές συνθήκες η φωνή ακολουθεί το μονοπάτι ACD που είναι το συντομότερο. Η χωρητικότητα των συνδέσμων είναι μεγάλη και η αναλογία φωνής σε κάθε σύνδεσμο είναι μεγάλη. Όταν για κάποιο λόγο διακοπεί ο σύνδεσμος CD τότε η κίνηση αναδρομολογείται από το επόμενο καλύτερο μονοπάτι που είναι το ACGD. Όμως ο σύνδεσμος CG είναι αυτός με τη μικρότερη χωρητικότητα και το ποσοστό κίνησης της φωνής γίνεται πολύ μεγάλο. Αντί για το μονοπάτι ACGD, η κίνηση έπρεπε να είχε αναδρομολογηθεί από το μονοπάτι ACEFD.



Επέκταση της παραπάνω πολιτικής είναι ο περιορισμός του διαθέσιμου εύρους κάθε συνδέσμου με τεχνητό τρόπο ώστε να μπορεί να περάσει η φωνή μόνη της και η χρήση ΤΕ ώστε η συνολική κίνηση (φωνή και δεδομένα) να καταναλώνει αυτούς τους τεχνητά περιορισμένους πόρους. Η νέα πολιτική πετυχαίνει να δώσει την απαιτούμενη λειτουργικότητα, αλλά αφήνει ανεκμετάλλευτους υπάρχοντες πόρους, οι οποίοι θα μπορούσαν να δοθούν σε δεδομένα ευαίσθητα στην καθυστέρηση. Το πρόβλημα εδώ ξεκινά από το γεγονός ότι το ΤΕ δεν μπορεί να διακρίνει δύο είδη κίνησης και δεν μπορεί να διαθέσει πόρους ανά είδος κίνησης.

Περίπτωση 2η :

Διατήρηση σχετικών αναλογιών κίνησης σε ένα σύνδεσμο

Στην περίπτωση αυτή απαιτείται από την εφαρμογή ΤΕ η υιοθέτηση διαφορετικών περιορισμών για διαφορετικές κλάσεις κίνησης. Το παραπάνω παράδειγμα επεκτείνεται με τη θεώρηση ότι το δίκτυο υποστηρίζει τρεις τύπους κίνησης που αντιστοιχίζονται σε τρεις κλάσεις υπηρεσίας (στην πραγματικότητα οι τύποι κίνησης είναι περισσότεροι από τις διατιθέμενες κλάσεις υπηρεσίας). Ο Πάροχος Υπηρεσιών θα προσπαθήσει να ρυθμίσει τα μεγέθη των ουρών και τις πολιτικές χρονοπρογραμματισμού σε κάθε σύνδεσμο, ώστε η σωστή συμπεριφορά PHB να δοθεί σε κάθε κλάση. Υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού των παραμέτρων από το φόρτο του κάθε συνδέσμου, αλλά αυτό πρακτικά δεν είναι εύκολο λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς των συνδέσμων που μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να προβλεφτεί από μαθηματικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν αλλαγές δρομολόγησης, δυσλειτουργίες κόμβων / συνδέσμων, πολιτικές

αποπομπής (preemption) μεταξύ των μονοπατιών μεταγωγής ετικετών (MME) κτλ. Φαίνεται συνεπώς ευκολότερο λειτουργικά και διαχειριστικά ο καθορισμός σταθερής αναλογίας του κάθε είδους κίνησης σε κάθε σύνδεσμο. Με τη σταθερή αναλογία είναι δυνατό πλέον ο καθορισμός των μεγεθών ουράς και των πολιτικών χρονοπρογραμματισμού και η χρήση ΤΕ ώστε η κίνηση να βρίσκεται σε συμφωνία με τους υπάρχοντες πόρους.

Περίπτωση 3η :

Εγγυημένου εύρους υπηρεσίες

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας (SLA) σχετικά με κίνηση που πρέπει να απολαμβάνει εγγυημένο εύρος ζώνης. Στο δίκτυο υπάρχει επίσης κίνηση εν δυνάμει εφικτή και θα πρέπει οι δύο τύποι κίνησης να μπορούν να συνυπάρξουν μέσα στο δίκτυο με την ικανοποίηση αφ ενός του ΣΕΥ, αλλά και τη δυνατότητα μεταφοράς της απλής κίνησης. Για να μην δοθεί όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης στην κίνηση ΣΕΥ εφαρμόζεται ΤΕ και ταυτόχρονα εφαρμόζεται ΤΕ στην εν δυνάμει κίνηση το υπόλοιπο εύρος ζώνης. Συνεπώς η εφαρμογή του ΤΕ πρέπει να έχει γνώση του είδους της κίνησης.

Η εφαρμογή ΤΕ πάνω σε δίκτυα αρχιτεκτονικής DiffServ γίνεται μέσω του τύπου κλάσης CT (class type) σύμφωνα με όσα ορίζονται στην IETF RFC 3564. Ο τύπος κλάσης κατά RFC 3564 είναι «*το σύνολο των δεσμίδων κίνησης σε ένα σύνδεσμο ο οποίος ελέγχεται από καθορισμένο σύνολο περιορισμών εύρους ζώνης. Ο τύπος κλάσης χρησιμοποιείται για παραχώρηση εύρους ζώνης του συνδέσμου, δρομολόγηση βάσει περιορισμών και έλεγχο εισόδου. Δεδομένη δεσμίδα κίνησης ανήκει στον ίδιο τύπο κλάσης CT σε όλους τους συνδέσμους*».

Μέσα από την RFC παρέχεται ελευθερία αντιστοίχησης κίνησης στους τύπους κλάσης που είναι οκτώ και αριθμούνται από CT0 έως CT7. Τα MME που έχουν καθοριστεί μέσω ΤΕ να εγγυώνται εύρος ζώνης σε συγκεκριμένο τύπο κλάσης CT ονομάζονται DiffServ-TE LSP. Στο τρέχον μοντέλο της IETF ένα μονοπάτι DiffServ-TE LSP μπορεί να μεταφέρει κίνηση μόνο ενός τύπου κλάσης CT. Η εν δυνάμει εφικτή κίνηση συνήθως αντιστοιχίζεται στον τύπο CT0 και όλη η κίνηση που φτάνει στα όρια του δικτύου DiffServ αντιστοιχίζεται αρχικά στον CT0. Στις παραπάνω περιπτώσεις που δεν επιλύονται με την εφαρμογή μόνο διαφοροποίησης υπηρεσιών (DiffServ) ή ΤΕ, με τη εφαρμογή πλέον των CT θα ισχύει:

Υπάρχουν δύο είδη κίνησης, φωνή και δεδομένα. Σε επίπεδο διαφοροποίησης εφαρμογών η φωνή αντιστοιχίζεται στη συμπεριφορά EF(Expedited Forwarding) και τα δεδομένα στη συμπεριφορά BE(Best Effort). Θα πρέπει η φωνή να λάβει από το δίκτυο εγγυημένο εύρος ζώνης και κατά συνέπεια θα πρέπει να εξυπηρετηθεί συγκεκριμένη ΣΕΥ από τον ΠΥ. Σε κάθε σύνδεσμο δημιουργούνται δύο ουρές αναμονής για τις δύο απαιτούμενες συμπεριφορές BE και EF. Ο τύπος CT0 αντιστοιχίζεται στην ουρά αναμονής BE και ο τύπος CT1 στην ουρά αναμονής EF. Το εύρος ζώνης που διατίθεται για τον τύπο CT1 περιορίζεται στο ποσοστό του συνδέσμου που απαιτείται για να εξασφαλιστούν μικρές καθυστερήσεις αναμονής στην κίνηση φωνής. Για κάθε τύπο (CT0, CT1) συστήνονται διαφορετικά μονοπάτια ΤΕ-LSP με διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Η αρχιτεκτονική MPLS-TE εισάγει την έννοια της προτεραιότητας σε ΜΜΕ. Η προτεραιότητα είναι ένας μηχανισμός κατηγοριοποίησης των ΜΜΕ σε περισσότερο σημαντικά και λιγότερο σημαντικά. Με το μηχανισμό αυτό τα περισσότερο σημαντικά ΜΜΕ μπορούν να κατάσχουν πόρους από τα λιγότερο σημαντικά ΜΜΕ και υπάρχουν εγγυήσεις για τα παρακάτω:

Όταν δεν υπάρχουν σημαντικά ΜΜΕ τότε οι πόροι του δικτύου δεσμεύονται από τα λιγότερο σημαντικά ΜΜΕ.
Ένα σημαντικό ΜΜΕ πάντοτε λαμβάνει το άριστο μονοπάτι μέσα στο δίκτυο, ανεξάρτητα από οποιεσδήποτε κρατήσεις υπάρχουν μέχρι εκείνη τη στιγμή.
Σε περίπτωση αναδρομολόγησης των ΜΜΕ(π.χ εξ αιτίας πτώσης συνδέσμου), τα σημαντικά ΜΜΕ έχουν πάντα καλύτερη πιθανότητα να βρουν εναλλακτικό μονοπάτι.

Η αρχιτεκτονική MPLS-TE διαθέτει οκτώ επίπεδα προτεραιότητας με το 0 να είναι το καλύτερο και το 7 το χειρότερο. Κάθε ΜΜΕ σχετίζεται με δύο προτεραιότητες, την προτεραιότητα αρχικοποίησης και την προτεραιότητα διατήρησης. Η προτεραιότητα αρχικοποίησης χρησιμοποιείται κατά το χρόνο σύστασης του ΜΜΕ για τον έλεγχο πρόσβασης στους πόρους. Η προτεραιότητα διατήρησης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πρόσβασης στους πόρους ενός ΜΜΕ που ήδη έχει συσταθεί. Ο μηχανισμός συγκρίνει την προτεραιότητα αρχικοποίησης νέου ΜΜΕ με τις προτεραιότητες διατήρησης των ΜΜΕ που υπάρχουν ήδη και χρησιμοποιούν τους πόρους του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνεται εάν το νέο ΜΜΕ μπορεί να πάρει τους πόρους υπάρχοντος λιγότερο σημαντικού ΜΜΕ και να αρχίσει να συστήνεται στο δίκτυο.

Οι περιορισμοί που λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την εφαρμογή ΤΕ σε ένα μονοπάτι έχουν σχέση, χωρίς να εξαντλούνται με τα παρακάτω:

- Εύρος ζώνης για συγκεκριμένο ΜΜΕ (π.χ n Mbps από τον κόμβο Α στον κόμβο Β)
- Τα διαχειριστικά κατηγορήματα (χρώματα) των συνδέσμων μέσα στο δίκτυο που επιτρέπεται να περάσει η κίνηση
- Αριθμό κόμβων (hop) που μπορεί να περάσει η κίνηση
- Προτεραιότητα ΜΜΕ έναντι άλλων ΜΜΕ

Οι περιορισμοί αυτοί λαμβάνονται υπ' όψιν στον υπολογισμό του μονοπατιού με δεδομένο ότι υπάρχουν πληροφορίες για κάθε σύνδεσμο που μπορεί να συμμετάσχει στο ΜΜΕ. Ο υπολογισμός αυτός και οι ιδιότητες των συνδέσμων διαχέονται στο δίκτυο με τη χρήση επεκτάσεων ΤΕ στα υπάρχοντα πρωτόκολλα OSPF και IS-IS. Οι επεκτάσεις αφορούν στην προσθήκη πληροφορίας για τα διαχειριστικά κατηγορήματα των συνδέσμων και το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο σε κάθε ένα από τα οκτώ επίπεδα προτεραιότητας.
Μόλις η πληροφορία φτάσει σε κάθε κόμβο του δικτύου ο κόμβος εισόδου στο δίκτυο πραγματοποιεί τον υπολογισμό μονοπατιού. Ο υπολογισμός μονοπατιού μπορεί να γίνει με τη χρήση του αλγορίθμου CSPF (Constrained Shortest Path First) που αποτελεί τροποποιημένη μορφή του αλγορίθμου SPF (Shortest Path First). Ο αλγόριθμος CSPF λειτουργεί όπως ο SPF, με τη διαφορά όμως, ότι αφαιρεί από τον υπολογισμό των μονοπατιών όλους τους συνδέσμους που δεν ικανοποιούν συγκεκριμένους περιορισμούς. Για παράδειγμα εάν ο περιορισμός είναι το εύρος

ζώνης ο αλγόριθμος CSPF θα αφαιρέσει από τους υπολογισμούς, τους συνδέσμους που δεν έχουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Αφού ο υπολογισμός του μονοπατιού γίνει με επιτυχία, συστήνεται η κατάσταση προώθησης του MPLS πάνω σε αυτό το μονοπάτι με τη χρήση του πρωτοκόλλου RSVP-TE σαν πρωτόκολλο διανομής ετικετών. Με την σύσταση του μονοπατιού ενημερώνονται οι κόμβοι για τους διαθέσιμους πόρους και οι άλλοι κόμβοι μαθαίνουν τις μεταβολές μέσω IGP. Συνεπώς το MPLS-TE δρα σωρευτικά σε όλες τις κλάσεις υπηρεσίας κατά DiffServ και δεν εγγυάται εύρος ζώνης ανά κλάσεις κίνησης.

Ο αλγόριθμος CSPF επεκτείνεται με την εφαρμογή των περιορισμών εύρους ζώνης που προέρχονται από τους τύπους κλάσης CT. Στον υπολογισμό μονοπατιού πρέπει να ληφθεί πλέον υπ' όψιν ο τύπος CT εύρους ζώνης που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη προτεραιότητα. Για κάθε σύνδεσμο απαιτείται ο υπολογισμός του ανά CT σε κάθε επίπεδο προτεραιότητας. Αυτό σημαίνει ότι ένα πρωτόκολλο κατάστασης συνδέσμου όπως το IGP πρέπει να διαδώσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά CT σε κάθε επίπεδο προτεραιότητας σε κάθε σύνδεσμο. Συνεπώς τα πρωτόκολλα κατάστασης έχουν να μεταφέρουν το καρτεσιανό γινόμενο του συνόλου των τύπων CT με το σύνολο των προτεραιοτήτων δηλαδή :

$[CT = \{CT_n, n \in N\}]$ **X** $[P = \{P_n, n \in N\}]$ και για τα δύο σύνολα $n \in [0, 7]$

και οι κλάσεις TE είναι πλέον το καρτεσιανό γινόμενο των τύπων κλάσεων με τις προτεραιότητες:

$TE = CT \times P$

Προκύπτουν με αυτό τον τρόπο 64 δυνατά ζεύγη της μορφής (CTn, Pn), αλλά η IETF αποφάσισε τον περιορισμό των ζευγών σε 8 τα οποία μπορούν να ανακοινώνονται μέσω των πρωτοκόλλων στο δίκτυο. Πρακτικά από τα 64 δυνατά ζεύγη επιλέγονται οκτώ τα οποία ταιριάζουν καλύτερα με το δίκτυο TE που θα συσταθεί. Σε ακραία περίπτωση υπάρχουν τα ζεύγη:

(CT_0, p_0), (CT_0, p_1), (CT_0, p_2), (CT_0, p_3), (CT_0, p_4), (CT_0, p_5), (CT_0, p_6), (CT_0, p_7), όπου με $P = \{Pn\ n \in [0, 7]\}$ και $Pn = n\ \forall\ n \in [0, 7]$ μεταπίπτει στην υπάρχουσα υλοποίηση του TE.
Στην άλλη ακραία περίπτωση θα υπάρχουν οκτώ ξεχωριστά CT με κοινή προτεραιότητα δηλαδή τα ζεύγη:
(CT_0, p_0), (CT_1, p_0), (CT_2, p_0), (CT_3, p_0), (CT_4, p_0), (CT_5, p_0), (CT_6, p_0), (CT_7, p_0)

Στην γενική περίπτωση θα υπάρχουν οκτώ κλάσεις TE στο δίκτυο, όπου οι κλάσεις αυτές μπορούν να ανακοινωθούν μέσω του πρωτοκόλλου IGP. Στο *Project Euro-NGI Design and Engineering of the Next Generation Internet, towards convergent multi-service networks* του προγράμματος *NETWORK OF EXCELLENCE (http://www.eurongi.org)*
προτείνεται αυτή η ανακοίνωση να γίνεται με τη χρήση του υπάρχοντος αδέσμευτου εύρους ζώνης TLV, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ήδη για την διάδοση του αδέσμευτου εύρους ζώνης για το TE. Συνεπώς η πληροφορία που μεταφέρει το IGP είναι σχετική μόνο για τους τύπους κλάσεων και τους συνδυασμούς προτεραιοτήτων που δημιουργούν νόμιμα ζεύγη κλάσεων TE.

Άρα για τον υπολογισμό μονοπατιού με τη χρήση περιορισμών ανά τύπων κλάσεων, ο αλγόριθμος CSPF επεκτείνεται για να καλύψει τις κρατήσεις εύρους ζώνης ανά CT και τα πρωτόκολλα IGP επεκτείνονται για να μεταφέρουν ανά CT διαθέσιμο εύρος ζώνης σε διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας.

Μοντέλα περιορισμού εύρους ζώνης

Στην IETF RFC 3564 ορίζεται σαν περιορισμός εύρους ζώνης (bandwidth constraint – BC) το ποσοστό εύρους ζώνης που θα χρησιμοποιηθεί από συγκεκριμένο (ή από ομάδα συγκεκριμένων) CT. Επίσης στο ίδιο κείμενο ορίζεται ότι η σχέση μεταξύ των τύπων κλάσης CT και των περιορισμών BC είναι *«μοντέλο περιορισμού εύρους ζώνης»*. Από την ομάδα IETF-TE-WG έχουν προταθεί δύο μοντέλα περιορισμού εύρους ζώνης που δημιουργούν σχέσεις μεταξύ τύπων κλάσης και περιορισμών. Το πρώτο μοντέλο ονομάζεται Μοντέλο Μέγιστης Κατανομής (Maximum Allocation Model) ή MAM, ενώ το δεύτερο ονομάζεται Μοντέλο Ρωσικές Κούκλες (Russian Dolls Model) ή RDM.

5.1. Μοντέλο μέγιστης κατανομής (IETF RFC-4125)

Το μοντέλο μέγιστης κατανομής (MAM- Maximum Allocation Model) είναι το πιο απλό μοντέλο, όπου σε κάθε τύπο CT αντιστοιχίζεται ένα περιορισμός BC.

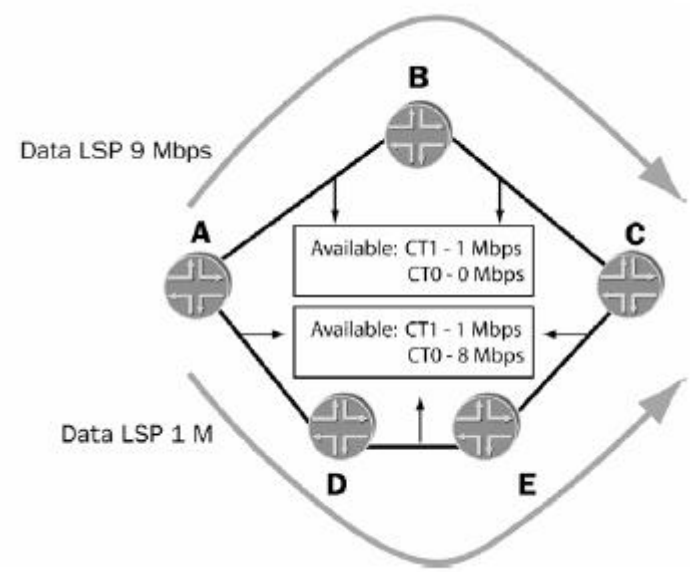
Συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης							
BC_7	**BC_6**	**BC_5**	**BC_4**	**BC_3**	**BC_2**	**BC_1**	**BC_0**
CT_7	**CT_6**	**CT_5**	**CT_4**	**CT_3**	**CT_2**	**CT_1**	**CT_0**

Το πρόβλημα του μοντέλου MAM είναι η αδυναμία ανακατανομής μη χρησιμοποιούμενου διαθέσιμου εύρους μεταξύ των CT, το οποίο χάνεται και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά άλλων τύπων CT.
Το πλεονέκτημα του μοντέλου MAM είναι η απομόνωση των διαφορετικών CT με άμεσο αποτέλεσμα να μην χρειάζονται προτεραιότητες μεταξύ των MME που μεταφέρουν κίνηση διαφορετικού CT. Επίσης είναι ελκυστικό για κάποια περιβάλλοντα DS-TE για τους παρακάτω λόγους *[RFC 4125]*:

- *Οι διαχειριστές δικτύων βρίσκουν το μοντέλο MAM απλό και διαισθητικό.*
- *Το MAM μπορεί να συνδυαστεί με απλές πολιτικές ελέγχου του εύρους ζώνης που πιθανώς θα ήθελαν να εφαρμόσουν οι διαχειριστές δικτύων όπως η τοποθέτηση ξεχωριστού περιορισμού εύρους ζώνης για συγκεκριμένο τύπο κίνησης (τύπο κλάσης – CT) με ταυτόχρονο περιορισμό του συγκεντρωτικού δεσμευμένου εύρους ζώνης μεταξύ όλων των τύπων κίνησης.*
- *Το MAM μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί η απομόνωση μεταξύ των τύπων CT είτε χρησιμοποιείται αποπομπή (preemption) είτε όχι.*
- *Το MAM επιτυγχάνει ταυτόχρονα απομόνωση, αποτελεσματικό εύρος ζώνης και προστασία απέναντι στην υποβάθμιση της QoS του πρόσθετου CT.*
- *Το MAM απαιτεί μόνο περιορισμένες επεκτάσεις πρωτοκόλλων όπως αυτές που περιγράφονται στη RFC 4124.*

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα δίκτυο όπου όλες οι γραμμές σύνδεσης έχουν χωρητικότητα 10 Mbps και ακολουθείται το μοντέλο MAM. Στον τύπο CT_0 έχουν

δοθεί 9 Mbps και στον τύπο CT_1 1 Mbps. Στην περίπτωση που στο δίκτυο δεν κυκλοφορεί κίνηση CT_0 (π.χ φωνή) στο συντομότερο μονοπάτι ABC μένει αδιάθετο εύρος ζώνης 9 Mbps. Εάν χρειαστεί να ρυθμιστεί δεύτερο MME για τον τύπο CT_1 (π.χ δεδομένα) αυτό θα συσταθεί πάνω στο δρόμο ADEC που δεν είναι ο συντομότερος.



Στην περίπτωση τώρα που ο ΠΥ χρειαστεί να συστήσει ένα νέο MME για τύπο CT_0 οι πόροι είναι διαθέσιμοι και δεν χρειάζεται να αποκτηθεί MME που έχει δοθεί στον τύπο CT_1.
Ο υπολογισμός του διαθέσιμου εύρους ζώνης για τον τύπο CTn με προτεραιότητα m γίνεται με αφαίρεση από το εύρος ζώνης του CTn του αθροίσματος όλου του εύρους ζώνης των MME του τύπου CTn σε όλα τα επίπεδα προτεραιότητας που είναι καλύτερα ή ίσα με το m. Σε μαθηματική γλώσσα το μοντέλο περιγράφεται:

I. Μέγιστος αριθμός περιορισμών BC= Μέγιστο αριθμό τύπων CT $\Rightarrow$
   MaxBC = MaxCT = 8

II. $c \in [0, MaxCT-1], c \in N$:
   $Reserved(CTc) = R(CTc) \leq BCc \leq$ Max Reservable Bandwidth

III. $SUM[R(CTc)] \leq$ Max Reservable Bandwidth, όπου το άθροισμα SUM είναι μεταξύ όλων των τιμών του c, με $c \in [0, MaxCT-1], c \in N$

Για να αυξηθεί το εύρος ζώνης που μοιράζεται σε διαφορετικούς CT, το άθροισμα των περιορισμών εύρους ζώνης BC μπορεί να υπερβεί το Max Reservable Bandwidth ώστε η ακόλουθη συνθήκη να είναι αληθινή:

$SUM(BCc) >$ Max Reservable Bandwidth, όπου το άθροισμα SUM είναι μεταξύ όλων των τιμών του c, με $c \in [0, MaxCT-1], c \in N$.

Το άθροισμα των περιορισμών BC μπορεί επίσης να είναι ίσο ή μικρότερο του Max Reservable Bandwidth. Τότε η συνθήκη III του μοντέλου δεν χρειάζεται να ληφθεί υπ΄ όψιν. Αυτό συμβαίνει γιατί από την συνθήκη II συνάγεται ότι :

SUM[R(CTc)] ≤ SUM(BCc) και με υπόθεση εδώ ότι SUM(BCc) ≤ Max Reservable Bandwidth προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση ισχύει SUM[R(CTc)]) ≤ Max Reservable Bandwidth

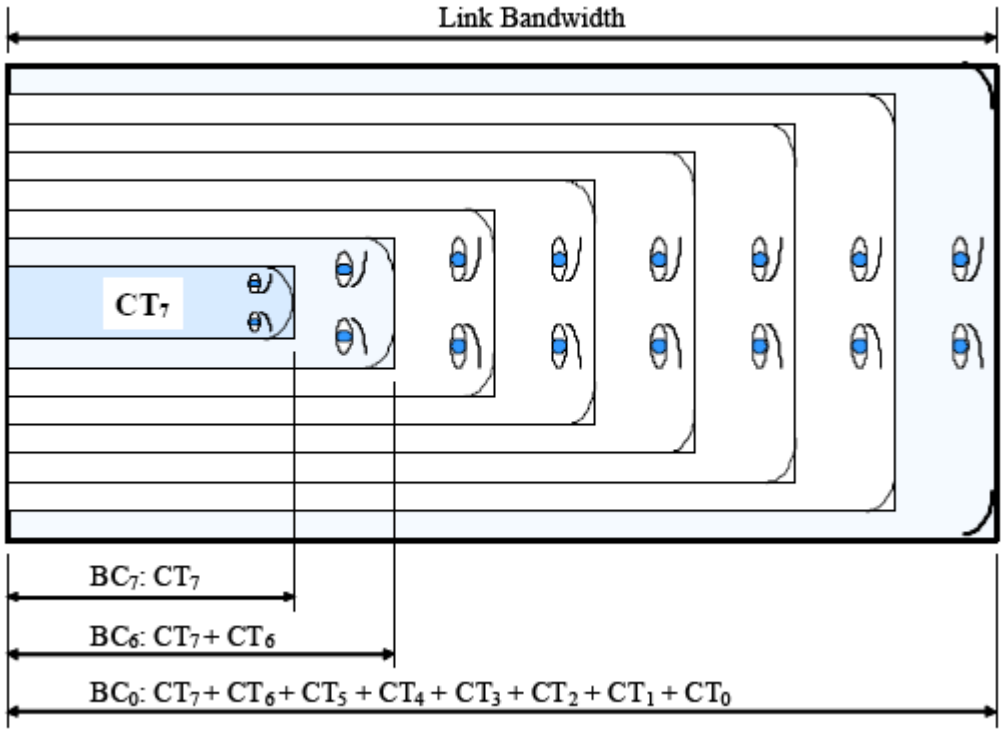
Στο πεδίο των MME οι περιορισμοί του μοντέλου MAM μπορούν να γίνουν:

Όλα τα μονοπάτια MME του τύπου κλάσης CT7 χρησιμοποιούν εύρος BC7
Όλα τα μονοπάτια MME του τύπου κλάσης CT6 χρησιμοποιούν εύρος BC6
Όλα τα μονοπάτια MME του τύπου κλάσης CT5 χρησιμοποιούν εύρος BC5
…….
…….
Όλα τα μονοπάτια MME του τύπου κλάσης CT0 χρησιμοποιούν εύρος BC0

Όλα τα μονοπάτια MME όλων των τύπων CT συγκεντρωτικά χρησιμοποιούν το πολύ Maximum Reservable Bandwidth.

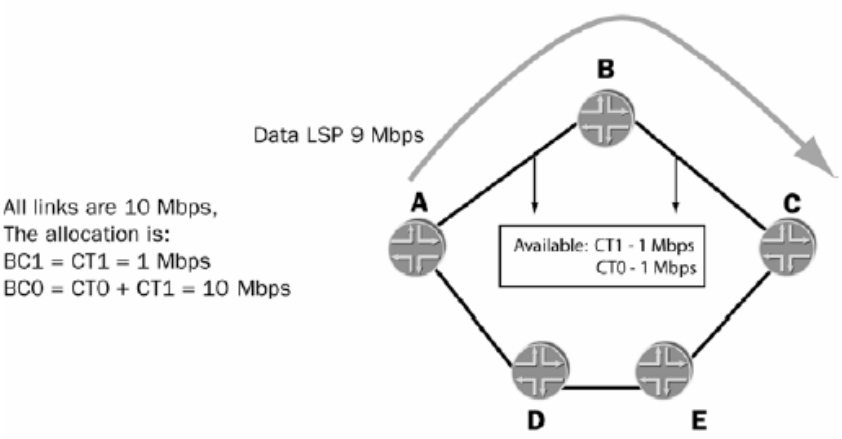
5.2. Μοντέλο Russian Dolls (IETF RFC-4127)

Το μοντέλο Russian Dolls επιτρέπει το μοίρασμα του εύρους ζώνης μεταξύ των τύπων κλάσης CTs, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αποτελεσματικότητα της χρήσης του εύρους ζώνης σε σχέση με το μοντέλο MAM. Ο τύπος κλάσης CT7 θεωρείται ότι έχει τις αυστηρότερες απαιτήσεις από πλευράς ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και ο τύπος CT0 ανήκει στην κατά δύναμη εφικτή κίνηση με τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Ανάλογα το εύρος ζώνης δίνεται με απόλυτο και δεδομένο ποσοστό BC7 στον τύπο CT7, ενώ στο άλλο άκρο το ποσοστό BC0 μοιράζεται σε όλους τους τύπους CT. Με αυτόν τον τρόπο το εύρος ζώνης BC6 μοιράζεται μεταξύ των τύπων CT7 και CT6, το εύρος ζώνης BC5 μεταξύ των CT7, CT6 και CT5, μέχρι το εύρος ζώνης BC0 που μοιράζεται σε όλους τους τύπους BC0. Σχηματικά το μοντέλο μοιάζει με το πασίγνωστο ρωσικό παιδικό παιγνίδι όπου η μεγάλη κούκλα περιέχει μια μικρότερη και ούτω καθ’ εξής μέχρι τη μικρότερη κούκλα που εμπεριέχεται σε όλες τις μεγαλύτερες:

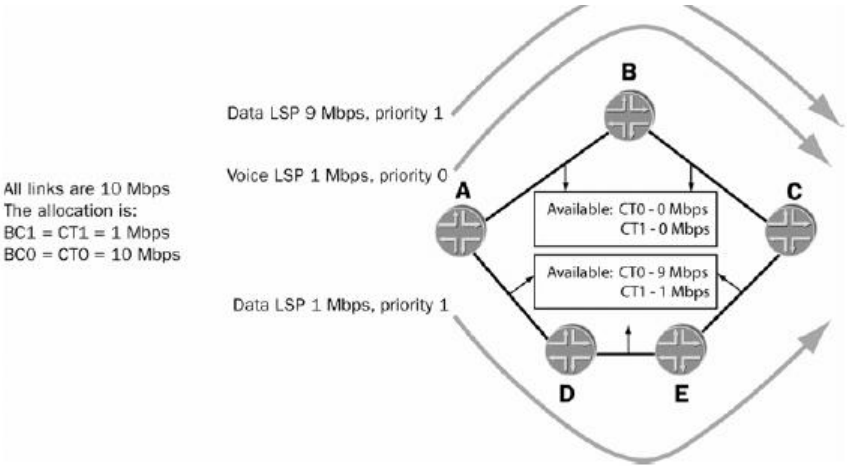


Το πλεονέκτημα του μοντέλου RDM σε σχέση με το MAM είναι ακριβώς το μοίρασμα του διαθέσιμου εύρους, ενώ το μειονέκτημα είναι ακριβώς ότι εξαιτίας του τρόπου μοιράσματος δεν υπάρχει απομόνωση μεταξύ των τύπων κλάσης. Η μη ύπαρξη απομόνωσης οδηγεί σε τεχνικές αποπομπής για να εξασφαλιστεί ότι κάθε τύπος κλάσης θα πάρει το εύρος ζώνης που πρέπει ανεξαρτήτως του επιπέδου ανταγωνισμού από άλλους τύπους. Συνεπώς σε περιβάλλοντα που επιτρέπεται η χρήση preemption το μειονέκτημα παύει να υφίσταται, αφού η χρήση του μοντέλου RDM μαζί με preemption εξασφαλίζει:
Απομόνωση μεταξύ των τύπων κλάσης, αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης και προστασία από την υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας όλων των τύπων κλάσης.
Από πλευράς υλοποίησης *[IETF-RFC4127]* το μοντέλο απαιτεί περιορισμένες επεκτάσεις πρωτοκόλλων όπως αυτές που περιγράφονται στην *IETF RFC4124 "Protocol Extensions for Support of Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering"*.

Ακολουθεί παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου RDM:



Στο παραπάνω σχήμα το συνολικό εύρος ζώνης ανά σύνδεσμο είναι 10 Mbps. Το δίκτυο μεταφέρει φωνή και δεδομένα. Το εύρος ζώνης 1 Mbps θεωρείται ως BC1, ενώ τα 10 Mbps ως BC0. Η φωνή συνεπώς λαμβάνει τον τύπο κλάσης CT1 και εύρος ζώνης από 0 έως 1Mbps, δηλαδή BC1. Τα δεδομένα λαμβάνουν τον τύπο κλάσης CT0 και το εύρος ζώνης που καταλαμβάνουν είναι BC0-BC1 δηλαδή 9 Mbps. Εάν ήδη έχει συσταθεί το MME ABC για δεδομένα και δεν υπάρχει φωνή να μεταφερθεί, τότε ένα δεύτερο μονοπάτι MME ABC μπορεί να συσταθεί χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης BC1 (1 Mbps). Είναι προφανής η αντιστοίχηση του μοντέλου με πολιτικές εύκολης και φθηνής υπερπώλησης του δικτύου για κίνηση πραγματικού χρόνου. Επειδή το επιπλέον εύρος ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλους τύπους κίνησης, η ανάθεσή του σε κίνηση πραγματικού χρόνου δεν επηρεάζει την ρυθμαπόδοση του δικτύου *[MPLS DiffServ TE – Ina Minei]*.
Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και το μειονέκτημα του μοντέλου RDM. Εάν για παράδειγμα όταν έχει παραχωρηθεί το δεύτερο MME ABC, φτάσει φωνή τότε δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για τη μεταφορά φωνής. Ένα από τα υπάρχοντα MME δεδομένων πρέπει να παραχωρηθεί για την μεταβίβαση φωνής, αλλιώς ο Πάροχος δεν μπορεί να εγγυηθεί το εύρος ζώνης που χρειάζεται η φωνή.



Συνεπώς η φωνή με μεγαλύτερη προτεραιότητα (με προτεραιότητα 0 έναντι 7 των δεδομένων) υποχρεώνει τα δεδομένα που καταλαμβάνουν το δεύτερο MME ABC, να φύγουν και να ακολουθήσουν το MME ADEC που έχει ένα άλμα περισσότερο. Φυσικά η φωνή διώχνει τα δεδομένα μόνο εάν δεν υπερβαίνει την κατανομή εύρους ζώνης για τον τύπο κλάσης CT1 πάνω στον σύνδεσμο (δηλαδή το 1Mbps).

Σε μαθηματική γλώσσα το μοντέλο είναι:

I. Μέγιστος αριθμός περιορισμών BC= Μέγιστο αριθμό τύπων CT $\Rightarrow$
MaxBC = MaxCT = 8

II. Για κάθε b $\in$ [0, MaxCT-1], b $\in$ N :
Sum {Reserved(CTc)} $\leq$ BCb, όπου το άθροισμα Sum διατρέχει όλες τις τιμές για το c στο διάστημα [b, MaxCT-1]

III. BC0 = Μέγιστο δεσμευμένο εύρος ζώνης, τέτοιο ώστε:
Sum {Reserved(CTc)} $\leq$ Max Reservable Bandwidth. όπου το άθροισμα Sum είναι μεταξύ όλων των τιμών του c, με c $\in$ [0, MaxCT-1], c $\in$ N

Με το μοντέλο αυτό επιτρέπεται αποπομπή τόσο μέσα σε τύπο κλάσης όσο και μεταξύ των τύπων κλάσεων.
Όταν υφίστανται οι 8 τύποι κλάσης οι περιορισμοί που εφαρμόζονται στο εύρος ζώνης περιγράφονται όπως παρακάτω:
Όλα τα MME του τύπου CT7 χρησιμοποιούν το πολύ εύρος ζώνης BC7.
Όλα τα MME του τύπου CT6 και CT7 χρησιμοποιούν το πολύ εύρος ζώνης BC6.
Όλα τα MME του τύπου CT5, CT6 και CT7 χρησιμοποιούν το πολύ εύρος ζώνης BC5.
Όλα τα MME του τύπου CT4, CT5, CT6 και CT7 χρησιμοποιούν το πολύ εύρος ζώνης BC4.
...
Όλα τα MME του τύπου CT0, CT1, CT2,... και CT7 χρησιμοποιούν το πολύ εύρος ζώνης BC0 ίσο με το μέγιστο δεσμευμένο εύρος ζώνης.

Ο παρακάτω πίνακας ανακεφαλαιώνει τις διαφορές, τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μοντέλων MAM και RDM:

Russian Dolls Model	***Maximum Allocation Model***
Αποτελεσματική χρήση εύρους ζώνης	Το εύρος ζώνης μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί σωστά και μέρος του να χαθεί
Δυσκολότερο να κατανοηθεί και να εφαρμοστεί	Εύκολα γίνεται κατανοητό και διαχειρίσιμο
Δεν υπάρχει απομόνωση μεταξύ των CT και χρειάζεται αποπομπή για την εγγύηση εύρους ζώνης σε άλλους τύπους CT εκτός από τον CT7	Υπάρχει απομόνωση μεταξύ των CT και εγγύηση εύρους ζώνης για όλους χωρίς αποπομπή
Χρήσιμο όπου επιτρέπεται αποπομπή	Χρήσιμο όπου δεν επιτρέπεται αποπομπή
Αντιστοιχεί έναν περιορισμό εύρους ζώνης BC σε ένα ή περισσότερους τύπους CT	Αντιστοιχεί έναν περιορισμό εύρους ζώνης BC σε έναν τύπο CT

Από την IETF δεν προκύπτει η υποχρέωση συμμόρφωσης στο ίδιο μοντέλο περιορισμού εύρους ζώνης μέσα σε ένα δίκτυο, αλλά η εμπειρία δείχνει ότι είναι ευκολότερο να ρυθμιστεί, υποστηριχτεί και λειτουργήσει ένα δίκτυο που ακολουθεί το ίδιο μοντέλο BC παντού *[MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering – Ina Minei, Juniper Networks 2004]*. Το μοντέλο που ακολουθείται σε κάθε σύνδεσμο ανακοινώνεται με τη χρήση των πρωτοκόλλων IGP σε συγκεκριμένο πεδίο αφιερωμένο στους περιορισμούς εύρους ζώνης.

Ο αλγόριθμος εφαρμογής DiffServ-TE συνίσταται από τα παρακάτω βήματα:

1. Ακολουθία ενός μοντέλου περιορισμού BC και απόφαση για το εύρος ζώνης που θα παραχωρηθεί σε κάθε BC σε κάθε σύνδεσμο.
2. Ρύθμιση των απομονωτών και των παραχωρήσεων εύρους ζώνης πάνω σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου ώστε να συμφωνούν με τους περιορισμούς BC που έχουν τεθεί στο πρώτο βήμα.
3. Απόφαση για τον αριθμό των τύπων κλάσης CT και των προτεραιοτήτων που πρέπει να εφαρμοστούν.
4. Επιλογή ενός πρωτοκόλλου IGP.
5. Ρύθμιση των μονοπατιών MME με το επιθυμητό εύρος ζώνης, τύπο κλάσης και προτεραιότητα.
6. Ρύθμιση πολιτικών και δέσμευση εύρους ζώνης εάν χρειάζεται.
7. Απόφαση για το χειρισμό διαφοροποίησης υπηρεσίας (DiffServ) μέσω των bit EXP ή της ετικέτας. Εάν ο χειρισμός γίνεται μέσω των EXP, τότε γίνεται ρύθμιση της αντιστοιχίας EXP σε PHB σε όλο τον τομέα DiffServ και πρέπει να εξασφαλιστεί ότι σε όλο το δίκτυο MPLS υπάρχει κοινή αντιστοίχηση της κίνησης.

6. Μοντελοποίηση Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων

Με την χρήση της υπάρχουσας RFC 2547 οι Bush και Griffin διατύπωσαν μια ενδιαφέρουσα θεωρία συνόλων που αναλύει το περιγραφικό μοντέλο των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων (Virtual Private Network) σε μαθηματική γλώσσα και εξασφαλίζει ότι η απομόνωση των πελατών ενός Παρόχου επιτυγχάνεται εάν ακολουθηθούν οι περιορισμοί που υπονοούνται χωρίς να ορίζονται ρητώς στην RFC 2547. Η πρωτότυπη εργασία παρουσιάστηκε στην IEEE-INFOCOM του έτους 2003.

Η εργασία αυτή προσφέρει ένα καλό μαθηματικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη μηχανισμών δημιουργίας, λειτουργίας και υποστήριξης ΕΙΔ.
Η RFC 2547 περιγράφει Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα βασισμένα σε MPLS/BGP. Βασικά σημεία της υλοποίησης Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων σύμφωνα με RFC 2547 ιδιαίτερα ελκυστικά για Παρόχους Υπηρεσιών είναι:

1) Τα ΕΙΔ μπορούν να επικαλύπτονται με συνέπεια τη δημιουργία Intranets και Extranets. Ένα Intranet αποτελεί ΕΙΔ με τοποθεσίες απομακρυσμένες συνήθως γεωγραφικά που ανήκουν όλες στον ίδιο φορέα (οργανισμό ή εταιρεία) και χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα πρωτοκόλλων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα Intranet είναι μια εταιρεία με τα υποκαταστήματα της. Το Extranet σχηματίζεται από τοποθεσίες απομακρυσμένες συνήθως γεωγραφικά που δεν ανήκουν στον ίδιο φορέα (οργανισμό ή εταιρεία). Χαρακτηριστικό παράδειγμα Extranet είναι το ΕΙΔ που σχηματίζει μια εταιρεία με τους πελάτες και τους προμηθευτές της. Μια τοποθεσία πελάτη μπορεί να αποτελείται από μια ομάδα Η/Υ από τους οποίους άλλοι μετέχουν στο Intranet του πελάτη, ενώ οι ίδιοι ταυτόχρονα, είτε άλλοι μπορούν να μετέχουν σε Extranet του πελάτη με άλλους οργανισμούς. Άρα η συμμετοχή σε ΕΙΔ μεταφέρεται από το επίπεδο της τοποθεσίας στο επίπεδο Η/Υ με συνέπεια την κλιμάκωση της συνδεσιμότητας σε επίπεδο συστήματος εντός της τοποθεσίας. Συνεπώς μέσα από την RFC 2547 υπάρχει εκτός της τοποθεσίας κλιμάκωση σε επίπεδο συστήματος εντός της τοποθεσίας.

2) Μια τοποθεσία μπορεί επιλεκτικά να εκθέτει διευθύνσεις IP των υπολογιστών που την συνθέτουν στα ΕΙΔ που ανήκει και να αποκρύπτει άλλες. Η έκθεση διεύθυνσης ουσιαστικά αναφέρεται στα προθέματα (prefixes) IP με τα οποία τμήματα του ολικού εύρους IP παραχωρούνται από τους Παρόχους στους Πελάτες. Τα προθέματα IP χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση των δρομολογήσεων και την ελάττωση των καταχωρήσεων στους πίνακες δρομολόγησης.

3) Η δυνατότητα τα ΕΙΔ να εκτείνονται σε πολλούς Παρόχους. Η δυνατότητα που δίνεται μέσα από την RFC 2547 για την επέκταση του ΕΙΔ ενός πελάτη σε πολλούς Παρόχους, εξετάζεται από την σκοπιά της διευθυνσιοδότησης, των περιορισμών που προκύπτουν από τους πίνακες δρομολόγησης και όχι της ποιότητας υπηρεσίας και των Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας. Οι περιορισμοί διευθυνσιοδότησης ουσιαστικά δημιουργούν το επίπεδο πάνω στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν οι μηχανισμοί παροχής συγκεκριμένης υπηρεσίας.

Από την άλλη μεριά τα ΕΙΔ υλοποιημένα κατά την RFC 2547 προσθέτουν πολυπλοκότητα στη διαμόρφωση και τη διαχείριση των δικτύων των Παρόχων. Η πολυπλοκότητα αυξάνει με τη συμμετοχή των τοποθεσιών ενός πελάτη σε πολλά ΕΙΔ, με το εύρος διευθύνσεων (διαφορετικό στη γενική περίπτωση) που συνεισφέρουν οι τοποθεσίες στα ΕΙΔ που μετέχουν και βέβαια όταν το δίκτυο κορμού των ΕΙΔ μοιράζεται σε πολλούς Παρόχους. Συνεπώς είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός επίσημου και τυπικού μοντέλου που θα εξασφαλίζει τη σωστή υλοποίηση των ΕΙΔ βασισμένων στην RFC 2547.

6.1. Παραδοχές από την σύσταση RFC 2547

Στην εισαγωγή της RFC 2547 αναφέρονται τα ακόλουθα:

[Έστω ένα σύνολο «τοποθεσιών» που συνδέονται με ένα κοινό δίκτυο που μπορεί να ονομαστεί «δίκτυο κορμού». Με την εφαρμογή κάποιων πολιτικών δημιουργούνται υποσύνολα αυτού του συνόλου τοποθεσιών για τα οποία ισχύει ο ακόλουθος κανόνας:

Δύο τοποθεσίες μπορούν να έχουν συνδεσιμότητα IP πάνω από το δίκτυο κορμού μόνο εάν τουλάχιστο ένα από τα παραπάνω υποσύνολα περιέχει και τις δύο. Τα υποσύνολα που δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα…
…Εάν όλες οι τοποθεσίες μέσα σε ένα ΕΙΔ ανήκουν στην ίδια επιχείρηση τότε το ΕΙΔ είναι το επιχειρησιακό Intranet. Εάν οι τοποθεσίες ενός ΕΙΔ ανήκουν σε διαφορετικές επιχειρήσεις τότε το ΕΙΔ είναι ένα Extranet…]

Από την RFC 2547 προκύπτουν τα ακόλουθα:

1. Δύο διαφορετικά Εικονικά Ιδιωτικά δίκτυα, έστω V_1, V_2 που δεν έχουν κοινές τοποθεσίες μπορούν να έχουν επικαλυπτόμενο ή ακριβώς το ίδιο εύρος διευθύνσεων IP.
    a. Άμεση συνέπεια της επικάλυψης είναι ότι ένα σύστημα μέσα σε ΕΙΔ με μοναδική ξεχωριστή διεύθυνση εντός του φάσματος διευθύνσεων αυτού του ΕΙΔ, δεν χρειάζεται να ξέρει τίποτα για τη δομή του ΕΙΔ. Τα πακέτα των δεδομένων θα σταλούν σε δρομολογητή ΑΠΕ ο οποίος θα φροντίσει για την προώθησή τους σε άλλο σημείο του ΕΙΔ σύμφωνα με τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.
    b. Δεύτερη συνέπεια της δυνατότητας επικάλυψης είναι η κλιμάκωση της περιγραφόμενης αρχιτεκτονικής από το επίπεδο της τοποθεσίας στο επίπεδο του συστήματος.

2. Δύο τοποθεσίες έχουν συνδεσιμότητα IP μόνο εάν υπάρχει κάποιο ΕΙΔ που περιέχει και τις δύο. Δύο τοποθεσίες που δεν έχουν κοινό ΕΙΔ δεν μπορούν να έχουν συνδεσιμότητα μέσω του δικτύου κορμού του Παρόχου.

Έστω το σύνολο $S = \{s_1, \dots, s_2\}$ που περιγράφει ένα σύνολο τοποθεσιών και $V = \{\upsilon_1, \dots, \upsilon_\kappa\}$ ένα σύνολο που αποτελείται από κ Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα (ΕΙΔ):

Για κάθε τοποθεσία $s \in S$, υπάρχει ένα πεπερασμένο μη κενό σύνολο C_S από κλάσεις διεπαφής για την τοποθεσία s. Αυτό προκύπτει γιατί μια τοποθεσία είναι δομικό στοιχείο ενός τουλάχιστον ΕΙΔ, οπότε θα συνδέεται μέσω διεπαφών στο συγκεκριμένο ΕΙΔ, μέσω του Παρόχου Υπηρεσιών. Ως αφηρημένη διεπαφή ορίζεται ένα ζεύγος της μορφής (s, c), όπου s είναι μια τοποθεσία και $c \in C_S$ είναι μια κλάση διεπαφών.

Με αποφυγή περαιτέρω τυπικότητας οι αφηρημένες διεπαφές θα υλοποιηθούν με μία ή περισσότερες λογικές διεπαφές στο άκρο του πελάτη (ΑΠΕ – Customer Edge/CE) και θα συνδεθούν με διεπαφές στο άκρο του Παρόχου (ΑΠΑ – Provider Edge/PE). Η κίνηση που προέρχεται από οποιαδήποτε λογική διεπαφή που καλύπτεται από την ίδια αφηρημένη διεπαφή θα εξυπηρετείται με τον ίδιο τρόπο από τους δρομολογητές ΑΠΑ. Η εξυπηρέτηση της κίνησης θα είναι ακριβώς η ίδια είτε πρόκειται για προώθηση, είτε πρόκειται για φιλτράρισμα.

Το σύνολο των αφηρημένων διεπαφών για την τοποθεσία s είναι:

$$I(s) = \{ (s, c) \mid c \in C_S \}$$

Η δημιουργία και διαμόρφωση ενός ΕΙΔ επιβάλει τον καθορισμό της συμμετοχής στο ΕΙΔ για κάθε τέτοια αφηρημένη διεπαφή i = (s, c). Για να σχηματιστεί το ΕΙΔ καθορίζεται για κάθε τοποθεσία που συμμετέχει στο ΕΙΔ, το σύνολο των διεπαφών αυτής της τοποθεσίας με τον Πάροχο Υπηρεσιών.
Το σύνολο όλων των παραπάνω αφηρημένων διεπαφών συμβολίζεται ως $V(i) \subseteq V$, δηλαδή εάν το υ είναι ένα ΕΙΔ για το οποίο ισχύει $\upsilon \in V((s, c))$, τότε η αφηρημένη διεπαφή (s, c) συμμετέχει στο ΕΙΔ υ.

Συνεπώς:

> Εάν $\upsilon \in V((s, c))$ τότε η αφηρημένη διεπαφή (s, c) είναι μέλος του ΕΙΔ υ, όπου $V(i) \subseteq V$. Δηλαδή στο σύνολο των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων εμπεριέχεται το σύνολο των αφηρημένων διεπαφών όλων των τοποθεσιών που σχηματίζουν το ΕΙΔ.

Κάθε ΕΙΔ $\upsilon \in V$ σχετίζεται:

i) με ένα σύνολο αφηρημένων διεπαφών I(υ), όπου
$I(\upsilon) = \{(s, c) \mid s \in S, c \in C_S, \upsilon \in V((s, c))\}$

και

ii) με ένα σύνολο τοποθεσιών S(υ), όπου
$S(\upsilon) = \{ s \in S \mid (s, c) \in I(\upsilon)\}$.

Εάν $s \in S(\upsilon)$ τότε η τοποθεσία s βρίσκεται εντός του ΕΙΔ υ, δηλαδή πρέπει να υπάρχει κάποια αφηρημένη διεπαφή $(s, c) \in I(\upsilon)$ μέσω της οποίας συνδέεται στο ΕΙΔ.
Το σύνολο όλων των ΕΙΔ στα οποία ανήκει η τοποθεσία s συμβολίζεται ως V(s):

$$V(s) = \{\upsilon \in V \mid s \in S(\upsilon)\}$$

Το παραπάνω συμπέρασμα ανάγει με μαθηματικό τρόπο, το γεγονός της δημιουργίας εικονικών διεπαφών μεταξύ των τοποθεσιών του Πελάτη πάνω από το δίκτυο του Παρόχου. Οι εικονικές αυτές διεπαφές συστήνονται μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΕ του Πελάτη που υπάρχουν σε κάθε επαφή Πελάτη – Παρόχου. Στην συνέχεια με τους μηχανισμούς BGP/MPLS μεταξύ των δρομολογητών ΑΠΕ, ΑΠΑ και Π οι εικονικές αφηρημένες διεπαφές, μεταβάλλονται σε πραγματικά μονοπάτια μεταγωγής ετικετών και τέλος δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο η εσωτερική τοπολογία του δικτύου του Παρόχου δεν γίνεται αντιληπτή από τους δρομολογητές του Πελάτη (περισσότερα σχετικά με την πρακτική υλοποίηση των ΕΙΔ υπάρχουν στο δεύτερο κεφάλαιο).

Για κάθε πρόθεμα διευθύνσεων p που ανήκουν σε τμήμα διευθύνσεων CIDR (Classless InterDomain Routing), έστω A(p) το σύνολο όλων των διευθύνσεων που καλύπτονται από το πρόθεμα p. Για παράδειγμα το πρόθεμα 194.218.0.0/15, καλύπτει τις IP διευθύνσεις 194.218.0.0-194.219.255.255, ενώ το πρόθεμα 194.218.0.0/16 καλύπτει τις IP διευθύνσεις 194.218.0.0-194.218.255.255.

Εάν το P είναι κάποιο μη κενό σύνολο από προθέματα τότε με A(P) συμβολίζεται η ένωση όλων των συνόλων A(p) για $p \in P$. Εάν το σύνολο όλων των IP προθεμάτων που μπορεί να χρησιμοποιήσει μια τοποθεσία s για να συμμετάσχει σε Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα συμβολίζεται με P(s) τότε το συνολικό εύρος διευθύνσεων για την τοποθεσία s είναι A(P(s)).

Εάν το υ είναι ΕΙΔ με τοποθεσία $s \in S(\upsilon)$, τότε η τοποθεσία s μπορεί επιλεκτικά να εκθέτει κάποια προθέματα του P(s) στο υ ενώ καλύπτει κάποια άλλα τα οποία πιθανώς δεν ανήκουν στο ίδιο ΕΙΔ.
Εάν $i = (s, c) \in I(\upsilon)$ είναι μια αφηρημένη διεπαφή του ΕΙΔ υ, τότε το E(i, υ) συμβολίζει το σύνολο των προθεμάτων IP που εκθέτει η τοποθεσία s στο ΕΙΔ υ στην αφηρημένη διεπαφή i. Το αντίστοιχο εύρος διευθύνσεων IP συμβολίζεται A(i, υ). Συνεπώς εάν $\alpha \in A((s, c), \upsilon)$, τότε το α ανήκει στο εύρος διευθύνσεων που η τοποθεσία s εκθέτει στο ΕΙΔ υ στην αφηρημένη διεπαφή $i = (s, c)$.

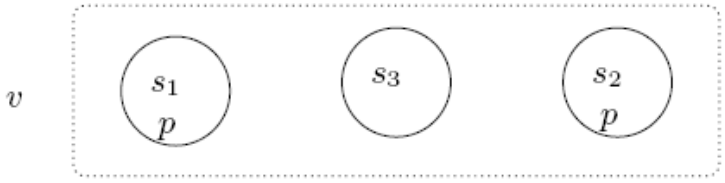
Συμπέρασμα
Με τις παραπάνω μαθηματικές αντιστοιχίες έχει καθοριστεί ο τρόπος σύστασης Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων, με βάση σύνολα τοποθεσιών, διεπαφών και εύρους διευθύνσεων IP. Στην συνέχεια αναλύονται χρήσιμες ιδιότητες και περιορισμοί για την λειτουργία των ΕΙΔ.

6.2. **Περιορισμοί σύνδεσης**

Είναι κατανοητό ότι για τη σωστή λειτουργία των ΕΙΔ πρέπει να αποφεύγεται η επικάλυψη διευθύνσεων. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις επικάλυψης διευθύνσεων:

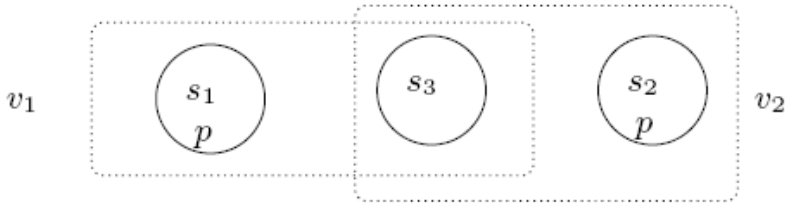
I. Μεταξύ τοποθεσιών του ιδίου ΕΙΔ
II. Μεταξύ δύο ή περισσοτέρων τοποθεσιών διαφορετικών ΕΙΔ

Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένα ΕΙΔ υ με τοποθεσίες s_1, s_2 και s_3 και οι s_1 και s_2 εκθέτουν το ίδιο πρόθεμα στο υ. Τότε υπάρχει πρόβλημα όταν η τοποθεσία s_3 προσπαθήσει να ανταλλάξει κίνηση με πρόθεμα p γιατί απευθύνεται και στην s_1 και στην s_2. Το ίδιο πρόβλημα συμβαίνει εάν η s_1 εκθέτει πρόθεμα p_1, η s_2 εκθέτει πρόθεμα p_2 και το p_1 είναι υποδίκτυο του p_2.



(I)

Στη δεύτερη περίπτωση η τοποθεσία s_3 ανήκει σε δύο ΕΙΔ στο $υ_1$ και $υ_2$. Το $υ_1$ περιλαμβάνει επίσης την τοποθεσία s_1 με πρόθεμα διευθύνσεων IP p. Το $υ_2$ περιλαμβάνει την τοποθεσία s_2 η οποία πάλι συμβαίνει να διαθέτει διευθύνσεις IP με πρόθεμα p. Συνεπώς εάν η τοποθεσία s_3 επιχειρήσει να στείλει κίνηση IP με πρόθεμα p προκύπτει πρόβλημα.



(II)

Η ανακάλυψη και διόρθωση του προβλήματος γίνεται ποιο δύσκολη επειδή τα ΕΙΔ $υ_1$ και $υ_2$ μπορούν να σε διαφορετικούς τομείς διαχείρισης. Όπως και στην πρώτη περίπτωση υπάρχει πάλι πρόβλημα εάν η τοποθεσία s_1 εκθέτει πρόθεμα p_1, η s_2 εκθέτει πρόθεμα p_2 και το p_1 είναι υποδίκτυο του p_2. Σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ εύκολη η παραβίαση της ασφαλείας για το ΕΙΔ $υ_2$ από την τοποθεσία s_1 που δεν ανήκει καν στο $υ_2$. Συνεπώς για την ορθή λειτουργία των ΕΙΔ σε επίπεδο διευθύνσεων IP υπάρχει συνθήκη περιορισμού της χρήσης επικαλυπτόμενων διευθύνσεων η οποία υπονοείται στην RFC 2547.

Η συγκεκριμένη περιοριστική συνθήκη ονομάζεται συνθήκη ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ (DISJOINT) και περιγράφεται μαθηματικά παρακάτω:

6.2.1. Συνθήκη ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ

Η συνθήκη διαχωρισμού σημαίνει ότι:

Για όλα τα Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα υ, υ_1, υ_2, τις διάφορες τοποθεσίες s_1 και s_2, με $i_1 \in I(s_1)$, όπου $I(s_1)$ σύνολο αφηρημένων διεπαφών της τοποθεσίας s_1 και $i_2 \in I(s_2)$, όπου $I(s_2)$ σύνολο των αφηρημένων διεπαφών της τοποθεσίας s_2:

(a) Εάν i_1 , $i_2 \in I(\upsilon)$ τότε:

$$A(i_1, \upsilon) \cap A(i_2, \upsilon) = \varnothing$$

δηλαδή οι τοποθεσίες του ΕΙΔ εκθέτουν μέσω των αφηρημένων διεπαφών τους διαφορετικές διευθύνσεις IP στο ΕΙΔ υ

(b) Εάν υπάρχουν δύο ΕΙΔ υ_1 , υ_2 με $\upsilon_1 \neq \upsilon_2$, $i_1 \in I(\upsilon_1)$, $i_2 \in I(\upsilon_2)$ και $(i_1, \upsilon_1) \cap A(i_2, \upsilon_2) \neq \varnothing$ τότε:

$$I(\upsilon_1) \cap I(\upsilon_2) = \varnothing$$

δηλαδή τα δύο ΕΙΔ υ_1, υ_2, δεν βρίσκονται σε επαφή, αφού δεν μοιράζονται καμία διεπαφή.

Τονίζεται εδώ ότι όταν τα ΕΙΔ δεν μοιράζονται τοποθεσίες τότε μπορούν οι διευθύνσεις IP να επικαλύπτονται.

6.2.2. Συνθήκη ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Κατά την υλοποίηση ενός ΕΙΔ πρέπει να εξασφαλίζεται η διασύνδεση τοποθεσιών και συστημάτων εντός του ΕΙΔ. Η διασύνδεση των τοποθεσιών και των συστημάτων μπορεί να ακολουθεί συγκεκριμένες πολιτικές ή αρχιτεκτονικές. Για παράδειγμα μπορεί όλες οι τοποθεσίες να μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα απ' ευθείας (τοπολογία πλήρους διασύνδεσης) ή να μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα μόνο μέσω μιας κεντρικής τοποθεσίας (τοπολογία hub and spoke). Επίσης η κίνηση από κάποια τοποθεσία να επιτρέπεται προς ορισμένες μόνο άλλες τοποθεσίες και όχι προς όλες τις τοποθεσίες του Εικονικού Ιδιωτικού Δικτύου.

Έστω $i_1 = (s_1, c_1)$ και $i_2 = (s_2, c_2)$, δύο αφηρημένες διεπαφές στις τοποθεσίες s_1 και s_2. Η σχέση $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$ σημαίνει ότι:

> Η πολιτική του ΕΙΔ επιτρέπει την απ' ευθείας διασύνδεση μεταξύ των τοποθεσιών s_1 και s_2.

Η διασύνδεση επιτρέπει την κίνηση δεδομένων με πηγαία διεύθυνση a_1 και διεύθυνση προορισμού a_2 να εξέλθει από την τοποθεσία s_1 μέσω της αφηρημένης διεπαφής i_1 και να εισέλθει στην τοποθεσία s_2 μέσω της αφηρημένης διεπαφής i_2 .

Εάν ισχύει:

$$(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$$
και
$$(a_2, i_2) \rightarrow (a_1, i_1)$$

τότε οι παραπάνω δύο σχέσεις συμπτύσσονται στην $(a_1, i_1) \leftrightarrow (a_2, i_2)$, δηλαδή η απ' ευθείας διασύνδεση των τοποθεσιών επιτρέπει αμφίδρομη κίνηση πάνω από τις αφηρημένες διεπαφές i_1 , i_2.

Τότε η συνθήκη συνδεσιμότητας σημαίνει ότι:

Για όλα τα υ, s_1 , s_2 , $i_1 \in$ I(s_1) και $i_2 \in$ I(s_2), $a_1 \in$ A(i_1, υ) και $a_2 \in$ A(i_2, υ)

εάν ισχύει $i_1, i_2 \in$ I(υ) τότε $(a_1, i_1) \leftrightarrow (a_2, i_2)$

Σε ανεπίσημη γλώσσα η συνθήκη ορίζει πως εάν δύο αφηρημένες διεπαφές μοιράζονται ένα κοινό ΕΙΔ, τότε η υπονοούμενη διασύνδεση δεδομένων επιτρέπει στις διεπαφές να ανταλλάξουν κίνηση. Η κίνηση μπορεί να εμποδιστεί με την δημιουργία πολιτικών ασφαλείας ή να γίνεται μέσω κάποιας άλλης τοποθεσίας. Η συνθήκη συνδεσιμότητας απλώς υποβάλλει ότι υπάρχει διασύνδεση δεδομένων, χωρίς όμως να αποτρέπει συνδεσιμότητα μεταξύ διαφορετικών ΕΙΔ η οποία πρέπει να αποκλειστεί. Συνεπώς χρειάζονται επιπλέον συνθήκες για την απομόνωση (isolation) των Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων.

6.2.3. Συνθήκη ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ

Εάν δύο διεπαφές μπορούν να ανταλλάσσουν κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις τότε πρέπει να ανήκουν στο ίδιο ΕΙΔ και συνεισφέρουν στο εύρος ζώνης διευθύνσεων της κίνησης που ορίζεται από διεύθυνση προορισμού και διεύθυνση αφίξεως. Με μαθητική γλώσσα η περιγραφή των παραπάνω είναι:

Για όλα τα i_1, i_2 και a_1, a_2 εάν $(a_1, i_1) \leftrightarrow (a_2, i_2)$ τότε υπάρχει κάποιο ΕΙΔ υ τέτοιο ώστε:

$i_1, i_2 \in$ I(υ), $a_1 \in$ A(i_1, υ) και $a_2 \in$ A(i_2, υ)

όπου A(i, υ) το εύρος διευθύνσεων που εκθέτεται στο ΕΙΔ υ στη διεπαφή i.

Η συνθήκη αυτή καλείται απλή απομόνωση.

Η απλή απομόνωση δεν εμποδίζει μονοκατευθυνόμενη κίνηση μεταξύ δύο αφηρημένων διεπαφών που δεν μοιράζονται κοινό ΕΙΔ γι αυτό εισάγεται η συνθήκη της ισχυρής απομόνωσης η οποία περιέχει την απλή συνθήκη απομόνωσης και είναι:

> **Για όλα τα i_1, i_2 και a_1, a_2 εάν $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$ τότε υπάρχει κάποιο ΕΙΔ υ τέτοιο ώστε:**
>
> $$i_1, i_2 \in \text{I}(\upsilon),\ a_1 \in \text{A}(i_1, \upsilon) \text{ και } a_2 \in \text{A}(i_2, \upsilon)$$
>
> **όπου A(i, υ) το εύρος διευθύνσεων που εκθέτεται στο ΕΙΔ υ στη διεπαφή i.**

Σημειώνεται εδώ ότι εάν ισχύει η ισχυρή απομόνωση, τότε ισχύει και η απλή απομόνωση. Ιδανικά σε πρακτικό επίπεδο η ισχυρή απομόνωση θα μπορούσε να επιτευχθεί με συνδυασμό πινάκων δρομολόγησης και φιλτραρίσματος της κίνησης. Σε θεωρητικό επίπεδο ο συνδυασμός αυτός μπορεί να περιγραφεί όπως παρακάτω:

6.2.4. Συνθήκη πηγαίας επιβεβαίωσης διεύθυνσης

Θεωρείται τοποθεσία s. Τότε υπάρχει πηγαία επιβεβαίωση διεύθυνσης στην τοποθεσία s, εάν υπάρχουν κάποια «μέσα» (είτε στην τοποθεσία, είτε στο Άκρο Παρόχου – ΑΠΑ, που συνδέει την τοποθεσία s στο δίκτυο κορμού), που βεβαιώνουν ότι όλη η προερχόμενη κίνηση από την s πρέπει να έχει νόμιμη διεύθυνση.
Η συνθήκη για την απλή πηγαία επιβεβαίωση διεύθυνσης (ΑΠΕΔ) είναι:

> **Για όλες τις αφηρημένες διεπαφές i_1, i_2 και διευθύνσεις a_1, a_2 εάν $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$ τότε υπάρχει ένα ΕΙΔ υ τέτοιο ώστε:**
>
> $$i_1 \in \text{I}(\upsilon),\ a_1 \in \text{A}(i_1, \upsilon)$$

Συνεπώς η συνθήκη ΑΠΕΔ περιγραφικά αναφέρει ότι η κίνηση που φεύγει από μία αφηρημένη διεπαφή πρέπει να έχει πηγαία διεύθυνση σχετιζόμενη με το εύρος διευθύνσεων κάποιου ΕΙΔ που υποστηρίζεται από αυτή τη διεπαφή.

Η συνθήκη για την ισχυρή πηγαία επιβεβαίωση διεύθυνσης (ΙΠΕΔ) είναι:

> **Για όλες τις αφηρημένες διεπαφές i_1, i_2 και διευθύνσεις a_1, a_2 εάν $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$ τότε υπάρχει ένα ΕΙΔ υ τέτοιο ώστε:**
>
> $$i_1, i_2 \in \text{I}(\upsilon),\ a_1 \in \text{A}(i_1, \upsilon)$$

Συνεπώς η συνθήκη ΙΠΕΔ περιγραφικά αναφέρει ότι η κίνηση που φεύγει από μία αφηρημένη διεπαφή πρέπει να έχει πηγαία διεύθυνση σχετιζόμενη με το εύρος διευθύνσεων κάποιου ΕΙΔ που υποστηρίζεται από αυτή τη διεπαφή και ότι η διεπαφή προορισμού ανήκει στο ίδιο ΕΙΔ. Η συνθήκη ΙΠΕΔ υπονοεί τη συνθήκη ΑΠΕΔ.

6.2.5. Συνθήκη φάσματος (ΦΑΣΜΑ-SCOPE)

Ορίζεται η συνθήκη φάσματος (ΦΑΣΜΑ-SCOPE) ως:

> **Για όλες τις αφηρημένες διεπαφές i_1, i_2 και διευθύνσεις a_1, a_2 εάν $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$ τότε υπάρχει ένα ΕΙΔ υ τέτοιο ώστε:**
>
> $$i_1, i_2 \in \mathbf{I}(\upsilon) \text{ και } a_2 \in \mathbf{A}(i_2, \upsilon)$$

Αυτό σημαίνει ότι εάν υπάρχει μονοκατευθυνόμενη κίνηση από αφηρημένη διεπαφή i_1, σε αφηρημένη διεπαφή i_2 , τότε η διεύθυνση προορισμού αυτής της κίνησης πρέπει να περιέχεται στο εύρος διευθύνσεων που συνεισφέρει η τοποθεσία πίσω από τη διεπαφή i_2 σε κάποιο ΕΙΔ στο οποίο ανήκουν και οι δύο αφηρημένες διεπαφές.
Διαισθητικά η πηγαία επιβεβαίωση διεύθυνσης θα μπορούσε να επιτευχθεί με διαχείριση της κίνησης είτε στο Άκρο του Πελάτη (π.χ με τείχη προστασίας), είτε στο ΑΠΑ (χρήση πινάκων προώθησης πηγής / προορισμού), ενώ το ΦΑΣΜΑ θα μπορούσε να επιτευχθεί με χρήση πινάκων προώθησης.

6.2.6. Λογικοί Περιορισμοί - Χρήσιμα Θεωρήματα

Ένα απλό ΕΙΔ είναι αυτό για το οποίο κάθε διεπαφή ανήκει σε ένα μοναδικό ΕΙΔ. Η συνθήκη απλότητας (ΑΠΛΟΤΗΤΑ) περιγράφεται μαθηματικά ως:

> **Για κάθε διεπαφή i και για κάθε ΕΙΔ υ_1 και υ_2 εάν $i \in \mathbf{I}(\upsilon_1)$ και $i \in \mathbf{I}(\upsilon_2)$, τότε $\upsilon_1 = \upsilon_2$.**

Μία ένωση ΕΙΔ είναι ΕΙΔ στο οποίο κάθε διεπαφή συνεισφέρει το ίδιο εύρος διευθύνσεων σε κάθε ΕΙΔ που ανήκει. Η συνθήκη της ΕΝΩΣΗΣ περιγράφεται μαθηματικά ως:

> **Για κάθε διεπαφή i και για κάθε ΕΙΔ υ_1 και υ_2 εάν $i \in \mathbf{I}(\upsilon_1)$ και $i \in \mathbf{I}(\upsilon_2)$, τότε $\mathbf{A}(i, \upsilon_2) = \mathbf{A}(i, \upsilon_2)$**

<u>Θεώρημα 1</u>: Εάν ισχύουν οι συνθήκες ΑΠΛΟΤΗΤΑΣ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ, τότε ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

Έστω ότι ισχύουν οι συνθήκες ΑΠΛΟΤΗΤΑΣ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ και για κάποιες διεπαφές και διευθύνσεις i_1, i_2, a_1, a_2 ισχύει:

$$(a_1, i_1) \leftrightarrow (a_2, i_2)$$

Δηλαδή:

(I) $(a_2, i_2) \rightarrow (a_1, i_1)$ και

(II) $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$

Από τη συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ και την (Ι), ξέρουμε ότι υπάρχει ένα ΕΙΔ υ_1 τέτοιο ώστε $\mathrm{i}_1, \mathrm{i}_2 \in \mathrm{I}(\upsilon_1)$ και $a_1 \in \mathrm{A}(\mathrm{i}_1, \upsilon_1)$, ενώ από τη (ΙΙ) και τη συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ ξέρουμε ότι υπάρχει ένα υ_2 τέτοιο ώστε i_1, $\mathrm{i}_2 \in \mathrm{I}(\upsilon_2)$ και $a_2 \in \mathrm{A}(\mathrm{i}_2, \upsilon_2)$.

Επειδή ισχύει η συνθήκη ΑΠΛΟΤΗΤΑΣ, πρέπει να είναι και $\upsilon_1 = \upsilon_2$. Συνεπώς ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

<u>Θεώρημα 2</u>: Εάν ισχύουν οι συνθήκες ΕΝΩΣΗΣ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ, τότε ισχύει η συνθήκη ΑΠΛΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

Έστω ότι ισχύουν οι συνθήκες ΕΝΩΣΗΣ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ και για κάποια i_1, i_2, a_1, a_2 ισχύει:

$$(a_1, i_1) \leftrightarrow (a_2, i_2)$$

Δηλαδή:

(Ι) $(a_2, i_2) \rightarrow (a_1, i_1)$ και

(ΙΙ) $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$

Από (Ι) και ΦΑΣΜΑ ξέρουμε ότι υπάρχει ένα υ_1 τέτοιο ώστε $\alpha_1 \in \mathrm{A}(\mathrm{i}_1, \upsilon_1)$ και από (ΙΙ) και τη συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ ξέρουμε ότι υπάρχει ένα υ_2 τέτοιο ώστε $a_2 \in \mathrm{A}(\mathrm{i}_2, \upsilon_2)$.
Εάν συμβαίνει $\upsilon_1 = \upsilon_2$ τότε ισχύει η συνθήκη ΑΠΛΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.
Αλλιώς έστω ως στόχος ΑΠΛΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ το υ_1 (ή το υ_2).
Εάν έχουμε το υ_1 τότε $\alpha_2 \in \mathrm{A}(\mathrm{i}_2, \upsilon_2) = \mathrm{A}(\mathrm{i}_2, \upsilon_1)$ λόγω της συνθήκης ΕΝΩΣΗΣ, άρα ισχύει η συνθήκη ΑΠΛΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

<u>Θεώρημα 3:</u> Εάν ισχύουν οι συνθήκες ΕΝΩΣΗΣ, ΑΠΕΔ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ, τότε ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ

Έστω ότι ισχύουν οι συνθήκες ΕΝΩΣΗΣ, ΑΠΕΔ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ. Επιπλέον για κάποια a_1, a_2, s_1, s_2 ισχύει $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$.

Από την συνθήκη ΑΠΕΔ πρέπει να υπάρχει ένα υ_1 τέτοιο ώστε:
$i_1 \in \mathrm{I}(\upsilon_1)$ και $\alpha_1 \in \mathrm{A}(i_1, \upsilon_1)$

Από την συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ ξέρουμε ότι υπάρχει ένα υ_2 τέτοιο ώστε:
$i_2 \in \mathrm{I}(\upsilon_2)$ και $\alpha_2 \in \mathrm{A}(i_2, \upsilon_2)$

Εάν $\upsilon_1 = \upsilon_2$ τότε έχουμε ΙΣΧΥΡΗ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ. Αλλιώς έστω ως στόχος ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ το υ_1 (ή το υ_2).

Εάν έχουμε το υ_1 τότε $a_2 \in A(i_2, \upsilon_2) = A(i_2, \upsilon_1)$ εξαιτίας της συνθήκης ΕΝΩΣΗΣ, άρα ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

Οι συνθήκες ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ, ΙΠΕΔ και ΦΑΣΜΑΤΟΣ συνδέονται μεταξύ τους όπως φαίνεται στο παρακάτω λήμμα:

Λήμμα 1: Εάν ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ τότε ισχύουν οι συνθήκες ΦΑΣΜΑΤΟΣ και ΙΠΕΔ .

Προφανές από τον ορισμό της ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ .

Εάν ισχύει ΙΠΕΔ (μέσω φιλτραρίσματος διευθύνσεων) και ΦΑΣΜΑ (μέσω πινάκων προώθησης) θα ήταν καλό να ίσχυε αυτόματα ΙΣΧΥΡΗ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ. Δυστυχώς αυτό δεν είναι εφικτό σε όλες τις περιπτώσεις και για να διασφαλιστεί χρειάζεται μια επιπλέον συνθήκη που ονομάζεται συνθήκη ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ:

6.2.7. Συνθήκη ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ

Για όλες τις διεπαφές i_1 , i_2 και διευθύνσεις a_1, a_2:

Εάν $a_1 \in A(i_1, \upsilon_1)$, $a_2 \in A(i_1, \upsilon_2)$ και i_1 , $i_2 \in I(\upsilon_1) \cap I(\upsilon_2)$, τότε:

$$a_1 \in A(i_1, \upsilon_2) \text{ και } a_2 \in A(i_2, \upsilon_1)$$

Θεώρημα 4: Έστω ότι ισχύουν οι συνθήκες ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΕΝΩΣΗΣ, ΦΑΣΜΑΤΟΣ και ΙΠΕΔ, τότε ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

Έστω ότι ισχύουν οι συνθήκες ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΕΝΩΣΗΣ, ΦΑΣΜΑΤΟΣ και ΙΠΕΔ και δεν ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

Τότε υπάρχουν i_1, i_2 και a_1, a_2 τέτοια ώστε $(a_1, i_1) \rightarrow (a_2, i_2)$ και για όλα τα υ με i_1 , $i_2 \in I(\upsilon)$ έχουμε $\alpha_1 \notin A(i_1, \upsilon)$ ή $\alpha_2 \notin A(i_2, \upsilon)$

Από τη συνθήκη ΙΠΕΔ, υπάρχει κάποιο υ_1 τέτοιο ώστε:

$i_1, i_2 \in I(\upsilon_1)$ και $a_1 \in A(i_1, \upsilon_1)$

Από την άρνηση της συνθήκης ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ξέρουμε ότι:

$a_2 \notin A(i_2, \upsilon_1)$

Με τον ίδιο τρόπο από τη συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ υπάρχει κάποιο υ_2 τέτοιο ώστε:

$i_1, i_2 \in \mathrm{I}(\upsilon_2)$ και $a_2 \in \mathrm{A}(i_2, \upsilon_2)$.

Από την άρνηση της συνθήκης ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ξέρουμε ότι :

$a_1 \notin \mathrm{A}(i_1, \upsilon_2)$.

Τα δύο όμως παραπάνω αποτελέσματα παραβιάζουν τη συνθήκη ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ το οποίο όμως αντιβαίνει στην αρχική υπόθεση. Άρα ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

6.3. Προώθηση

Ορισμοί

Για κάθε διεπαφή i υπάρχει πίνακας προώθησης εισερχόμενης και εξερχόμενης κίνησης με τις αντίστοιχες καταχωρήσεις. Μια καταχώρηση του πίνακα προώθησης στην αφηρημένη της μορφή είναι δυάδα (p, i), όπου p είναι ένα πρόθεμα διευθύνσεων και i είναι η επόμενη (next – hop) αφηρημένη διεπαφή. Στην πραγματικότητα εάν η διεύθυνση προορισμού συμπίπτει με το πρόθεμα p, τότε θα προωθηθεί σε μία λογική διεπαφή σχετιζόμενη με το i (η πραγματική τελική διεπαφή καθορίζεται από τις αποφάσεις δρομολόγησης). Εάν η λογική διεπαφή δεν είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη στο ΑΠΑ που περιέχει την καταχώρηση (p, i), τότε η διεπαφή i μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει την κορυφή μιας σήραγγας δρομολόγησης (tunnel) που τερματίζει σε ένα εισερχόμενο πίνακα προώθησης για τη διεπαφή i.

Έστω τοποθεσία s ∈ S, διεπαφή i ∈ I(s), ΕΙΔ υ ∈ V και i ∈ I(υ). Τότε ο πίνακας εξερχόμενης (Outbound) προώθησης για το υ στη διεπαφή i ορίζεται το σύνολο F ως:

$$F_{\upsilon}^{O}(i) = \{(p, i') \mid i' \notin \mathrm{I(s)}, \mathrm{p} \in \mathrm{E}(i', \upsilon), i' \in I(\upsilon)\}$$

Στην περίπτωση που υ ∉ V(i), δηλαδή η διεπαφή i δεν σχετίζεται με το ΕΙΔ υ, τότε ο πίνακας εξερχόμενης προώθησης θα είναι:

$$F_{\upsilon}^{O}(i) = \emptyset$$

Ο πίνακας εισερχόμενης (Inbound) προώθησης για το υ στη διεπαφή i ορίζεται το σύνολο F ως:

$$F_{\upsilon}^{I}(i) = \{(p, i) \mid p \in E(i, \upsilon)\}$$

Στην περίπτωση που υ ∉ V(i), τότε:

$$F_{\upsilon}^{I}(i) = \emptyset$$

Η μαθηματική τυποποίηση θέτει εκτός θεώρησης τα θέματα της αντιστοίχησης λογικών διεπαφών (που υλοποιούν αφηρημένη διεπαφή i) σε ΑΠΑ και των ρυθμίσεων των σηράγγων δρομολόγησης μεταξύ των ΑΠΑ. Το σχήμα προώθησης αυτό δεν απαιτεί καμιά ετικέτα κίνησης ΕΙΔ και δεν απαιτεί τη γνώση της κατάστασης των ΕΙΔ σε δρομολογητές Παρόχου Π στο δίκτυο κορμού.

Εάν Y ⊆ V είναι ένα υποσύνολο από ΕΙΔ, ορίζεται ο πίνακας εξερχόμενης προώθησης ανά διεπαφή i :

$$F_{Y}^{O}(i) = \bigcup_{\upsilon \in Y} F_{\upsilon}^{O}(i)$$

Εάν η τοποθεσία έχει μοναδική κλάση διεπαφών, τότε αυτός ο πίνακας ονομάζεται πίνακας προώθησης για την τοποθεσία s . Στην αντίθετη ακραία περίπτωση εάν κάθε κλάση διεπαφών στην τοποθεσία s αντιπροσωπεύει ένα ξεχωριστό ΕΙΔ, τότε κάθε πίνακας ονομάζεται πίνακας προώθησης ανά ΕΙΔ για το υ.

Λήμμα 2: Έστω ότι ισχύει η συνθήκη ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ, δηλαδή δεν υπάρχουν συγκρουόμενες διευθύνσεις στους πίνακες προώθησης. Τότε για κάθε πρόθεμα p υπάρχει το πολύ μία δυάδα, τέτοια ώστε:

$$(p, i') \in F_{V(i)}(i)$$

Έστω ότι (p, i_1) ∈ $F_{V(i)}$ (i) και (p, i_2) ∈ $F_{V(i)}$ (i), όπου η διεπαφή i_2 δεν σχετίζεται με την τοποθεσία της διεπαφής i_1 . Υπάρχουν τότε δύο περιπτώσεις:

Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει ένα υ τέτοιο ώστε και οι δύο (p, i_1) και (p, i_2) ανήκουν στο F_{υ}(i). Αυτό όμως παραβιάζει την πρώτη σχέση της συνθήκης ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.

Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχουν υ_1 και υ_2τέτοια ώστε (p, i_1) ∈ F_{υ_1}(i) και (p, i_2) ∈ F_{υ_2}(i) που παραβιάζει τη δεύτερη σχέση της συνθήκης ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.

Σε πραγματικές συνθήκες τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν επιτρέπουν την καταχώρηση αντικρουόμενων διευθύνσεων στους πίνακες προώθησης. Αυτό δε σημαίνει όμως ότι δεν υπάρχουν περιπτώσεις καταστρατήγησης της συνθήκης διαχωρισμού, που οδηγούν στην επιλογή κάποιας καταχώρησης έναντι κάποιων

άλλων στους πίνακες προώθησης. Το αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση παραβίασης της συνθήκης είναι απρόσμενο έλλειψη συνδεσιμότητας σε κάποια ΕΙΔ.

Θεώρημα 6: Έστω ότι ισχύει η συνθήκη ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ και ότι η εξερχόμενη κίνηση από κάθε διεπαφή i προωθείται σύμφωνα με τον πίνακα προώθησης ανά διεπαφή i, $F_{\upsilon}^{O}(i)$. Τότε ισχύει η συνθήκη ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ.

Έστω κάποια υ, i_1, i_2, ∈ I(υ), α_1 ∈ A(i_1, υ) και α_2 ∈ A(i_2, υ). Τότε υπάρχουν προθέματα p_1 ∈ E(i_1, υ) και p_2 ∈ E(i_2, υ) τέτοια ώστε το p_1 είναι το καλύτερο ταίριασμα μεταξύ των προθεμάτων E(i_1, υ) για τη διεύθυνση α_1 και το το p_2 είναι το καλύτερο ταίριασμα μεταξύ των προθεμάτων E(i_2 , υ) για τη διεύθυνση α_2.

Από το λήμμα 2 είναι γνωστό ότι υπάρχει ένα ξεχωριστό ζεύγος (p_2, i_2) ∈ F_{υ} (i_1) και ένα ξεχωριστό ζεύγος (p_1, i_1) ∈ F_{υ} (i_2), οπότε (α_1, i_1) ↔ (α_2, i_2), άρα ισχύει η συνθήκη ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ.

Σε γλώσσα εφαρμογής το παραπάνω θεώρημα σημαίνει ότι εάν το δίκτυο κορμού παρέχει τη σωστή συνδεσιμότητα και κάποιος πελάτης δεν έχει σωστή συνδεσιμότητα ΕΙΔ, τότε κάπου υπάρχει παραβίαση των συνθηκών ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ή της ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ.

Θεώρημα 7: Έστω ότι η εξερχόμενη κίνηση από κάθε διεπαφή i προωθείται σύμφωνα με τον πίνακα προώθησης ανά διεπαφή i, $\boldsymbol{F_{V(i)}^{O}}$(i). Τότε ισχύει η συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ.
Έστω (a_1, i_1) → (a_2, i_2). Τότε από τον ορισμό του πίνακα προώθησης $\boldsymbol{F_{V(i_1)}^{O}}(i_1)$)πρέπει να υπάρχει ένα καλύτερο ταίριασμα (p, i_2) ∈ $F_{V(i_1)}^{O}(i_1)$ τέτοιο ώστε για κάποιο υ ∈ V(i_1) το πρόθεμα p ∈ E(i_2 , υ) και η διεπαφή i_2∈ I(υ). Αυτό σημαίνει ότι a_2 ∈ A(i_2, υ), οπότε ισχύει η συνθήκη ΦΑΣΜΑΤΟΣ.

6.4. Προώθηση πηγής / προορισμού

Ένας επεκτεινόμενος πίνακας προώθησης για την αφηρημένη διεπαφή i θα περιέχει καταχωρήσεις της μορφής (p, p', i') που θα προωθούν κίνηση σε μια αφηρημένη διεπαφή i' , αλλά μόνο στην περίπτωση που η πηγή της κίνησης ανήκει στο εύρος διευθύνσεων του προθέματος p', ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση η κίνηση θα φιλτράρεται. Ορίζεται το σύνολο

$$EF_i^O(i,p) = \{(p,p',i') \mid i' \notin \text{I(s)}, p', \in \text{E}(i',\upsilon), i' \in I(\upsilon)\}$$

Τότε ο επεκτεινόμενος πίνακας προώθησης μπορεί να οριστεί ως:

$$EF_{V(i)}^{O}(i) = \bigcup_{\upsilon \in V(i)} \bigcup_{p \in E(i,\upsilon)} EF_{\upsilon}\,(i,p)$$

Η παραπάνω σχέση είναι πολύ πιο περιοριστική από την προώθηση που βασίζεται στη διεύθυνση προορισμού και στην επιβεβαίωση της πηγαίας διεύθυνσης. Μια απλή προσέγγιση της υλοποίησης των επεκτεινόμενων πινάκων προώθησης πηγής-προορισμού θα απαιτούσε το εξωτερικό γινόμενο όλων των καταχωρήσεων, πράγμα που σημαίνει ότι η υλοποίηση τέτοιων πινάκων δεν είναι εύκολη υπόθεση.

Θεώρημα 8: Έστω ότι η εξερχόμενη κίνηση από κάθε διεπαφή i προωθείται με τη χρήση του επεκτεινόμενου πίνακα προώθησης για τη διεπαφή i, $\boldsymbol{EF^{O}_{V(i_1)}(i_1)}$. Τότε ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ.

Έστω ότι $(\boldsymbol{\alpha_1}, \boldsymbol{i_1}) \rightarrow (\boldsymbol{\alpha_2}, \boldsymbol{i_2})$. Τότε από τον ορισμό του επεκτεινόμενου πίνακα προώθησης $\boldsymbol{EF^{O}_{V(i_1)}(i_1)}$, πρέπει να υπάρχει το καλύτερο ταίριασμα $(\boldsymbol{p_1}, \boldsymbol{p_2}, \boldsymbol{i_2}) \in \boldsymbol{EF^{O}_{V(i_1)}(i_1)}$,τέτοιο ώστε για κάποιο υ ∈ V($\boldsymbol{i_1}$), p_1 ∈ Ε($\boldsymbol{i_1}$, υ), $\boldsymbol{p_2}$ ∈ Ε($\boldsymbol{i_2}$, υ) και $\boldsymbol{i_2}$ ∈ Ι(υ). Αυτό σημαίνει ότι $\boldsymbol{\alpha_1}$∈ Α($\boldsymbol{i_1}$, υ) και $\boldsymbol{\alpha_2}$ ∈ Α($\boldsymbol{i_2}$, υ), συνεπώς ισχύει η συνθήκη ΙΣΧΥΡΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ**.**

Συμπεράσματα 6ου κεφαλαίου

Η αυστηρή μαθηματική τυποποίηση μιας απολύτου εφαρμόσιμης αρχιτεκτονικής δημιουργίας ΕΙΔ, όπως η RFC 2547 αποτελεί μεγάλη και δύσκολη πρόκληση. Είναι φανερό ότι τα προβλήματα συνδεσιμότητας, απομονώσεως και επικαλύψεως διευθύνσεων των ΕΙΔ, μπορούν να αντιμετωπισθούν με την μαθηματική θεώρηση. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η σωστή δημιουργία και ανάπτυξη των ΕΙΔ κατά RFC 2547.

7. Νέος μηχανισμός εξυπηρέτησης ΣΕΥ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά τα ερωτήματα που προκύπτουν από την επέκταση της εφαρμογής Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας για Εικονικά Ιδιωτικά Δίκτυα, όταν αυτά εκτείνονται σε πολλούς Παρόχους. Πραγματοποιείται στην συνέχεια μία επισκόπηση των σχετικών ερευνητικών εργασιών και τέλος παρουσιάζεται ένας νέος αλγόριθμος για την παροχή ΣΕΥ σε δίκτυο ΕΙΔ που εκτείνεται σε πολλούς Παρόχους. Το κεφάλαιο κλείνει με προτεινόμενες μελλοντικές εργασίες.

7.1. Ερωτήματα

Η παροχή ΣΕΥ βασίζεται όπως έχει ήδη περιγραφεί σε καθαρά ποσοτικά στοιχεία των παραγόντων ποιότητας υπηρεσίας και αποτελεί απ' ευθείας συνάρτηση της ποιότητας υπηρεσίας σύμφωνα με ότι έχει ειπωθεί στο $1^{ο}$ κεφάλαιο. Εάν όμως αυτό εφαρμόζεται για ένα Πάροχο και ένα Πελάτη, τι μπορεί να ειπωθεί στην περίπτωση Εικονικού Ιδιωτικού Δικτύου (ΕΙΔ) που εκτείνεται σε περισσοτέρους του ενός Παρόχους. Αρκεί άραγε ο κάθε Πάροχος να είναι σε θέση να δώσει ΣΕΥ που να ισχύει εντός των ορίων του ή χρειάζεται ένα γενικότερο, πλαίσιο παροχής ΣΕΥ που να καλύπτει σφαιρικά το ΕΙΔ του Πελάτη; Εάν ο κάθε Πάροχος δίνει μια γενικευμένη ΣΕΥ εντός του δικτύου του είναι σίγουρο και εξασφαλισμένο ότι η επικοινωνία δύο οποιοδήποτε τοποθεσιών του Πελάτη είτε βρίσκονται στον ίδιο Πάροχο, είτε σε διαφορετικούς Παρόχους είναι εντός των ορίων του επιθυμητού επιπέδου υπηρεσίας;

Στην περίπτωση του ενός Παρόχου υπάρχει το ακόλουθο παράδειγμα που δείχνει τον βαθμό δυσκολίας της απάντησης στα παραπάνω ερωτήματα:

> Το κέντρο δεδομένων του Πελάτη μπορεί να λαμβάνει φτωχής ποιότητας υπηρεσία, ενώ οι ποσοτικοί δείκτες της ΣΕΥ να τηρούνται καθ όλο το δίκτυο κορμού του Παρόχου. Η καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) μεταξύ δύο τοποθεσιών του ΕΙΔ, μπορεί εύκολα να ξεπεράσει την μέση καθυστέρηση (latency) του δικτύου και συνεπώς ο Πελάτης να μην απολαμβάνει το συμφωνημένο επίπεδο υπηρεσιών.

Η χρήση ολοένα και περισσοτέρων τεχνολογιών στο φυσικό επίπεδο και ιδιαίτερα η μετατόπιση από τεχνολογίες ATM/Frame Relay σε τεχνολογίες Ethernet, οι διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης στα δίκτυα των Παρόχων καθιστούν ακόμη πιο δύσκολη την απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα.

Στην RFC 2547 αντιμετωπίζονται οι περιορισμοί συνδεσιμότητας και απομόνωσης των τοποθεσιών του Πελάτη σε επίπεδο διευθυνσιοδότησης και δρομολογήσεων. Στην εργασία των Bush & Griffin παρουσιάζονται τα θεωρήματα που προκύπτουν από τις παραδοχές της RFC 2547 σε σχέση με τα θέματα διευθυνσιοδότησης και δρομολογήσεων των ΕΙΔ.
Η απομόνωση των διαφορετικών ΕΙΔ που επιτυγχάνεται με την απαγόρευση ελεύθερης προσπέλασης μεταξύ τους, έχει έναν ιδιαίτερα ευεργετικό ρόλο στην εξοικονόμηση πόρων και εύρους ζώνης από τον Πάροχο. Αυτό το δευτερεύον αποτέλεσμα των περιορισμών είναι κρίσιμο για την υλοποίηση των ΣΕΥ γιατί αφήνει

κατά περίπτωση εύρος ζώνης ελεύθερο που μπορεί να δοθεί σε Πελάτες και εφαρμογές που το έχουν ανάγκη.

Η απομόνωση σε επίπεδο δρομολόγησης της κίνησης κάθε τοποθεσίας στον αντίστοιχο δρομολογητή του Παρόχου (ΑΠΑ), ελευθερώνει το κεντρικό δίκτυο κορμού από ανεπιθύμητη κίνηση. Για παράδειγμα η κίνηση από Πελάτη σε Πελάτη δηλαδή από ΕΙΔ σε ΕΙΔ, επιτρέπεται μόνο υπό σαφείς προϋποθέσεις (στην περίπτωση που μεταξύ των Πελατών συστήνεται extranet) ή μπορεί να αποκλειστεί εντελώς.
Για κάθε ΕΙΔ υπάρχει μια Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσιών μεταξύ του Παρόχου Υπηρεσιών και του Πελάτη στον οποίο ανήκει το ΕΙΔ. Σύμφωνα με τον ορισμό της ΣΕΥ πρώτο κεφάλαιο, η ΣΕΥ είναι συνάρτηση της ποιότητας υπηρεσίας που ζητεί ο Πελάτης από τον Πάροχο και εκφράζεται μαθηματικά από τα παρακάτω:

SLA= f : Πάροχος $\rightarrow$ Πελάτης = F(QoS) $\Rightarrow \forall$ είδος κίνησης του Πελάτη $\exists$ τουλάχιστον μια τριάδα (latency, jitter, packet_loss) με χαρακτηριστικά:

Latency = l $\leq$ t, όπου l ο χρόνος καθυστέρησης, συνήθως σε msec.
Jitter = t1 $\leq$ j $\leq$ t2 , όπου j η διακύμανση της καθυστέρησης στο δίκτυο του Παρόχου
Packet loss = pl $\leq$ k %, όπου pl το ποσοστό χαμένων πακέτων από την είσοδο στο δίκτυο του Παρόχου μέχρι την έξοδο από αυτό.

Η τριάδα αυτή εξασφαλίζει ότι κάθε είδος κίνησης του Πελάτη διατρέχει το δίκτυο του Παρόχου με ομαλό τρόπο και φτάνει στον προορισμό της ακέραια στον επιθυμητό χρόνο. Τονίζεται εδώ ότι γενικά οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας συνιστούν μια ομάδα χαρακτηριστικών και δεν περιορίζονται στην παραπάνω τριάδα που έχει επιλεγεί προς χάριν παραδείγματος. Άλλωστε με βάση αυτές τις τρεις παραμέτρους υπηρεσίας έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα όρια τιμών από την ITU (G.114) που κάνουν εφικτή την μετάδοση φωνής μέσα από δίκτυα IP. Άλλες παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ΣΕΥ είναι η αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, ρυθμαπόδοση, περίσσεια πόρων κτλ.

Έστω ότι η διασύνδεση των τοποθεσιών του Πελάτη δεν καλύπτεται από το δίκτυο μοναδικού Παρόχου, αλλά μπορεί να γίνει μόνο μέσω i αριθμού Παρόχων Υπηρεσιών (Π_iΥ, i$\geq$2, i $\in$ N, N σύνολο θετικών ακεραίων). Στο δίκτυο του κάθε Π_iΥ υπάρχει η δυνατότητα παροχής συγκεκριμένης SLA_i ως συνάρτηση συγκεκριμένης ποιότητας υπηρεσίας που μπορεί να προσφέρει ο Π_iΥ. Η ποιότητα υπηρεσίας όπως έχει ήδη γραφεί είναι μηχανισμός κατηγοριοποίησης της κίνησης on-line.

Για να δημιουργηθεί το ΕΙΔ του Πελάτη πρέπει μεταξύ των Παρόχων όπου είναι συνδεδεμένες οι τοποθεσίες του Πελάτη να δημιουργηθεί ένα κοινό δίκτυο κορμού (ΚΔΚ) το οποίο θα συνδέσει τους Παρόχους μεταξύ τους.
Οι περιπτώσεις για το ΚΔΚ είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Υπάρχει ήδη μεταξύ των Παρόχων
- ✓ Μπορεί να δημιουργηθεί με απευθείας διασύνδεση των Παρόχων
- ✓ Μπορεί να δημιουργηθεί όχι μόνο με απ' ευθείας διασύνδεση των i Παρόχων όπου υπάρχουν τοποθεσίες του Πελάτη, αλλά και μέσω άλλων k ενδιάμεσων Παρόχων (transit ΠΥ) οι οποίοι δεν διαθέτουν καμία τοποθεσία Πελάτη.

Για την αντιμετώπιση του ΚΔΚ θα χρειαστεί επέκταση των εννοιών που παρουσιάζονται στην RFC 2547bis,αλλά και στην θεωρία των Bush & Griffin.

7.2. Επέκταση της RFC 2547bis

Η κατανομή των τοποθεσιών του Πελάτη στην περίπτωση της επέκτασης του ΕΙΔ σε πολλαπλούς Παρόχους, ορίζει Παρόχους Εισόδου/Εξόδου, αλλά και ενδιάμεσους (transit) Παρόχους που δεν συνδέονται απ' ευθείας με τον Πελάτη. Ο κάθε Πάροχος του κοινού δικτύου κορμού (ΚΔΚ) που σχηματίζεται, έχει συμμετοχή και ρόλο στην δημιουργία του ΕΙΔ, όπως ακριβώς τα δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής BGP/MPLS ΕΙΔ.
Η αναλογία με τα δομικά στοιχεία Άκρο Πελάτη (CE), Άκρο Παρόχου (PE) και δρομολογητής Παρόχου (P) της RFC 2547bis είναι χαρακτηριστική:

> Το Άκρο Πελάτη (ΑΠΑ) παραμένει το ίδιο. Το Άκρο Παρόχου αντικαθίσταται πλέον από τον Πάροχο Εισόδου ή τον Πάροχο Εξόδου. Οι κεντρικοί δρομολογητές Παρόχου της RFC 2547bis αντικαθίστανται από τους ενδιάμεσους Παρόχους (transit).

Σε υψηλό επίπεδο πλέον (μεταξύ Πελάτη και Παρόχων) υπάρχει πάλι το Άκρο Πελάτη το οποίο συνδέεται είτε σε Πάροχο Εισόδου είτε σε Πάροχο Εξόδου, αντί για Άκρο μοναδικού Παρόχου. Στην μεταφορά της κίνησης συμμετέχουν πλέον οι Πάροχοι που δημιουργούν το ΚΔΚ, από τους οποίους όμως κάποιοι μπορεί να μην συνδέονται απ' ευθείας με τον Πελάτη όπως συμβαίνει με τους κεντρικούς δρομολογητές στην RFC 2475bis, οι οποίοι αγνοούν την αρχιτεκτονική του δικτύου του Πελάτη.

Επακόλουθο της αναλογίας και της αρχιτεκτονικής που πηγάζει από την RFC 2547bis, είναι ότι οι ενδιάμεσοι Πάροχοι δεν χρειάζεται να έχουν γνώση των δρομολογήσεων του Πελάτη. Η παραπάνω αρχιτεκτονική θα μπορούσε να επεκταθεί και στην περίπτωση των Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DiffServ), όπως έχει προταθεί από διάφορες ερευνητικές εργασίες που παρουσιάζονται παρακάτω στο τρέχον κεφάλαιο. Σύμφωνα με τις προτάσεις αυτές η συμπεριφορά ανά άλμα (Per Hop Behavior, PHB) αντικαθίσταται στην περίπτωση των πολλαπλών Παρόχων με την συμπεριφορά ανά τομέα (Per Domain Behavior, PDB). Με αυτόν τον τρόπο κάθε πακέτο που διατρέχει ένα σύνολο Παρόχων, αντιμετωπίζεται με συγκεκριμένο τρόπο εντός του δικτύου του κάθε Παρόχου.

Τα ερωτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της παραπάνω αρχιτεκτονικής σχετικά με την Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας του Πελάτη είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ποια θα πρέπει να είναι η γενικευμένη ΣΕΥ εφαρμοσμένη επί του ΚΔΚ, που να εξασφαλίζει ότι οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ τοποθεσιών του Πελάτη θα γίνει με τους όρους ποιότητας υπηρεσίας που επιθυμεί ο Πελάτης;
- ✓ Πως σχετίζεται η γενικευμένη συνολική ΣΕΥ με τις επιμέρους ΣΕΥ (SLA_i) που μπορεί να προσφέρει ο κάθε Πάροχος Υπηρεσιών, Π_iΥ;
- ✓ Τι πρέπει να ισχύει για τις ΣΕΥ των k Παρόχων οι οποίοι δεν διαθέτουν καμία τοποθεσία Πελάτη, αλλά συμβαίνει να συνδέουν Παρόχους Εισόδου/Εξόδου;

- ✓ Ποιοι είναι οι μηχανισμοί που μπορούν να στηρίξουν αποτελεσματικά μια γενικευμένη ΣΕΥ;

Για να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα έχουν γίνει αρκετές προσεγγίσεις σε δημοσιεύσεις ή ερευνητικά προγράμματα χωρίς όμως μέχρι τώρα να υπάρχει μια γενικά αποδεκτή απάντηση που να λύνει τα προβλήματα.

7.3. Ποιότητα Υπηρεσίας πέραν του πεδίου διαχείρισης ενός Παρόχου

Σύμφωνα με τους P. Pongpaidbool, H.S Kim [Computer Networks 46/2004] *η προσφορά ΣΕΥ πέραν του δικτύου κορμού συγκεκριμένου Παρόχου εμποδίζεται από σύνολο τεχνικών και οικονομικών παραγόντων:*
Η στήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας εξαρτάται από την φυσική τοπολογία του κάθε δικτύου και το σύνολο των διαθέσιμων πόρων (δρομολογητών, συνδέσμων). Η πληροφορία αυτή αντιμετωπίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις ως εμπιστευτική και δεν ανακοινώνεται μεταξύ των Παρόχων. Σε τεχνικό επίπεδο το πρωτόκολλο BGP κρύβει την εσωτερική τοπολογία και ανακοινώνει στον επόμενο Πάροχο, μόνο δυνατότητες πρόσβασης σε συγκεκριμένες διευθύνσεις δικτύου και την δυναμική συμπεριφορά των διευθύνσεων αυτών σε σχέση με άλλες γειτονικές τοποθεσίες.
Οι κλάσεις παροχής υπηρεσίας μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των Παρόχων γιατί μπορεί απλά να στηρίζονται σε διαφορετικές παραμέτρους (π.χ διαθεσιμότητα και αξιοπιστία) πέραν της γνωστής τριάδας (καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης, ποσοστό χαμένων πακέτων). Σε αυτήν την περίπτωση χρειάζεται μηχανισμός αντιστοίχησης των κλάσεων υπηρεσίας των Παρόχων.
Δεν υπάρχει ενιαίο οικονομικό μοντέλο για την Παροχή Υπηρεσιών μεταξύ Πελάτη και Παρόχου, αλλά και μεταξύ Παρόχων. Για παράδειγμα μεταξύ Παρόχων μπορεί να εφαρμόζονται ομότιμα μοντέλα (peer to peer) όπου η ανταλλαγή κίνησης μεταξύ Παρόχων δεν χρεώνεται, μοντέλα πληρωμής με βάση τον όγκο δεδομένων ή μοντέλα πληρωμής με βάση επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας.

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος TEQUILA (http://www.ist-tequila.org) προτάθηκε μια αρχιτεκτονική διαχείρισης της ποιότητας υπηρεσίας με αντίστοιχη παροχή ΣΕΥ βασισμένη σε τομείς διαφοροποίησης υπηρεσιών (DiffServ Domains). Όμως το πρόβλημα της διαχείρισης ποιότητας υπηρεσίας από άκρο σε άκρο μεταξύ πολλαπλών τομέων διαφοροποίησης υπηρεσιών δεν λύνεται.

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος AQUILA (http://www-st.inf.tu-dresden.de/aquila/) για την αντιμετώπιση της γνωστοποίησης και διανομής των δικτυακών πόρων μεταξύ διαφορετικών δικτύων, προτάθηκε η δημιουργία ενός νέου επιπέδου πάνω από το επίπεδο των Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών. Το επίπεδο αυτό ονομάσθηκε Επίπεδο Ελέγχου Πόρων (Resource Control Layer) και διασφαλίζει ότι το υπάρχον δίκτυο IP των κατώτερων επιπέδων μπορεί να εγγυηθεί ποιότητας υπηρεσίας σε συγκεκριμένες κλάσεις κίνησης. Προϋπόθεση όμως εδώ είναι η διάθεση των Παρόχων να ανακοινώσουν και να μοιραστούν τους πόρους τους το οποίο είναι δύσκολο για λόγους ανταγωνισμού.

Στα πλαίσια του προγράμματος MESCAL (http://www.mescal.org) επιχειρείται ο χωρισμός των Παρόχων σε κατηγορίες ανάλογα με το αντικείμενο των εργασιών. Με αυτό τον τρόπο οι Πάροχοι διαιρούνται σε Παρόχους Δικτύου (Network Providers),

Παρόχους Υπηρεσιών (Service Providers) και Παρόχους Περιεχομένου (Content Providers). Παρά τον παραπάνω διαχωρισμό το πρόγραμμα τελικά επικεντρώνεται περισσότερο στα οικονομικά στοιχεία των σχέσεων πελατών με Παρόχους Δικτύου IP (IP Network Providers) και μεταξύ Παρόχων Δικτύων IP για την παροχή αποκλειστικά υπηρεσιών IP. Η λύση που προτείνεται για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ των Παρόχων Δικτύου στηρίζεται στην ανταλλαγή πληροφοριών ποιότητας υπηρεσίας ανά άλμα. Το μοντέλο είναι cascaded με την έννοια ότι επιτρέπεται η ανταλλαγή πληροφοριών ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ μόνο γειτονικών Παρόχων οι οποίοι όμως είναι ήδη ομότιμοι ως προς το πρωτόκολλο BGP (δηλαδή ήδη ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες δρομολόγησης σύμφωνα με το πρωτόκολλο BGP). Στο μοντέλο αυτό πάλι δεν υπάρχουν καθορισμένες ΣΕΥ από άκρο σε άκρο και αυτό γίνεται σύμφωνα με τους συμμετέχοντες στο πρόγραμμα για λόγους ευελιξίας και αντιστοίχησης του μοντέλου με το πραγματικό Internet.

Στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα CADENUS προτάθηκε η δημιουργία μια αρχιτεκτονικής που λαμβάνει υπ' όψιν τόσο την σχέση Πελάτη με τον Πάροχο Υπηρεσιών, αλλά και την σχέση του Παρόχου Υπηρεσιών με τον Πάροχο ή τους Παρόχους Δικτύου. Η λύση που προτείνεται εδώ φαίνεται σχετικά πολύπλοκη ιδιαίτερα στο επίπεδο της παράλληλης διαπραγμάτευσης για την παροχή υπηρεσίας τόσο μεταξύ Πελάτη και ΠΥ, όσο και μεταξύ ΠΥ και Παρόχου Δικτύου.

Στην δημοσίευση [*A QoS Routing Architecture for Multi-Domain Networks, Haci A. Mantar, IEEE International Symposium on Computer Networks – ISCN 2006]* προτείνεται η ενσωμάτωση λειτουργιών ποιότητας υπηρεσίας από άκρο σε άκρο στην δρομολόγηση. Η εργασία στηρίζεται στο μοντέλο Bandwidth Broker [BB Nichols, Jacobson, Zhang, RFC2638, 1999] σύμφωνα με το οποίο υπάρχει κεντρική διαχείριση των πόρων σε ένα δίκτυο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών. Χρησιμοποιείται πλέον η διατύπωση «συμπεριφορά ανά τομέα – Per Domain Behavior, PDB [RFC 3086]» αντί της γνωστής «συμπεριφοράς ανά άλμα, Per Hop Behavior» της αρχιτεκτονικής Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών και επιχειρείται η λύση των προβλημάτων κλιμάκωσης του μοντέλου BB για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας από άκρο σε άκρο.

Στην δημοσίευση *[Modelling End-to-end QoS for Transaction-Based Services in Multidomain Environments-Mei,Meeuwissen, IEEE International Conference on Web Services 2006]* εισάγεται η έννοια του SLA negotiation space (χώρος διαπραγματεύσεων Συμφωνιών Επιπέδου υπηρεσίας) για να περιγράψει όλες τις αναγκαίες τροποποιήσεις που χρειάζονται οι επιμέρους ΣΕΥ των Παρόχων, ώστε να δημιουργηθεί μια γενικευμένη από άκρο σε άκρο ΣΕΥ.

Διεθνή forum και οργανισμοί με πεδία ενδιαφέροντος τα δίκτυα επόμενης γενιάς (Next Generation Network) έχουν προτείνει διάφορες αρχιτεκτονικές διαχείρισης της ποιότητας υπηρεσίας και των συμβολαίων επιπέδου υπηρεσίας χωρίς να έχουν όμως καταλήξει σε μια γενικά αποδεκτή αρχιτεκτονική. Πρόσφατα (2007) δύο πασίγνωστες ομάδες η TMF (Telecommunication Management Forum) και η DMTF (Distributed Management Task Force) από τις οποίες έχουν βγει αρκετά βιομηχανικά πρότυπα και έχουν στηριχτεί πολλές ερευνητικές εργασίες προσπάθησαν να παρουσιάσουν μια πλατφόρμα διαχείρισης των Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας. Η κοινή εργασία βρίσκεται σε εξέλιξη (2009).

Στην δημοσίευση *[What Are The Chances An Availability SLA Will Be Violated, Andrew P. Snow – Gary R, Weckman, IEEE International Conference on Networking 2007]* παρουσιάζεται με αποκαλυπτικό τρόπο πως ο «μέσος όρος» των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας, μπορεί να συμβάλλει σε εντελώς λαθεμένες εκτιμήσεις από τον Πελάτη και να οδηγήσει ευθέως σε παραβίαση της ΣΕΥ.

Σύμφωνα με την δημοσίευση *[Guaranteed SLA across Multiple ISP Networks, Panita Pongpaidbool, Hyong S. Kim, Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2003] οι παράγοντες ποιότητας υπηρεσίας έχουν προσθετική ή πολλαπλασιαστική συμμετοχή όταν η κίνηση διατρέχει πολλαπλούς Παρόχους. Οι παράγοντες καθυστέρηση και διακύμανση της καθυστέρησης έχουν προσθετική συμμετοχή, ενώ παράγοντες όπως η αξιοπιστία, διαθεσιμότητα και το ποσοστό χαμένων πακέτων έχουν πολλαπλασιαστική συμμετοχή.*
Συνεπώς εάν έχουμε πολλαπλούς Παρόχους Υπηρεσιών τότε για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα υπηρεσίας ισχύουν τα ακόλουθα:

Έστω $L = \{x \mid x = \text{latency}_{\kappa}$ στον $\Pi_{\kappa}Y\}$. Τότε για να είναι εφικτή μια ΣΕΥ για τον πελάτη π μεταξύ των Παρόχων n θα πρέπει $L_{\pi} \geq \sum_1^n L_n$, δηλαδή η μέγιστη καθυστέρηση που μπορεί να αντέξει ο πελάτης να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το άθροισμα των εγγυημένων καθυστερήσεων εντός του δικτύων των Παρόχων.

Έστω $J = \{x \mid x = \text{jitter}_{\kappa}$ στον $\Pi_{\kappa}Y\}$. Τότε για να είναι εφικτή μια ΣΕΥ για τον πελάτη π μεταξύ των Παρόχων n θα πρέπει $J_{\pi} \geq \sum_1^n J_n$, δηλαδή η μέγιστη διακύμανση της καθυστέρησης που μπορεί να αντέξει ο πελάτης να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το άθροισμα των εγγυημένων διακυμάνσεων της καθυστέρησης εντός του δικτύων των Παρόχων.

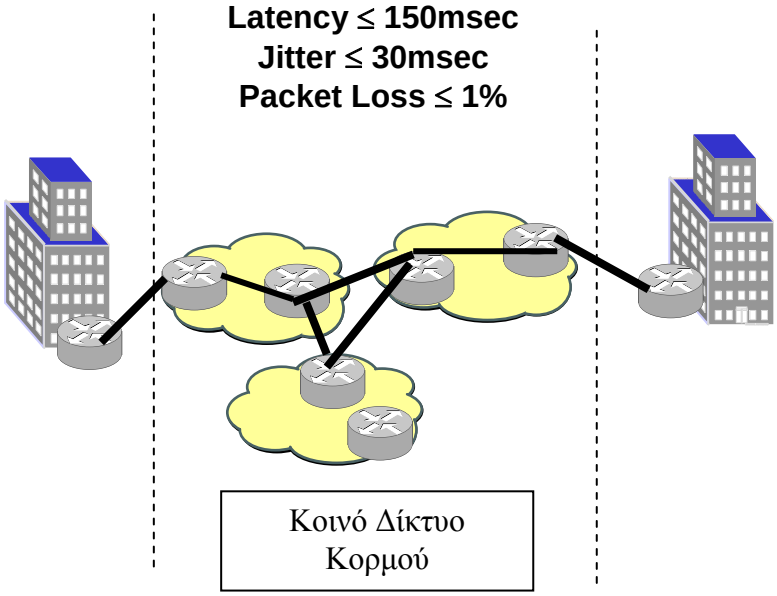
Έστω $PL = \{x \mid x = \text{packetloss}_{\kappa}$ στον $\Pi\Upsilon\Delta_{\kappa}\}$. Τότε για να είναι εφικτή μια ΣΕΥ για τον πελάτη π μεταξύ των Παρόχων n θα πρέπει $PL_{\pi} \geq \prod_1^n PL_n$. δηλαδή το μέγιστο χάσιμο πακέτων που μπορεί να αντέξει ο πελάτης να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το πολλαπλάσιο των ποσοστών χαμένων πακάτων εντός του δικτύων των Παρόχων.

Για να είναι εύκολη μια σύγκριση όλων των παραπάνω στην περίπτωση που ο πελάτης επιθυμεί τη μεταβίβαση φωνής και video πάνω από το ΚΔΚ θα πρέπει:

- Το πολύ 150 msec καθυστέρηση προς τη μία κατεύθυνση (καθυστέρηση για τη φωνή από το στόμα στο αυτί, ITU G.114).
- Το πολύ 30 msec διακύμανση καθυστέρησης.
- Το πολύ 1% χάσιμο πακέτων.

Συνεπώς:

$\sum_1^n L_n \leq 150$ msec
$\sum_1^n J_n \leq 30$ msec
$\prod_1^n PL_n \leq 1\%$



Στην πραγματικότητα η καθυστέρηση, η διακύμανση της καθυστέρησης και το ποσοστό χαμένων πακέτων είναι μόνο οι πιο διαδομένες παράμετροι που χρησιμοποιούνται από Παρόχους Υπηρεσιών για τη δημιουργία ΣΕΥ. Αυτό γίνεται γιατί ακριβώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν έναν πεπερασμένο και διαδεδομένο αριθμό κλάσεων υπηρεσίας που αντιστοιχούν σε διαφορετική κίνηση μέσα σε ένα δίκτυο.
Στην μοντελοποίηση της κίνησης του Πελάτη πάνω στο δίκτυο του Παρόχου, επιβάλλεται ο χωρισμός της κίνησης του Πελάτη με τέτοιο τρόπο ώστε συγκεκριμένη κίνηση να αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένη κλάση υπηρεσίας μέσα στο δίκτυο του Παρόχου. Από την ανάλυση προκύπτουν συνήθως μοντέλα όπου ένας ή περισσότεροι τύποι κίνησης του Πελάτη αντιστοιχίζονται σε μοναδική κλάση υπηρεσίας του Παρόχου. Οι λόγοι που γίνεται αυτό είναι:

- Πάροχος με το ίδιο δίκτυο κορμού εξυπηρετεί τις ανάγκες διαφορετικών πελατών και το προσαρμόζει όσο αυτό είναι εντός των ορίων των ΣΕΥ που μπορεί να υποστηρίξει.
- Το δίκτυο του Παρόχου έχει συγκεκριμένο εύρος ζώνης το οποίο πρέπει να ανταποκριθεί στην διαστασιολόγηση των αναγκών του Πελάτη, αλλά και να αποδώσει οικονομικό όφελος στον Πάροχο. Σύμφωνα με την δημοσίευση *[Guaranteed SLA across Multiple ISP Networks, Panita Pongpaidbool, Hyong S. Kim, Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2003] το οικονομικό όφελος του Παρόχου j οριζόμενο ως Pj είναι:*

$$P_j = \left(\sum_{i=1}^{k} A_{i,j} * d_{i,j}\right) - B_j * w_j \text{ όπου}$$

$A_{i,j}$ *είναι το κέρδος ανά σύνδεση σε επίπεδο υπηρεσίας i,*
$d_{i,j}$ *είναι ο αριθμός των επιτρεπόμενων συνδέσεων σε επίπεδο υπηρεσίας i,*
B_j *είναι το κόστος ανά Mbps παρεχομένου εύρους ζώνης και*
w_j *είναι το ποσό του εύρους ζώνης που παραχωρείται*

- Η αντιστοίχηση των τύπων κίνησης του Πελάτη στις κλάσεις υπηρεσιών του Παρόχου εξασφαλίζει ότι οι τύποι κίνησης του Πελάτη θα απολαμβάνουν συγκεκριμένα επίπεδα υπηρεσίας τα οποία ο Πάροχος είναι σε θέση να εγγυηθεί.
- Οι κλάσεις υπηρεσίας ουσιαστικά υπερπωλούνται στους τύπους κίνησης με ανάλογο τρόπο και αποτελεσματικότητα, όπως υπερπωλείται το εύρος ζώνης του κάθε Παρόχου προς τους Πελάτες του.
- Ο Πάροχος δεν είναι αναγκασμένος να διατηρεί μια κλάση ανά τύπο κίνησης το οποίο με τα σημερινά δεδομένα είναι αντιοικονομικό και μη αποτελεσματικό.

7.4. Αντιστοίχηση τύπων κίνησης με κλάσεις υπηρεσίας

Ο πελάτης διαθέτει έναν αριθμό τύπων κίνησης οι οποίοι πρέπει να μεταβιβαστούν μέσω του Κοινού Δικτύου Κορμού των Παρόχων, το οποίο όμως μπορεί να διαθέτει ανάλογο αριθμό κλάσεων υπηρεσίας στην ιδανική περίπτωση ή λιγότερες κλάσεις στη συνηθισμένη περίπτωση. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι ο Πάροχος με το ίδιο δίκτυο κορμού εξυπηρετεί τις ανάγκες διαφορετικών πελατών και το προσαρμόζει όσο αυτό είναι εντός των ορίων των Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας που μπορεί να υποστηρίξει. Στην περίπτωση των πολλαπλών Παρόχων, υπάρχει μια ακολουθία σχέσεων «Πελάτη – Παρόχου», όπου δυνητικά κάθε Πάροχος γίνεται «Πελάτης» του επόμενου Παρόχου, όπως σχηματίζεται το ΚΔΚ. Οι Συμφωνίες Επιπέδου Υπηρεσιών μέσα στο ΚΔΚ μεταβάλλονται από ΣΕΥ μεταξύ Πελάτη και Παρόχου σε ΣΕΥ μεταξύ Παρόχων (ιδιαίτερη εργασία έχει γίνει πάνω σε αυτήν την διάκριση στο ερευνητικό πρόγραμμα IST/MESCAL, http://www.mescal.org)

Άρα σε μαθηματική γλώσσα τα παραπάνω μπορούν να γραφούν:

Σύνολο κλάσεων υπηρεσίας ΠΥ:

$$C_{ΠΥ} = \{\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_\iota\}$$

Σύνολο τύπων κίνησης του Πελάτη:

$$C_{ΠΕ} = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$$

κ, n, i, m ∈ N, όπου N το σύνολο των θετικών ακεραίων μεγαλύτερων του μηδενός.

Εάν ο Πελάτης διαθέτει m διαφορετικούς τύπους κίνησης, τότε αυτοί μπορούν να κωδικοποιηθούν σύμφωνα με την αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ) με ακριβώς m διαφορετικούς κωδικούς DSCP μέσα στο δίκτυο του Πελάτη. Το δίκτυο του Πελάτη ανά ξεχωριστή τοποθεσία (όπως ορίζεται στην RFC 2574bis) μπορεί να υποστηρίξει όλους αυτούς τους τύπους δεδομένων.
Εάν ο Πάροχος διαθέτει i ≥ 3 κλάσεις υπηρεσίας τότε αυτές μπορούν να κωδικοποιηθούν σύμφωνα με την αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ, παρ. 1.4) με το πολύ i διαφορετικούς κωδικούς DSCP. Οι κλάσεις υπηρεσίας του Παρόχου ή των Παρόχων θα πρέπει να υποστηρίζουν τουλάχιστον προτεραιότητα, εγγυημένο εύρος και κίνηση εν δυνάμει εφικτή ώστε να θεωρείται ότι

υποστηρίζεται η αρχιτεκτονική DiffServ (σύμφωνα με τον ορισμό των διαφοροποιημένων υπηρεσιών, παρ. 1.4).
Σε πραγματικές συνθήκες όμως οι κωδικοί DSCP που θα μπορούσαν να λάβουν οι τύποι κίνησης ομαδοποιούνται σε κλάσεις υπηρεσίας οπότε ο αριθμός των κωδικών DSCP είναι αρκετά μεγαλύτερος του αριθμού των κλάσεων υπηρεσίας.

Ο Πάροχος προκειμένου να αποδώσει συγκεκριμένα επίπεδα υπηρεσίας πρέπει να προχωρήσει σε αντιστοίχηση των τύπων κίνησης του Πελάτη $C_{ΠΕ}$ σε κλάσεις υπηρεσίας $C_{ΠΥ}$ μέσω συνάρτησης $f(n_m) = \kappa_i$, η οποία γίνεται μέσω των συμπεριφορών ανά κόμβο και κωδικοποιείται με τα DSCP.

Η συνάρτηση $f(n_m) = \kappa_i$ σημαίνει ότι για να δοθεί ΣΕΥ υπάρχει ικανός αριθμός διαφορετικών κωδικών DSCP, ομαδοποιημένων σε κατάλληλες κλάσεις υπηρεσίας, ώστε κάθε τύπος κίνησης του Πελάτη, εισερχόμενος στο δίκτυο του Παρόχου να λαμβάνει συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσίας σύμφωνα με τις ανάγκες του σε προτεραιότητα, εύρος ζώνης, συνύπαρξης με άλλους τύπους δεδομένων κτλ.

Στην ιδανική περίπτωση θα ισχύει ότι οι τύποι κίνησης του πελάτη αντιστοιχίζονται έκαστος σε μία ξεχωριστή και μοναδική κλάση υπηρεσίας του Παρόχου, δηλαδή $C_{ΠΥ} = C_{ΠΕ}$ **ή** ι=m. Εάν $C_{ΠΥ} = C_{ΠΕ}$, τότε από τη θεωρία συνόλων *[δύο σύνολα ταυτίζονται εάν τα στοιχεία τους είναι ίδια ένα προς ένα και το αντίστροφο, Naive Set Theory, σελ 2]* ισχύει $\kappa_i = n_i$ για κάθε $n \in C_{ΠΕ}$, $\kappa \in C_{ΠΥ}$, δηλαδή πολύ απλά οι παρεχόμενες κλάσεις υπηρεσίας των ΠΥ, ταυτίζονται ακριβώς με τα είδη κίνησης του ΠΕ.
Εάν i=m, τότε υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ των στοιχείων των συνόλων $C_{ΠΥ}$ και $C_{ΠΕ}$, δηλαδή ο αριθμός των τύπων κίνησης του Πελάτη είναι ίδιος με τον αριθμό των υποστηριζόμενων κλάσεων κίνησης του Παρόχου. Η αντιστοιχία αυτή των συνόλων $C_{ΠΥ}$ και $C_{ΠΕ}$ είναι αμφίδρομη, δηλαδή:

$$C_{ΠΥ} \leftrightarrow C_{ΠΕ}$$

$i=m \Rightarrow \forall\, n_i \in C_{ΠΕ}\ \exists$ μοναδική συνάρτηση $f(n_i) = \kappa_i \in C_{ΠΥ}$ τέτοια ώστε εντός του δικτύου των Παρόχων να υπάρχουν διαθέσιμα διαφορετικά DSCP, ένα για κάθε τύπο κίνησης του πελάτη. Τότε το ΚΔΚ είναι τομέας DiffServ, με αποτέλεσμα διαφορετικός τύπος κίνησης του Πελάτη να λαμβάνει διαφορετική υπηρεσία από το ΚΔΚ.
Προφανώς η περίπτωση όπου $C_{ΠΕ} \subseteq C_{ΠΥ}$ αντιμετωπίζεται με την παραπάνω θεώρηση, γιατί οι τύποι κίνησης του πελάτη είναι ίδιοι με τις κλάσεις κίνησης των ΠΥ σε σχέση ένα προς ένα, ενώ περισσεύουν κλάσεις κίνησης των ΠΥ στις οποίες δεν αντιστοιχίζονται τύποι κίνησης του Πελάτη. Η αντιστοιχία εδώ είναι μονής κατεύθυνσης από το σύνολο $C_{ΠΕ}$ στο σύνολο $C_{ΠΥ}$.

Παράδειγμα
Έστω ότι ο Πελάτης διαθέτει τους ακόλουθους τύπους κίνησης:
Φωνή, Δεδομένα Συναλλαγών, κίνηση εν δυνάμει εφικτή.

Ο Πάροχος διαθέτει από την πλευρά του τις κλάσεις υπηρεσίας:
Αυστηρή προτεραιότητα, εγγυημένο εύρος ζώνης, κίνηση εν δυνάμει εφικτή.

Στην περίπτωση αυτή ο Πάροχος θέτει την φωνή στην κλάση υπηρεσίας με αυστηρή προτεραιότητα, τις συναλλαγές στην κλάση κίνησης με εγγυημένο εύρος και η εν δυνάμει κίνηση στην αντίστοιχη κλάση υπηρεσίας.

Σύμφωνα με τα όσα έχουν ειπωθεί στην παράγραφο 1.4 η διαφοροποίηση υπηρεσιών αναγνωρίζει τουλάχιστον τρία επίπεδα υπηρεσίας, δηλαδή τουλάχιστον τρεις κλάσεις υπηρεσίας όπου:

Η αυστηρή προτεραιότητα δίνεται στην κίνηση πραγματικού χρόνου, το εγγυημένο εύρος στα κρίσιμα δεδομένα και η τρίτη κλάση χαρακτηρίζει την κίνηση εν δυνάμει εφικτή.

Εάν στο παραπάνω παράδειγμα ο Πελάτης δεν διαθέτει κίνηση φωνής, τότε είναι φανερό το πόσο εύκολο γίνεται για τον Πάροχο που διαθέτει ήδη τρεις κλάσεις υπηρεσίας να εξυπηρετήσει τον Πελάτη με μόλις δύο τύπους κίνησης.

Εάν τώρα και ο Πάροχος διαθέτει μόνο δύο κλάσεις υπηρεσίας, δηλαδή δεν υποστηρίζει κίνηση πραγματικού χρόνου, αλλά μόνο εγγυημένο εύρος ζώνης και κίνηση εν δυνάμει εφικτή, τότε πάλι εάν ο πελάτης έχει μόνο δύο τύπους κίνησης, τότε μπορεί να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο του Παρόχου. Ο ένας από τους δύο τύπους κίνησης του Πελάτη είναι πάντα η κίνηση εν δυνάμει εφικτή σύμφωνα με τους ορισμούς των τύπων κίνησης σε επόμενη παράγραφο. Το ίδιο συμβαίνει στο δίκτυο του Παρόχου, όπου η πάντα υπαρκτή κλάση υπηρεσίας σε κάθε δίκτυο Παροχής Υπηρεσιών είναι ακριβώς αυτή που εξυπηρετεί την κίνηση εν δυνάμει εφικτή. Η κίνηση εν δυνάμει εφικτή είναι ο τύπος κίνησης ο οποίος δεν απαιτεί από το δίκτυο συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας, ούτε χρειάζεται για να μεταφερθεί εντός του δικτύου προτεραιότητα ή/και εγγυημένο εύρος ζώνης.

Η περίπτωση όπου $C_{ΠΥ}=\{κ\}$ δηλαδή το ΚΔΚ υποστηρίζει μόνο μία κλάση κίνησης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ΚΔΚ είναι ένα δίκτυο κίνησης κατά δυνάμει εφικτό (best effort network) και συνεπώς δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει ΣΕΥ και ή όλη λειτουργία του ΚΔΚ μεταπίπτει σε αυτήν της απλής μεταφοράς δεδομένων χωρίς εγγυήσεις ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Σε αυτήν την περίπτωση όλα οι τύποι κίνησης του πελάτη αντιστοιχίζονται σε κλάση εν δυνάμει εφικτή και δεν αντιμετωπίζονται διαφορετικά από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το ΚΔΚ δεν συνιστά πεδίο εφαρμογής της αρχιτεκτονικής διαφοροποίησης υπηρεσίας γιατί αντιμετωπίζει κάθε τύπο κίνησης με τον ίδιο τρόπο με την μοναδική υπηρεσία που διαθέτει.

Η περίπτωση που χρήζει προσοχής είναι η πιο συνήθης σε δίκτυα Παροχής Υπηρεσιών, όπου οι παρεχόμενες κλάσεις είναι λιγότερες και διαφορετικές από τα είδη κίνησης που ενδιαφέρεται να μεταφέρει ο ΠΕ, δηλαδή $n_m \neq κ_i$ για κάθε $n_m \in C_{ΠΕ}$, $κ_i \in C_{ΠΥ}$ και $i < m$.

Τότε θα πρέπει να δημιουργηθεί μια αντιστοιχία μεταξύ των στοιχείων των δύο συνόλων ώστε για κάθε τύπο κίνησης να υπάρχει μία κλάση κίνησης, χωρίς να ισχύει η αντίστροφη αντιστοιχία για κάθε κλάση κίνησης. Με την κατάλληλη αντιστοιχία των τύπων κίνησης του Πελάτη σε κλάσεις κίνησης του Παρόχου είναι δυνατή η παροχή ποιότητας υπηρεσίας προς τον Πελάτη και η πιστή εφαρμογή ΣΕΥ.

Συνεπώς η αντιστοιχία μεταξύ $C_{ΠΕ}$ και $C_{ΠΥ}$ είναι μία σχέση πολλά προς ένα με κατεύθυνση από το σύνολο $C_{ΠΕ}$ προς το $C_{ΠΥ}$. Δεν είναι απαγορευτικό σε μία κλάση κίνησης να αντιστοιχίζονται παραπάνω από ένας τύποι κίνησης, αρκεί με την αντιστοίχηση αυτή να εξασφαλίζεται η ποιότητα υπηρεσίας που απαιτεί κάθε διαφορετικός τύπος κίνησης. Ανάλογα με το πλήθος των κλάσεων κίνησης που μπορεί να υποστηρίξει το ΚΔΚ υπάρχουν μοντέλα τριών και άνω κλάσεων τα οποία έχουν διαφορετική λειτουργικότητα. Η θεώρηση των μοντέλων με τουλάχιστον τρεις κλάσεις συνδέεται απ' ευθείας με τον ορισμό των τριών τουλάχιστον διαφορετικών κλάσεων υπηρεσίας που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών. Η διαφορετική λειτουργικότητα οδηγεί στην καθιέρωση διαφορετικών ΣΕΥ και διαφορετικών επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας.

Από την διάκριση των περιπτώσεων παραπάνω προκύπτει ότι ανάλογα με τον αριθμό των τύπων κίνησης του Πελάτη και τις κλάσεις υπηρεσίας των Παρόχων μπορεί ή δεν μπορεί να δοθεί διαφορετική υπηρεσία σε κάθε τύπο κίνησης μέσα στο κοινό δίκτυο των Παρόχων.

7.5. Παράδειγμα αντιστοίχησης

Σύμφωνα με τις συστάσεις RFC 2474, 2597 και 3246 υπάρχει ένας γενικός κανόνας αντιστοίχησης τύπων κίνησης με συμπεριφορές ανά άλμα και τις σημάνσεις DSCP των Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών. Ο κανόνας που προκύπτει από τις παραπάνω συστάσεις διακρίνει έντεκα (11) ξεχωριστούς τύπους κίνησης που στην ιδανική περίπτωση θα λάβουν ξεχωριστή ποιότητα υπηρεσίας. Η ιδανική περίπτωση είναι όταν σύμφωνα με την παράγραφο 7.1 οι τύποι κίνησης συμπίπτουν με τις υποστηριζόμενες κλάσεις κίνησης σε αντιστοιχία ένα προς ένα. Οι έντεκα διαφορετικοί τύποι κίνησης, σύμφωνα με τις παραπάνω συστάσεις, που μπορεί να συνυπάρχουν σε ένα δίκτυο IP είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ <u>Φωνή</u>
  - Πρόκειται για πακέτα φωνής πάνω από IP, το πασίγνωστο VoIP. Η ποιότητα της φωνής επηρεάζεται και από τους τρεις πιο γνωστούς παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα υπηρεσίας (χάσιμο πακέτων, καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης). Συνήθεις τιμές των παραγόντων σύμφωνα με ITU G.114 για καλή ποιότητα φωνής είναι:
    - Χάσιμο πακέτων λιγότερο από 1%
    - Καθυστέρηση προς μία κατεύθυνση από άκρο σε άκρο το πολύ 150msec
    - Μέσος όρος διακύμανσης της καθυστέρησης προς μία κατεύθυνση από άκρο σε άκρο λιγότερο από 30 msec.

- ✓ <u>Διαδραστικό video</u>
  - Πρόκειται κυρίως για τον τύπο κίνησης που προκύπτει από IP videoconference (IP/VC). Επειδή η κίνηση IP/VC εμπεριέχει ήχο, επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες ποιότητας υπηρεσίες όπως το VoIP, παρόλο που η μορφή της κίνησης είναι εντελώς διαφορετική από το VoIP.Η κίνηση IP/VC χαρακτηρίζεται από πακέτα μεταβλητού μεγέθους και από ευμετάβλητους ρυθμούς μετάδοσης.

- ✓ Streaming video
  - Ο τύπος κίνησης streaming video (είτε σε μορφή unicast, είτε multicast) είναι γενικά περισσότερο ανεκτικός στους παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα υπηρεσίας. Το χάσιμο πακέτων μπορεί να είναι το πολύ μέχρι 5%, η καθυστέρηση μέχρι 5 sec και η διακύμανση της καθυστέρησης δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στην μεταφορά της κίνησης streaming video. Η ανάγκη δέσμευσης συγκεκριμένου εύρους ζώνης για τον τύπο κίνησης αυτό εξαρτάται από το είδος κωδικοποίησης του video και του ρυθμού μετάδοσης.

- ✓ Σηματοδοσία κλήσεων
  - Η σηματοδοσία κλήσεων χρειάζεται ένα μικρό εγγυημένο εύρος ζώνης της τάξεως των 150 bps (συν την επιβάρυνση που προέρχεται από το δεύτερο επίπεδο του OSI, ανάλογα με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται).

- ✓ Δρομολόγηση IP
  - Απολύτως απαραίτητος τύπος κίνησης για την λειτουργία του δικτύου και συνεπώς πρέπει να υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης για τα πακέτα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης (RIP,BGP, OSPF κτλ).

- ✓ Διαχείριση δικτύου
  - Σημαντικός τύπος κίνησης που περιλαμβάνει πρωτόκολλα όπως το SNMP, NTP, και εφαρμογές όπως το NFS (Network File System), syslog κτλ. Απαιτεί ένα ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης.

- ✓ Δεδομένα συναλλαγών / Διαδραστικά δεδομένα
  - Περιλαμβάνει κίνηση από βάσεις δεδομένων (Oracle, SAP κτλ) που έχουν την μορφή συναλλαγών (ο χρήστης περιμένει να ολοκληρωθεί η διαδικασία πριν προχωρήσει στην επόμενη) και στηρίζονται σε μοντέλο client / server.
  - Διαδραστική κίνηση από προγράμματα μηνυμάτων όπως το Instant Messenger.

- ✓ Κρίσιμα δεδομένα
  - Ο τύπος της κίνησης αυτής είναι ποιοτικά ίδιος με τα δεδομένα συναλλαγών και τα διαδραστικά δεδομένα. Εδώ απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή γιατί η ποιότητα υπηρεσίας δεν εξαρτάται από τεχνικούς παράγοντες, αλλά από επιχειρησιακούς και πολιτικούς που διαφέρουν ανά πελάτη και έχουν σχέση με τις εφαρμογές που θεωρεί ο Πελάτης ως κρίσιμες για την λειτουργία της επιχείρησης του.
  - Στα κρίσιμα δεδομένα συγκαταλέγονται εφαρμογές που είναι απολύτως απαραίτητες για την λειτουργία του Πελάτη. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι βάσεις δεδομένων (Oracle, SAP, Siebel κτλ), εμπορικά προγράμματα (B2B, εφοδιαστικές αλυσίδες) και προγράμματα επικοινωνίας χρηστών και εφαρμογών (Citrix, Messengers, telnet κτλ). Χαρακτηριστικό είναι ο τύπος κίνησης αυτός είναι διαφορετικός για κάθε πελάτη. Επίσης η κίνηση αυτή ανάλογα με τις εφαρμογές έχει χαρακτήρα διαδραστικό (π.χ Messangers, Citrix) η/και συναλλαγματικό (βάσεις δεδομένων). Σημαντικό είναι να

αναφερθεί ότι η καθυστέρηση στην λειτουργία των εφαρμογών αυτών δημιουργεί συνεχή παράπονα από τον Πελάτη προς τους Παρόχους.

- Συνεπώς πρέπει να προβλεφτεί εύρος ζώνης για τον τύπο κίνησης Κρίσιμα δεδομένα. Η πρόβλεψη δυσκολεύει ακόμη περισσότερο από το γεγονός ότι οι εφαρμογές αυτές παράγουν διαφορετικά μεγέθη πακέτων. Για παράδειγμα οι διαδραστικές εφαρμογές έχουν μέγεθος μηνύματος από μερικά bytes (λιγότερα από 100) μέχρι 1024 bytes, ενώ οι βάσεις δεδομένων παράγουν πακέτα από 1024 bytes έως 50 Megabytes.

✓ Ογκώδη δεδομένα (Bulk data)

- Εφαρμογές όπως το backup, η μεταφορά αρχείων μέσω ftp, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, συγχρονισμός ή replication βάσεων δεδομένων, παράγουν δεδομένα μη διαδραστικά και ανεκτικά στην απόρριψη πακέτων. Το εύρος ζώνης που δίνεται εδώ καταβάλλεται προσπάθεια να είναι μεταβλητό, ώστε τα ογκώδη δεδομένα να μπορούν να χρησιμοποιήσουν εύρος ζώνης από άλλους τύπους κίνησης σε ώρες μη αιχμής του δικτύου.

✓ Κίνηση εν δυνάμει εφικτή

- Στον τύπο αυτό συγκαταλέγεται ότι δεν είναι κρίσιμο για την λειτουργία των εφαρμογών του Πελάτη και του δικτύου. Η κίνηση αυτή δεν χρειάζεται προτεραιότητα ούτε εγγυημένο εύρος ζώνης. Υπάρχει όμως σε κάθε είδους δίκτυο και τελικά λαμβάνεται υπ' όψιν. Χαρακτηριστικός κίνηση αυτής της μορφής είναι η πλοήγηση στο διαδίκτυο.

✓ «Σκουπίδια»

- Ο τύπος κίνησης « Σκουπίδια» περιλαμβάνει ιούς, σκουλήκια και κίνηση άσχετη με τους σκοπούς της επιχείρησης του Πελάτη με μορφή peer to peer (Kazaa, Morpheus, e-mule), παιγνίδια (Doom, Quake) κτλ. Η παραχώρηση εύρους ζώνης σε αυτού του είδους κίνηση επιτρέπει στους υπόλοιπους τύπους κίνησης να περνούν χωρίς προβλήματα από το δίκτυο.

Για την κατανόηση των αντιστοιχιών τύπων κίνησης του Πελάτη σε κλάσεις κίνησης του Παρόχου θα δοθούν παραδείγματα
Έστω μοντέλο τριών κλάσεων όπου το δίκτυο του Παρόχου μπορεί να υποστηρίξει κίνηση δεδομένων πραγματικού χρόνου, κρίσιμα δεδομένα και κίνηση εν δυνάμει εφικτή. Επίσης στο δίκτυο του Παρόχου αλλά και του Πελάτη πέρα από τα δεδομένα (πραγματικού χρόνου, κρίσιμα κτλ) υπάρχει ανάγκη σηματοδοσίας αλλά και σκουπίδια (ιοί, σκουλήκια, άχρηστα πακέτα). Συνεπώς υπάρχει η ανάγκη πρόβλεψης επαρκούς εύρους ζώνης για την σηματοδοσία και τα σκουπίδια, ώστε οι τύποι κίνησης να μπορούν να μεταφέρονται χωρίς πρόβλημα.

Έστω ότι οι κλάσεις κίνησης που διαθέτει ο Πάροχος είναι:

- Κίνηση πραγματικού χρόνου (αυστηρή προτεραιότητα)
- Κρίσιμα δεδομένα (εγγυημένο εύρος ζώνης)
- Best effort (εν δυνάμει εφικτό)

Εύρος ζώνης για την σηματοδοσία θα δοθεί μέσα στο εύρος ζώνης για την κίνηση πραγματικού χρόνου ή στο εύρος ζώνης των κρίσιμων δεδομένων. Για τα σκουπίδια θα δοθεί ένα ποσοστό της τάξης του 1 με 2 % από το εύρος ζώνης της εν δυνάμει εφικτής κίνησης.
Το εύρος ζώνης του Παρόχου κατανέμεται ως εξής:

Κλάσεις Κίνησης	***Εύρος Ζώνης***
Κίνηση Πραγματικού Χρόνου	35%
Κρίσιμα Δεδομένα	40%
Best effort	25%

Ο πελάτης από τη δική του πλευρά κατηγοριοποιεί την κίνηση στο δίκτυο του ως εξής:

- Κίνηση δρομολόγησης
- Φωνή
- Διαδραστικό video
- Streaming video
- Κρίσιμα δεδομένα
- Σηματοδοσία κλήσεων
- Διαχείριση Δικτύου
- Δεδομένα συναλλαγών
- Σκουπίδια (ιοί – σκουλήκια, άχρηστα πακέτα)
- Bulk Data
- Best effort

Πρόθεση του Πελάτη είναι να συνδέσει μέσω Εικονικού Ιδιωτικού Δικτύου τις τοποθεσίες του πάνω από το δίκτυο του Παρόχου (ή των Παρόχων) με δεδομένο ότι επιθυμεί διαφοροποίηση υπηρεσίας ανάλογα με τους τύπους κίνησης.
Είναι σαφές στο σημείο αυτό, ότι υπάρχει η ανάγκη αντιστοίχησης των τύπων κίνησης του Πελάτη με τις κλάσεις κίνησης του Παρόχου. Επειδή οι τύποι κίνησης είναι περισσότεροι και διαφορετικοί από τις κλάσεις κίνησης του Παρόχου θα χρειαστεί να αντιστοιχιστούν περισσότεροι του ενός τύποι κίνησης σε κάθε κλάση κίνησης.
Το πρώτο βήμα του Παρόχου είναι η κατάταξη των τύπων κίνησης του Πελάτη με βάση τις ανάγκες τους από πλευράς εύρους ζώνης, προτεραιότητας και κρισιμότητας για την λειτουργία του δικτύου του Πελάτη.
Η φωνή και το διαδραστικό video θα αντιστοιχιστούν στην κλάση κίνησης πραγματικού χρόνου ή κάποιο από τα δύο θα αντιστοιχιστεί στην κλάση κίνησης κρίσιμων δεδομένων. Εάν οι συνδέσεις Πελάτη – Παρόχου δεν είναι ιδιαίτερα «γρήγορες», δηλαδή είναι κάτω από 768 Kbps, τότε η σειριακοποίηση των πακέτων επιβαρύνει ιδιαίτερα τις εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στις καθυστερήσεις. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι καλή ιδέα η φωνή και το διαδραστικό video να αντιστοιχιστούν στην ίδια κλάση κίνησης.
Η σηματοδοσία των κλήσεων σε συνδέσεις Πελάτη – Παρόχου πάνω από 768 Kbps, αντιστοιχίζεται συνήθως μαζί με την φωνή στην κίνηση πραγματικού χρόνου. Επειδή η σηματοδοσία των κλήσεων θεωρείται ότι δεν είναι επιβαρυντική ιδιαίτερα για το εύρος ζώνης, μπορεί σε περιπτώσεις αργών συνδέσεων να αντιστοιχιστεί στην κλάση κρίσιμων δεδομένων. Βέβαια εδώ ο Πάροχος είναι αναγκασμένος μέσα στην κλάση

κρίσιμων δεδομένων να εγγυηθεί ένα μικρό αλλά υπαρκτό εύρος ζώνης ειδικά για την σηματοδοσία των κλήσεων.
Στο επίπεδο πρωτοκόλλων είναι γνωστή η διαφορετικότητα στην συμπεριφορά εφαρμογών TCP από τις εφαρμογές UDP, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συμφόρησης του δικτύου. Οι εφαρμογές βασισμένες σε TCP, μπορούν να ανιχνεύσουν την συμφόρηση του δικτύου, μέσω της αύξησης των απορριπτόμενων πακέτων, οπότε ανάλογα ελαττώνουν τον ρυθμό μετάδοσης πακέτων. Αντίθετα οι εφαρμογές UDP δεν διαθέτουν ανάλογους μηχανισμούς σε επίπεδο πρωτοκόλλου με αποτέλεσμα να συνεχίζουν να δημιουργούν πακέτα με τον ίδιο ρυθμό, ακόμα και όταν αυξάνεται η απόρριψη πακέτων λόγω συμφόρησης. Χαρακτηριστική εφαρμογή UDP με ανάλογη συμπεριφορά όπως περιγράφηκε νωρίτερα είναι το Streaming Video. Εάν συνδυαστούν σε μία κλάση κίνησης του Παρόχου TCP και UDP εφαρμογές, τότε είναι πιθανόν σε περίπτωση συμφόρησης να εμφανιστεί το φαινόμενο TCP starvation / UDP dominance (επικυριαρχία UDP έναντι TCP). Το φαινόμενο περιγράφεται αμέσως παρακάτω, γιατί αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα κακής αντιστοίχησης τύπων κίνησης σε κλάσεις κίνησης μέσα σε δίκτυα Παρόχων.
Κατά την συμφόρηση οι εφαρμογές TCP ανιχνεύουν μέσω των μηχανισμών του πρωτοκόλλου TCP την συμφόρηση και ελαττώνουν τον ρυθμό μετάδοσης πακέτων συνεχώς, ενώ την ίδια στιγμή μέσα στην ίδια κλάση κίνησης ο ρυθμός μετάδοσης των πακέτων UDP δεν ελαττώνεται. Το πρωτόκολλο UDP δεν διαθέτει μηχανισμό ανίχνευσης της συμφόρησης, αφού η εκπομπή των πακέτων UDP, δεν συνοδεύεται από επιβεβαίωση λήψης στο άλλο άκρο του δικτύου.
Με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό το εύρος ζώνης των εφαρμογών TCP κυριαρχείται από τις εφαρμογές UDP και ο μηχανισμός ελέγχου του πρωτοκόλλου TCP προκαλεί ακόμη μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης της κλάσης κίνησης αρχίζει να αδειάζει από πακέτα TCP και να καταλαμβάνεται από πακέτα UDP. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό έστω ότι τα κρίσιμα δεδομένα του Πελάτη που βασίζονται στο πρωτόκολλο TCP (π.χ on – line transactions) και το streaming video έχουν αντιστοιχιστεί και τα δύο στην ίδια κλάση κίνησης του Παρόχου. Τη στιγμή λοιπόν που έχουν «κολλήσει» οι συναλλαγές on – line, οι εφαρμογές streaming video «παίζουν» μια χαρά!

Συμπέρασμα:
Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή της αντιστοίχησης των τύπων κίνησης του Πελάτη με τις κλάσεις του Παρόχου, ώστε να διατηρείται η επιθυμητή Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας.

Σύμφωνα με τις RFC 2474, 2597 και 3246 που αναφέρονται στα πρότυπα των Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών οι συμπεριφορές ανά άλμα (PHB) και κατά συνέπεια τα DSCP για τους τύπους κίνησης του Πελάτη είναι:

Τύπος κίνησης ΠΕΛΑΤΗ	***DSCP***
Κίνηση δρομολόγησης	CS6
Φωνή	EF
Διαδραστικό video	AF41
Streaming video	CS4
Κρίσιμα δεδομένα	AF31
Σηματοδοσία κλήσεων	CS3
Δεδομένα συναλλαγών	AF21
Διαχείριση Δικτύου	CS2

Bulk Data	AF11
Σκουπίδια (ιοί – σκουλήκια, άχρηστα πακέτα)	CS1
Best effort	0

Σε πρώτο βήμα για την απόδοση ποιότητας υπηρεσίας και κατά συνέπεια την Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας, ο Πάροχος (ή οι Πάροχοι) προσπαθεί να ομαδοποιήσει τους τύπους κίνησης του Πελάτη σε κλάσεις κίνησης που διαθέτει στο δίκτυο του (ή στο κοινό δίκτυο ΚΔΚ).

ΠΕΛΑΤΗΣ	***ΠΑΡΟΧΟΣ***
Κίνηση δρομολόγησης	Κρίσιμα δεδομένα
Φωνή	Κίνηση πραγματικού χρόνου
Διαδραστικό video	Κίνηση πραγματικού χρόνου
Streaming video	Κίνηση πραγματικού χρόνου
Σηματοδοσία κλήσεων	Κρίσιμα δεδομένα
Δεδομένα συναλλαγών	Κρίσιμα δεδομένα
Διαχείριση Δικτύου	Κρίσιμα δεδομένα
Bulk Data	Κρίσιμα δεδομένα
Σκουπίδια (ιοί – σκουλήκια, άχρηστα πακέτα)	Σκουπίδια (ιοί – σκουλήκια, άχρηστα πακέτα)
Best effort	Best effort

Σε δεύτερο βήμα ο Πάροχος μπορεί ακολουθώντας τις συστάσεις της RFC 3270:

- να αλλάξει την σήμανση των υπηρεσιών με διαφορετικά DSCP (τρόπος Uniform)
- να διατηρήσει την κωδικοποίηση DSCP που στέλνει ο Πελάτης (τρόπος Pipe)
- να έχει διαφορετική κωδικοποίηση MPLS/EXP την οποία να αλλάζει σε αυτή του Πελάτη στα σημεία διασύνδεσης (τρόπος short pipe).

Η κάθε επιλογή ανοίγει μια νέα σειρά θεμάτων.

Η διαδικασία αλλαγής ή όχι της σήμανσης θα γίνει από το Άκρο Πελάτη ή από το Άκρο Παρόχου;
Η αλλαγή της σήμανσης εντός του Παρόχου, πόσο επηρεάζει τους τύπους κίνησης του Πελάτη;
Στην επιστροφή από το δίκτυο του Παρόχου στο δίκτυο του Πελάτη στην ίδια ή σε άλλη τοποθεσία ποιος μηχανισμός σήμανσης θα εφαρμοστεί;

Το μοντέλο δεν απαγορεύει επίσης την αλλαγή της σήμανσης εντός του δικτύου του Παρόχου. Είναι δηλαδή εφικτό και πραγματοποιείται να υπάρχει διαφορετική αντιστοίχηση ανάμεσα στο ΑΠΕ και ΑΠΑ και διαφορετική πάλι αντιστοίχηση μεταξύ ΑΠΑ και πυρήνα Παρόχου. Η επιπλέον αλλαγή της σήμανσης εντός του ίδιου

Παρόχου διευκολύνει τον Πάροχο στην καλύτερη διαχείριση των ΕΙΔ και περιορίζει τις ανάγκες διαφοροποίησης της υπηρεσίας ανά Πελάτη στον πυρήνα του δικτύου.
Σε κάθε περίπτωση θα καταβληθεί προσπάθεια ο τύπος της κίνησης του Πελάτη να κωδικοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστοιχεί τεχνικά και διαχειριστικά στην κατάλληλη κλάση υπηρεσίας του Παρόχου, όσο αυτό είναι τεχνικά δυνατόν.
Επισημαίνεται ότι η ΣΕΥ είναι συνάρτηση της ποιότητας υπηρεσίας σε ότι αφορά το τεχνικό μέρος και ο Πάροχος είναι υποχρεωμένος να προσπαθήσει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του Πελάτη.
Εάν θεωρηθεί ότι το ΑΠΕ/ΑΠΑ αλλάζει την σήμανση των πακέτων ώστε να εξασφαλιστεί πλησιέστερη προς το επιθυμητό μεταχείριση των πακέτων από το δίκτυο του Παρόχου, τότε μια πιθανή αντιστοίχηση θα είναι:

ΑΠΕ	***DSCP***	***Συνιστώμενη Αλλαγή Σήμανσης, όπου είναι εφικτή***	***Κλάσεις Κίνησης ΑΠΑ***
Φωνή	EF	EF	Κίνηση Πραγματικού Χρόνου {EF, CS5} 35%
Διαδραστικό video	AF41	**CS5**	
Streaming video	CS4	**X**	
Σηματοδοσία κλήσεων	CS3	**CS5**	
Κρίσιμα δεδομένα	AF31	AF31	Κρίσιμα δεδομένα 40%
Κίνηση δρομολόγησης	CS6	CS6	
Δεδομένα συναλλαγών	AF21	**CS3**	
Διαχείριση Δικτύου	CS2	**CS3**	
Bulk Data	AF11	**X**	
Σκουπίδια (ιοί – σκουλήκια, άχρηστα πακέτα)	CS1	**0**	Best effort 25%
Best effort	0	0	

Στο μοντέλο των τριών κλάσεων δεν υπάρχει συνιστώμενη αλλαγή σήμανσης για τα πακέτα streaming video και bulk data. Ενώ τα UDP πακέτα του Διαδραστικού Video απολαμβάνουν με σιγουριά τις υπηρεσίες της κλάσης «Κίνηση Πραγματικού Χρόνου» τα πακέτα TCP του Streaming Video απειλούνται από το φαινόμενο επικυριαρχίας των UDP σε TCP. Επίσης ο τύπος κίνησης bulk data δεν έχει συνιστώμενη αλλαγή σήμανσης στο μοντέλο των τριών κλάσεων. Τα bulk data είναι τύπος κίνησης που δημιουργεί μεγάλες ακολουθίες μεγάλων πακέτων TCP οι οποίες είναι σε θέση να καταλάβουν μεγάλο εύρος ζώνης, το οποίο αφαιρείται από άλλες εφαρμογές με μικρότερα πακέτα.

Για να γίνει ποιο κατανοητή η αντιστοίχηση και να φανεί το κατά πόσο επηρεάζεται τελικά η κίνηση του πελάτη ανάλογα με τις κλάσεις κίνησης που ξεχωρίζει ο Πάροχος, δίνεται ένα παράδειγμα με μοντέλο που περιλαμβάνει περισσότερες από τρεις κλάσεις κίνησης στο δίκτυο του Παρόχου (μοντέλο πέντε κλάσεων):

ΑΠΕ	***DSCP***	***Συνιστώμενη Αλλαγή Σήμανσης, όπου είναι εφικτή***	***Κλάσεις Κίνησης ΑΠΑ***
Φωνή	EF	EF	Κίνηση Πραγματικού Χρόνου {EF, CS5} 35%
Διαδραστικό video	AF41	**CS5**	
Σηματοδοσία κλήσεων	CS3	**CS5**	
Κρίσιμα δεδομένα	AF31	AF31	Κρίσιμα δεδομένα {AF31,CS6, CS3} 20%
Κίνηση δρομολόγησης	CS6	CS6	
Δεδομένα συναλλαγών	AF21	**CS3**	
Streaming video	**CS4**	**AF21**	**Video {AF21, CS2} 15%**
Διαχείριση Δικτύου	**CS2**	**CS2**	
Bulk Data	**AF11**	**AF11/CS1**	**Bulk Data {AF11, CS1} 5%**
Σκουπίδια (ιοί – σκουλήκια, άχρηστα πακέτα)	CS1	**0**	Best effort 25%
Best effort	0	0	

Στο μοντέλο πέντε κλάσεων έχουν προστεθεί οι κλάσεις Video και Bulk Data με ταυτόχρονο περιορισμό του εύρους ζώνης των κρίσιμων δεδομένων σε 20 %. Με αυτόν τον τρόπο θεραπεύεται το φαινόμενο μονοπώλησης του δικτύου από τα πακέτα UDP του διαδραστικού video και φυλάσσεται ένα μικρό ποσοστό του εύρους ζώνης για Bulk Data. Συνεπώς οι εφαρμογές που δημιουργούν μεγάλες ακολουθίες μεγάλων πακέτων TCP βρίσκουν διέξοδο στο 5% και δεν ενοχλούν την λειτουργία άλλων εφαρμογών με μικρότερα πακέτα.
Χαρακτηριστικό είναι ότι στο μοντέλο πέντε κλάσεων περιορίζονται οι αλλαγές σήμανσης, αλλά και γίνονται κάποιες αναγκαίες. Ο τύπος κίνησης «σκουπίδια», αλλάζει σήμανση για να μην συμπέσει με τα Bulk Data, ώστε να αποφευχθεί πιθανό πρόβλημα στο δίκτυο από ιούς.

Οι συμφωνίες ΣΕΥ θα εξυπηρετηθούν στο δίκτυο των Παρόχων με τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- Υπερπρόβλεψη εύρους ζώνης (όταν το εύρος ζώνης καταναλώνεται κατά 50 %,προσθέτονται νέοι σύνδεσμοι→ ακριβός τρόπος και μη αποτελεσματικός).
- Εφαρμογή Διαφοροποίησης Υπηρεσίας στο δίκτυο κορμού
- Εφαρμογή MPLS – TE
- Συνδυασμός των παραπάνω τρόπων.

Σε ένα ΕΙΔ που εκτείνεται σε πολλούς Παρόχους η αντιστοίχηση τύπων κίνησης με DCSP δεν είναι γίνεται πλέον μεταξύ Πελάτη και Παρόχου, αλλά και μεταξύ των Παρόχων.
Ο Πάροχος Π_iΥ παραδίδει στον επόμενο Πάροχο Π_{i+1}Υ την δική του αντιστοίχηση την οποία ο επόμενος Πάροχος έχει δύο επιλογές:
Είτε να την διατηρήσει, είτε να την αλλάξει με δεδομένο ότι διαθέτει περισσότερες ή λιγότερες κλάσεις κίνησης από τον Πάροχο Π_iΥ
Κάθε μία προσέγγιση έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η διατήρηση της ίδιας αντιστοίχησης επιτρέπει πρακτικά την εκχώρησης της ίδιας αντιστοίχησης (άρα και των συγκεκριμένων DSCP) δια μέσου όλου του ΚΔΚ. Το μειονέκτημά της είναι ότι ίσως δεν είναι πάντα εφικτή, ιδιαίτερα εάν ο επόμενος Πάροχος διαθέτει διαφορετικά DSCP από τον προηγούμενο στην σειρά για τον ίδιο τύπο κίνησης του Πελάτη. Στα παραπάνω παραδείγματα αντιστοίχησης είναι φανερό ότι κάποιοι τύποι κίνησης αλλάζουν DSCP, ανάλογα με το μοντέλο τριών ή πέντε κλάσεων που ακολουθείται. Σε τέτοια περίπτωση χρειάζεται να γίνει αλλαγή των DSCP. Ο Πάροχος βέβαια πάλι μπορεί να κρατήσει την αντιστοιχία του Πελάτη στον μικρό αριθμό κλάσεων κίνησης που του δίνει ο Π_iΥ με το σκεπτικό ότι για τον συγκεκριμένο Πελάτη αρκούν αυτές οι ελάχιστες κλάσεις. Ο Πάροχος έχει κερδίσει στην περίπτωση αυτή κλάσεις κίνησης και συνεπώς μπορεί να διαθέσει το εύρος ζώνης για άλλους τύπους κίνησης άλλων Πελατών.
Η αλλαγή της αντιστοίχησης δημιουργεί επιπλέον φόρτο στους δρομολογητές του τρέχοντος Παρόχου που λαμβάνουν κίνηση από τον Πάροχο Π_iΥ για τον κοινό Πελάτη. Όμως η προσεκτική μελέτη της τοπολογίας του δικτύου του Πελάτη μπορεί να δώσει την ευκαιρία να ευνοηθούν οι τοποθεσίες του Πελάτη που βρίσκονται στον τρέχοντα Πάροχο με περισσότερες κλάσεις. Συνεπώς εάν μεταξύ κάποιων τοποθεσιών θεωρεί ο Πελάτης ότι χρειάζεται περισσότερες κλάσεις κίνησης και άρα καλύτερη και «λεπτότερη» ποιότητα υπηρεσίας φροντίζει να μην εντάξει τις τοποθεσίες αυτές στον Πάροχο Π_iΥ αλλά σε οποιοδήποτε άλλον είναι εφικτό.
Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί αρχιτεκτονικές όπως ο δανεισμός εύρους ζώνης από άλλον Πάροχο ώστε να γίνει δυνατή η καλύτερη εξυπηρέτηση του Πελάτη. Πρακτικά αυτό σημαίνει εκτροπή της κίνησης προς τον δανειστή, είτε σε μόνιμη βάση είτε δυναμικά όποτε παρουσιάζεται έντονο πρόβλημα εύρους ζώνης. Σημειώνεται εδώ ότι ο δανεισμός εύρους ζώνης δεν είναι πρόβλημα του Πελάτη, αλλά πρόβλημα των Παρόχων οι οποίοι πρέπει να δίνουν ανά πάσα στιγμή στον Πελάτη τις υπηρεσίες που προκύπτουν από την εφαρμογή της ΣΕΥ.

7.6. Μηχανισμός μετατροπής απαιτήσεων Πελάτη σε ΣΕΥ Παρόχων

Προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος – μηχανισμός για την παροχή Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσίας. Ο αλγόριθμος σε αντίθεση με υπάρχοντες μηχανισμούς απαιτεί από τον κάθε Πάροχο να δώσει το επιθυμητό επίπεδο υπηρεσίας για κάθε ζεύγος τοποθεσιών του Πελάτη ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αποφυγή της συμμόρφωσης με «μέσους όρους» υπηρεσίας που ισχύουν για όλες τις τοποθεσίες, η οποία όπως έχει αποδειχτεί στα προηγούμενα μπορεί να οδηγήσει σε καταστρατήγηση της ΣΕΥ.
Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μεταξύ συγκεκριμένων τοποθεσιών ο Πελάτης έχει ανάγκη videoconference, ενώ μεταξύ άλλων χρειάζεται μόνο μεταφορά μη κρίσιμων

δεδομένων. Η εφαρμογή γενικευμένης ΣΕΥ σε τέτοιες περιπτώσεις επιβαρύνει οικονομικά τον Πελάτη και τεχνικά τους Παρόχους γιατί θα στηριχτεί στην εξασφάλιση της κρίσιμης κίνησης παντού με χρήση «μέσων όρων» και όχι στις επιμέρους ανάγκες επικοινωνίας των τοποθεσιών. Ο αλγόριθμος εξασφαλίζει την παροχή των συμφωνημένων επιπέδων παροχής υπηρεσίας και στην περίπτωση προσθήκης νέων τοποθεσιών του Πελάτη εκ των υστέρων, καθώς το ΕΙΔ επεκτείνεται ακόμη περισσότερο.
Ο μηχανισμός δεν εξαρτάται από κάποιο συγκεκριμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης, αλλά χρησιμοποιεί τις πληροφορίες δρομολόγησης για τον εντοπισμό των τοποθεσιών του Πελάτη μέσα στο δίκτυο των Παρόχων. Προτείνεται όμως κατά την διαμόρφωση των συνδέσεων του Πελάτη η χρήση MPLS.
Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν εξαρτάται από την μορφή διασύνδεσης των τοποθεσιών Πελάτη. Μπορεί να εφαρμοστεί σε αρχιτεκτονικές hub and spoke (ύπαρξη κεντρικής τοποθεσίας και διασύνδεση όλων των άλλων τοποθεσιών με την κεντρική) αλλά και σε αρχιτεκτονικές mesh (κάθε τοποθεσία συνδέεται με κάθε άλλη).
Η δημιουργία μονοπατιού πάνω από το οποίο τηρούνται οι δεσμεύσεις του Παρόχου Υπηρεσιών σχετικά με το επιθυμητό επίπεδο υπηρεσίας του Πελάτη είναι ανεξάρτητη συγκεκριμένου είδους και πλήθους παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας. Μπορεί δε να προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με την Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας που ζητεί ο Πελάτης με την πρόσθεση ή την αφαίρεση παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας. Υπάρχει δυνατότητα επέκτασης του αλγορίθμου ώστε να εντοπίζεται πέρα από ένα και μοναδικό μονοπάτι συμμόρφωσης προς τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας και άλλα δευτερεύοντα ή εφεδρικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλόγως προς τις ανάγκες του Πελάτη αλλά και των Παρόχων.
Ο αλγόριθμος διαθέτει μηχανισμούς επαναδιαπραγμάτευσης των όρων της Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσίας, οι οποίοι ενεργοποιούνται όταν συγκεκριμένοι περιορισμοί πόρων δεν επιτρέπουν το αρχικώς ζητούμενο επίπεδο υπηρεσίας μεταξύ τοποθεσιών του Πελάτη. Οι μηχανισμοί εντοπίζουν τους περιορισμούς και αποκαλύπτουν το σημείο ή τα σημεία πέρα από το οποίο ή τα οποία δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η αρχικώς ζητούμενη ΣΕΥ. Στην συνέχεια πυροδοτείται μια ακολουθία διαπραγματεύσεων είτε εκ μέρους του Πελάτη είτε εκ μέρους του Παρόχου, ώστε εάν είναι δυνατόν με εκατέρωθεν υποχωρήσεις να βρεθεί χρυσή τομή για την ΣΕΥ.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου συνοδευόμενα από επεξηγηματικά σχήματα και σχόλια.

Ο Πελάτης ενδιαφέρεται να συνδέσει ένα σύνολο τοποθεσιών σε ένα Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο με συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας. Οι τοποθεσίες του Πελάτη δεν μπορούν να συνδεθούν όλες μέσω συγκεκριμένου μοναδικού Παρόχου, λόγω της τοπολογικής διασποράς.
Για κάθε ζεύγος τοποθεσιών (S_i, S_j) του Πελάτη αναζητείται η εφαρμογή Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσίας μέσω της λειτουργίας ASK_SLA(S_i, S_j). Η ΣΕΥ θα καθοριστεί με την δημιουργία πίνακα SLS (Service Level Specification), ο οποίος περιγράφεται από επίσημη γλώσσα καθορισμού και περιέχει τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας. Γνωστή γλώσσα καθορισμού επιπέδου υπηρεσίας είναι η Web Service Level Agreement Language *[IBM, http://www.research.ibm.com/wsla/]*, βασισμένη στην XML η οποία μπορεί να διαχειριστεί πίνακες SLS με παραμέτρους όπως χρόνος απόκρισης, ρυθμοαπόδοση, εύρος ζώνης, ποσοστό CPU και RAM, αλλά και τις ενέργειες που θα μπορούσαν να γίνουν σε περίπτωση παραβίασης του συμφωνημένου

επιπέδου υπηρεσίας. Η WSLA χρησιμοποιείται συνήθως για την εξυπηρέτηση Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας σε Υπηρεσίες Φιλοξενίας Ιστοτόπων και Υπολογιστών (Virtual Hosting και DataCenters), αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον καθορισμό υπηρεσιών VPN με συγκεκριμένα συμβόλαια εξυπηρέτησης.
Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία του πίνακα SLS δεν είναι προκαθορισμένοι ούτε ως προς τον αριθμό, αλλά ούτε ως προς το είδος (π.χ δεν υπάρχουν συνθήκες που να απαγορεύουν την χρήση συγκεκριμένων παραμέτρων υπηρεσίας και να επιτρέπουν την χρήση άλλων). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας να διαφέρουν προς τον αριθμό και το είδος ανάλογα με το ζεύγος τοποθεσιών, οπότε για κάθε ζεύγος τοποθεσιών μπορεί να δημιουργηθεί εντελώς διαφορετικός πίνακας SLS. Για παράδειγμα μπορεί κάποια από τις τοποθεσίες του Πελάτη να έχει ανάγκες υποστήριξης videoconference με κάποια άλλη και ταυτόχρονα με μία τρίτη τοποθεσία να έχει ανάγκες υποστήριξης μόνο μεταφοράς απλών δεδομένων.

Αρχικά εξετάζεται με βάση το σύστημα διευθυνσιοδότησης που χρησιμοποιείται (συνήθως κάποια μορφή του συστήματος διευθύνσεων IP σύμφωνα με το δεύτερο κεφάλαιο), που βρίσκονται τα μέλη S_i, S_j του ζεύγους τοποθεσιών. Οι περιπτώσεις που απαντώνται είναι δύο:

Οι τοποθεσίες S_i και S_j βρίσκονται στον ίδιο Πάροχο
Οι τοποθεσίες S_i και S_j δεν βρίσκονται στον ίδιο Πάροχο

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα γίνεται με προσφυγή στους πίνακες δρομολόγησης του Παρόχου. Εάν η απάντηση είναι θετική, δηλαδή το ζεύγος τοποθεσιών του Πελάτη τυγχάνει να βρίσκεται εντός του ίδιου Παρόχου, τότε αναζητείται μέσα στο δίκτυο του τρέχοντος Παρόχου Π_κΥ ένα μονοπάτι που να ικανοποιεί την Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας. Στην διαδικασία αυτή ανακαλείται πρώτα ο πίνακας SLS, που περιέχει τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που έχει θέσει ο Πελάτης για την επικοινωνία του ζεύγους τοποθεσιών (S_i, S_j). Εάν βρεθεί ένα τουλάχιστον μονοπάτι που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του Πελάτη, τότε μπορεί να τηρηθεί η ζητούμενη ΣΕΥ και συστήνεται το μονοπάτι μέσω MPLS (ή με συνδυασμό MPLS και Traffic Engineering). Η σύσταση του μονοπατιού πραγματοποιείται με την κλήση της λειτουργίας openQoSpath(S_i, S_j) με ορίσματα τις δύο τοποθεσίες, εφ όσον και οι δύο τοποθεσίες βρίσκονται στον ίδιο Πάροχο.

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή του αλγορίθμου θα μπορούσε να είναι η εύρεση όλων των μονοπατιών για τα οποία ικανοποιείται η ΣΕΥ και η επιλογή ενός από αυτά ως πρωτεύοντος με τα υπόλοιπα ως δευτερεύοντα, όπως γίνεται στον καθορισμό των εναλλακτικών δρομολογήσεων μέσω οπτικών ινών. Τα δευτερεύοντα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρικά στην περίπτωση προβλήματος του πρωτεύοντος ή συμπληρωματικά με αποστολή της κίνησης πάνω από όλα τα μονοπάτια για τα οποία ικανοποιείται η ΣΕΥ. Η επιλογή πολλαπλών μονοπατιών ταυτόχρονα προς τον ίδιο προορισμό είναι θέμα πρωτοκόλλων όπως το MPLS ή/ και traffic engineering.

Στην συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε άλλο ζεύγος τοποθεσιών του Πελάτη μέχρι να σχηματιστούν όλες οι διαδρομές. Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι εάν βρεθεί μονοπάτι από την τοποθεσία S_i στην S_j πάνω στο οποίο τηρείται η ΣΕΥ,

πρέπει να εξετασθεί και η αντίστροφη διαδρομή από την τοποθεσία S_j στην S_i . Αυτό γίνεται γιατί η επιστροφή από την τοποθεσία αφίξεως στην τοποθεσία προορισμού μπορεί να ακολουθήσει διαφορετικό μονοπάτι. Το διαφορετικό μονοπάτι μπορεί να οφείλεται στα πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου, στις πολιτικές διασύνδεσης των Παρόχων και δεν είναι εξασφαλισμένο ότι θα ικανοποιείται η ζητούμενη ΣΕΥ.

Εάν δεν βρεθεί μονοπάτι που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του Πελάτη, τότε καλείται η διαδικασία SLA(S_i, S_j)_Rejected η οποία επιστρέφει το σημείο του Παρόχου (ή όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, τον συγκεκριμένο Πάροχο εάν το μέλη του ζεύγους τοποθεσιών δεν βρίσκονται στο δίκτυο του ίδιου Παρόχου) πέρα από το οποίο δεν μπορεί να δοθεί ΣΕΥ, αλλά και τον λόγο για τον οποίο δεν μπορεί να δοθεί ΣΕΥ. Τα δύο στοιχεία αυτά σημείο και λόγος (point, reason) αποτελούν την είσοδο στην διαδικασία επαναδιαπραγμάτευσης (Negotiation Restart) η οποία επίσης θα εξηγηθεί λεπτομερώς παρακάτω.

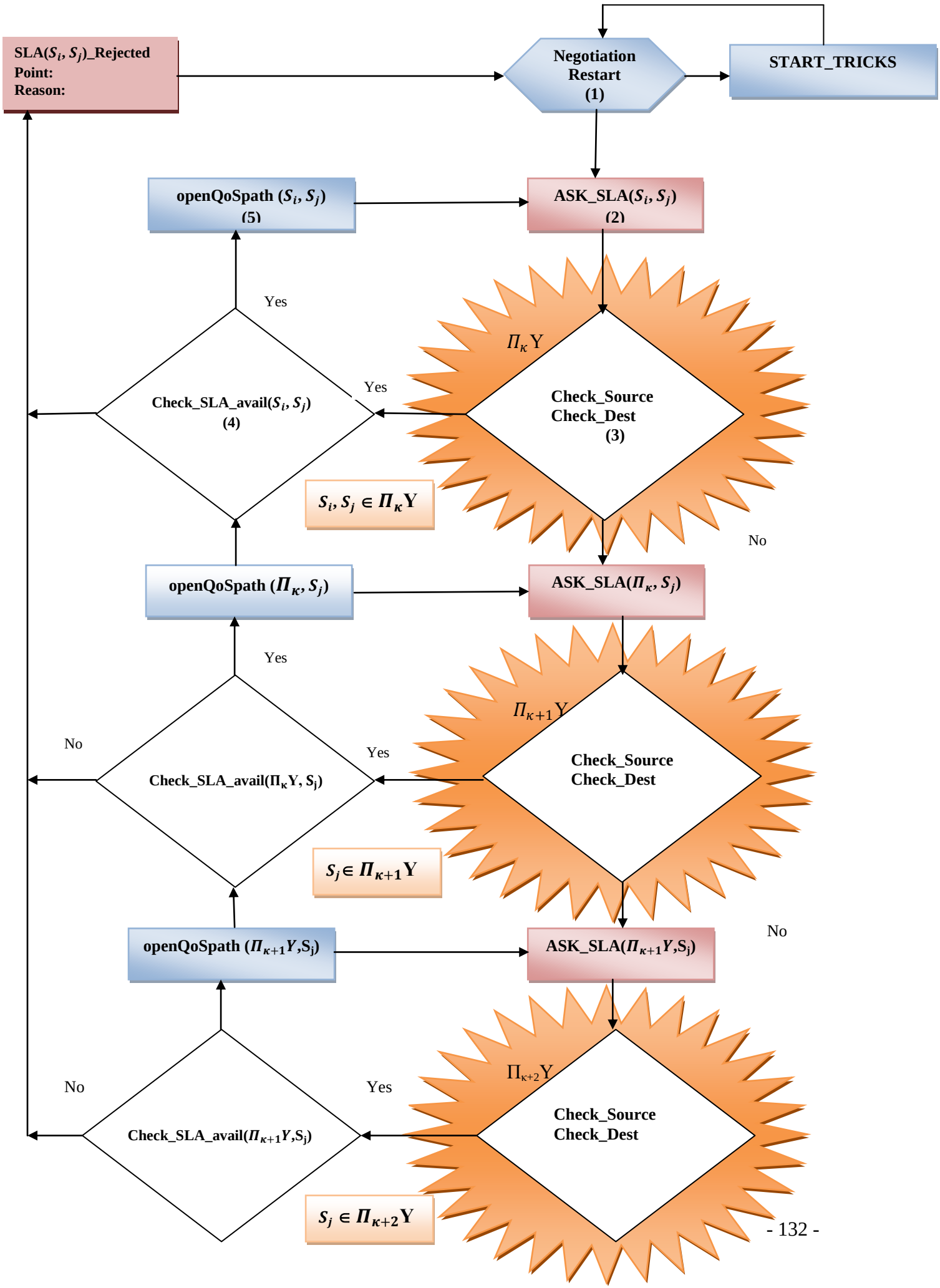
Στην περίπτωση που οι δύο τοποθεσίες δεν βρίσκονται στον ίδιο Πάροχο, μετά τον έλεγχο της δρομολόγησης, καλείται πάλι η λειτουργία ASK_SLA με ορίσματα τον τρέχοντα Πάροχο $\Pi_\kappa Y$ και την τοποθεσία S_j – δηλαδή ASK_SLA($\Pi_\kappa Y$, S_j). Ερωτάται δηλαδή ο επόμενος Πάροχος (ο Πάροχος του επόμενου άλματος $\Pi_{\kappa+1}Y$, next hop ISP) εάν μπορεί να δώσει ένα μονοπάτι με συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας μέχρι την τοποθεσία S_j . Η ζητούμενη τοποθεσία S_j μπορεί να βρίσκεται εντός του Παρόχου $\Pi_{\kappa+1}Y$ ή να μην βρίσκεται. Στην περίπτωση που η ζητούμενη τοποθεσία δεν είναι εντός του Παρόχου $\Pi_{\kappa+1}Y$ η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τον εντοπισμό της τοποθεσίας σε κάποιον από τους επόμενους Παρόχους.

Στην περίπτωση που η τοποθεσία βρίσκεται στον Πάροχο $\Pi_{\kappa+1}Y$ ανακαλείται η λειτουργία αναζήτησης μονοπατιού Check_SLA_avail(Π_κY, S_j), με τις απαιτούμενες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας με ορίσματα τον προηγούμενο Πάροχο $\Pi_\kappa Y$ σύμφωνα με τους Πίνακες δρομολόγησης και την ζητούμενη τοποθεσία. Εάν είναι δυνατή η εύρεση μονοπατιού, όπου ικανοποιείται η ΣΕΥ, τότε ανακαλείται η λειτουργία σύστασης μονοπατιού openQoSpath($\Pi_\kappa Y$, S_j) με ορίσματα τον προηγούμενο Πάροχο $\Pi_\kappa Y$ σύμφωνα με τους Πίνακες δρομολόγησης και την ζητούμενη τοποθεσία.

Εάν δεν είναι δυνατή η σύσταση μονοπατιού που να ικανοποιεί την επιθυμητή ΣΕΥ, τότε η λειτουργία απορρίψεως SLA(S_i, S_j)_Rejected αναφέρει τον λόγο (reason στο σχήμα), για τον οποίο δεν μπορεί να δοθεί ΣΕΥ μεταξύ των δύο τοποθεσιών. Επίσης αναφέρει και τον συγκεκριμένο Πάροχο (point στο σχήμα) που δεν μπορεί να δώσει τα επιθυμητά επίπεδα υπηρεσίας. Ο λόγος απορρίψεως της ΣΕΥ είναι ότι κάποια ή κάποιες από τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας είναι εκτός των ορίων που έχει ζητήσει ο Πελάτης. Αυτό δεν σημαίνει ότι τερματίζεται η προσπάθεια εξυπηρέτησης του Πελάτη, αλλά καλείται η διαδικασία επαναδιαπραγμάτευσης Negotiation_Restart. Η διαδικασία επαναδιαπραγμάτευσης με είσοδο τους λόγους και το σημείο απορρίψεως θα επιδιώξει την παροχή ΣΕΥ χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές (tricks) που θα αναλυθούν παρακάτω.

Στο σχήμα που ακολουθεί επιχειρείται μια περιγραφική σύνοψη των βημάτων του αλγορίθμου. Για την διευκόλυνση της σχηματικής αναπαράστασης, χωρίς βλάβη της

γενικότητας, χρησιμοποιούνται τρεις διαδοχικοί Πάροχοι Υπηρεσιών. Μετά το σχήμα επεξηγούνται περαιτέρω οι λειτουργίες του αλγορίθμου σε κάθε βήμα:


SLA(S_i, S_j)_Rejected
Point:
Reason:
Negotiation Restart (1)
START_TRICKS
openQoSpath (S_i, S_j) (5)
ASK_SLA(S_i, S_j) (2)
Yes
Check_SLA_avail(S_i, S_j) (4)
Yes
Π_κY
Check_Source
Check_Dest
(3)
$S_i, S_j \in \Pi_\kappa$Y
No
openQoSpath (Π_κ, S_j)
ASK_SLA(Π_κ, S_j)
Yes
No
Check_SLA_avail(Π_κY, S_j)
Yes
$\Pi_{\kappa+1}$Y
Check_Source
Check_Dest
$S_j \in \Pi_{\kappa+1}$Y
No
openQoSpath ($\Pi_{\kappa+1}$Y,S_j)
ASK_SLA($\Pi_{\kappa+1}$Y,S_j)
No
Check_SLA_avail($\Pi_{\kappa+1}$Y,S_j)
Yes
$\Pi_{\kappa+2}$Y
Check_Source
Check_Dest
$S_j \in \Pi_{\kappa+2}$Y

(1) Λειτουργία Negotiation Restart

Η λειτουργία Negotiation Restart αποτελείται από δύο επιμέρους υπολειτουργίες. Η πρώτη υπολειτουργία ενεργεί στην κανονική ροή του αλγορίθμου κάθε φορά που ζητείται ΣΕΥ μεταξύ νέου ζεύγους τοποθεσιών. Αρχικά γίνεται έλεγχος εάν πρόκειται για ζεύγος στο οποίο έχει ήδη ζητηθεί και ολοκληρωθεί η διαδικασία εύρεσης μονοπατιού που να ικανοποιεί την ζητούμενη ΣΕΥ. Τότε επιστρέφεται ένδειξη λάθους και δίνεται η ευκαιρία διορθώσεως.
Η δεύτερη υπολειτουργία πυροδοτείται από την SLA_Rejected (βλ. σχήμα ή/και παρακάτω). Τότε διακόπτεται η κανονική ροή του αλγορίθμου και δίνεται ο έλεγχος στην λειτουργία START_TRICKS η οποία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

(2) Λειτουργία ASK_SLA(S_i, S_j)

Η λειτουργία ASK_SLA(S_i, S_j) αναζητά για κάθε i, j (όπου το i και το j είναι θετικοί ακέραιοι με i ≠ j) ένα μονοπάτι από την τοποθεσία S_i στην τοποθεσία S_j μέσα στο δίκτυο του Παρόχου ή των Παρόχων, πάνω στο οποίο οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας έχουν συγκεκριμένη τιμή. Οι τιμές των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας καθορίζουν εάν μπορεί να δοθεί στον Πελάτη η επιθυμητή Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσιών. Περιορίζοντας για λόγους εύκολης παρακολούθησης του αλγορίθμου τις παραμέτρους σε καθυστέρηση (delay), διακύμανση καθυστέρησης (jitter) και ποσοστό χαμένων πακέτων ($packet\_loss$) έχουμε την παρακάτω αναζήτηση μονοπατιού στο οποίο θα ισχύουν οι περιορισμοί:

$$delay \leq t$$
$$jitter \leq T$$
$$packet\_loss \leq p$$

Η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης είναι χρονικοί περιορισμοί, ενώ το χάσιμο πακέτων είναι ποσοστό επί του συνολικού αριθμού μεταδιδόμενων πακέτων.
Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας δημιουργούν τον πίνακα Service Level Specification (SLS) ο οποίος αναζητεί από τον Πάροχο την συμμόρφωση σύμφωνα με το επίπεδο παροχής υπηρεσίας. Ο πίνακας SLS δεν έχει προκαθορισμένο μέγεθος, αλλά διαμορφώνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του Πελάτη. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν ο αλγόριθμος να χειριστεί οποιεσδήποτε παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας ζητούνται, χωρίς να περιορίζεται στις κλασικές τρεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Εάν η τοποθεσία S_j βρίσκεται σε διαφορετικό Πάροχο τότε αλλάζουν οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας γιατί επηρεάζονται από την παρεμβολή ενός ακόμη Παρόχου και γίνονται

$$delay_1 \leq t'_1$$
$$jitter_1 \leq T'_1$$
$$packet\_loss_1 \leq p'$$

Σύμφωνα με τις ιδέες που έχουν προκύψει από το πρόγραμμα IST MESCAL, σε αυτό το σημείο ο αρχικός πίνακας SLS του Πελάτη, οριζόμενος σαν cSLS (customer SLS) μετατρέπεται σε πίνακα SLS μεταξύ Παρόχων. Ο νέος αυτός πίνακας ακολουθώντας τον συμβολισμό του IST MESCAL ορίζεται σαν pSLS (provider SLS).

Σε αυτήν την περίπτωση όπως έχει ήδη αποδειχτεί οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας είναι πολύ πιο περιοριστικοί γιατί θα πρέπει συνολικά να εξυπηρετούνται οι αρχικοί περιορισμοί που έχει θέσει ο Πελάτης. Εάν μέχρι την τοποθεσία S_j παρεμβάλλονται κ Πάροχοι και σε κάθε Πάροχο υπάρχουν οι αντίστοιχες τιμές καθυστέρησης, διακύμανσης καθυστέρησης και χασίματος πακέτων τότε:

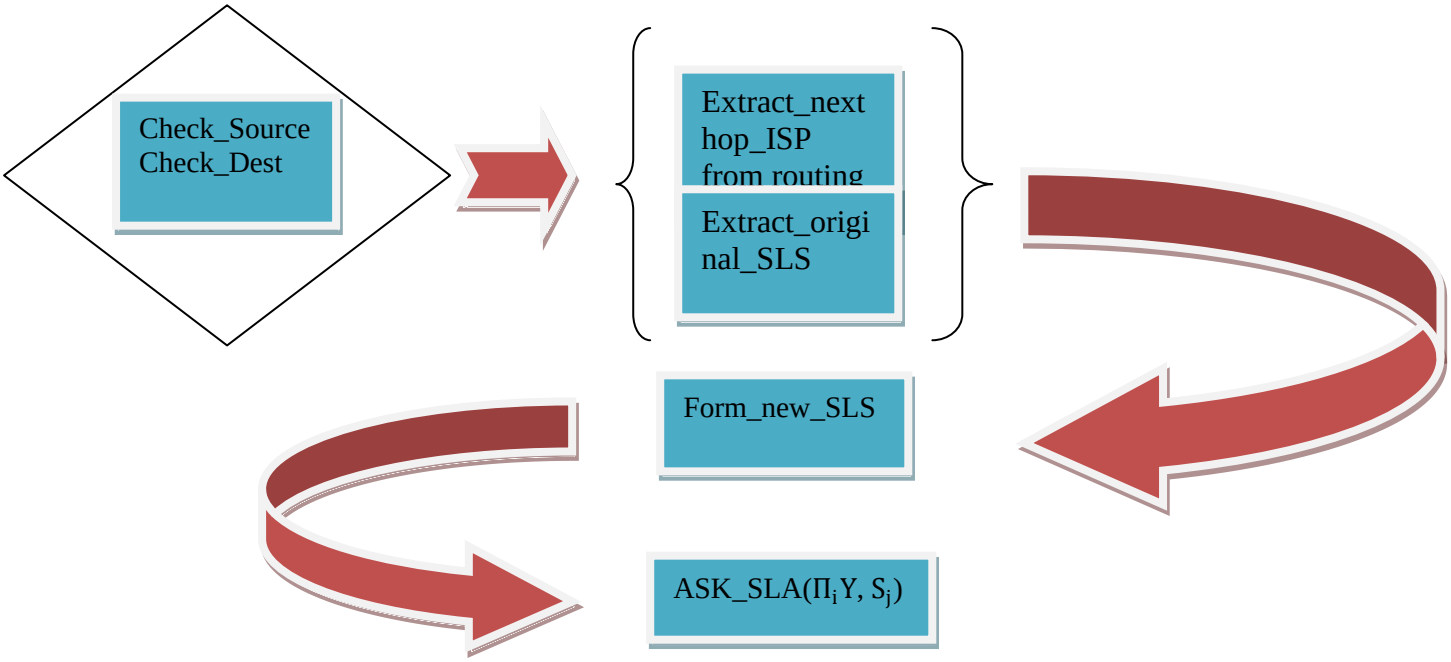
$$delay_1 + delay_2 + \cdots + delay_k \leq delay \leq t$$
$$jitter_1 + jitter_2 + \cdots + jitter_k \leq jitter \leq T$$
$$packet\_loss_1 * packet\_loss_2 * \ldots * packet\_loss_k \leq p$$

Δηλαδή σε κάθε επίκληση της λειτουργίας ASK_SLA(S_i, S_j) στον επόμενο κατά σειρά Πάροχο οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας αποκτούν ολοένα και πιο περιοριστικές τιμές. Αυτό συμβαίνει γιατί οι παράγοντες καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης επιδρούν αθροιστικά στο σύνολο, ενώ το χάσιμο πακέτων πολλαπλασιαστικά. Συνεπώς κάθε φορά ο επόμενος Πάροχος Υπηρεσιών είναι υποχρεωμένος να συμμορφωθεί ως προς ένα νέο πίνακα pSLS, με ακόμη πιο περιοριστικές τιμές από τον πίνακα που είχε λάβει ο προηγούμενος Πάροχος στην σειρά.
Εδώ μπορεί να φανεί η αξία υπολογισμού των μονοπατιών διασύνδεσης ξεχωριστά για κάθε ζεύγος τοποθεσιών. Εάν για παράδειγμα ένα άλλο ζεύγος τοποθεσιών του Πελάτη, έστω (S_k , S_m), βρίσκεται εντός του τρέχοντος Παρόχου $\Pi_{\kappa+1}$Υ, τότε για αυτό το ζεύγος ο τρέχων Πάροχος συμμορφώνεται ως προς πίνακα cSLS. Ταυτόχρονα για ένα άλλο ζεύγος τοποθεσιών (S_i, S_j) του Πελάτη ο ίδιος Πάροχος $\Pi_{\kappa+1}$Υ, αναγκάζεται να συμμορφωθεί ως προς πίνακα pSLS, εφόσον μέλος του ζεύγους (η και τα δύο μέλη του ζεύγους) δεν συνδέεται απ' ευθείας στο δίκτυο του, αλλά μέσω άλλου Παρόχου. Από τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας και το αποτέλεσμα που έχουν στην διαμόρφωση της γενικευμένης ποιότητας υπηρεσίας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για παράδειγμα η καθυστέρηση μεταξύ τοποθεσιών που βρίσκονται μέσα στο δίκτυο του τρέχοντος Παρόχου είναι μικρότερη από την καθυστέρηση μεταξύ τοποθεσιών που βρίσκονται σε διαφορετικά δίκτυα Παρόχων. Συνεπώς η συμμόρφωση ως προς πίνακα cSLS είναι ευκολότερη τεχνικά και πιο συμφέρουσα οικονομικά από την συμμόρφωση ως προς πίνακα pSLS.

(3) Λειτουργία Check_Source_Check_Dest

Η λειτουργία Check_Source_Check_Dest ελέγχει με κάθε κλήση που βρίσκονται οι τοποθεσίες του Πελάτη για τις οποίες απαιτείται συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσίας. Οι τοποθεσίες αυτές μπορεί να βρίσκονται εντός του δικτύου του ίδιου Παρόχου ή να βρίσκονται σε διαφορετικούς Παρόχους. Το που βρίσκονται εξάγεται από τους πίνακες δρομολόγησης. Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι ανεξάρτητη του πρωτοκόλλου δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που η τοποθεσία προορισμού (S_j) βρίσκεται σε άλλο Πάροχο τότε η λειτουργία επιστρέφει τον επόμενο Πάροχο (next hop Service Provider) σύμφωνα με τους πίνακες δρομολόγησης. Επειδή επιστρέφεται Πάροχος και όχι τοποθεσία, ο αλγόριθμος αφού ανακαλέσει τον πίνακα SLS του τρέχοντος βήματος σχηματοποιεί τον νέο πίνακα SLS με τον οποίο θα καλέσει την ASK_SLA, η οποία πλέον έχει ως ορίσματα τον τρέχοντα Πάροχο στην θέση της τοποθεσίας S_i και στον προορισμό συνεχίζει να έχει την τοποθεσία S_j.

Σχηματικά (όπου η τοποθεσία S_j προορισμού - Dest – βρίσκεται εκτός του τρέχοντος Παρόχου $\Pi_i Y$):



(4) Λειτουργία Check_SLA_avail(S_i, S_j)

Η λειτουργία Check_SLA_avail(S_i, S_j) ή η γενικότερη μορφή Check_SLA_avail(Π_κ, S_j) καλείται, αφού έχει διαπιστωθεί το που βρίσκονται οι τοποθεσίες, ώστε να γίνει έλεγχος για το εάν μπορεί να βρεθεί μονοπάτι που να ικανοποιεί την ζητούμενη ΣΕΥ μεταξύ των δύο τοποθεσιών. Ο έλεγχος μπορεί να βασιστεί σε μια τροποποίηση του αλγορίθμου MAR *[Maximum Availability Routing – P.Pongpaidbool, H.S Kim Computer Networks 46/2004]*, με ορίσματα τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας του πίνακα SLS. Ο αλγόριθμος στην μορφή της δημοσίευσης χρησιμοποιείται για να βρει εντός του ίδιου Παρόχου ένα πρωτεύον μονοπάτι οπτικών ινών με «αρκετό εύρος ζώνης» και «αρκετή διαθεσιμότητα» μεταξύ δύο σημείων του Παρόχου που χαρακτηρίζονται ως src (αφετηρία) και dst (προορισμός) . Οι παράμετροι SLA αντικαθιστούν τους περιορισμούς που δέχεται ως ορίσματα ο MAR ενώ τα ορίσματα αφετηρίας και προορισμού αντικαθίστανται από τις διευθύνσεις IP των τοποθεσιών.

Στην περίπτωση που το όρισμα src είναι Πάροχος, τότε το όρισμα αφετηρία παίρνει την διεύθυνση του αυτόνομου συστήματος (AS) που χαρακτηρίζει τον Πάροχο. Συνεπώς η λειτουργία Check_SLA_avail(S_i, S_j), εισάγει στον αλγόριθμο MAR τις ζητούμενες παραμέτρους και ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει το καλύτερο μονοπάτι που ενώνει τις δυο τοποθεσίες ή τον Πάροχο και την τοποθεσία. Ο αλγόριθμος χρειάζεται μικρή τροποποίηση ώστε να δέχεται επιπλέον παραμέτρους QoS, σύμφωνα με τον πίνακα SLS.

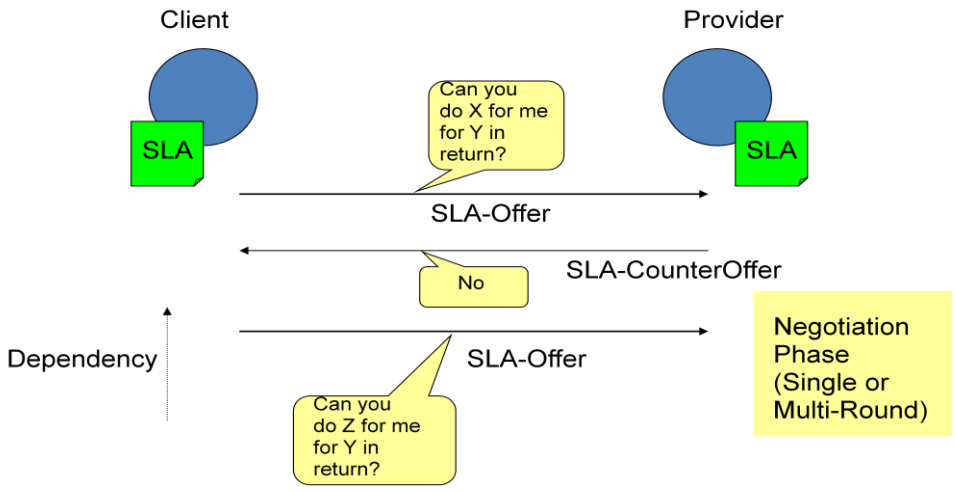
(5) Λειτουργία openQoSpath(S_i, S_J)

Η λειτουργία openQoSpath(S_i, S_j)ή η γενικότερη μορφή openQoSpath($\Pi_\kappa Y$, S_j) με ορίσματα τον προηγούμενο Πάροχο Πκ σύμφωνα με τους Πίνακες δρομολόγησης και την ζητούμενη τοποθεσία, καλείται για να ανοίξει ένα μονοπάτι διασύνδεσης ανάμεσα στα ορίσματά της. Η σύσταση του μονοπατιού μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις διαδικασίες του πρωτοκόλλου MPLS όπως περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (κεφ 2.1.3) ή μπορεί να γίνει μέσω Traffic Engineering ή και με συνδυασμό MPLS/TE. Στο μονοπάτι αυτό ισχύει η συμμόρφωση του Παρόχου ή των Παρόχων με την ζητούμενη ΣΕΥ, όπως έχει εξασφαλιστεί από την λειτουργία Check_SLA_avail($\Pi_\kappa Y$, S_j) στο προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου.

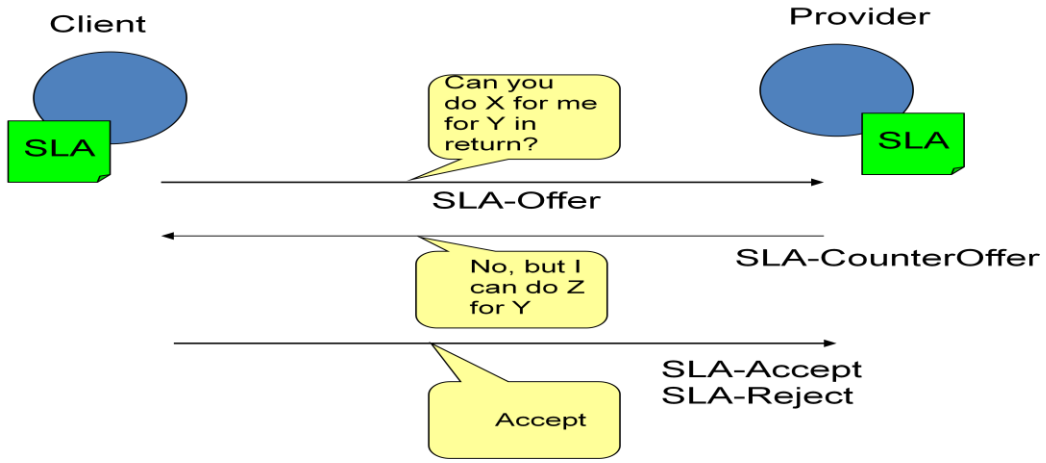
(6) Τεχνικές επαναδιαπραγμάτευσης Start_Tricks

Από την SLA(S_i, S_j)_Rejected μεταφέρεται ως πληροφορία ο λόγος και ο «τόπος» της απορρίψεως. Με βάση τον λόγο μπορεί ο Πελάτης να περιορίσει το επίπεδο υπηρεσίας που επιθυμεί και να ζητήσει νέα ΣΕΥ η οποία να είναι λιγότερη αυστηρή από την αρχική. Ένα ζήτημα που τίθεται σε αυτό το σημείο είναι το κατά πόσο θα επιμείνει ο Πελάτης στην επαναδιαπραγμάτευση των ΣΕΥ με τους Παρόχους.
Η επαναδιαπραγμάτευση μπορεί να περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους «γύρους» μέχρι να βρεθεί ικανοποιητική λύση για τα συμβαλλόμενα μέρη. Σε μια πιθανή παραλλαγή της λειτουργίας SLA(S_i, S_j)_Rejected ο Πάροχος που δεν μπορεί να συμμορφωθεί με συγκεκριμένη απαίτηση του Πελάτη παραθέτει αντιπροσφορά μαζί με τον λόγο και τον τόπο της απορρίψεως. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω η επαναδιαπραγμάτευση μπορεί να αρχικοποιείται είτε από τον Πελάτη είτε από τον Πάροχο.
Οι δύο αρχικοποιήσεις των διαπραγματεύσεων περιγράφονται σχηματικά παρακάτω σύμφωνα με Omer. F. Rana και έχει εισαχθεί ως παράμετρος το κόστος Y:

1η Περίπτωση – Ο Πελάτης υποχωρεί στις απαιτήσεις του



2η Περίπτωση – Ο Πάροχος προχωρά σε αντιπροσφορά:



Εάν με οποιαδήποτε από τις παραπάνω αρχικοποιήσεις επιτευχθεί συμφωνία τότε ο αλγόριθμος ξεκινάει πάλι ώστε να υλοποιηθεί τελικά το μονοπάτι ποιότητας υπηρεσίας -μέσω νέων παραμέτρων για τον πίνακα SLS- μεταξύ του ζεύγους τοποθεσιών και να υπολογιστεί το επίπεδο υπηρεσίας για όλα τα υπόλοιπα ζεύγη τοποθεσιών.

Πιο αναλυτικά τώρα για να επιτευχθεί συμφωνία μπορεί όπως έχει περιγραφεί να επιχειρηθεί από τον Πάροχο η αλλαγή των DSCP του Πελάτη, ώστε να ταιριάζουν με το υφιστάμενο μοντέλο εξυπηρέτησης της κίνησης του Παρόχου. Εάν το τίμημα που προσφέρει ο Πελάτης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό για τον Πάροχο, τότε προκειμένου να εξυπηρετηθεί η ΣΕΥ που επιθυμεί ο Πελάτης, είναι δυνατόν ο Πάροχος να καταφύγει σε δανεισμό εύρους ζώνης από άλλο Πάροχο. Πρακτικά η διασύνδεση συγκεκριμένου προβληματικού ζεύγους του Πελάτη για το οποίο ο τρέχων Πάροχος διαπιστώνει αδυναμία συμμόρφωσης προς ΣΕΥ, μπορεί να γίνει μέσω άλλου Παρόχου ο οποίος «δανείζει» με ανάλογο τίμημα εύρος ζώνης.

Ο Πελάτης μπορεί να ζητήσει στους όρους της ΣΕΥ να είναι ενήμερος για περιπτώσεις δανεισμού εύρους ζώνης ή μπορεί να περιοριστεί στην εξυπηρέτηση της ΣΕΥ με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, χωρίς να ενδιαφέρεται για τον τρόπο υλοποίησης από την αλυσίδα των Παρόχων. Ένας λόγος για τον οποίο ο Πελάτης ενδιαφέρεται πολλές φορές για τον τρόπο υλοποίησης είναι όταν απαιτεί δρομολόγηση του δικτύου από συγκεκριμένο φυσικό φορέα (π.χ οπτικές ίνες και όχι ασύρματες ζεύξεις). Σε τέτοια περίπτωση ο Πελάτης μπορεί να μην αποδεχτεί την εξυπηρέτηση της ΣΕΥ εάν αυτή γίνεται μέσω δανεισμού εύρους ζώνης από Πάροχο με διαφορετικό φυσικό φορέα από τον επιθυμητό.

Ο αλγόριθμος περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω με έμφαση στις επιμέρους λειτουργίες:

$\forall S_i, S_j \in$ ΠΕ, i∈ N, j ∈ N & i ≠j
Negotiation_Restart

Form SLS(S_i, S_j)

ASK_SLA(S_i, S_j)

Check_Source,Check_Dest

IF (S_i, S_j) ∈ Π_κY then Extract_SLS-params

Check_SLA_avail(S_i, S_j)

IF O.K then openQoSpath(S_i, S_j)

ELSE SLA(S_i, S_j)_Rejected

WHILE SLA(S_i, S_j)_Rejected

Negotiation Restart

Start Tricks

ELSE WHILE S_j **NOT FOUND**

Invoke_Routing_Tables

Extract_next_hop_ISP

Extract_original_SLS

Compose_new_SLS

ASK_SLA(Π_κY, S_j)

Check_Source,Check_Dest

Check_SLA_avail(Π_κY, S_j)

IF O.K then openQoSpath(Π_κY, S_j)

ELSE SLA(Π_κY, Sj)_Rejected

WHILE SLA(Π_κY, S_j)_Rejected

Negotiation Restart

Start Tricks

8. Συμπεράσματα – Προοπτικές

Στην παρούσα διατριβή εξετάσθηκαν σε βάθος θέματα Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσίας (ΣΕΥ) μεταξύ Πελατών και πολλαπλών Παρόχων. Οι ΣΕΥ αποτελούν πεδίο εφαρμογής συστάσεων της IEEE και της IETF, προκαλούν συνεχή ερευνητική εργασία και είναι το αντικείμενο χρηματοδοτούμενων προγραμμάτων στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ενώσεως.

Με την παρούσα εργασία προέκυψαν νέα στοιχεία για την αντιμετώπιση του προβλήματος παροχής της ποιότητας υπηρεσίας που απαιτεί ο Πελάτης από τους Παρόχους μέσω της Συμφωνίας Επιπέδου Υπηρεσίας.

Η απλή διασύνδεση Παρόχων μέσω πρωτοκόλλων TCP/IP σε ολοένα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεν μπορεί να εξασφαλίσει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας και συνεπακόλουθα την Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας που επιθυμεί ο Πελάτης.

Η συμμόρφωση με γενικούς μέσους όρους ποιότητας υπηρεσίας επιτρέπει τελικά την παραβίαση των ΣΕΥ μέσα σε ένα δυναμικά εξελισσόμενο δίκτυο Παρόχων. Για αυτό τον λόγο η διασύνδεση των τοποθεσιών του Πελάτη με επίπεδα υπηρεσιών αυστηρώς καθορισμένα μέσω ΣΕΥ προτείνεται να εξετάζεται πλέον για κάθε ζεύγος επικοινωνούντων τοποθεσιών ξεχωριστά.

Μετά τον επίμονο σχολιασμό λύσεων που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, χρησιμοποιήθηκαν επιμέρους στοιχεία από άλλες ερευνητικές εργασίες και προγράμματα για να συμβάλλουν στην διαμόρφωση ενός αλγόριθμου δημιουργίας και ελέγχου των ΣΕΥ.

Άρα συνοψίζοντας τελικά η συμβολή της παρούσας διατριβής είναι η ακόλουθη:

- Καταδείχτηκαν οι αδυναμίες των μέχρι τώρα θεωρήσεων και υλοποιήσεων.
- Δημιουργήθηκε ένας νέος μηχανισμός – αλγόριθμος για την αντιμετώπιση των ΣΕΥ μεταξύ Πελάτη και πολλαπλών Παρόχων Υπηρεσιών.

Ο αλγόριθμος θα μπορούσε με μικρές τροποποιήσεις όπως έχει ήδη ειπωθεί να βρίσκει όλα τα μονοπάτια μεταξύ των τοποθεσιών που ισχύει η ΣΕΥ. Στην συνέχεια με την χρήση κατάλληλου πρωτοκόλλου (π.χ MPLS) να αναλαμβάνει την προώθηση της κίνησης πάνω από όλα τα μονοπάτια εξασφαλίζοντας ότι ισχύει η ΣΕΥ.

Σε πιθανή επέκταση θα μπορούσε να συμπεριληφθούν απαιτήσεις του Πελάτη ορισμένες σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια. Για παράδειγμα ο Πελάτης μπορεί να επιθυμεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης ή διαφορετικά επίπεδα υπηρεσίας σε συγκεκριμένες ώρες/μέρες/μήνες ανάλογα με τις ανάγκες διασύνδεσης των τοποθεσιών. Οπότε στον πίνακα SLS τοποθετούνται χρονικά εξαρτημένες παράμετροι και τότε η εύρεση των μονοπατιών εξυπηρέτησης γίνεται δυσκολότερη. Η εισαγωγή του χρόνου ως παραμέτρου μαζί με διαφορετικά επίπεδα υπηρεσίας ανά χρονική στιγμή μπορεί να προκαλεί νέο υπολογισμό μονοπατιών που να διαφέρουν ανάλογα με την χρονική στιγμή και τις υπηρεσίες που απαιτούνται.

Ο αλγόριθμος παρουσιάστηκε στην περίπτωση που απαιτείται Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας μεταξύ Πελάτη και <u>ομοειδών</u> Παρόχων Υπηρεσιών (όλοι είναι Πάροχοι

Υπηρεσιών IP). Μένει να εξεταστεί μελλοντικά η σχέση των ΣΕΥ του Πελάτη με τις ΣΕΥ μεταξύ μη ομοειδών Παρόχων (π.χ μεταξύ του Παρόχου Υπηρεσιών IP και του Παρόχου του οπτικού δικτύου). Πως τελικά οι απαιτήσεις συγκεκριμένου Πελάτη μπορούν να επηρεάσουν την ΣΕΥ μεταξύ ενός Παρόχου Περιεχομένου, ενός Παρόχου υπηρεσιών IP και τέλος ενός Παρόχου Φορέα;

Η υλοποίηση του αλγορίθμου μπορεί να γίνει με κλασικούς τρόπους (προγραμματισμός μέσω μηνυμάτων πρωτοκόλλων και με την χρήση εξυπηρετητών ΣΕΥ ανά Πάροχο Υπηρεσιών) ή με πλέον επαναστατικούς τρόπους (πράκτορες, θεωρία σμήνους).

Παραρτήματα – Γλωσσάριο - Βιβλιογραφία