

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη Εργαλείου Διασύνδεσης
Πολλαπλών Απομακρυσμένων και
Ετερογενών Ασύρματων Δικτύων με το
Διαδίκτυο**

Συγγραφέας

Ηλίας Γ. Ρίνης

Επιβλέπων

Καθ. Παύλος Σπυράκης

Συνεπιβλέπων

Δρ. Ιωάννης Χατζηγιαννάκης

ΠΑΤΡΑ, 2009

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	7
1.1 Πληροφορική και Δίκτυα Υπολογιστών	7
1.2 Ασύρματα Δίκτυα	8
1.2.1 Τα Ασύρματα Δίκτυα WiFi	10
1.2.2 Τα Ασύρματα Δίκτυα WiMAX	11
1.3 Συνάθροιση Πολλαπλών Συνδέσμων (Multihoming)	13
1.4 Περίγραμμα Διπλωματικής Εργασίας	16
2 Multihoming και Εφαρμογές	17
2.1 Το Σύστημα PERM	17
2.1.1 Περιγραφή του Συστήματος	18
2.1.2 Μοντελοποίηση Δικτυακής Κυκλοφορίας	21
2.1.3 Υβριδική Δρομολόγηση Ροών	27
2.1.4 Υλοποίηση του PERM	29
2.1.5 Αξιολόγηση των επιδόσεων	30
2.1.6 Συμπεράσματα	34
2.2 Μια Πειραματική Ανάλυση του Multihoming	36
2.2.1 Εισαγωγή	36
2.2.2 Multihoming για Επιδόσεις	37
2.2.3 Η Οπτική των Επιχειρήσεων	40
2.2.4 Η Οπτική ενός Web Server	44
2.2.5 Αξιοπιστία	46
2.2.6 Συμπεράσματα	48

2.3 Άλλες Εφαρμογές Συνάθροισης Πολλαπλών Συνδέσμων	49
3 Η Πλατφόρμα JXTA	51
3.1 Συστήματα Ομοτίμων	51
3.1.1 Γενικά	51
3.1.2 Δομή και Αρχιτεκτονική	52
3.1.3 Μερικά Παραδείγματα	53
3.1.4 Τα μειονεκτήματα	54
3.2 Η JXTA	55
3.2.1 Επισκόπηση	55
3.2.2 Βασικές Έννοιες και Τεχνολογίες	56
3.2.3 Το Σύνολο Πρωτοκόλλων	60
3.2.4 Προγραμματισμός με την υλοποίηση της JXTA σε Java	63
4 Το Σύστημα p2pInet	71
4.1 Εισαγωγή	71
4.2 Περιγραφή της Αρχιτεκτονικής	72
4.3 Οι Λειτουργικές Μονάδες	76
4.3.1 Η Μονάδα Proxy	76
4.3.2 Η Μονάδα Δικτύου (Network Manager)	78
4.3.3 Η Μονάδα Παρακολούθησης (Network Monitor)	79
4.3.4 Η Μονάδα Δρομολόγησης (Scheduler)	81
4.4 Πειραματική Αξιολόγηση	83
4.4.1 Η Τοπολογία του Δικτύου για τα Πειράματα	83
4.4.2 Περιγραφή της Κυκλοφορίας των Πειραμάτων	84
4.4.3 Πειραματική Ανάλυση του Proxy	85
4.4.4 Πειραματική Ανάλυση του Συστήματος p2pInet	87
5 Επίλογος	97
5.1 Συμπεράσματα	97
5.2 Μελλοντική Έρευνα	98

5.2.1 Το μητροπολιτικό δίκτυο Patras Wireless.	99
--	----

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πληροφορική και Δίκτυα Υπολογιστών

Η *Επιστήμη της Πληροφορικής* είναι ίσως η νεότερη επιστήμη, με όχι παραπάνω από 100 χρόνια ζωής, η οποία χαρακτηρίζεται και με την πιο ραγδαία πλέον ανάπτυξη. Οι εξελίξεις στην Πληροφορική των τελευταίων χρόνων εντοπίζονται σε πολυπληθή ερευνητικά αντικείμενα, όχι μόνο γύρω από την πληροφορική ως τη λογική της πλευρά, αλλά και στον τομέα του Υλικού των υπολογιστών και στο πιο θεωρητικό επίπεδο των Εφαρμογών και Θεμελιώσεων της Πληροφορικής. Ιδιαίτερα, στις αρχές της δεκαετίας του '70, ένα μεγάλο κομμάτι της Πληροφορικής εμφανίστηκε και άρχισε να αναπτύσσεται, το οποίο μέχρι σήμερα έχει σηματοδοτήσει όχι μόνο την Πληροφορική αλλά και πολλές ακόμη επιστήμες και πλευρές της ζωής του ανθρώπου: τα Δίκτυα Υπολογιστών, και το σημαντικότερο όλων, το Internet.

Σε πρώτη μορφή, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είχαν εμφανιστεί πολύ πριν τους υπολογιστές, και έτσι η ιδέα εφαρμογής της διασύνδεσης σε δίκτυο υπολογιστικών μονάδων δεν ήταν καινούρια. Αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς, μιας και ανέκαθεν μεγάλο κομμάτι του κεφαλαίου ενός έθνους αφιερωνόταν σε στρατιωτικές επενδύσεις, και στην πορεία για οικονομικούς, εκπαιδευτικούς και πλέον για κοινωνικούς και προσωπικούς σκοπούς. Έτσι, τα δίκτυα υπολογιστών ήταν μια τεχνολογία, μια ιδέα η οποία είχε εδραιωθεί πριν καν αναπτυχθεί τόσο ώστε η χρησιμότητά της να είναι προφανής. Με την τεχνολογική ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών, σιγά σιγά έγινε εφικτή η κατασκευή όλο και μεγαλύτερων δικτύων και, παράλληλα με την ανάπτυξη της πληροφορικής και την εισαγωγή στην *κοινωνία της*

Πληροφορίας, όλα έδειχναν και δείχνουν πως κατευθυνόμαστε στη δικτύωση όσο το δυνατόν περισσότερων οντοτήτων μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα είναι ότι ήδη έχει εμφανιστεί μια μεγάλη σειρά από ετερογενή μεταξύ τους δίκτυα υπολογιστών, τα οποία διαφοροποιούνται τόσο στον τρόπο διασύνδεσης και στις οντότητες που διασυνδέονται όσο και στην τοπολογία, λειτουργία, χρησιμότητα, αξιοπιστία, και μια μεγάλη ακολουθία από άλλα χαρακτηριστικά. Ένα μεγάλο κομμάτι αυτών των δικτύων, ανεξαρτήτου σκοπού και λειτουργίας, είναι συνυφασμένο και με τη σύνδεση με το Internet.

Η δημοφιλέστερη σήμερα μορφή τηλεπικοινωνιών είναι οι *Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες*. Είναι προφανές ότι η δυνατότητα διασύνδεσης χωρίς φυσικά μέσα είναι το χαρακτηριστικό που έχει κάνει τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες τόσο ελκυστικές, καθώς οι περιορισμοί χρησιμοποίησης μειώνονται δραματικά, και οι δυνατότητες για τη χρήση και εφαρμογή των δικτυακών τεχνολογιών αυξάνονται. Πλέον, η χρήση της τεχνολογίας των ασύρματων τηλεπικοινωνιών εκτείνεται από ένα σπίτι και ένα μικρό οικιακό δίκτυο, μέχρι ένα παγκόσμιο δορυφορικό δίκτυο, όπως το Global Positioning System (GPS). Αυτό και μόνο το γεγονός είναι ικανό να δείξει τη δύναμη της τεχνολογίας αυτής.

Η χρήση των ασύρματων τηλεπικοινωνιών έχει καταστήσει δυνατή τη διαχείριση και διακίνηση τεράστιου όγκου πληροφοριών, που σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της Πληροφορικής έχει δώσει πολύ σημαντικά επιτεύγματα για την Επιστήμη και την ανθρωπότητα. Τα χαρακτηριστικότερα ίσως εξ αυτών είναι τα *Ασύρματα Δίκτυα WiFi* (wireless fidelity - δίκτυα προσωπικών υπολογιστών, PDA, κινητών τηλεφώνων και άλλων συσκευών συνδεδεμένα με το Internet), καθώς και τα *Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων*. Τα συστήματα αυτά βρίσκουν σήμερα εφαρμογή σε πολλούς τομείς της επιστήμης, της βιομηχανίας, ακόμη και της καθημερινότητας.

1.2 Ασύρματα Δίκτυα

Ο όρος *Ασύρματα Δίκτυα* αναφέρεται σε οποιαδήποτε μορφή δικτύου υπολογιστών που είναι ασύρματο, και πολύ συχνά είναι συνυφασμένος με ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο όπου οι διασυνδέσεις μεταξύ των συνδεδεμένων κόμβων υλοποιούνται δίχως φυσικά μέσα. Αυτή η υλοποίηση συνήθως γίνεται με χρήση κάποιου συστήματος μετάδοσης πληροφορίας το οποίο

βασίζεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα Ασύρματα Δίκτυα πλέον τα συναντά κανείς σε διάφορες μορφές, που κατηγοριοποιούνται ως ακολούθως:

Wireless Personal Area Networks (WPAN) Τα Ασύρματα Δίκτυα Προσωπικής Εμβέλειας διασυνδέουν συσκευές σε πολύ μικρή περιοχή, συνήθως γύρω από μερικά άτομα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα WPA Δικτύων είναι τα *Bluetooth* και *ZigBee* δίκτυα.

Wireless Local Area Networks (WLAN) Ασύρματα Δίκτυα Περιορισμένης Έκτασης. Αυτή η τεχνολογία δικτύων χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τη μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε υπολογιστικές μονάδες σε μια μικρή περιοχή, όπως ένα σχολείο ή μια εταιρία. Το πιο γνωστό παράδειγμα τέτοιων δικτύων είναι τα WiFi (**w**ireless **f**idelity), τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο όσων υπολογιστικών μονάδων βρίσκονται εντός εμβέλειας των ραδιοκυμάτων και έχουν το κατάλληλο υλικό εγκατεστημένο. Συνήθως, η κατασκευή ενός τέτοιου δικτύου συμπεριλαμβάνει και τη σύνδεση του δικτύου (και όσων μονάδων συμμετέχουν) με το Ίντερνετ.

Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN) Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα. Τα WMA δίκτυα εκτείνονται σε μεγαλύτερη περιοχή από ότι μερικά WLAN και έχουν το χαρακτηριστικό ότι συνδέουν WLA δίκτυα μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα μεγαλύτερο. Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στα WMAN είναι τα WiMAX δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, και ήδη έχουν κάνει την εμφάνισή τους και στη χώρα μας.

Mobile Devices Networks Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των “Έξυπνων Τηλεφώνων” (Smart Phones), τα δίκτυα κινητών τηλεφώνων έχουν αναπτυχθεί στο σημείο όπου πλέον χρησιμοποιούνται και για τη μεταφορά δεδομένων όπως και στα προαναφερθέντα δίκτυα, εκτός από τις τηλεφωνικές συνομιλίες.

Wireless Sensor Networks (WSN) Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Πρόκειται για μια μορφή ασύρματου δικτύου, όπου το δίκτυο συντίθεται από αυτόνομες συσκευές, καταναλισκόμενες στο χώρο με διάφορους τρόπους, οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες για τη συνεργατική παρακολούθηση φυσικών και περιβαλλοντικών συνθηκών σε ένα χώρο, όπως θερμοκρασίας, πίεσης, θορύβου, κίνησης, παραγόντων μόλυνσης. Μια τέτοια συσκευή εκτός από αισθητήρες, είναι εξοπλισμένη και με υλικό κατάλληλο για ασύρματη

μετάδοση των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης, προς τους υπόλοιπους αισθητήρες, και πολλές φορές προς ένα Σταθμό Συγκέντρωσης (ή Gateway Station) όπου τα δεδομένα συναθροίζονται και επεξεργάζονται. Τα δίκτυα αυτά πλέον βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές. Μερικές από τις σημαντικότερες περιλαμβάνουν, *παρακολούθηση περιβάλλοντος, εντοπισμός αντικειμένων, έλεγχος πυρηνικών αντιδραστήρων, εντοπισμός πυρκαϊών, παρακολούθηση κίνησης στους δρόμους*.

1.2.1 Τα Ασύρματα Δίκτυα WiFi

Η ονομασία WiFi περιγράφει την τεχνολογία των ασύρματων δικτύων τοπικής εμβέλειας (Wireless Local Area Networks - WLANs), τα οποία τυποποιούνται στο πρότυπο της IEEE 802.11[2]. Στα ασύρματα δίκτυα WiFi έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται συσκευές νέας τεχνολογίας που αξιοποιούν τη σύνδεση στο διαδίκτυο, όπως προσωπικοί υπολογιστές, έξυπνα κινητά τηλέφωνα, PDAs και άλλες και βρίσκονται εντός εμβελείας κάποιου WiFi δικτύου. Η περιοχή που καλύπτεται από ένα ή περισσότερα Access Points (και καλείται hotspot, μπορεί να καταλαμβάνει από ένα μικρό δωμάτιο μέχρι μιας έκτασης πολλών τετραγωνικών μιλίων με χρήση παραπάνω από ενός, αλληλοκαλυπτόμενων και συνδεδεμένων Access Points, χωρίς έτσι να περιορίζεται σε μικρούς και κλειστούς χώρους. Πλέον, πολλές εμπορικές επιχειρήσεις ή υπηρεσίες προσφέρουν συνδεσιμότητα σε WiFi δίκτυα για εξυπηρέτηση των πελατών τους. Πλέον όλες οι ευρυζωνικές συνδέσεις συνοδεύονται από ένα router με δυνατότητα εκπομπής WiFi δικτύου, και όλοι οι φορητοί υπολογιστές είναι εφοδιασμένοι με το κατάλληλο υλικό για σύνδεση σε WiFi δίκτυα.

Πέρα από το σαφές πλεονέκτημα της ασύρματης συνδεσιμότητας που παρέχει το WiFi, το γεγονός της ευρείας κυκλοφορίας πλέον συσκευών που υποστηρίζουν σύνδεση σε ένα WiFi δίκτυο, οφείλεται στη διαρκή πτώση του κόστους του απαραίτητου υλικού. Εκτός αυτού, μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί η οικουμενικότητα που χαρακτηρίζει τις συσκευές αυτές και τα δίκτυα: μια συσκευή με δυνατότητα σύνδεσης σε WiFi, θα μπορεί να συνδεθεί σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου και να βρίσκεται το δίκτυο αυτό.

Η τεχνολογία των WiFi προσδίδει και περιορισμούς όμως στη χρήση τους. Αυτό οφείλεται ανά περιοχές στη διαθεσιμότητα των καναλιών της ζώνης συχνοτήτων. Έτσι στην Ευρώπη, στη συχνότητα των 2.4GHz τα επιτρεπόμενα κανάλια εκπομπής είναι 13, ενώ στην Αμερική

είναι 11 και στην Ιαπωνία 14. Αυτό ενδεχομένως περιορίζει τη χρήση κάποιων καναλιών σε χρήστες που μετακινούνται διότι το σήμα ενός WiFi δικτύου καταλαμβάνει 5 κανάλια και ενδεχομένως να υπάρχει επικάλυψη σε δίκτυα διαφορετικών χωρών.

Μιας και τα WiFi δίκτυα αποτελούν κατηγορία των WLANs, είναι αναμενόμενο ότι η εμβέλειά τους θα είναι μικρή. Ένα τυπικό router για οικιακή και ατομική χρήση, με την εργοστασιακή του κεραία παρέχει κάλυψη σε μια περιοχή διαμέτρου 32 μέτρων σε κλειστούς χώρους και 95 μέτρων σε ανοιχτούς (η διαφορά είναι ότι σε εξωτερικούς χώρους τα εμπόδια που αλλοιώνουν το σήμα εκλείπουν). Στην πιο πρόσφατη όμως ενημέρωση του προτύπου, την 802.11n παρέχεται έως και διπλάσια εμβέλεια σήματος. Ας σημειωθεί εδώ ότι μέσα στην περιοχή κάλυψης δεν υπάρχει αξιοσημείωτη υποστήριξη σε συσκευές που βρίσκονται σε κίνηση. Όσον αφορά στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων πάνω σε ένα WiFi, τα πρωτόκολλα μέχρι και το 802.11g παρέχουν έναν τυπικό ρυθμό 22-27Mbit/sec. Στο πιο πρόσφατο όμως πρωτόκολλο 802.11n, το οποίο όμως ακόμη δεν έχει υλοποιηθεί πλήρως, ο τυπικός ρυθμός μετάδοσης φθάνει μέχρι και τα 144Mbit/sec.

Λόγω της ευρείας χρήσης του WiFi από επιχειρήσεις, υπηρεσίες και ιδιώτες, ένα ζήτημα που ενδιαφέρει τους πάντες είναι η ασφάλεια των δικτύων. Αρχικά, η μέθοδος WEP¹ φαινόταν αρκετή, όμως στην πορεία φάνηκε εύκολα παραβιάσιμη και ανασφαλής. Οι τεχνολογίες όμως που ακολούθησαν, WPA, WPA2², μέχρι στιγμής παρέχουν αρκετή ασφάλεια, με καθορισμό προσωπικού κλειδιού για σύνδεση στο δίκτυο.

1.2.2 Τα Ασύρματα Δίκτυα WiMAX

Η ονομασία WiMAX προέρχεται από τη φράση *Worldwide Interoperability for Microwave Access*. Όπως δηλώνει και η ονομασία, πρόκειται για μια τεχνολογία αιχμής ασύρματης μετάδοσης δεδομένων με χρήση μικροκυμάτων. Η τεχνολογία αυτή έχει τυποποιηθεί υπό το πρότυπο IEEE 802.16[3]. Το WiMAX χρησιμοποιείται ήδη ευρέως για την παροχή υψηλού επιπέδου υπηρεσιών διαδικτύου σε μεγάλες αστικές περιοχές. Οι διαφορές με το WiFi είναι πολλές και σημαντικές.

Το WiMAX σε αντίθεση με τον προκάτοχό του, χρησιμοποιεί φασματική εκπομπή σή-

¹Wired Equivalent Privacy

²WiFi Protected Access

ματος, πράγμα το οποίο δίνει τη δυνατότητα, με διάφορους τύπους πρόσβασης, παροχής υπηρεσιών τόσο σε σταθερές όσο και σε κινητές συσκευές. Εκεί οδηγούνται ούτως ή άλλως οι τεχνολογίες δικτύων δεδομένων, καθώς ήδη πλησιάζουμε στην τέταρτη γενιά (4G). Το φάσμα αυτό είναι νομιμοποιημένο, κάτι που στο WiFi δεν ίσχυε λόγω της ευρείας χρήσης του από απλούς χρήστες και τη μικρή κλίμακα κάλυψης.

Οι υπηρεσίες παρέχονται με διαφορετικό τρόπο στο WiMAX, από ότι στο WiFi. Στο WiMAX η παροχή των υπηρεσιών βασίζεται στη σύνδεση ανάμεσα στο σταθμό εκπομπής και στη συσκευή του χρήστη, και στους αλγόριθμους δρομολόγησης που την πλαισιώνουν. Στο WiFi όμως, οι υπηρεσίες βασίζονται στην ανταλλαγή πακέτων και στη ρύθμιση των προτεραιοτήτων τους.

Η ακτίνα εκπομπής του WiMAX αγγίζει τα 50 χιλιόμετρα σε ακτίνα από το σημείο εκπομπής, κάτι αναμενόμενο μιας και πρόκειται για μητροπολιτικό δίκτυο. Η ακτίνα εκπομπής όμως στο WiMAX έχει μεγάλο αντίκτυπο στο ρυθμό δυαδικών σφαλμάτων (bit error rate), και έτσι όσο η ακτίνα πλησιάζει τα 50 χιλιόμετρα, τόσο ο ρυθμός σφαλμάτων ανεβαίνει και η ρυθμαπόδοση φθίνει. Οι πιο μεγάλες τιμές ρυθμαπόδοσης που έχουν παρατηρηθεί μέχρι σήμερα αγγίζουν τα 40Mbit/sec. Στις περιπτώσεις παροχής υπηρεσιών σε κινητές συσκευές, οι σημερινές εγκαταστάσεις απαιτούν ένα σταθερό σημείο εκπομπής (κεραία), το οποίο καλύπτει αποστάσεις της τάξης των 10χλμ, κάτι το οποίο σε τυπικές περιπτώσεις παρέχει ρυθμαπόδοση της τάξης των 1-2Mbit/sec σε κινητές συσκευές. Λόγω όλων αυτών των θεμάτων, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε στάδιο διερεύνησης των κατάλληλων δικτυακών αρχιτεκτονικών για να αποδώσει πλησιέστερα στο εύρος των δυνατοτήτων της, κάτι το οποίο με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις αγγίζει τα όρια ρυθμαπόδοσης του 1Gbit/sec.

Σε σχέση με ανταγωνιστικές τεχνολογίες, το πλεονέκτημα του WiMAX είναι ότι βρίσκεται περίπου στη μέση της διελκυστίνδας ανάμεσα σε υψηλές ταχύτητες και σε παροχή υπηρεσιών υπό κίνηση. Όπως είναι αναμενόμενο, προς το άκρο της ταχύτητας βρίσκεται το WiFi, ενώ περισσότερο προς το άκρο της κινητικότητας από ότι το WiMAX, βρίσκονται οι τεχνολογίες HSPA³, UMTS⁴, GSM. Η γνωστή στους περισσότερους GSM, είναι το *Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (Global System for Mobile Telecommunications)* το οποίο

³High Speed Packet Access

⁴Universal Mobile Telecommunications System

χρησιμοποιείται από τα κινητά τηλέφωνα.

Για περαιτέρω πληροφορίες σχετικά τόσο με τις τεχνολογίες WiFi και WiMAX, όσο και για άλλα παρόμοια πρότυπα δικτύων, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [1].

1.3 Συνάθροιση Πολλαπλών Συνδέσμων (Multihoming)

Όπως έχει προαναφερθεί, στην εποχή μας ο τομέας των δικτύων υφίσταται ραγδαίες εξελίξεις μέρα με τη μέρα, και διαρκώς αναδύονται νέες τεχνολογίες και βελτιώσεις για τις ήδη υπάρχουσες πάνω στην αξιοπιστία και ποιότητα των υπηρεσιών. Οι ταχύτητες σύνδεσης στο Internet πλέον έχουν περάσει στο επίπεδο της *Ευρείας Ζώνης Σύνδεσης*, ή *Broadband Connection*. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία παρόχων ψηφιακών συνδέσεων (*Digital Subscriber Line - DSL*) που προσφέρουν τη δυνατότητα για διαρκή, αξιόπιστη και γρήγορη σύνδεση στο Internet. Αυτό για τα ελληνικά δεδομένα είναι πολύ σημαντικό, καθώς μέσα σε διάστημα 5 ετών, περάσαμε από τη χρήση συνδέσεων μέσω τηλεφώνου σε ψηφιακές, γρήγορες συνδέσεις, που όχι μόνο έγιναν διαθέσιμες για τους απλούς χρήστες, αλλά έφτασαν ήδη στο άνω όριο του δυναμικού τους. Εκτός από οικιακή χρήση, πλέον πανεπιστήμια, σχολεία, νοσοκομεία, ερευνητικά κέντρα, αλλά και επιχειρήσεις και υπηρεσίες, χρησιμοποιούν τέτοιες συνδέσεις για τη βελτίωση της λειτουργίας τους. Είναι γεγονός πλέον ότι περιστοιχιζόμαστε από πολυάριθμα ασύρματα αλλά και ενσύρματα δίκτυα, τα οποία με συνδέσεις ευρείας ζώνης διασυνδέονται τελικά και με το Internet. Αυτή η πραγματικότητα ήταν και η ελατήρια δύναμη για την αξιοποίηση και τη μεταφορά στο επόμενο επίπεδο όλων αυτών των δικτύων.

Μια στατιστική μελέτη από τους δημιουργούς του *SpeedTest.net* (σύνδεσμος <http://www.speedtest.net>) δείχνει την ποιότητα των ευρυζωνικών συνδέσεων στην Ελλάδα:

ΠΑΡΟΧΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ (Mbps)
Ελληνικό Δημόσιο	14.13
Τεχνολογία και Εκπαίδευση	12.22
Ακαδημαϊκά και Ερευνητικά Κέντρα	11.89

Η ίδια μελέτη βέβαια δείχνει ότι πανευρωπαϊκά βρισκόμαστε στην 23η θέση, κάτι που δείχνει πόσα περιθώρια ανάπτυξης υπάρχουν.

Πέρα από την εξέλιξή της και την υψηλή αποδοτικότητά της, η ευρυζωνική σύνδεση

στο Internet έχει και μερικά ακόμη ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Λόγω της ψηφιακής σύνδεσης, ανεξαρτητοποιημένης από τηλεφωνικές κλήσεις, μια ευρυζωνική σύνδεση είναι διαρκώς ενεργή, χωρίς να γίνονται αποσυνδέσεις, αφού η ψηφιακή γραμμή είναι αφιερωμένη σε αυτή τη σύνδεση. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι κατά μέσο όρο, μια τέτοια σύνδεση θα είναι με μεγάλη πιθανότητα ανενεργή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Πέρα από τη φύση της σύνδεσης, αν κανείς παρατηρήσει τη λειτουργία του λογισμικού που χρησιμοποιεί τη συνδεσιμότητα, θα δει πως κάθε σύνδεση προς το Internet δύσκολα μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές ροές προς το Internet. Με την έννοια *ροή* περιγράφεται μια εγκαθίδρυση ζεύγους αποστολής-λήψης δεδομένων (ή και αντίστροφα) προς κάποιον απομακρυσμένο (δικτυακά) προορισμό. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι όταν ένας χρήστης εργάζεται στον Παγκόσμιο Ιστό, ή χρησιμοποιεί κάποιο σύστημα Ομοτίμων, περιορίζονται οι δυνατότητες να εργαστεί και σε κάτι άλλο.

Η ύπαρξη αυτής της πληθωρικής ποικιλίας συνδέσεων προς το Internet, καθώς και των χαρακτηριστικών αυτών των συνδέσεων που περιγράφηκαν παραπάνω, γέννησε την ιδέα της Συνάθροισης Πολλαπλών Συνδέσμων, ή όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία, του *Multiple Link Aggregation* ή *Multihomed Collaborative Internet Access* (εν συντομία, *Multihoming*). Το Multihoming συνίσταται στο συνδυασμό και χρήση πολλαπλών συνδέσμων με το Internet με τρόπο παράλληλο, ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα της σύνδεσης και η αξιοπιστία της. Η απόδοση αυτών των τεχνικών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που φθάνουν μέχρι και το υλικό που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των συνδέσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι μέθοδοι υλοποίησης της τεχνικής του Multihoming δεν περιορίζονται μόνο στο λογικό επίπεδο (με χρήση προγραμματισμού στο λειτουργικό σύστημα). Έχουν γίνει προσπάθειες να υλοποιηθεί η τεχνική και με υλικά μέσα, με ειδικό δηλαδή εξοπλισμό. Το Multihoming υλοποιείται με διάφορες παραλλαγές, αναλόγως τη διαθεσιμότητα συνδέσμων με το Internet και του κατάλληλου υλικού. Πολλές φορές μάλιστα για την υλοποίηση συγκεκριμένων τεχνικών, απαιτείται και συνεργασία από τον πάροχο της υπηρεσίας Internet. Οι σημαντικότερες μορφές του Multihoming περιγράφονται παρακάτω:

- **Μοναδικός Σύνδεσμος, Πολλαπλές IP διευθύνσεις**

Η οντότητα στην οποία υλοποιείται η τεχνική αυτή, κατέχει ένα μοναδικό σύνδεσμο με το Internet, αλλά πολλαπλές IP διευθύνσεις με αποτέλεσμα να γίνεται η χρήση όλων

των διευθύνσεων με λογισμικό. Όταν αποτύχει η μοναδική σύνδεση, χάνεται όλη η συνδεσιμότητα.

- **Πολλαπλές Δικτυακές Διατάξεις, Μοναδική IP ανά διάταξη**

Λόγω της ύπαρξης μιας IP διεύθυνσης ανά διάταξη (interface), στην τεχνική αυτή μια αποτυχία δεν σημαίνει αποτυχία όλης της συνδεσιμότητας, καθώς οι υπόλοιπες διατάξεις εξακολουθούν να παρέχουν τη δική τους σύνδεση.

- **Πολλαπλοί Σύνδεσμοι, Μοναδική IP διεύθυνση**

Σε αυτή την τεχνική, χρησιμοποιείται κάποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης ανάμεσα στους πολλαπλούς συνδέσμους, και ο στόχος εδώ είναι να απαλειφθεί η πιθανότητα όπου σφάλμα σε ένα σύνδεσμο σημαίνει και απώλεια της συνδεσιμότητας, καθώς οι υπόλοιποι σύνδεσμοι παραμένουν ενεργοί.

- **Πολλαπλοί Σύνδεσμοι, Πολλαπλές IP Διευθύνσεις**

Η προσέγγιση αυτή απαιτεί χρήση ειδικού υλικού, του λεγόμενου *Link Load Balancer*. Επιτρέπει ταυτόχρονη χρήση όλων των συνδέσμων ώστε να αυξηθεί το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης, και λόγω του ειδικού υλικού παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού αποτυχιών στους συνδέσμους σε πραγματικό χρόνο, καθώς και ανακατεύθυνση της μεταφοράς πληροφοριών επίσης σε πραγματικό χρόνο. Και εδώ χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για τη διαχείριση της μεταφοράς πληροφοριών.

Οι τεχνολογίες αυτές δίνουν ξεκάθαρα τη δυνατότητα βελτίωσης των δικτυακών υπηρεσιών: επιτυγχάνονται *χαμηλότερες καθυστερήσεις* στις συνδέσεις, υψηλότερη *ρυθμαπόδοση* (throughput - μέσος ρυθμός επιτυχούς μετάδοσης δεδομένων) και άρα υψηλότερη διαθεσιμότητα σύνδεσης. Μια ακόμη πτυχή των βελτιώσεων είναι η *προσαρμοστικότητα* και η *ανοχή σε σφάλματα*. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι όταν έχει γίνει συνάθροιση των διαθέσιμων συνδέσμων, και κάποιος από αυτούς αποτύχει, αυτό δεν συνεπάγεται με πλήρη απώλεια της συνδεσιμότητας, αφού οι υπόλοιποι συνδέσμοι εξακολουθούν να λειτουργούν κανονικά. Η παλιότερη ιδέα αξιοποίησης του Multihoming για ανοχή σε σφάλματα στο δίκτυο, και η πιο μοντέρνα και αναπτυσσόμενη πλευρά βελτίωσης της επίδοσης του δικτύου είναι προς το παρόν οι διαστάσεις του Multihoming που προς το παρόν κερδίζουν τους περισσότερους

οπαδούς, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν μελετώνται και περιθώρια επέκτασης και σε άλλες κατευθύνσεις.

1.4 Περίγραμμα Διπλωματικής Εργασίας

Έχοντας μια πλήρη εικόνα πάνω στα ασύρματα δίκτυα, σε τεχνολογίες όπως τα Συστήματα Ομοτίμων, καθώς και στη σύγχρονη ιδέα του Multihoming, δίνεται η δυνατότητα συνδυασμού όλων αυτών και συνεπώς εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων της κάθε μιας συνιστώσας, σε ένα σύστημα. Αυτό που λείπει από τις υπάρχουσες εφαρμογές του Multihoming, είναι η δυνατότητα υποστήριξης περισσότερων από μια οντοτήτων, ίσως και ένα ολόκληρο τοπικό δίκτυο, με συναθροισμένη συνδεσιμότητα στο Internet (ή ακόμη και προς κάποια πύλη σε ειδικής μορφής δίκτυα), όπως θα μπορούσε να συμβεί σε μια μικρή κοινωνία, παραδείγματος χάριν. Εκεί στοχεύει η παρούσα διπλωματική εργασία - στην υλοποίηση δηλαδή, ενός Συστήματος Ομοτίμων, πάνω στο οποίο εφαρμόζεται η τεχνική του Multihoming. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το σύστημα ομοτίμων που υλοποιείται, είναι σχεδιασμένο έτσι, ώστε ο πόρος που διαμοιράζονται οι κόμβοι του συστήματος να είναι η συνδεσιμότητα στο Internet. Δεν είναι προϋπόθεση η ύπαρξη συνδεσιμότητας - ο στόχος εδώ είναι ο διαμοιρασμός της συνδεσιμότητας και με κόμβους που απλώς η δική τους συνδεσιμότητα αποτυγχάνει ή είναι φορτωμένη, αλλά και με κόμβους που δεν έχουν, αλλά έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο σύστημα Ομοτίμων.

Πριν αναλυθεί το σύστημα που έχει υλοποιηθεί, είναι σκόπιμο να γίνει μια περιγραφεί ορισμένων υπάρχοντων υλοποιήσεων και ερευνών γύρω από το Multihoming, ώστε να δοθεί η ευκαιρία για μια πληρέστερη άποψη της τεχνικής και της χρησιμότητάς της.

Κεφάλαιο 2

Multihoming και Εφαρμογές

2.1 Το Σύστημα PERM

Πρίν τρία χρόνια, στο Πανεπιστήμιο του Illinois, δημιουργήθηκε το σύστημα *PERM*, ή *Practical End-host Residential Multihoming*[4]. Πρόκειται για μια προσπάθεια εφαρμογής του Multihoming σε πραγματικά δεδομένα, σε επίπεδο οικιακής χρήσης, για αυτό άλλωστε και ο χαρακτηρισμός *practical* και *residential* του τίτλου. Συνοπτικά, πρόκειται για ένα σύστημα (οι δημιουργοί του το αναφέρουν σαν *framework*), το οποίο παρεμβάλλεται στο επίπεδο Δικτύου ενός υπολογιστικού συστήματος, και με κατάλληλο λογισμικό, εφαρμόζει δρομολόγηση της μεταφοράς δεδομένων προς το Internet ανάμεσα στους διαθέσιμους συνδέσμους. Το PERM επίσης εφαρμόζει ανάλυση σε πραγματικό χρόνο της *διαδικτυακής συμπεριφοράς* (*networking behaviour*) του χρήστη, ώστε με τεχνικές πρόβλεψης να βελτιώσει την απόδοση της δρομολόγησης (*scheduling*).

Μια βασική προϋπόθεση για το PERM, την οποία οι δημιουργοί έλαβαν υπόψιν τους εξ'αρχής και διατήρησαν μέχρι τέλους, ήταν η διατήρηση όλου του σχεδιασμού του συστήματος αποκλειστικά στην πλευρά του χρήστη, και όχι σε εξωτερικούς παράγοντες υποστήριξης, όπως υποστήριξη από τον Παροχέα Υπηρεσίας Internet (εξ'ού και ο χαρακτηρισμός *end-host Multihoming*). Αυτό συνέβη γιατί θεωρήθηκε μη ρεαλιστική η ανάγκη εξωτερικής υποστήριξης, μιας και αυτό δεν είναι δυνατό να εξασφαλιστεί από όλους τους απομακρυσμένους προορισμούς στο Internet.

Κατά συνέπεια, το PERM έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Αρχικά, η δρομολόγηση της κυ-

κλοφορίας του Internet γίνεται στο επίπεδο ροών¹ του συστήματος. Επιπλέον, μια τέτοια ροή δεν έχει τη δυνατότητα να αναδρομολογηθεί, κάτι ούτως ή άλλως πρακτικά σχεδόν αδύνατο στις υπάρχουσες δικτυακές τεχνολογίες. Το PERM επιτυγχάνει αποδοτική δρομολόγηση διαφορετικών μεταξύ τους ροών, όσον αφορά στον όγκο δεδομένων και προορισμών τους. Επίσης, είναι σημαντικό το γεγονός ότι η δρομολόγηση που εφαρμόζει το PERM, γίνεται λαμβάνοντας υπ'όψιν και εκτιμήσεις που βασίζονται στην ισχυρή χρονική συσχέτιση των ροών μεταξύ τους, καθώς και την μακροπρόθεσμη εξάρτηση του όγκου των δεδομένων της ροής, όταν αυτή γίνεται με έναν συγκεκριμένο προορισμό.

Για την ανάλυση αυτών των δυο παρατηρήσεων, οι δημιουργοί του PERM εγκατέστησαν και χρησιμοποίησαν το σύστημα στις κατοικίες της πανεπιστημιούπολης του Dartmouth College, για τέσσερις μήνες σε διάρκεια. Το πείραμα συμπεριέλαβε συνολικά 1334 διαφορετικά υπολογιστικά συστήματα, και η διακίνηση δεδομένων έφτασε τα 8,6 gigabytes. Κατά την ανάλυση επαληθεύτηκε η θεωρία τους πάνω στην χρονική συσχέτιση και εξάρτηση όγκου των ροών. Πάνω σε αυτές τις παρατηρήσεις χτίστηκαν *αλγόριθμοι πρόβλεψης* οι οποίοι χρησιμοποιούνται από το PERM για εκτίμηση της καλύτερης δρομολόγησης.

2.1.1 Περιγραφή του Συστήματος

Η λειτουργικότητα του PERM διαχωρίζεται σε έξι λειτουργικές μονάδες, οι οποίες συνεργατικά στοχεύουν στην επιτυχή ανίχνευση άφιξης νέων ροών στο σύστημα, δρομολόγησής τους προς μια εκ των διαθέσιμων συνδέσεων, διατήρησης στατιστικών στοιχείων των συνδέσεων, απαραίτητων για τους αλγόριθμους πρόβλεψης και τελικά στην καταλληλότερη επιλογή συνδέσμου για χρήση. Οι λειτουργικές μονάδες του PERM είναι ένας *Διαχειριστής Συνδέσεων*, η *Μονάδα Παρακολούθησης Συστήματος*, η *Μονάδα Πρόβλεψης*, ο *Διαχειριστής Κινήτρου*, ο *Διαχειριστής Ασφαλείας* και τελικά η *Μονάδα Δρομολόγησης*.

1. Διαχειριστής Συνδέσεων - Connection Manager

Οι νέες ροές που δημιουργούνται από το χρήστη του PERM στον υπολογιστή του, για παράδειγμα η αίτηση για άνοιγμα μιας ιστοσελίδας, η αποθήκευση ενός αρχείου από

¹Ως ροή αναγνωρίζεται το ζεύγος πηγή - απομακρυσμένος προορισμός, όπου η πηγή είναι φυσικά ο χρήστης του PERM.

το Internet, η χρήση ενός P2P συστήματος, πρέπει να ανιχνεύονται έγκαιρα από το PERM και να γίνεται η δρομολόγησή τους προς έναν εκ των διαθέσιμων συνδέσμων. Ο ΔΣ παρεμβάλλεται ανάμεσα στο Επίπεδο Δικτύου και το Socket API του συστήματος, και ενεργοποιεί τη δρομολόγηση των ροών προς τους συνδέσμους. Επίσης, ο ΔΣ δεν διαχειρίζεται εξωτερικά προερχόμενες ροές, μιας και η πλειοψηφία των ροών σε έναν οικιακό υπολογιστή ξεκινούν από το χρήστη (από το ίδιο το υπολογιστικό σύστημα).

2. Μονάδα Παρακολούθησης - Monitor Component

Για κάθε διαθέσιμο σύνδεσμο με το Internet το σύστημα διατηρεί ένα σύνολο από στοιχεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για σωστή δρομολόγηση. Αυτά περιλαμβάνουν αποτυχίες και σφάλματα των συνδέσμων, εκτιμήσεις για τη χωρητικότητα των συνδέσμων, και χρονική καθυστέρηση προς τους απομακρυσμένους προορισμούς. Για τη μέτρηση χρονικής καθυστέρησης χρησιμοποιείται *active probing* (δηλαδή ενεργητική μέτρηση), ενώ για τη διατήρηση στοιχείων για την κατάσταση των συνδέσμων *passive monitoring* (ή παθητική παρακολούθηση).

3. Μονάδα Πρόβλεψης - Prediction Component

Η δρομολόγηση ροών προς συνδέσμους στο PERM δουλεύει με τρόπο που η γνώση εκ των προτέρων του χρόνου *round trip*² και του αναμενόμενου όγκου δεδομένων της ροής είναι στοιχεία απαραίτητα. Πρακτικά τέτοια στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα πριν την εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης με έναν απομακρυσμένο προορισμό, ή έστω γίνονται διαθέσιμα πολύ αργά πλέον για να λάβει χώρα η δρομολόγηση των ροών. Η ανάλυση που περιγράφηκε πριν και έγινε στο Dartmouth College, έδειξε ότι και οι απομακρυσμένοι προορισμοί αλλά και οι όγκοι δεδομένων των ροών είναι προβλέψιμοι. Η δρομολόγηση στο PERM αξιοποιεί τα μοντέλα πρόβλεψης που έχουν αναπτυχθεί και υλοποιούνται στη ΜΠ, ώστε να εκτιμηθούν οι όγκοι δεδομένων των ροών και η πρόβλεψη των πιθανών απομακρυσμένων προορισμών που θα ακολουθήσουν, ώστε να μετρηθεί εκ των προτέρων ο χρόνος *round trip*.

4. Διαχειριστής Κινήτρου - Incentive Manager

²Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για ένα πακέτο δεδομένων να ταξιδέψει από μια πηγή, σε έναν προορισμό και πάλι πίσω.

Για να υπάρχει αίσθημα δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες που κοινοποιούν τις συνδέσεις τους, μιας και το PERM στοχεύει σε περιπτώσεις που δυο χρήστες μοιράζονται ο κάθε ένας τη δική του σύνδεση με το Internet, εισάγεται η έννοια του *κινήτρου (incentive)*. Η πολιτική κινήτρου και η εφαρμογή της είναι οι αρμοδιότητες του ΔΚ. Ο ΔΚ παρακολουθεί τη χρήση των διαθέσιμων συνδέσμων με το Internet, συνεργάζεται με τους ΔΚ των υπόλοιπων συμμετεχόντων συστημάτων και παρέχει πληροφορίες δρομολόγησης στη Μονάδα Δρομολόγησης.

5. Διαχειριστής Ασφαλείας - Security Manager

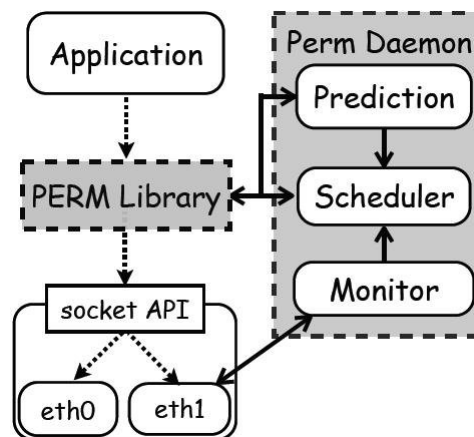
Όταν ένας χρήστης προσπελαύνει το Internet μέσω της σύνδεσης ενός γείτονα, εκθέτει τα ιδιωτικά του δεδομένα, φανερώνει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιεί το Internet και γενικώς αφήνει κενά ασφαλείας στο σύστημά του. Ο ΔΑ ευθύνεται για την ενίσχυση της ασφάλειας κατά τη χρήση του PERM. Στόχοι είναι η προστασία ευαίσθητων δεδομένων από τη διαρροή τους από το προστατευμένο δίκτυο του PERM, καθώς και ο αποκλεισμός από άλλους χρήστες στο να έχουν πρόσβαση σε σημαντικές ιστοσελίδες (όπως τραπεζικοί λογαριασμοί) μέσω της τοπικής σύνδεσης. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα απόκρυψης της συμπεριφοράς στο Internet του χρήστη.

6. Μονάδα Δρομολόγησης Ροών - Scheduler

Στο PERM υλοποιείται ένας *Υβριδικός Δρομολογητής*, ο οποίος δρομολογεί με βάση τον αναμενόμενο, σύμφωνα με τη Μονάδα Πρόβλεψης, όγκο δεδομένων της ροής. Κατά τη δρομολόγηση μιας TCP ροής, οι σημαντικοί παράγοντες είναι ο χρόνος round trip, ο ανταγωνισμός μεταξύ των ροών όσον αφορά τον όγκο δεδομένων τους, σε σημεία συμφόρησης (*bottleneck links*) και το εύρος ζώνης στα σημεία συμφόρησης. Στην περίπτωση του PERM, τα σημεία συμφόρησης είναι οι διαθέσιμοι σύνδεσμοι με το Internet. Ακόμη, το γεγονός ότι ο εκάστοτε χρήστης από τον οποίο ξεκινούν οι ροές ελέγχει την δικτυακή κυκλοφορία στη δική του ευρυζωνική σύνδεση, σε συνδυασμό με τη μέτρηση του χρόνου round trip και την εκτίμηση των όγκων δεδομένων των ροών που εκτελεί η ΜΠ, δίνει τη δυνατότητα για μια αξιόπιστη πρόβλεψη του συνολικού χρόνου μετάδοσης μιας ροής. Σύμφωνα με την πρόβλεψη αυτή, το PERM προσαρμόζεται ανάμεσα σε δρομολογήσεις με βάση δυο διαφορετικά κριτήρια - απ'τη μία, δρομολόγηση που

βασίζεται στην καθυστέρηση πάνω στους συνδέσμους, για την περίπτωση ροών με μικρό όγκο δεδομένων, και από την άλλη, δρομολόγηση με βάση τον εκτιμώμενο χρόνο μετάδοσης (για επίτευξη ισοκατανομής του φόρτου στους συνδέσμους) για ροές με μεγάλο όγκο δεδομένων³.

Η λειτουργία του PERM ολοκληρώνεται με τη συνεργασία των λειτουργικών μονάδων του. Ο τρόπος αλληλεπίδρασης των μονάδων του φαίνεται και σχηματικά στην Εικόνα 2.1.



Σχήμα 2.1: Η αλληλεπίδραση των λειτουργικών μονάδων του PERM

2.1.2 Μοντελοποίηση Δικτυακής Κυκλοφορίας

Η αμερόληπτη, υψηλής απόδοσης δρομολόγηση που επιτυγχάνει ο δρομολογητής ροών του PERM, οφείλεται στην ανάλυση της δικτυακή κυκλοφορίας στην πλευρά του χρήστη και στην εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών για αυτή. Η επιδόσεις των ροών με μικρό όγκο δεδομένων κυριαρχούνται από το χρόνο round trip, και έτσι οι ροές αυτές δρομολογούνται στο σύνδεσμο με το μικρότερο χρόνο round trip κάθε φορά. Το PERM διατηρεί αυτό το χρόνο, παίρνοντας εκ των προτέρων μετρήσεις για το χρόνο αυτό, προς τους προορισμούς που προβλέπεται ότι θα ακολουθήσουν. Αυτή η εκ των προτέρων μέτρηση εξαλείφει την καθυστέρηση που θα δημιουργούνταν μετά την δημιουργία μιας ροής, αλλά πριν γίνει η δρομολόγηση της. Για τις ροές με μεγάλο όγκο δεδομένων, των οποίων οι επιδόσεις οριοθετούνται από το διαθέσιμο

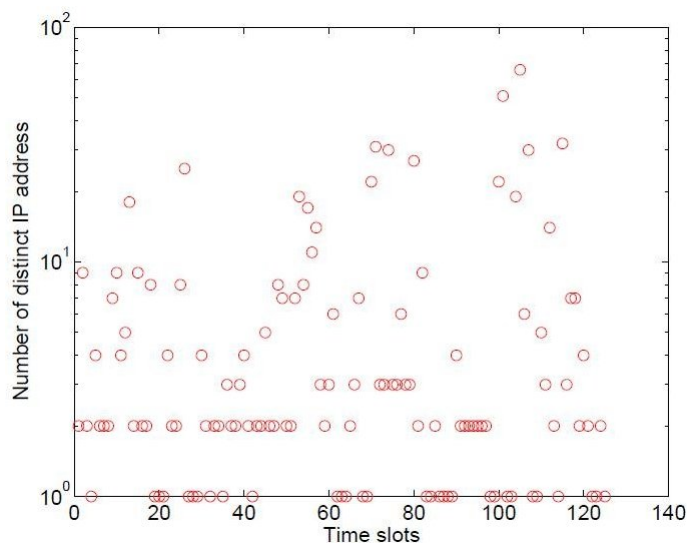
³Το όριο ανάμεσα στον μικρό και το μεγάλο όγκο δεδομένων που θεωρείται στο PERM είναι τα 8 kilobytes.

εύρος ζώνης, το PERM δρομολογεί τις ροές βάσει του εκτιμώμενου όγκου τους και τον τρέχον δικτυακό φόρτο σε κάθε σύνδεσμο.

Για να γίνει επιτυχώς αυτή η κλιμακούμενη *a priori* μέτρηση, και κατά συνέπεια και η υβριδική δρομολόγηση ροών, πρέπει να απαντηθούν δύο ερωτήματα:

1. Ποιό είναι το σύνολο των διευθύνσεων των απομακρυσμένων προορισμών με τους οποίους πρόκειται να επικοινωνήσει ο χρήστης μέσα στο επόμενο χρονικό διάστημα;
2. Ποιά είναι η κατανομή του όγκου δεδομένων της κυκλοφορίας που αντιστοιχεί σε έναν απομακρυσμένο προορισμό;

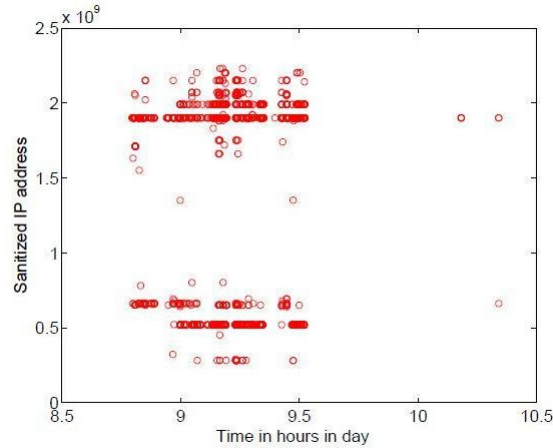
Διευθύνσεις IP των Απομακρυσμένων Προορισμών. Τα αποτελέσματα που συντελούν στην απάντηση του ερωτήματος που τέθηκε, προήλθαν από τη μελέτη στο Dartmouth College. Στο Σχήμα 2.2 μπορούμε να δούμε το πλήθος των διαφορετικών διευθύνσεων τις οποίες επισκέπτεται ένας χρήστης, σε διαστήματα 10 δευτερολέπτων.



Σχήμα 2.2: Πλήθος διακριτών απομακρυσμένων IP διευθύνσεων

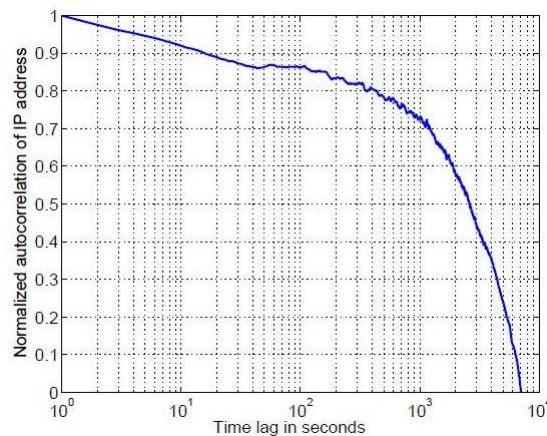
Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται οι απομακρυσμένες IP διευθύνσεις που ένας χρήστης επισκέπτεται κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Κάθε στοιχείο του κάθετου άξονα (κάθε κύκλος) αναπαριστά μια διακριτή IP διεύθυνση. Είναι προφανείς δυο οριζόντιες “γραμμές” που υπονοούν ότι ορισμένες IP διευθύνσεις επισκέπτονται πιο συχνά από ότι άλλες. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα

παρατήρηση, είναι ότι αυτές οι γραμμές είναι διασπασμένες σε δυο ομάδες, ένα πρότυπο το οποίο συχνά καλείται *bi-modal*, και συναντήθηκε σε πολλούς χρήστες κατά τη μελέτη στο Dartmouth College.



Σχήμα 2.3: Διευθύνσεις IP μέσα σε μια μέρα

Για επιπλέον ποσοτικοποίηση της χρονικής συσχέτισης των απομακρυσμένων ΙΠ διευθύνσεων που έχει επισκευθεί ο χρήστης, δίνεται στο Σχήμα 2.4 η αυτοσυσχέτιση των IP διευθύνσεων. Η κανονικοποιημένη συσχέτιση είναι μεγαλύτερη του 0.85 ακόμη και όταν η χρονική καθυστέρηση φθάνει τα 100 δευτερόλεπτα.

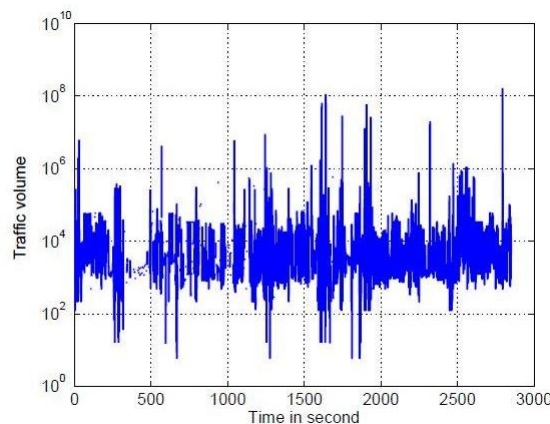


Σχήμα 2.4: Αυτοσυσχέτιση των IP Διευθύνσεων

Το πρότυπο *bi-modal* του Σχήματος 2.3 καθώς και η ισχυρή χρονική συσχέτιση του Σχήματος 2.4 υποδεικνύουν τη δυνατότητα πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο (*online prediction*)

των IP διευθύνσεων τις οποίες ο χρήστης θα επισκευθεί με μεγαλύτερη πιθανότητα, με βάση την προσωρινή εμπειρία. Για την ακρίβεια, το σύστημα εκτελεί ένα συγκεκριμένο πλήθος από προβλέψεις, πράγμα που αυξάνει την πιθανότητα, η απομακρυσμένη IP διεύθυνση που θα ακολουθήσει να βρίσκεται μέσα στις προβλέψεις.

Όγκος Δεδομένων των Ροών. Για να απαντηθεί το ερώτημα της δυνατότητας πρόβλεψης της κατανομής του όγκου δεδομένων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απομακρυσμένη IP διεύθυνση, οι δημιουργοί του PERM δείχνουν ότι με συγκεκριμένη τεχνική πρόβλεψης, το σφάλμα που προκύπτει είναι μέσα σε αποδεκτά όρια. Για τις ανάγκες του προβλήματος, ο όγκος δεδομένων της κυκλοφορίας όλων των συνδέσεων προς μια IP διεύθυνση αναπαρίσταται σαν μια χρονική σειρά. Μια τυπική σειρά, η οποία χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση, φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η ‘έκρηκτικότητα’ που παρατηρείται σε ορισμένες στιγμές είναι εμπόδιο για την πρόβλεψη το όγκου, μιας και πρόκειται για αλλαγή στον όγκο αρκετών τάξεων μεγέθους πάνω από το επίπεδο του μεγέθους.



Σχήμα 2.5: Όγκος κυκλοφορίας για μια απομακρυσμένη IP διεύθυνση

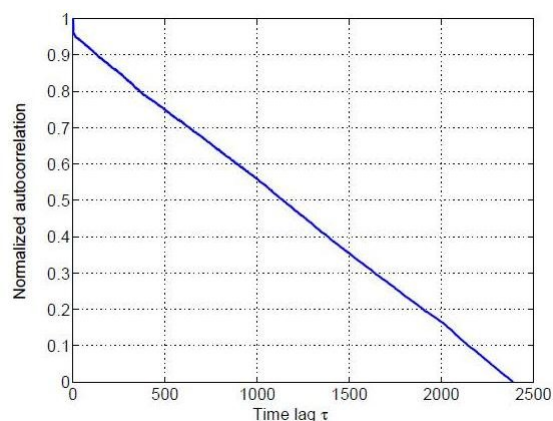
Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, εισάγεται μια μέθοδος πρόβλεψης με χρήση ενός αλγόριθμου πρόβλεψης LMMSE⁴ πραγματικού χρόνου. Έτσι, όπως θα φανεί και παρακάτω, επιτυγχάνεται μέση ακρίβεια πρόβλεψης 80%. Η επιτυχία του αλγορίθμου πρόβλεψης οφείλεται στο γεγονός ότι αντί να λαμβάνεται υπ’όψιν η ακριβής στιγμιαία τιμή του αποτελέσματος, χρησιμοποιούνται στοχαστικές ιδιότητες του μεγέθους, όπως η μέση τιμή.

⁴Linear Minimum Mean Squared Error

Ορίζεται η σειρά όγκου δεδομένων ροής για μια απομακρυσμένη IP διεύθυνση και για έναν τυπικό χρήστη, ως μια χρονική σειρά $x(t)$ και ορίζεται ο μετασχηματισμός $y(t) = \log x(t)$. Η αυτοσυσχέτιση της συνάρτησης $y(t)$, που συμβολίζεται ως $R(\tau) = \int_0^\infty y(u)y(u + \tau) du$, υπακούει στον ακόλουθο κανόνα:

$$R_y(\tau) \sim -\alpha\tau + b$$

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6, όπου α και b είναι σταθερές, τέτοιες ώστε $R_y(\tau) \geq 0$. Η γραμμικώς φθίνουσα αυτοσυσχέτιση δείχνει πως η $y(t)$ είναι ισχυρώς αυτοσυσχετισμένη και συνεπώς προβλέψιμη με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 2.6: Αυτοσυσχέτιση της $y(t)$

Ο αλγόριθμος πρόβλεψης LMMSE δουλεύει με τρόπο που περιγράφεται παρακάτω. Δεδομένης της χρονικής σειράς $y(k), k = 1, \dots, n$, το επόμενο δείγμα της σειράς, $\hat{y}(n+1)$, εκτιμάται στο επόμενο χρονικό διάστημα ως σταθμισμένο άθροισμα των προηγούμενων n δειγμάτων:

$$\hat{y}(n+1) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(n) \end{bmatrix}$$

όπου οι $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ είναι οι *LMMSE* συντελεστές, και μπορούν να εκφραστούν ως

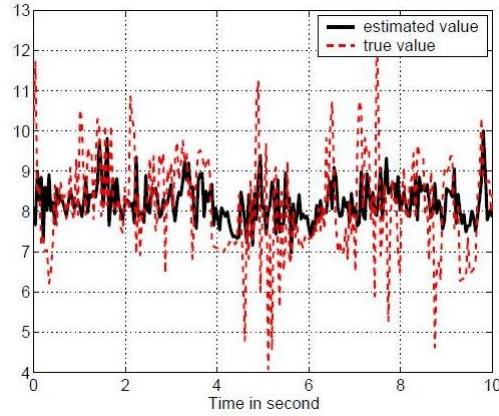
$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(n) & R(n-1) & \dots & R(1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & \dots & \dots & R(0) \end{bmatrix}^{-1}$$

όπου η $R(n)$ είναι η συνάρτηση συνδιασποράς της χρονικής σειράς. Στην πράξη, αυτή μπορεί να εκτιμηθεί ως

$$R(i) = \frac{1}{n} \sum_{t=i+1}^n y(t)y(t-i), \quad 0 \leq i \leq n-1$$

με n να είναι το πλήθος των δειγμάτων της χρονικής σειράς που κρατούνται.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το Σχήμα 2.7, όπου φαίνεται η πραγματική δικτυακή κυκλοφορία μαζί με αυτήν που έδωσε η πρόβλεψη.



Σχήμα 2.7: Προβλεπόμενη και πραγματική κυκλοφορία

Κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου πρόβλεψης *LMMSE* στο πείραμα του Dartmouth College επιτυγχάνεται σχετικό μέσο σφάλμα $\eta_y = 2.5\%$, για την $y(\tau)$, δηλαδή $\hat{y}(t) = (1 \pm \eta_y) \cdot y(t)$. Η εκτίμηση $\hat{x}(t)$ της $x(t)$, θα είναι $\hat{x}(t) = \exp[(1 \pm \eta_y)y(t)] = x(t) \cdot \exp \pm \eta_y y(t)$. Επομένως το σχετικό σφάλμα πρόβλεψης για την $x(t)$ θα είναι:

$$\eta_x = \frac{\|\hat{x}(t) - x(t)\|}{x(t)} = \|\exp[\pm \eta_y y(t)] - 1\|$$

Στην ανάλυση που έγινε για το PERM, η μέση τάξη μεγέθους του όγκου δεδομένων ροής $y(t)$ είναι γύρω στο 8, και $\eta_y \in [2\%, 3\%]$. Άρα συνεπάγεται ότι το $\eta_x \in [14\%, 20\%]$ είναι κατά

πολύ μικρότερο από αυτό που θα προέκυπτε χωρίς την εφαρμογή του μετασχηματισμού $y(t)$, το οποίο θα ήταν γύρω στο 1000%, από την απευθείας εφαρμογή του LMMSE.

2.1.3 Υβριδική Δρομολόγηση Ροών

Όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στην πράξη από το PERM για την υλοποίηση της *Υβριδικής Δρομολόγησης Ροών (Hybrid Flow Scheduling)*. Για το σχεδιασμό, λαμβάνονται υπ'όψιν μονάχα οι ροές που προκύπτουν από κυκλοφορία στον Παγκόσμιο Ιστό, μιας και έχει μετρηθεί ότι αποτελούν το 76% όλων των ροών στο διαδίκτυο.

Έχουν ήδη διαχωριστεί δυο είδη ροών - μικρού μεγέθους ($< 8KB$) και μεγάλου. Εάν η ροή είναι μικρού μεγέθους, τότε η ροή δρομολογείται στο σύνδεσμο με το μικρότερο προ-μετρημένο χρόνο round trip. Αντίθετα, η ροή δρομολογείται με βάση τον εκτιμώμενο όγκο δεδομένων της, καθώς και τον φόρτο εργασίας στους συνδέσμους την εκάστοτε στιγμή.

Θεωρούμε το πλήθος των διαθέσιμων συνδέσμων M , και ότι κάθε σύνδεσμος έχει διαθέσιμο εύρος ζώνης $B_j, j \in \{1, 2, \dots, M\}$. Το πλήθος των ροών που δρομολογούνται έστω ότι είναι N , και κάθε μια έχει εκτιμώμενο όγκο δεδομένων $V_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$. Έστω ο πίνακας $C : N \times M$, να είναι ο πίνακας δρομολόγησης, με το στοιχείο $c_{i,j} = 1$ όταν η ροή i δρομολογείται στο σύνδεσμο j , αλλιώς $c_{i,j} = 0$.

Θεωρούμε ότι όλες οι ροές είναι TCP ροές με προ-μετρημένο χρόνο round trip $RTT_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$. Ορίζεται για τον σύνδεσμο B_j το *επιτεύξιμο* εύρος ζώνης $A_{i,j}$ για τη ροή i να είναι

$$A_{i,j} = \frac{(B_j \cdot c_{i,j})}{Z \cdot RTT_i^2}, \text{ όπου } Z = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{c_{i,j}}{RTT_i^2}$$

Δεδομένου του $A_{i,j}$ και του V_i , η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της ροής i είναι $V_i/A_{i,j}$.

Έχοντας ορίσει τις χρήσιμες αυτές έννοιες, το πρόβλημα της δρομολόγησης πλέον μπορεί να διατυπωθεί και μαθηματικώς με τους ακόλουθους δυο τρόπους:

Ελαχιστοποίηση του Συνολικού Χρόνου Μετάδοσης

$$\min \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{A_{i,j}}, \text{ για } j \text{ τέτοιο ώστε } A_{i,j} > 0 \text{ και } c_{i,j} \in \{0, 1\}$$

Ελαχιστο-μέγιστος Χρόνος Μετάδοσης

$$\min_{c_{i,j}} \max_i \frac{V_i}{A_{i,j}}, \text{ για } j \text{ τέτοιο ώστε } A_{i,j} > 0 \text{ και } c_{i,j} \in \{0, 1\}$$

Η πρώτη διατύπωση ισοδυναμεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης όλων των ροών που βρίσκονται σε αναμονή για ολοκλήρωση, λαμβάνοντάς τις ως ισότιμες. Η δεύτερη, δίνει περισσότερο βάρος στο χρόνο ολοκλήρωσης της κάθε ροής ξεχωριστά και ευνοεί ροές με μικρότερο όγκο δεδομένων. Και τα δυο προβλήματα κατατάσσονται στην κατηγορία του μη-γραμμικού προγραμματισμού και χαρακτηρίζονται ως *NP-πλήρη*. Λόγω αυτού του γεγονότος, στο PERM έχουν υλοποιηθεί ευρετικοί greedy αλγόριθμοι ώστε να εξασφαλιστεί χαμηλή καθυστέρηση δρομολόγησης.

Στην περίπτωση του Ελαχιστο-μέγιστου χρόνου μετάδοσης, παρατηρούμε ότι $\max_i \frac{V_i}{A_{i,j}} = \frac{\sum_i^N V_i}{B}$. Είναι επόμενο να προστεθεί ο όγκος της νέας ροής στο εναπομείναντα φόρτο του κάθε συνδέσμου, και να διαιρεθεί ο συνολικός φόρτος με το εύρος ζώνης του συνδέσμου. Έτσι η νέα ροή θα δρομολογηθεί στο σύνδεσμο που θα εμφανίσει μικρότερο χρόνο ολοκλήρωσης της ροής, σύμφωνα με τον προηγούμενο υπολογισμό.

Στην περίπτωση της Ελαχιστοποίησης του Συνολικού Χρόνου Μετάδοσης, υπολογίζεται ο χρόνος ολοκλήρωσης της νέας ροής. Για να επιτευχθεί αυτό αποδοτικά, διατηρείται μια ταξινομημένη λίστα ροών που έχουν ήδη δρομολογηθεί σε ένα σύνδεσμο, με βάση το χρόνο ολοκλήρωσης της κάθε μιας. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, επιλέγεται ο σύνδεσμος 1 με διαθέσιμο εύρος ζώνης B_1 , και θεωρείται ότι πριν φθάσει η νέα ροή όγκου f_{new} , υπάρχουν N_1 δρομολογημένες ροές. Έστω A_i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ το επιτεύξιμο εύρος ζώνης για τη ροή i και $A_i = B_1 / (\sum_{j=1}^{N_1} \frac{RTT_j^2}{RTT_i^2})$. Με βάση την παρατήρηση ότι στις TCP ροές το εύρος ζώνης μοιράζεται αναλογικά και νέες ροές δεν επηρεάζουν το χρόνο ολοκλήρωσης των ήδη υπαρχόντων, προκύπτει το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 1. Έστω V_i ο όγκος δεδομένων της ροής i , RTT_i ο τρέχων χρόνος round trip, B το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συνδέσμου και N_α ροές μοιράζονται το σύνδεσμο, συμπεριλαμβανομένης και της καινούριας. Τότε η k -οστή ροή στην ταξινομημένη λίστα θα ολοκληρώσει τη μετάδοσή της μετά από χρόνο T_k :

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} V_i}{B} + \frac{\sum_{i=k}^{N_\alpha} \frac{1}{RTT_i^2} \cdot V_k}{\frac{1}{RTT_k^2} \cdot B} \quad (2.1)$$

Η λίστα των ροών ταξινομείται σε ανερχόμενη σειρά του $V_i \cdot RTT_i^2$.

Απόδειξη. Αφού οι ροές μοιράζονται αναλογικά με το εύρος ζώνης του συνδέσμου, ολοκλη-

ρώνονται σε χρόνο τάξης $V_i \cdot RTT_i^2$. Για τις $k - 1$ ροές που ολοκληρώνονται πριν την k -οστή ροή, οι μεταδόσεις τους προκαλούν συνολική καθυστέρηση $\frac{\sum_{i=1}^{k-1}}{B}$ στην k -οστή ροή. Οι απομένουσες $N_\alpha - k + 1$ ροές μοιράζονται το εύρος ζώνης αναλογικά μέχρι να ολοκληρωθεί η k -οστή ροή, πράγμα το οποίο δημιουργεί επιπλέον καθυστέρηση στη ροή αυτή, όπως δηλώνει και ο δεύτερος όρος της 2.1. $\square$

Με δεδομένη τη σχέση 2.1, ο δρομολογητής υπολογίζει ρητά τη συνολική αύξηση στο χρόνο ολοκλήρωσης ροής σε κάθε σύνδεσμο, και δρομολογεί τη ροή στο σύνδεσμο με τη μικρότερη αύξηση.

2.1.4 Υλοποίηση του PERM

Το σύστημα PERM έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί ως μια βιβλιοθήκη UNIX συστήματος, σε επίπεδο χρήστη. Η βιβλιοθήκη παρεμβάλλεται στις κλήσεις των εφαρμογών προς το Socket API⁵, και επικοινωνεί με την κύρια διεργασία του PERM, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 στη σελίδα 21.

Το σύστημα διατηρεί πληροφορίες για τους απομακρυσμένους προορισμούς, όπως χρόνος round trip, συχνότητα επίσκεψης και όγκος δεδομένων, που χρειάζονται στον αλγόριθμο πρόβλεψης. Επίσης, διατηρούνται πληροφορίες για την κατάσταση των συνδέσμων, όπως η χωρητικότητα, η IP διεύθυνση και οι ροές που είναι ενεργές στο σύνδεσμο. Πέρα από τα πραγματικά δεδομένα, ο αλγόριθμος LMMSE παράγει και προβλέψεις για τον αναμενόμενο όγκο των επερχόμενων ροών καθώς και για τους πιθανούς επόμενους προορισμούς. Η προμέτρηση του χρόνου round trip γίνεται περιοδικά, τόσο ώστε ούτε να επιβαρύνεται το σύστημα με το επιπλέον κόστος επικοινωνίας της μέτρησης (overhead) αλλά ούτε και οι τιμές που μετρώνται να είναι πεπαλαιωμένες.

Οι αποτυχίες των συνδέσμων εντοπίζονται παθητικά, ύστερα από τρεις συνεχόμενες και αποτυχημένες προσπάθειες σύνδεσης με απομακρυσμένους προορισμούς. Παρόλο που μπορεί να έχει εντοπιστεί αποτυχία σε ένα σύνδεσμο, δεν σταματούν οι προσπάθειες για προμέτρηση του χρόνου round trip σε αυτό το σύνδεσμο. Αν βρεθεί επιτυχής μέτρηση του χρόνου, ο σύνδεσμος θεωρείται ότι έχει επανέλθει.

⁵Application Programming Interface

Η λειτουργία του συστήματος ξεκινά με μια νέα αίτηση σύνδεσης από μια ροή. Τότε ο δρομολογητής πληροφορείται για τον εκτιμώμενο όγκο δεδομένων της ροής ανάλογα με τον προορισμό, και χαρακτηρίζει τη ροή ως μικρού ή μεγάλου όγκου. Εάν ένας προορισμός συναντάται πρώτη φορά και δεν υπάρχει εκτίμηση για αυτόν, ακολουθείται στρατηγική χειρότερης περίπτωσης και επιλέγεται η ροή ως μεγάλου όγκου. Όσο δημιουργούνται ροές προς ένα προορισμό, η πρόβλεψη βελτιώνεται διαρκώς. Τελικά, όταν επιλεγεί ο σύνδεσμος στον οποίο η ροή θα δρομολογηθεί, γίνεται η σύνδεση των δυο, και ενώ η ροή δεδομένων λαμβάνει χώρα, διατηρούνται τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία. Κατά την ολοκλήρωση, γίνεται ενημέρωση των κατάλληλων μονάδων του συστήματος με τα στατιστικά και ανανεώνεται η εκτίμηση για τον προκείμενο απομακρυσμένο προορισμό.

2.1.5 Αξιολόγηση των επιδόσεων

Το σύστημα PERM αξιολογείται μέσα από τα δεδομένα που μετρώνται από τη λειτουργία του, σε αντιπαράθεση αφενός με την περίπτωση ύπαρξης μοναδικής ευρυζωνικής σύνδεσης, και αφετέρου με τρία διαφορετικά σχήματα δρομολόγησης που είναι δημοφιλή στο Multihoming. Τα σχήματα αυτά είναι η *Δρομολόγηση βάσει Κατακερματισμού (Hash based Scheduling)*, η *Δρομολόγηση Εξισορρόπησης Δικτυακού Φόρτου (Load Balancing)*, και τέλος η μέθοδος *Κυλιόμενου Παραθύρου (Sliding Window) με Active Probing*. Οι ευρυζωνικές συνδέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι μια DSL σύνδεση (κορύφωση στα 175KB ανά δευτερόλεπτο) και μια καλωδιακή σύνδεση (κορύφωση στα 500KB ανά δευτερόλεπτο). Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων και των μετρήσεων, έγινε διαχωρισμός ανάμεσα στις δυο κατηγορίες ροών του PERM.

A. Ροές μικρού Όγκου Δεδομένων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επίδοση των ροών μικρού όγκου εξαρτάται περισσότερο από το χρόνο round trip. Σε διάστημα μιας εβδομάδας έγιναν μετρήσεις του χρόνου round trip ανά πέντε λεπτά και για τις δυο συνδέσεις. Στο 44% των περιπτώσεων, η καλωδιακή σύνδεση είχε το στιγμιαίο χαμηλότερο χρόνο round trip, και η DSL για το υπόλοιπο 56%. Αναφορικά με τους προορισμούς, το 55% από αυτούς έδωσαν χαμηλότερο χρόνο round trip με την καλωδιακή, και το υπόλοιπο 45% με την DSL. Κατά μέσο όρο, για το 80% της διάρκειας των πειραμάτων, η σύνδεση που είχε την πλειοψηφία των

χαμηλότερων στιγμιαίων μετρήσεων χρόνου round trip, ήταν και αυτή που είχε και συνολικά το χαμηλότερο χρόνο round trip. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κατά ένα 20% η σύνδεση με την πλειοψηφία των χαμηλότερων στιγμιαίων μετρήσεων χρόνου round trip είναι η λάθος επιλογή.

Παρόλο που οι μετρήσεις έδειξαν ότι μακροπρόθεσμα ο χρόνος round trip είναι αρκετά σταθερός, η δυναμικότητα στις καθυστερήσεις είναι αρκετά υψηλή ώστε να απαιτείται διαρκής μέτρηση του χρόνου round trip. Για να φανεί το πλεονέκτημα του PERM, έγινε μια εξομοίωση πάνω στην δικτυακή κυκλοφορία του πειράματος του Dartmouth της κλιμακούμενης προ-μέτρησης του χρόνου round trip του PERM και της τεχνικής Κυλιόμενου Παραθύρου με Active Probing. Για κάθε νέα εξωμοιωμένη ροή, αν ο προορισμός ήταν στη λίστα με τις προβλέψεις, θεωρούνταν επιτυχία. Το PERM είχε ποσοστό επιτυχίας 53%, ενώ το Κυλιόμενο Παράθυρο μόλις 28%. Για καθαρά ροές HTTP, το PERM είχε ποσοστό επιτυχίας 92%, ενώ το Κυλιόμενο Παράθυρο 54%.

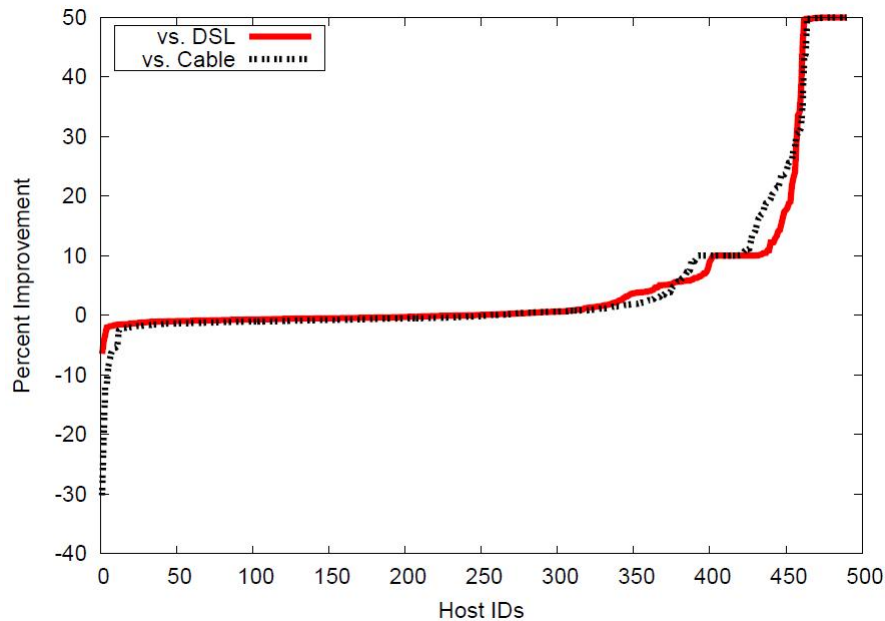
Αφού πλέον έχει δειχθεί η ακρίβεια της τεχνικής κλιμακούμενης προ-μέτρησης και πρό-βλεψης του PERM, για να ποσοτικοποιηθεί και η ωφέλεια από την τεχνική αυτή, έγιναν μετρήσεις από μικρές μεταδόσεις δεδομένων από 150 δημοφιλείς ιστοσελίδες, με τρεις διαφορετικούς δρομολογητές - αυτόν του PERM, το Κυλιόμενο Παράθυρο, και το δρομολογητή Εξισορρόπησης Φόρτου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.8 - το πλήθος απομακρυσμένων προορισμών για τους οποίους ο εκάστοτε δρομολογητής πέτυχε ελάχιστο χρόνο μετάδοσης, και το μέσο χρόνο μετάδοσης.

Scheduling scheme	# of hosts w/ min transmission time	Mean transmission time (sec)
PERM	147	2.790
Sliding Window	87	3.278
Load Balancing	80	3.052

Σχήμα 2.8: Τα διαφορετικά Σχήματα Δρομολόγησης

Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται ο μέσος χρόνος μετάδοσης ανά προορισμό του δρομολογητή του PERM σε σχέση με την απλή DSL και καλωδιακή σύνδεση. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο δρομολογητής του PERM έχει υψηλότερο μέσο χρόνο μετάδοσης μόνον για έναν έως δέκα προορισμούς. Επίσης, όταν οι προορισμοί ξεπερνούν τους 230 το PERM εμφανίζει όλο και

μεγαλύτερη βελτίωση στο χρόνο.



Σχήμα 2.9: Βελτίωση μέσου χρόνου μετάδοσης του PERM σε σχέση με την DSL και την Καλωδιακή απλή σύνδεση.

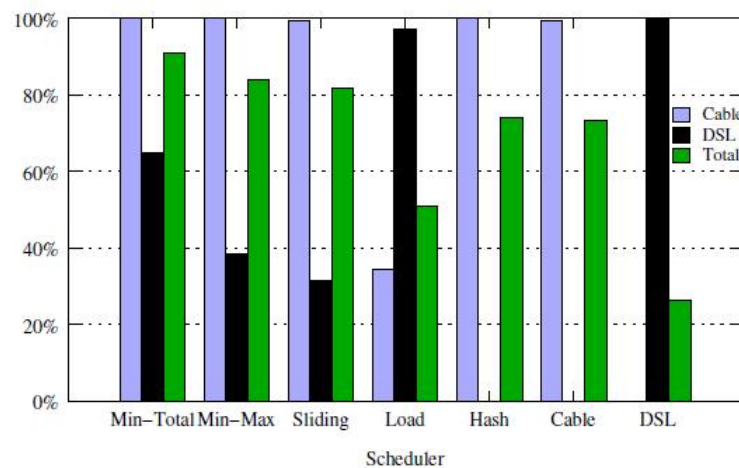
Β. Ροές μεγάλου Όγκου Δεδομένων. Η κύρια επιρροή στις επιδόσεις ροών μεγάλου όγκου, είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Για να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του PERM για τις ροές με μεγάλο όγκο δεδομένων, εκτελέστηκαν ταυτόχρονες λήψεις αρχείων από απομακρυσμένους προορισμούς, των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από 2 έως 30 megabytes. Για το σκοπό της αξιολόγησης, οι δυο τρόποι δρομολόγησης των ροών μεγάλου όγκου της σελίδας 27 αντιπαραθέτονται με τη Δρομολόγηση βάσει Κατακερματισμού της απομακρυσμένης διεύθυνσης, την Δρομολόγηση Εξισορρόπησης Δικτυακού Φόρτου, και τέλος τη μέθοδο Κυλιόμενου Παραθύρου. Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται οι μέσοι χρόνοι μετάδοσης για κάθε σχήμα δρομολόγησης.

Και εδώ είναι εμφανής η υπεροχή των σχημάτων δρομολόγησης του PERM. Ο “min-total” δρομολογητής (Δρομολόγηση με Ελαχιστοποίηση Συνολικού Χρόνου Μετάδοσης, σελ. 27) υπερέχει της δρομολόγησης Εξισορρόπησης Φόρτου κατά 11.9%, της δρομολόγησης βάσει Κατακερματισμού των διευθύνσεων κατά 27.7% και της δρομολόγησης Κυλιόμενου Παραθύρου κατά 7.4%. Η χρήση μόνο της καλωδιακής και DSL σύνδεσης βελτιώθηκε κατά 28%

Scheduler	Mean Completion Time (sec)
Min-Total	186.21
Min-Max	199.14
Sliding Window	201.23
Load Balancing	211.37
Cable	257.21
Hash-Based	257.57
DSL	500.54

Σχήμα 2.10: Μέσος χρόνος μετάδοσης Αρχείων μεγάλου όγκου

και 62% αντίστοιχα. Το Σχήμα 2.11 δίνει μια καλύτερη άποψη στη σχέση ανάμεσα στην απόδοση όλων των σχημάτων δρομολόγησης, δείχνοντας τη *χρησιμοποίηση (utilization)*⁶ της κάθε σύνδεσης κατά την εφαρμογή των διαφόρων σχημάτων. Και εδώ, τα δυο σχήματα δρο-



Σχήμα 2.11: Χρησιμοποίηση της Καλωδιακής, DSL και συνολικής (Καλωδιακής+DSL) σύνδεσης με κάθε δρομολογητή.

μολόγησης που επιστρατεύει το PERM πέτυχαν το μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποίησης και στους δυο συνδέσμους ταυτόχρονα. Λόγω μεγαλύτερης χωρητικότητας σύνδεσης όμως, η Καλωδιακή σύνδεση ωφελείται περισσότερο από το PERM. Στο σχήμα επίσης φαίνεται ότι η δρομολόγηση βάσει Κατακερματισμού αξιοποιεί αποκλειστικά την Καλωδιακή σύνδεση, πράγμα που σημαίνει ότι δεν επιτυγχάνεται καλή εξισορρόπηση φόρτου όταν το πλήθος των συνδέσεων είναι μικρό και η δικτυακή κυκλοφορία αραιή. Ενδεχομένως κατά την επιλογή

⁶Το ποσοστό της χωρητικότητας του συνδέσμου που χρησιμοποιείται.

διαφορετικής συλλογής από προορισμούς, η δρομολόγηση βάσει Κατακερματισμού να επέλεγε την DSL σύνδεση μόνο, κάτι που θα κατέληγε σε ακόμη χειρότερη εξισορρόπηση του δικτυακού φόρτου.

Γ. Ανθεκτικότητα. Έχει σημασία να φανεί πως αντιδρά το σύστημα σε περιπτώσεις αποτυχίας ενός από τους διαθέσιμους συνδέσμους, μιας και η ανοχή σε σφάλματα είναι στόχος στο Multihoming. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες προ-μετρήσεις (probes) με την παράγραφο (Α), ο συνολικός ρυθμός αποτυχιών κατά την εκτέλεση των μετρήσεων ήταν 20.3% στην Καλωδιακή και 12.8% στην DSL. Από αυτές τις αποτυχίες, μόνον το 4% αυτών της Καλωδιακής και το 6% αυτών της DSL συνέβησαν ταυτόχρονα, οπότε και η συνδεσιμότητα του συστήματος κατέρρευσε εντελώς. Συνολικά, κατά το 94% των αποτυχιών αποφεύχθηκε χρησιμοποιώντας το σχήμα δρομολόγησης του PERM.

Δ. Επιβαρύνσεις Αυτό καθαυτό το υβριδικό σχήμα δρομολόγησης του PERM επιφέρει επιπλέον καθυστερήσεις στη δημιουργία και τερματισμό μιας σύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι πιο αξιοσημείωτες καθυστερήσεις που παρατηρήθηκαν περιλαμβάνουν μια καθυστέρηση κατά 33% κατά την λήψη δεδομένων από μια σύνδεση και 16% κατά την αποστολή. Ο λόγος είναι η παρεμβολή της βιβλιοθήκης του PERM στο Socket API του συστήματος. Η καθυστέρηση που προστέθηκε στην ειδική κλήση συστήματος `connect` ήταν 1.40ms (ή 159%) ενώ στην κλήση συστήματος `socket` ήταν 0.050ms (ή 931%). Παρόλο που τα ποσοστά της καθυστέρησης που προστίθεται από το PERM είναι φαινομενικά μεγάλα, η συνολική χρονική διάρκεια είναι πολύ μικρή για να γίνει αντιληπτή από το χρήστη.

2.1.6 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, το PERM είναι ένα σύστημα που επιτυγχάνει αυτό για το οποίο έχει σχεδιαστεί - να υλοποιήσει δηλαδή στην πράξη μια αποδοτική λύση για το Multihoming, από την οπτική της δρομολόγησης των ροών στους διαθέσιμους συνδέσμους. Η ενίσχυση του δρομολογητή του PERM με τους μηχανισμούς πρόβλεψης που αναλύθηκαν, δίνει έναν ισχυρό συνδυασμό που βελτιώνει ακόμη περισσότερο την απόδοση της δρομολόγησης. Έτσι το PERM επιτυγχάνει συνολικά σχεδόν 15% μείωση του μέσου χρόνου μετάδοσης των μικρού

όγκου ροών και μέχρι 27% για τις μεγάλου όγκου ροές, σε σύγκριση με σχήματα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται σε άλλες παρεμφερείς υλοποιήσεις του Multihoming. Ιδιαίτερα σε σχέση με την απλή καλωδιακή και DSL σύνδεση, για τις ροές μικρού όγκου η καθυστέρηση μετάδοσης μειώνεται μέχρι και 50%, ενώ ο μέσος χρόνος μετάδοσης για τις ροές μεγάλου όγκου μειώνεται κατά 28% και 62% αντίστοιχα για την κάθε σύνδεση.

Ενώ οι επιδόσεις της δρομολόγησης του PERM είναι εμφανείς, υπάρχουν και κάποια θέματα που δεν έχουν ακόμη υλοποιηθεί από τους δημιουργούς, και βρίσκονται υπό συζήτηση. Η χρήση του PERM, προϋποθέτει τη θέληση για διαμοιρασμό της σύνδεσης ενός χρήστη, διότι κανείς χρήστης δεν έχει στην ιδιοκτησία του δυο διαφορετικές συνδέσεις, και βασίζεται στο διαμοιρασμό με κάποιο γείτονα. Για να υπάρξει όμως αυτή η συνεργασία, θα πρέπει να υπάρχει και κάποια μορφή κινήτρου. Αυτό το ρόλο ακριβώς παίζει ο Διαχειριστής Κινήτρου που έχει περιγραφεί. Ένα τέτοιο σύστημα βρίσκεται υπό υλοποίηση από τους δημιουργούς του PERM, μιας και η χρήση του κρίνεται αναγκαία σε αυτή την περίπτωση.

Ένα ακόμη θέμα υπό έρευνα είναι το θέμα της ασφάλειας. Πάνω σε αυτό, ερευνώνται μέθοδοι αύξησης της ασφάλειας σύνδεσης χρησιμοποιώντας φιλτράρισμα των διευθύνσεων MAC⁷ και έλεγχος στη σύνδεση σε τοπικό ασύρματο δίκτυο με χρήση 802.11i (WPA) κλειδιών. Για την απόκρυψη πληροφοριών της δικτυακής κυκλοφορίας του κάθε χρήστη, μιας και εδώ τίθεται θέμα ιδιωτικού απορρήτου, συζητείται η υλοποίηση μιας μεθόδου δημιουργίας εικονικής κυκλοφορίας, η οποία ουσιαστικά θα αποκρύπτει από τον έξω κόσμο την καθαρή, πραγματική κυκλοφορία του χρήστη.

Η ανάλυση που έγινε για τη δυνατότητα πρόβλεψης στη δρομολόγηση του PERM έδειξε ότι η κυκλοφορία στον παγκόσμιο ιστό και στο πρωτόκολλο του e-mail είναι προβλέψιμη. Άλλα είδη κυκλοφορίας στο διαδίκτυο δεν είναι προβλέψιμα, αλλά μάλλον τυχαία, όπως κυκλοφορία σε P2P και Voice Over IP (VoIP) συστήματα. Αυτά τα είδη δικτυακής κυκλοφορίας βρίσκονται υπό μελέτη ώστε να βρεθούν τρόποι πρόβλεψης αλλά και δρομολόγησης που να είναι αποδοτικοί.

Το Σύστημα PERM αποτελεί μια υψηλού επιπέδου προσπάθεια στα πλαίσια του Multihoming, η οποία εφαρμόστηκε στην πράξη και τα αποτελέσματα δείχνουν πολλά πράγματα. Το γεγονός ότι κάποιες πτυχές δεν έχουν ερευνηθεί εις βάθος ακόμη δεν μπορεί να χαρα-

⁷Medium Access Control

κτηρίσει το PERM ως ελλιπές, μιας και η ουσιαστική αξία του Multihoming αναδείχθηκε επιτυχώς και δημιουργήθηκε ένα σύστημα που στην πράξη και στην καθημερινότητα μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα. Καθώς η τεχνολογία των δικτύων και των υπολογιστικών συστημάτων προχωρά, ενδεχομένως το Multihoming να γίνει κατεστημένο στη δικτυακή καθημερινότητα, και σίγουρα το PERM είναι ένα βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.

2.2 Μια Πειραματική Ανάλυση του Multihoming

2.2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα PERM που γνωρίσαμε στην προηγούμενη ενότητα αποτελεί μια υλοποίηση στην πράξη ενός πλήρους συστήματος Multihoming. Η μελέτη στο PERM έγινε για το συγκεκριμένο σύστημα, και τα συμπεράσματα αφορούν κυρίως αυτό. Έχει ενδιαφέρον να φανεί γενικότερα η έκταση της χρησιμότητας του Multihoming, και στη βάση της ανθεκτικότητας σε σφάλματα αλλά και στη βάση της βελτίωσης των επιδόσεων της δικτύωσης. Αυτό ακριβώς έχει δημοσιευθεί στο [5], με συνεργασία των *A. Akella του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon*, *A. Shaikh του Ερευνητικού Κέντρου της IBM* και *R. Sitaraman του Πανεπιστημίου της Μασαχουσέτης*.

Ο ξεκάθαρος στόχος εδώ ήταν η ποσοτικοποίηση του εύρους στο οποίο χρήστες του διαδικτύου μπορούν να εκμεταλλευτούν πολλαπλές συνδέσεις σε παρόχους υπηρεσιών Internet (ISPs) για αύξηση των επιδόσεων (ταχύτητα και αποδοτικότητα των μεταδόσεων δεδομένων) της συνδεσιμότητάς τους καθώς και για βελτίωση της ανθεκτικότητάς της. Δυο είναι οι οπτικές στις οποίες εστιάζει η μελέτη. Αφενός η ανάγκη ιστοσελίδων και κέντρων διανομής δεδομένων (web sites και data centers) για διατήρηση υψηλών επιδόσεων στα τμήματα του δικτύου τους, και αφ'ετέρου το ενδιαφέρον επιχειρήσεων (enterprise subscribers) για την λήψη μεγάλων όγκων δεδομένων από ποικίλους παρόχους δεδομένων. Και στις δυο περιπτώσεις, μελετάται η περίπτωση όπου ο συνδρομητής οποιασδήποτε κατηγορίας έχει μικρό ή καθόλου έλεγχο πάνω στη διαδρομή της ροής δεδομένων από την πηγή στον προορισμό αλλά μόνο τη δυνατότητα επιλογής του παρόχου που παρέχει συνδεσιμότητα μιας μεταπήδησης (*first hop connectivity*) με το Internet.

Για τις ανάγκες της μελέτης συλλέγονται δεδομένα μετρήσεων από servers και κόμβους παρακολούθησης (monitoring nodes), της Akamai, μιας εταιρίας παροχής υπηρεσιών διανομής δεδομένων⁸. Αυτοί οι servers και οι κόμβοι της Akamai είναι συνδεδεμένοι με ποικίλους ISP, συνήθως έναν ανά κόμβο ή server. Αυτό δίνει την ευκαιρία για μελέτη των δικτυακών επιδόσεων των διάφορων ISP από την οπτική γωνία και των επιχειρήσεων αλλά και των διανομέων δεδομένων, στις διάφορες πόλεις στις οποίες υπάρχουν servers της Akamai.

Η μελέτη γίνεται υπό την έννοια του *k-multihoming*, όπου μετρώνται και ποσοτικοποιούνται οι δικτυακές επιδόσεις όταν ένας συνδρομητής χρησιμοποιεί multihoming σε k παρόχους σε δεδομένη πόλη. Αυτό γίνεται πάνω στη βάση ότι ο συνδρομητής μπορεί να χρησιμοποιήσει και τους k παρόχους ώστε να επιλέξει αυτόν που αποδίδει καλύτερα την κάθε στιγμή. Η μελέτη θα δείξει την πορεία των επιδόσεων καθώς αυξάνεται το k καθώς και τη χρησιμοποίηση του κάθε παρόχου κατά το *k-multihoming*, και άλλα στοιχεία. Τελικά δείχνεται ότι το *k-multihoming* επιφέρει αξιοσημείωτη βελτίωση στις επιδόσεις και στην περίπτωση των επιχειρήσεων αλλά και στην περίπτωση των διανομέων δεδομένων.

Πέρα από τις επιδόσεις, γίνεται και αξιολόγηση των βελτιώσεων σε θέματα διαθεσιμότητας της συνδεσιμότητας, της ανοχής δηλαδή της πλευράς του συνδρομητή σε αποτυχίες των συνδέσεων με το Internet.

2.2.2 Multihoming για Επιδόσεις

Για να φανεί η προοπτική βελτίωσης των δικτυακών επιδόσεων ενός συνδρομητή με χρήση του multihoming, παρουσιάζονται δυο μελέτες περιπτώσεων (case studies).

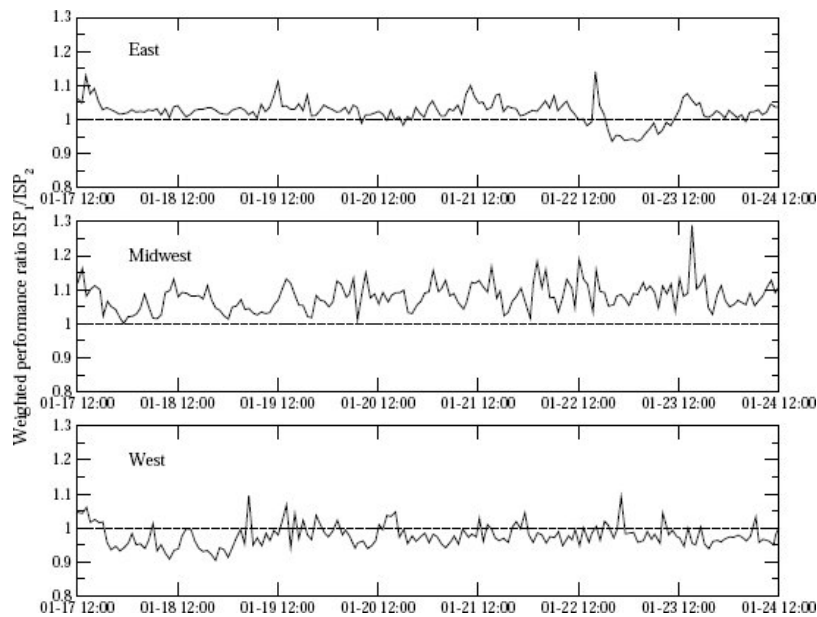
Case Study I: Multihoming σε Κέντρα Διανομής Δεδομένων

Το πρώτο παράδειγμα αφορά σε τρία εμπορικά Κέντρα Διανομής Δεδομένων, το καθένα από τα οποία συνδεδεμένο με multihoming σε δυο ISP. Αυτά τα κέντρα φιλοξενούν την ιστοσελίδα της IBM Corporation, και δέχονται αιτήσεις από χρήστες κατανεμημένους σε παγκόσμια κλίμακα. Κάθε κέντρο είναι εξοπλισμένο με μια μονάδα παθητικής συλλογής στατιστικών

⁸Για την ακρίβεια, η Akamai παρέχει υπηρεσίες mirroring από servers των πελατών της, ακριβή δηλαδή αντίγραφα των δεδομένων τους ώστε να υπάρχει πρόσβαση των ίδιων δεδομένων από πολλά σημεία.

δεδομένων, η οποία παρακολουθεί στατιστικά όπως η καθυστέρηση στη σύνδεση καθενός από τους παρόχους, κατά τη μετάδοση δεδομένων προς τους χρήστες.

Οι εκτιμήσεις της καθυστέρησης βασίζονται στο *χρόνο χειραψίας round trip* ή *hrtt* (*handshake round trip time*). Το *hrtt* ορίζεται ως ο χρόνος ανάμεσα στη λήψη του πρώτου πακέτου TCP SYN από τον πελάτη που ζητά τη σύνδεση στο κέντρο, μέχρι τη λήψη του τελικού TCP ACK για την ολοκλήρωση της τριπλής χειραψίας του TCP⁹. Οι πελάτες κατευθύνονται σε ένα από τα τρία κέντρα μέσω ενός μηχανισμού επιλογής βάσει εξισορρόπησης φόρτου στα τρία κέντρα. Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η μέση σχετική καθυστέρηση (ο λόγος των επιδόσεων ISP_1/ISP_2) που παρατηρήθηκε στους συνδέσμους των δυο παρόχων του κάθε data center σε διάστημα μιας εβδομάδας. Ο μέσος όρος σταθμίζεται από τη συχνότητα αιτήσεων, ώστε



Σχήμα 2.12: Σχετική επίδοση για τα data centers με 2-multihoming

να δοθεί έμφαση στους χρήστες που δημιουργούν μεγαλύτερη κυκλοφορία. Συμπερασματικά, κάθε data center έχει την ευκαιρία να βελτιστοποιήσει την επίδοσή του εάν υπάρξει η δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης της κυκλοφορίας πάνω στους συνδέσμους των παρόχων του.

⁹Η διαδικασία TCP σύνδεσης μιας πηγής με έναν προορισμό περιλαμβάνει διαδικασία τριών βημάτων. Η πηγή στέλνει ένα πακέτο TCP SYN στον προορισμό, ο οποίος απαντά με ένα πακέτο TCP SYN-ACK, και τελικά η πηγή στέλνει ένα τελικό πακέτο TCP ACK πίσω στον προορισμό.

Case Study II: Multihoming σε Επιχειρήσεις

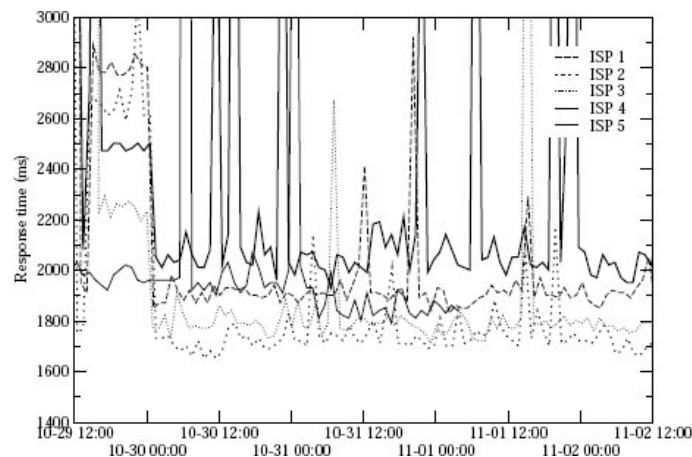
Η επόμενη μελέτη γίνεται από την οπτική γωνία μιας επιχείρησης που επιθυμεί να βελτιστοποιήσει την συνδεσιμότητά της προς παρόχους υπηρεσιών και εφαρμογών στον παγκόσμιο ιστό. Φαινομενικά είναι δύσκολο για μια επιχείρηση να ελέγξει τη δρομολόγηση των δεδομένων που λαμβάνει από κάποιον πάροχο δεδομένων. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με χρήση κάποιου εύρους διευθύνσεων από κάθε πάροχο της επιχείρησης, και κάθε μετάδοση δεδομένων να γίνεται στο αντίστοιχο εύρος διευθύνσεων, αναλόγως με το ποιός πάροχος αποδίδει καλύτερα. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές NAT¹⁰ σε συνδυασμό με αξιοποίηση του DNS¹¹. Χρησιμοποιούνται δεδομένα από λογισμικό της Keynote Systems, μιας εταιρίας παροχής υπηρεσιών δοκιμών και μετρήσεων απόδοσης για κινητές τηλεπικοινωνίες και για το Internet. Το λογισμικό αυτό βρίσκεται κατανεμημένο και συνδεδεμένο σε ISPs πρώτου επιπέδου. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης της επίδοσης των ISP και των διαφορών στις επιδόσεις σε κάθε πόλη.

Οι agents (το λογισμικό) της Keynote Systems ρυθμίστηκαν να καταγράφουν το χρόνο μετάδοσης μιας ολόκληρης ιστοσελίδας συνολικού μεγέθους 104 kilobytes. Κάθε ένας agent της Keynote Systems ζητούσε την ιστοσελίδα αυτή για πλήρη μετάδοση κάθε ώρα για μια περίοδο λίγο μεγαλύτερη από τρεις μήνες. Στο Σχήμα 2.13 φαίνονται στιγμιότυπα από συνεχή traces, χωρίς δηλαδή σφάλματα των agents, στο Los Angeles. Εκεί βρίσκονται τοποθετημένοι μερικοί agents, με κάποια μικρή επικάλυψη στους ISP τους οποίους παρακολουθούν. Το συμπέρασμα εδώ είναι ότι όταν τα traces παραμένουν σε έναν συγκεκριμένο ISP, σε βάθος χρόνου παρατηρείται σταδιακή υποβάθμιση στην απόδοση. Για παράδειγμα, σχεδόν στην αρχή του trace η απόδοση ανάμεσα στους ISPs είναι σημαντικά διαφορετική (περίπου 200ms διαφοράς) με τον ISP 5 τον καλύτερο και τον ISP 1 τον χειρότερο. Μετά τις 30 Οκτώβρη όμως, η απόδοση αλλάζει δραματικά.

Αυτές οι θεωρητικές μελέτες των παραπάνω περιπτώσεων δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στο κέρδος απόδοσης που μπορεί να φθάσει το multihoming. Παρόλα αυτά όμως, δείχνουν ότι σωστή χρήση παρόχων Internet μπορεί να δώσει βελτιωμένες δικτυακές επιδόσεις. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων για την περιεκτικότερη ανάλυση

¹⁰Network Address Translation

¹¹Domain Name Server



Σχήμα 2.13: Απόδοση των ISP των διάφορων πελατών

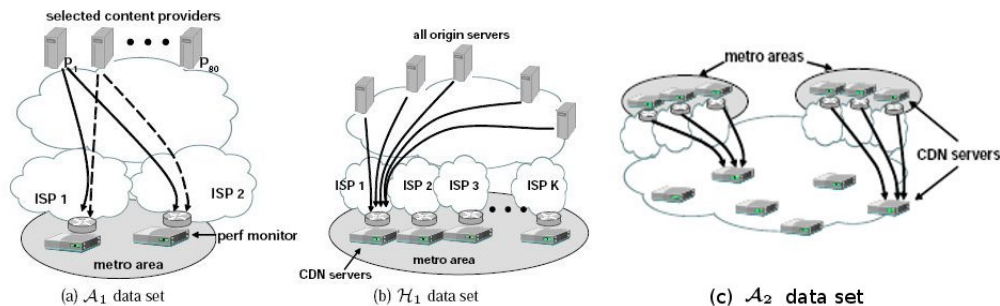
του οφέλους από το multihoming.

2.2.3 Η Οπτική των Επιχειρήσεων

Το κέρδος στην απόδοση του δικτύου μιας επιχείρησης περιγράφεται από τις επιδόσεις των μεταδόσεων ροών προς την επιχείρηση από προορισμούς ενδιαφέροντος στο Internet, όπως δημοφιλείς ιστοσελίδες. Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικά σύνολα από δεδομένα, A_1 και H_1 , που έχουν συλλεχθεί από κόμβους της Akamai. Σημαντικό στοιχείο των δεδομένων αυτών αποτελεί το γεγονός ότι τα σημεία συλλογής των δεδομένων είναι συνδεδεμένα σε μια μεγάλη ποικιλία από ISPs, και κατανεμημένα σε πολλές μητροπολιτικές περιοχές.

Σύνολο Δεδομένων A_1 : Το σύνολο αυτό περιλαμβάνει στατιστικά στοιχεία από 27 κόμβους παρακολούθησης της Akamai. Υπάρχουν ένας ή δυο κεντρικοί κόμβοι, οι οποίοι συνδέονται σε διαφορετικούς παροχείς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14(α). Οι κόμβοι αυτοί περιοδικά ζητούν και λαμβάνουν δεδομένα από επιλεγμένους διανομείς δεδομένων, πελάτες της Akamai. Για κάθε μετάδοση, ο κόμβος παρακολούθησης καταγράφει το μέγεθος του αντικειμένου που μεταδίδεται, το συνολικό χρόνο απόκρισης, τυχόν σφάλματα, και το χρόνο επιστροφής (turnaround time) της αίτησης για λήψη. Ο χρόνος επιστροφής της αίτησης ορίζεται ως το χρόνο ανάμεσα στην αποστολή του τελευταίου byte της αίτησης για λήψη μέχρι τη λήψη του πρώτου byte της απάντησης του server. Ο χρόνος αυτός αποτελεί ένδειξη για την κα-

θυστέρηση μεταδόσεων στο δίκτυο. Τα στατιστικά στοιχεία συλλέγονται για λήψεις από 80 διαφορετικούς προορισμούς, για διάστημα τριών ημερών.



Σχήμα 2.14: Τα τρία σύνολα δεδομένων της μελέτης

Σύνολο Δεδομένων H_1 : Για κάθε server της Akamai, αυτό το σύνολο περιέχει τους ωριαίους μέσους χρόνους turnaround για αιτήσεις που έγιναν προς τους αρχικούς servers διανομής δεδομένων (Σχήμα 2.14β), σε περίπτωση που ο mirror server δεν έχει τοπικά αποθηκευμένα τα δεδομένα που ζητούνται από χρήστες και πρέπει να τα λάβει από κάποιον από τους αρχικούς servers. Οι περίοδοι συλλογής ήταν δυο, από πέντε μέρες διάρκεια έκαστη. Λόγω του ότι οι πελάτες της Akamai θεωρούνται καλά εξοπλισμένοι σε επίπεδο servers, προκύπτει ότι ο χρόνος turnaround αφορά σχεδόν μονάχα στην καθυστέρηση λόγω δικτύου. Αυτή ακριβώς η καθυστέρηση θεωρείται κρίσιμος παράγοντας στην αξιολόγηση επίδοσης των λήψεων από τους διανομείς δεδομένων. Η ρυθμαπόδοση των μεταδόσεων δε θα μπορούσε να είναι ενδεικτική σε αυτή την περίπτωση μιας και λόγω του μικρού μεγέθους των αρχείων που μεταφέρονται (μικρότερα από 10 kilobytes) δεν θα ήταν αξιόπιστη.

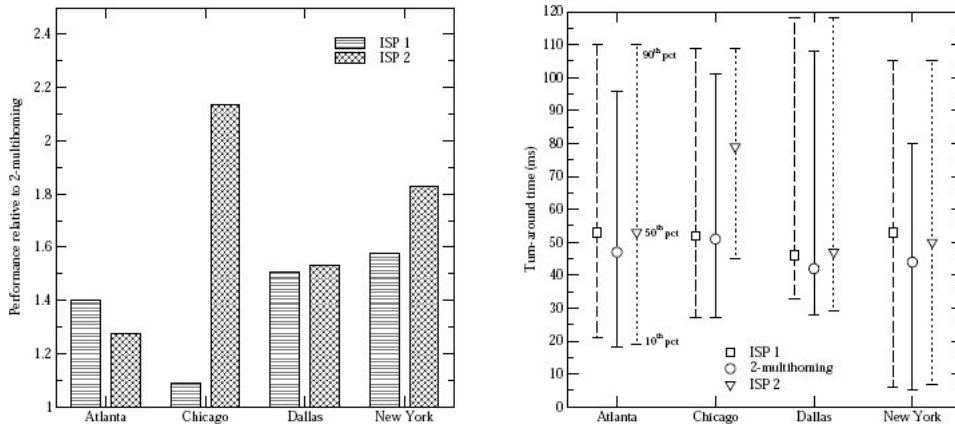
Όφελος στην Απόδοση με 2-multihoming

Το σύνολο A_1 χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του όφελους από το 2-multihoming. Συγκρίνεται η απόδοση λήψης κάθε αρχείου από τον καλύτερο πάροχο, με την περίπτωση λήψης όλων από μοναδικό πάροχο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή του λόγου αυτού για τις λήψεις από όλους τους παρόχους. Πιο τυπικά, ο υπολογισμός εκφράζεται ως εξής:

$$N_X = \frac{\sum_{i,t} (M_X(P_i, t)) / (M_{best}(P_i, t))}{Numvalid(P_i, t)}$$

όπου, N_X η απόδοση με τον ISP X στο 2-multihoming, $M_X(P_i, t)$ ο χρόνος turnaround για τη μετάδοση που άρχισε σε χρόνο t από τον κόμβο που είναι συνδεδεμένος με τον ISP X και μετέφερε αρχείο από τον πάροχο P_i . Επίσης, $M_{best}(P_i, t)$ είναι η καλύτερη τιμή του χρόνου αυτού. Το άθροισμα του αριθμητή γίνεται για κάθε ζεύγος (P_i, t) , ώστε υπήρξε μετάδοση στο χρόνο t προς τον πάροχο P_i μέσω και των δύο ISP, A και B. Η συνάρτηση $Numvalid(P_i, t)$ μετρά το συνολικό αριθμό από τέτοια ζεύγη (P_i, t) . Η βέλτιστη τιμή της N_X είναι 1 και συμβαίνει όταν ο ένας ISP είναι σταθερά καλύτερος από τον άλλο. Αν $N_X > 1$, τότε το $N_X - 1$ δίνει τη μέγιστη δυνατή βελτίωση στην απόδοση με χρήση του 2-multihoming σε σύγκριση με την απόδοση χρησιμοποιώντας μόνο τον ISP X.

Στο Σχήμα 2.15(α) φαίνεται το δυνατό όφελος από το 2-multihoming, δηλαδή η τιμή N_X για κάθε ISP X. Είναι φανερό ότι το 2-multihoming θα επιφέρει κέρδος, αν και σε ποικίλους βαθμούς, αναλόγως την πόλη και τον ISP. Το Σχήμα 2.15(β) δείχνει την απόλυτη βελτίωση



Σχήμα 2.15: (a) Δυνατό Όφελος του 2-multihoming, (b) Ποικιλομορφία στα οφέλη

στην επίδοση για το μέσο, δέκατο και ενενηκοστό εκατοστημόριο του χρόνου turnaround. Το σημαντικό εδώ είναι ότι το 2-multihoming βελτιώνει ομοιόμορφα τις μέγιστες τιμές του χρόνου, αλλά έχει μικρότερη επιρροή στη μέση και ελάχιστη απόδοση.

Όφελος στην Απόδοση με k -multihoming

Τα σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω δεν είναι ικανά να δώσουν αποτελέσματα για το k -multihoming. Όταν ένας δεδομένος πάροχος χρησιμοποιείται για *όλες* τις μεταδόσεις προς και από την επιχείρηση, ανεξαρτήτως προορισμού, αναφερόμαστε στο *απλο-*

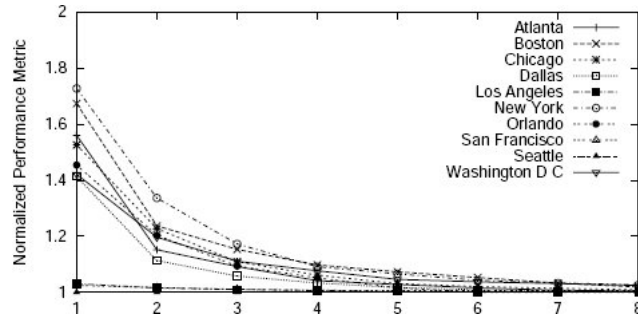
ϊκό ή *naive k-multihoming*. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την ανάλυση για το 2-multihoming όπου η επιχείρηση μπορεί να διαλέξει τον καλύτερο πάροχο για κάθε προορισμό, κάθε χρονική στιγμή - αυτό καλείται *πραγματικό ή true k-multihoming*. Το μέγιστο όφελος από το πραγματικό k-multihoming οριοθετείται κάτωθεν από το απλοϊκό k-multihoming.

Σε αντιστοιχία με το 2-multihoming, το όφελος απόδοσης του απλοϊκού k-multihoming υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{OP_k} = \frac{\sum_t HT_{OP_k}(t)/HT_{best}(t)}{Numvalid(t)}$$

όπου N_{OP_k} η απόδοση χρησιμοποιώντας την επιλογή OP_k , σε σχέση με την απόδοση χρησιμοποιώντας όλους τους διαθέσιμους ISP, $HT_{OP_k}(t)$ η καλύτερη απόδοση μέσου χρόνου turnaround ανάμεσα στους k ISPs στο σύνολο OP_k την ώρα t , $HT_{best}(t)$ η καλύτερη απόδοση μέσου χρόνου turnaround την ώρα t ανάμεσα σε όλους τους διαθέσιμους φορείς. Το άθροισμα στον αριθμητή γίνεται για όλες τις ώρες t για τις οποίες όλοι οι k ISPs έχουν αποθηκεύσει τα στατιστικά του μέσου χρόνου turnaround στο σύνολο δεδομένων H_1 . Η συνάρτηση $Numvalid(t)$ μετρά τον αριθμό από τέτοια στιγμιότυπα t .

Για να γίνει εφικτή η εκτέλεση της μελέτης από υπολογιστικής απόψεως, ο αριθμός των ISP που συνδυάζονται για να δώσουν τις $\binom{I}{k}$ δυνατές επιλογές για k-multihoming, όπου I το πλήθος των διαθέσιμων ISPs, επιλέγεται να είναι το πολύ $I = 20$ σε κάθε πόλη. Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται το μέγιστο όφελος απόδοσης για μια εβδομάδα δεδομένων στο H_1 . Βλέπουμε ότι για $k > 1$, η καμπύλη πλησιάζει στο 1 όλο και περισσότερο, άρα το όφελος μεγαλώνει. Επίσης, για $k > 4$ το όφελος είναι μόνον οριακά μεγαλύτερο από ότι για μικρότερες τιμές του k . Όπως παρατηρήθηκε και στο 2-multihoming, όσον αφορά στο χρόνο



Σχήμα 2.16: Σχετικό Όφελος από το naive k-multihoming

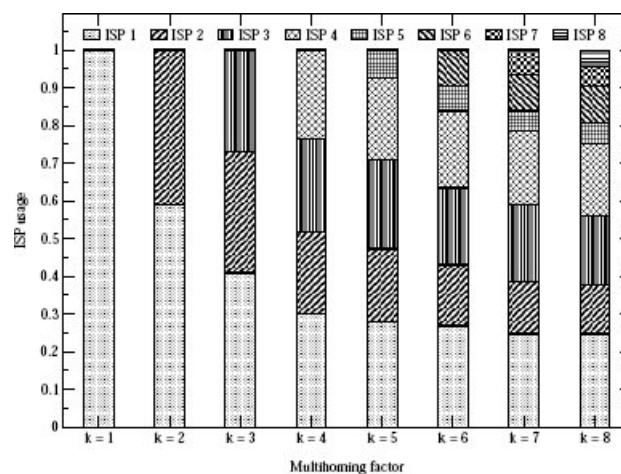
turnaround, σημαντική βελτίωση παρατηρείται περισσότερο στις τιμές του μέγιστου παρά

στις τιμές του μέσου και ελάχιστου χρόνου turnaround. Στο Σχήμα 2.17 φαίνεται η ατομική απόδοση του κάθε ISP, σε αντιπαράθεση με την απόδοση στο k -multihoming, όταν ο συγκεκριμένος ISP προστίθεται στους k ISPs του multihoming.

ISP	Rank	1-multihoming performance	k -multihoming performance
ISP 1	1	1.72	1.72
ISP 2	2	1.93	1.33
ISP 3	9	2.61	1.17
ISP 4	3	2.05	1.09
ISP 5	4	2.29	1.07
ISP 6	19	3.16	1.04
ISP 7	17	3.03	1.03
ISP 8	13	2.93	1.03

Σχήμα 2.17: Ατομική (1-multihoming) και συνδυασμένη (k -multihoming) απόδοση των 8 ISPs στη Νέα Υόρκη, κατά τη σειρά που προστίθενται στο multihoming

Για τους 8 αυτούς ISPs της Νέας Υόρκης, στο Σχήμα 2.18, φαίνεται η χρησιμοποίησή τους, στις k περιπτώσεις multihoming που υλοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.18: Χρησιμοποίηση των ISPs στο k -multihoming στην πόλη της Νέας Υόρκης.

2.2.4 Η Οπτική ενός Web Server

Το όφελος από τη χρήση του multihoming, από την οπτική ενός web server, αντικατοπτρίζεται στην από άκρη σε άκρη απόδοση των αιτήσεων που εξυπηρετεί για μια ευρεία κατανομή πελατών. Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης, διαμορφώνεται ένα νέο Σύνολο Δεδομένων:

Σύνολο Δεδομένων A_2 : Σε πέντε μεγάλες πόλεις των ΗΠΑ επιλέγονται 34 servers της Akamai οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε διαφορετικούς ISPs οι οποίοι αναπαριστούν τον web server με k-multihoming, και σε διαφορετικές από τις πρώτες πέντε πόλεις, επιλέγονται 40 servers της Akamai για το ρόλο των κατανεμημένων web πελατών. Περιοδικά εκτελούνται μεταδόσεις αρχείων μεγέθους 50 kilobytes από τους πρώτους servers προς τους ‘πελάτες’. Όλοι οι servers διατηρούν στατιστικά παρόμοια με αυτά στο σύνολο A_1 της σελίδας 41. Και εδώ η προσοχή εστιάζεται στο χρόνο turnaround. Στο Σχήμα 2.14(ς) φαίνεται η αναπαράσταση του συνόλου.

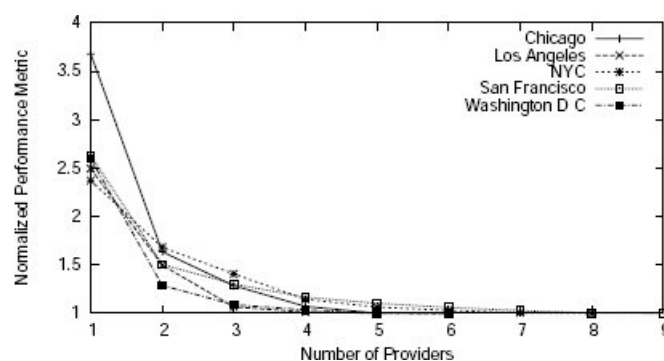
Όφελος στην Απόδοση

Για την τυποποίηση του οφέλους, χρησιμοποιείται παρόμοια στρατηγική με την περίπτωση του multihoming σε επιχειρήσεις. Έτσι, θα έχουμε

$$N_{OP_k} = \frac{\sum_{i,t} M_{OP_k}(A_i, t) / M_{best}(A_i, t)}{Numvalid(t)}$$

όπου $M_{best}(A_i, t)$ είναι η μικρότερη τιμή του χρόνου turnaround για μετάδοση προς τον πελάτη A_i στο χρόνο t , M_{OP_k} ο μικρότερος turnaround χρόνος για τους ISPs του συνόλου OP_k . Το άθροισμα γίνεται για τις χρονικές στιγμές t οπότε συμβαίνουν μεταδόσεις από όλους τους ISPs προς έναν πελάτη A_i , με $Numvalid(t)$ να είναι το πλήθος αυτών των στιγμών.

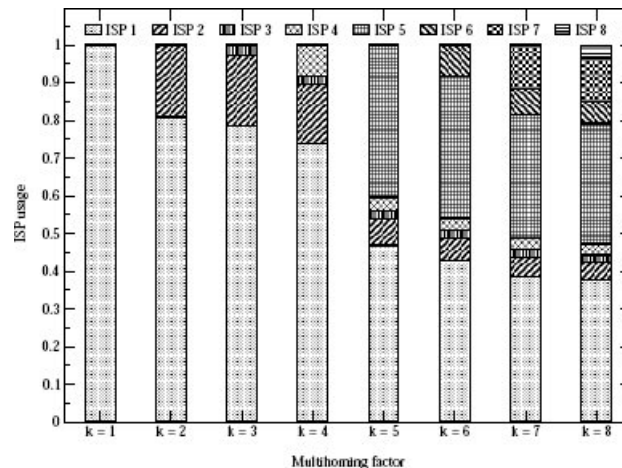
Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται το κανονικοποιημένο όφελος από το multihoming σα συνάρτηση του πλήθους ISPs.



Σχήμα 2.19: Όφελος από το multihoming για έναν Web Server.

Τα αποτελέσματα και εδώ είναι αντίστοιχα με την περίπτωση του multihoming σε επιχειρήσεις. Στην περίπτωση του web server, το k-multihoming έχει περισσότερη επιρροή

στο μέσο και ελάχιστο χρόνο turnaround, σε αντίθεση με το k -multihoming σε επιχειρήσεις. Τέλος, στο Σχήμα 2.20 φαίνεται η χρησιμοποίηση του καθενός από τους ISPs στο k -multihoming και στην πόλη της Νέας Υόρκης.



Σχήμα 2.20: Χρησιμοποίηση των ISPs στο k -multihoming για web server στην πόλη της Νέας Υόρκης.

2.2.5 Αξιοπιστία

Η διαθεσιμότητα παραπάνω από μιας συνδέσεων με το Internet λόγω του multihoming αυξάνει την αξιοπιστία της συνδεσιμότητας των δικτύων που το χρησιμοποιούν. Η αξιοπιστία αυτή όμως εξαρτάται από τη δομή των δικτύων που έχουν multihoming. Γίνεται λοιπόν μια μελέτη του κέρδους σε αξιοπιστία από το multihoming λαμβάνοντας υπόψη την πολυμορφία στα μονοπάτια δικτύου. Το σύνολο δεδομένων T_1 χρησιμοποιείται για την ανάλυση αυτή.

Το Σύνολο Δεδομένων T_1 : Το σύνολο αυτό περιέχει μετρήσεις για δικτυακές διαδρομές από 50 κόμβους της Keynote Systems που επιλέγουν servers της Akamai τοποθετημένους σε τρεις πόλεις. Οι κόμβοι της Keynote Systems αντιπροσωπεύουν καλώς συνδεδεμένα σημεία στο δίκτυο και όχι απλούς χρήστες. Έτσι, το σύνολο T_1 παρέχει πληροφορίες για τη συνδεσιμότητα σε επίπεδο IP και όχι φυσικό (καλώδια, οπτικές ίνες). Έτσι οι μετρήσεις αξιοπιστίας αφορούν την ευρωστία σε αποτυχίες επιπέδου IP και όχι του υλικού.

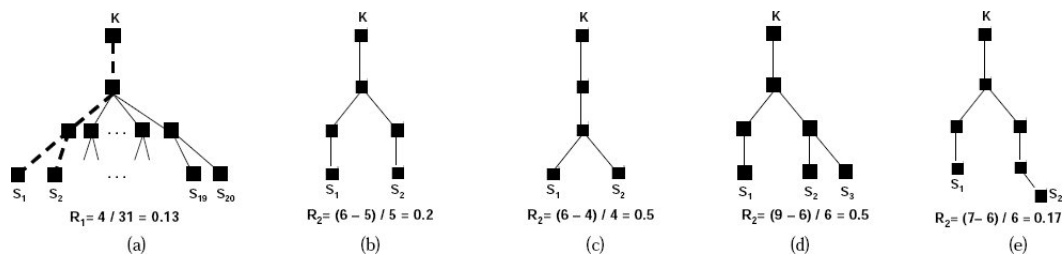
Ποσοτικοποίηση της Αξιοπιστίας

Το ζήτημα της αξιοπιστίας προσεγγίζεται με το συνδυασμό των μονοπατιών από κάθε κόμβο της Keynote Systems σε κάθε σερερ της Akamai σε μια δεδομένη πόλη. Τα μονοπάτια αυτά σχηματίζουν ένα δέντρο με ρίζα έναν κόμβο της Keynote Systems και φύλλα servers της Akamai στην ίδια πόλη. Οι servers της Akamai αντιπροσωπεύουν ένα δίκτυο με multihoming και οι κόμβοι της Keynote τυπικούς προορισμούς με τους οποίους επικοινωνεί το multihomed δίκτυο.

Οι servers της Akamai συμβολίζονται ως $S_1, \dots, S_{20}$, και $OP_k = S_{j_1}, \dots, S_{j_k}$ είναι μια επιλογή multihoming με k ISPs, ουσιαστικά υποσύνολο αυτών των servers. Το δέντρο $T_{i,k}$ είναι η ένωση των μονοπατιών από έναν κόμβο της Keynote, K_i , σε κάθε από τους S_{j_k} . $E_{i,k}$ είναι το πλήθος των ακμών του $T_{i,k}$. $P_{i,k}$ είναι το πλήθος των hops (μεταβιβάσεων) του κάθε ενός από τα k μονοπάτια που συνθέτουν το δέντρο. Επομένως, η ανάλυση της πολυμορφίας λόγω του multihoming βασίζεται σε δυο μετρικές:

- $R_1(OP_k) = \frac{1}{50} \sum_i \frac{E_{i,k}}{E_{i,20}}$: Το $R_1 OP_k$ είναι ανάλογο στο μέσο όρο (για κάθε κόμβο K_i) από το κλάσμα των ακμών του $T_{i,20}$ που ανήκουν και στο $T_{i,k}$. Η ποσότητα αυτή εκτιμά πόσος από το συνολικό πλεονασμό που παρέχεται από τους 20 ISPs μπορεί να αξιοποιηθεί με χρήση μόνον των k ISP στο σύνολο OP_k .
- $R_2 OP_k = \frac{1}{50} \sum_i \frac{P_{i,k} - E_{i,k}}{E_{i,k}}$: Το $R_2 OP_k$ είναι ανάλογο στο αναμενόμενο κλάσμα των ακμών του $T_{i,k}$ που μοιράζονται δυο ή περισσότερα μονοπάτια στο δέντρο. Έτσι, η ποσότητα αυτή εκτιμά το αναμενόμενο κλάσμα επικάλυψης στα από άκρη σε άκρη μονοπάτια που προκύπτουν από την επιλογή του OP_k .

Στο Σχήμα 2.21(a),(b) φαίνονται δυο παραδείγματα αυτών των μετρικών. Είναι προφανές ότι προτιμώνται υψηλότερες τιμές του R_1 και χαμηλότερες του R_2 . Το R_1 εξαρτάται περισσότερο στην επιλογή των 20 ISP. Αν υπάρχει σημαντική επικάλυψη μονοπατιών στους ISPs, τότε οι περισσότερες επιλογές για k -multihoming θα έχουν μεγάλο R_1 . Το R_2 έχει αρνητική συμπεριφορά για περισσότερους ISPs. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 2.21(b)-(e). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται πως και οι δυο μετρικές αποθαρρύνουν μακριά μονοπάτια.

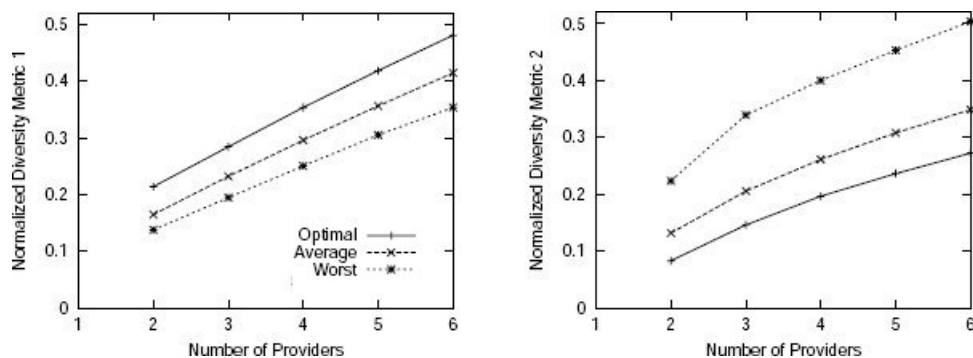


Σχήμα 2.21: Μετρικές Πολυμορφίας Μονοπατιού (a) R_1 (b)-(e) Υπολογισμός του R_2

Οφέλη στην Αξιοπιστία από το Multihoming

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρικές, υπολογίζονται οι πιο αξιόπιστες επιλογές για k-multihoming στις τρεις πόλεις. Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα για τη Νέα Υόρκη φαίνονται στο Σχήμα 2.22.

Είναι εμφανές ότι η βέλτιστη επιλογή προσφέρει αύξηση της αξιοπιστίας, σύμφωνα και με



Σχήμα 2.22: Νέα Υόρκη, (a) R_1 (b) R_2

τις δυο μετρικές, κατά τουλάχιστον 25% σε σύγκριση με μια τυχαία επιλογή. Αυτή η διαφορά φαίνεται ακόμη περισσότερο αν κανείς παρατηρήσει ότι σύμφωνα με τη μετρική R_1 η βέλτιστη υπερσχύει κατά 50% περίπου, ενώ με την R_2 κατά 30% μιας πτωχής επιλογής ISPs.

Η παραπάνω ανάλυση για την αξιοπιστία αφορά ως ένα βαθμό και στις δυο οπτικές που μελετήθηκαν και για την απόδοση - αυτή των επιχειρήσεων και αυτή των web servers.

2.2.6 Συμπεράσματα

Κατά την μελέτη του multihoming έγινε η υπόθεση ότι τα εκάστοτε δίκτυα είχαν πλήρη έλεγχο για τη δικτυακή κυκλοφορία - μπορούσαν να επιλέγουν συχνά το βέλτιστο ISP για

κάθε μετάδοση. Στην πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο είναι ανέφικτο. Αντ'αυτού, τα δίκτυα πρέπει να επιλέξουν ένα λογικό χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θα κάνουν αλλαγές στη δρομολόγηση, χρησιμοποιώντας ίσως εμπειρία από το ιστορικό του δικτύου προς καθοδήγηση των επιλογών. Στη μελέτη περιλαμβάνεται και μια περιληπτική συζήτηση αυτού του πιο ρεαλιστικού σεναρίου, η οποία δε θα μας απασχολήσει εδώ.

Η διάσταση του *multihoming* που εξερευνήθηκε στη μελέτη αυτή οδηγεί σε θετικά αποτελέσματα σε ότι αφορά τόσο την αποδοτικότητα της συνδεσιμότητας του δικτύου με το Internet, όσο και στην αξιοπιστία που προσφέρεται από τις πολλαπλές συνδέσεις. Συνολικά τα αποτελέσματα μπορούν να χαρακτηριστούν αρκετά ικανοποιητικά - ήταν άλλωστε έτσι για οποιαδήποτε από τις στρατηγικές *multihoming* που μελετήθηκαν. Η μελέτη αυτή πετυχαίνει αφενός να παρουσιάσει τα μέγιστα οφέλη που μπορεί να περιμένει κανείς σε κάποια από τις υπό μελέτη περιπτώσεις, αφετέρου δε, να δείξει με ισχυρά επιχειρήματα τη δυνατότητα για εκμετάλλευση του *multihoming* για αύξηση της αποδοτικότητας και αξιοπιστίας των δικτύων. Όλα αυτά αποτελούν στέρεη βάση καθώς και ώθηση για ευρύτερη μελέτη γύρω από το θέμα.

2.3 Άλλες Εφαρμογές Συνάθροισης Πολλαπλών Συνδέσεων

Το σύστημα PERM καθώς και η μελέτη του *k-multihoming* που παρουσιάστηκαν αποτελούν ολοκληρωμένες έρευνες πάνω στο *Multihoming*. Πέρα από το *Multihoming*, υπάρχουν πιο απλές τεχνικές, που όμως βρίσκουν εφαρμογή σε πολύ μικρότερη κλίμακα. Το πρότυπο IEEE 802.3ad ορίζει τη Συνάθροιση Συνδέσεων (*Link Aggregation*), το οποίο περιγράφει το συνδυασμό δυο ή παραπάνω συνδέσεων σε πολλαπλά interfaces δικτύου σε έναν υπολογιστή (π.χ. ένα interface τοπικής σύνδεσης ethernet, και ένα ασύρματης - wireless adapter). Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για εκμετάλλευση της ύπαρξης πολλαπλών συνδέσεων με συνάθροιση. Σε UNIX συστήματα, που δίνουν μεγάλη ευχέρεια στην τροποποίηση και χειρισμό των interfaces δικτύου ενός υπολογιστή, υπάρχει η δυνατότητα συνάθροισης χρησιμοποιώντας τη δρομολόγηση από τα IP Tables καθώς και κάποια βοηθητική εφαρμογή, όπως είναι το NetFilter.

Στο [9] γίνεται εξισορρόπηση του δικτυακού φορτίου ενός υπολογιστή ανάμεσα σε πολλαπλούς συνδέσμους με αυτή την τεχνική. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ρυθμίζοντας

κατάλληλα τα IP Tables και την εφαρμογή NetFilter, επιτυγχάνεται συνάθροιση δυο συνδέσμων (μέσης ταχύτητας 150KB/s ο κάθε ένας) σε μια σύνδεση, η οποία τελικώς αποδίδει περίπου 255KB/s σε δοκιμή πάνω σε P2P κυκλοφορία. Μια άλλη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση ειδικού υλικού, για την ακρίβεια ενός router εξοπλισμένου με παραπάνω από ένα interfaces δικτύου, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση παραπάνω από ενός παρόχους σε αυτό. Στη συνέχεια μένει να ρυθμιστεί το router με τρόπο ώστε η δρομολόγηση να γίνεται και προς τα δυο interfaces, όπως γίνεται στο [11]. Τέλος, ακόμη μια τεχνική συνάθροισης πολλαπλών συνδέσμων από έναν υπολογιστή, ή ακόμη και από δυο, συνδεδεμένους μεταξύ τους με ένα καλώδιο crossover, παρουσιάζεται στο [10].

Όλες αυτές οι τεχνικές αποτελούν προσπάθειες για υλοποίηση του IEEE 802.3ad σε κλίμακα ιδιωτικών υπολογιστών και δικτύων, και σίγουρα είναι ένας απλός τρόπος για έναν χρήστη να μπορέσει απλά και γρήγορα να εκμεταλλευτεί την ύπαρξη πολλαπλών συνδέσμων προς το internet. Έχοντας δει το Multihoming να εφαρμόζεται από έναν μόνο χρήστη, μέχρι μέσω ενός πλήρους συστήματος, και τελικά σε επίπεδο εθνικό πάνω σε επιχειρήσεις και μεγάλους Web Servers, έχει ενδιαφέρον η εξερεύνηση των περαιτέρω εφαρμογών που μπορεί να βρει, και των περαιτέρω ωφελειών που μπορεί να προσφέρει.

Κεφάλαιο 3

Η Πλατφόρμα JXTA

3.1 Συστήματα Ομοτίμων

3.1.1 Γενικά

Εκτός από αυτές τις γενικές κατηγορίες ασύρματων δικτύων, οι οποίες βρίσκουν σήμερα αμέτρητες εφαρμογές, τα ασύρματα δίκτυα δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής προσαρμοσμένων δικτύων στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτό στην πραγματικότητα σημαίνει ότι πάνω από ένα από τα προαναφερθέντα δίκτυα χτίζεται ένα καινούριο, προσαρμοσμένο δίκτυο, σύμφωνα με τις ανάγκες και επιθυμίες των κατασκευαστών. Μια μοντέρνα μέθοδος η οποία στις μέρες μας συναντάται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, είναι τα *Συστήματα (ή Δίκτυα) Ομοτίμων κόμβων*, ή όπως αναφέρονται στην Αγγλική, *Peer-to-Peer Systems (P2P)*. Στο κεφάλαιο θα αναφέρονται σαν Συστήματα Ομοτίμων, μιας και ο όρος *Σύστημα* περιλαμβάνει και το λογισμικό αλλά και το δίκτυο, κομμάτια τα οποία μαζί συνιστούν ένα Σύστημα Ομοτίμων.

Η έννοια *host-host* (σήμερα, αυτό που καλούμε *peer-to-peer*) έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του Internet. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, κάθε υπολογιστής εντός του δικτύου *host-host* ήταν ισάξιος - δηλαδή, κάθε υπολογιστής μπορούσε να προσπελάσει τους πόρους ενός οποιουδήποτε άλλου υπολογιστή του δικτύου, ενώ παράλληλα έκανε τους δικούς του πόρους διαθέσιμους στους άλλους υπολογιστές. Εκτός από τον διαμοιρασμό πόρων, η επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστών του δικτύου ήταν επίσης ισότιμη: κανένας υπολογιστής δεν φαινόταν σαν πελάτης ή τμήμα κάποιου άλλου, και όλοι οι υπολογιστές ήταν μεταξύ τους

συνδεδεμένοι με παρόμοιες συνδέσεις σε γενικές γραμμές.

Το Internet βέβαια, ενώ αναπτυσσόταν, ξέφυγε γρήγορα από αυτή την αρχή και κατευθύνθηκε προς τη γνωστή σημερινή αρχιτεκτονική *πελάτη-εξυπηρετητή* (*client - server*), για διάφορους λόγους. Ο βασικότερος λόγος ήταν η εμπορευματοποίηση του Internet - πλέον οι απλοί χρήστες συνδέονται στους απομακρυσμένους εξυπηρετητές με οικιακούς υπολογιστές, οι οποίοι δεν συγκρίνονταν με τους υπερυπολογιστές που συνιστούν το σκελετό (*backbone*) του Internet. Τα τελευταία χρόνια όμως, η τεχνολογία των Συστημάτων Ομοτίμων έχει κερδίσει έδαφος, ιδιαίτερα στον τομέα της κατανομής πληροφοριών και πόρων. Η τεχνολογία αυτή έχει απασχολήσει πολλούς, και οι απαντήσεις της ερώτησης “*Τι είναι peer-to-peer*” ποικίλουν. Μια χαρακτηριστική και δημοφιλής γνώμη, του Ed Dumbill της XML, αναφέρει ότι, “*P2P είναι οποιοσδήποτε ισχυρίζεται ότι είναι P2P*”.

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ένα σύστημα Ομοτίμων συνιστά και το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του - όσο περισσότεροι κόμβοι συνδεθούν σε αυτό, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το πλήθος πόρων που θα υπάρχουν διαθέσιμοι στο δίκτυο. Η κλιμάκωση αυτή δεν περιορίζεται όπως στην περίπτωση ενός σταθερού πλήθους από εξυπηρετητές όπου συνδέεται ένα συνεχώς αυξανόμενο πλήθος από πελάτες. Επιπλέον, η κατανεμημένη φύση ενός τέτοιου δικτύου αυξάνει την ευρωστία του συστήματος, μιας και οι κόμβοι που συμμετέχουν μπορούν να βρουν την υπηρεσία που ζητούν χωρίς να βασίζονται στην αξιοπιστία μεμονωμένων οντοτήτων. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει μοναδικό σημείο αποτυχίας στο δίκτυο (*singe point of failure*).

3.1.2 Δομή και Αρχιτεκτονική

Παρατηρώντας το Internet θα δούμε ότι οι αναρίθμητοι υπολογιστές που συνδέονται σε αυτό, θεωρητικά είναι ορατοί μεταξύ τους, και δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το πού βρίσκεται αποθηκευμένη η πληροφορία που ο καθένας από αυτούς προσπελαύνει. Κάποιοι από αυτούς τους υπολογιστές, οι λεγόμενοι “*εξυπηρετητές*” (*servers*), είναι αυτοί που παρέχουν πληροφορίες και λειτουργίες σε όλους τους άλλους χρήστες, οι οποίοι είναι οι “*πελάτες*” (*clients*). Αυτή ακριβώς η αρχιτεκτονική αποτελεί και το μεγαλύτερο δομικό χαρακτηριστικό του Internet.

Αντίθετα, στα περισσότερα συστήματα Ομοτίμων, ο διαχωρισμός ανάμεσα σε πελάτη και

εξυπηρετητή είναι δυσδιάκριτος. Έτσι, η αρχιτεκτονική και η δομή ενός τέτοιου συστήματος διαφέρει πολύ από αυτή του Internet. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι υπολογιστές που συνδέονται σε ένα Σύστημα Ομοτίμων, χρησιμοποιούν το Internet για να επιτύχουν τη σύνδεση μεταξύ τους, και πιο συγκεκριμένα τα πρωτόκολλα επικοινωνίας *TCP* (Transmission Control Protocol - Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης) ή *HTTP* (Hyper Text Transfer Protocol - Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερ Κειμένου). Ιδιαίτερα το *TCP*, μαζί με το *IP* (Internet Protocol - Πρωτόκολλο Internet), συνιστά το θεμελιώδες πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων του Internet (*TCP/IP*).

Για την οργάνωση συστημάτων Ομοτίμων χρησιμοποιούνται διάφορες τοπολογίες, στις οποίες οργανώνονται οι υπολογιστές (ή κόμβοι) που συνδέονται σε αυτά. Μερικά δημοφιλή παραδείγματα είναι η *Ιεραρχική Τοπολογία* (*Hierarchical Topology*), η *Τοπολογία Δακτυλίου* (*Ring Topology*), η *Κεντροποιημένη* (*Client-Server* ή *Centralized*) *Τοπολογία*, η *Αποκεντρωμένη Τοπολογία* (*Decentralized Topology*) καθώς και πιο γενικά *υβριδικές* (*Hybrid*) *τοπολογίες* που συνδυάζουν τις προαναφερθείσες και *δομικά ανωργάνοτες τοπολογίες* (*Ad-hoc δίκτυα*).

3.1.3 Μερικά Παραδείγματα

Στην πραγματικότητα τα συστήματα Ομοτίμων βρίσκουν αναρίθμητες εφαρμογές. Ψυχαγωγία, εκπαίδευση, επικοινωνία, έρευνα, είναι περιοχές στις οποίες βρίσκουν απήχηση. Ο κάθε χρήστης του Internet ενδεχομένως θα έχει έρθει σε επαφή με εφαρμογές που αξιοποιούν κάποιο σύστημα Ομοτίμων.

Το πιο δημοφιλές παράδειγμα είναι αυτό του λογισμικού για διαμοιρασμό αρχείων μουσικής, και κατ'επέκτασιν και οποιουδήποτε άλλου τύπου αρχείου και πληροφορίας. Ίσως το πιο αντιπροσωπευτικό από αυτά είναι το *Napster*, το οποίο περιστοιχίζουν γεγονότα μέχρι και νομικής φύσεως. Αλλα παραδείγματα αποτελούν τα *Gnutella*, *KaZaA* και *LimeWire*. Η φιλοσοφία όλων αυτών είναι κοινή - ο κάθε χρήστης έχει πρόσβαση σε μουσικά (και όχι μόνο) αρχεία που βρίσκονται στους υπολογιστές που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο.

Ένα από τα παλιότερα συστήματα Ομοτίμων, είναι το *Usenet*. Στο σύστημα αυτό οι χρήστες μοιράζονται μεταξύ τους πληροφορίες, νέα και γενικότερα μηνύματα, τα οποία οργανώνονται σε ομάδες ενημέρωσης (*newsgroups*). Εδώ υπάρχουν ειδικοί κόμβοι στο δίκτυο υπεύθυνοι για να διατηρούν όλους τους χρήστες ενημερωμένους μέχρι τις πιο πρόσφατες

ενημερώσεις, άρα μιλάμε για ένα δομικά υβριδικό σύστημα ομοτίμων.

Η πιο σημαντική όμως προσφορά των συστημάτων Ομοτίμων είναι ίσως η κατηγορία των *Ακραίων Συστημάτων Ομοτίμων*, ή όπως αναφέρεται στην αγγλική βιβλιογραφία πιο εύστοχα, *Extreme Peer-to-Peer*. Εδώ, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κατανεμημένων υπολογιστικών μηχανών, μεγέθους που ξεπερνά το ένα δωμάτιο, ή κτίριο, και βρίσκονται διασκορπισμένες στους υπολογιστές των χρηστών του συστήματος. Η εισήγηση τέτοιων συστημάτων άλλαξε τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζονταν πολύ σύνθετα, επεξεργαστικά, προβλήματα. Οι χρήστες που επιθυμούν να συμμετέχουν στο σύστημα αυτό, εκτελούν στον υπολογιστή τους ειδικό λογισμικό, το οποίο, όταν ο υπολογιστής στον οποίο βρίσκεται είναι ανενεργός, εκμεταλλεύεται αυτή την αδράνεια και, αφού μεταφέρει τα απαραίτητα δεδομένα από κάποιον απομακρυσμένο υπολογιστή, εκτελεί επεξεργασία πάνω σε αυτά. Η συνολική υπολογιστική ισχύς του υπολογιστικού συστήματος που προκύπτει είναι τεράστια. Μια από τις πρώτες προσπάθειες τέτοιου συστήματος ήταν το *Distributed.Net* (www.distributed.net). Όταν φάνηκε η απήχηση του *Distributed.Net*, ήρθαν στην επιφάνεια και άλλες προσπάθειες, όπως στο *SETI@home* (Search for Extraterrestrial Intelligence), μια έρευνα στην κατεύθυνση της αναζήτησης για εξωγήινα όντα.

3.1.4 Τα μειονεκτήματα

Αφήνοντας κανείς στην άκρη αυτά που προσφέρουν τα συστήματα Ομοτίμων, που όπως μπορεί να δει κανείς από όλα τα παραπάνω είναι σημαντικά, υπάρχουν θέματα τα οποία δεν έχουν ξεκαθαρίσει σχετικά με τη χρήση τους. Εύκολα μπορεί κάποιος, κακόβουλα, να εκμεταλλευτεί τη δυνατότητα χρήσης πόρων άλλου συστήματος. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο διαμοιρασμός πληροφορίας έρχεται σε αντίθεση με κανόνες εργασιακών χώρων και πνευματικής ιδιοκτησίας. Επίσης, μιας και τα συστήματα αυτά τείνουν να απορροφούν μεγάλο ποσοστό από το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ένα υπολογιστικό σύστημα, αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε κοινόχρηστα δίκτυα όπου πολλοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης. Πολύ σημαντικό είναι και το θέμα της ασφάλειας, το οποίο απασχολεί διαρκώς τους ερευνητές και τους προγραμματιστές. Είναι εύκολο να φανταστεί κανείς ότι όταν ένα υπολογιστικό σύστημα μοιράζεται με ένα ολόκληρο δίκτυο συγκεκριμένους πόρους του, ο διαμοιρασμός ενδεχομένως να μην είναι πάντα ελεγχόμενος. Κανείς δεν είναι σίγουρος

για το τί ακριβώς πληροφορία είναι αυτή που διαμοιράζεται, τί ποσοστό των πόρων διατίθεται, και το κυριότερο, αν όντως οι επιτρεπόμενοι πόροι και πληροφορία (σύμφωνα με τους κανόνες του εκάστοτε συστήματος) είναι τα μόνα που πραγματικά διαμοιράζονται.

Όλα αυτά δημιουργούν ανάμεικτες σκέψεις για τα Συστήματα Ομοτίμων, όμως είναι θέματα που διαρκώς βρίσκονται υπό παρακολούθηση και έρευνα για βελτίωση.

3.2 Η JXTA

3.2.1 Επισκόπηση

Η ονομασία *JXTA* προέρχεται από την αγγλική λέξη "juxtapose", που σημαίνει "τοποθετώ δίπλα-δίπλα, παραθέτω". Εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι με αυτή την ονομασία οι δημιουργοί της ήθελαν να δείξουν ότι πρόκειται για μια τεχνολογία δημιουργίας P2P εφαρμογών. Πιο τυπικά, η *JXTA* είναι μια πλατφόρμα δημιουργίας P2P συστημάτων πλήρως ορισμένη, που δημιουργήθηκε στο μοντέλο ανοιχτού κώδικα της Apache από την Sun Microsystems. Μερικοί βασικοί στόχοι της πλατφόρμας, όπως αναφέρονται από τον J.Gradecki στο [6], περιλαμβάνουν την αναγκαιότητα για αμοιβαία επικοινωνία, εύρεση, δημοσίευση υπηρεσιών, παρακολούθηση των κόμβων μέσα στο P2P δίκτυο, καθώς και την ανεξαρτησία της πλατφόρμας από συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού, δικτυακή τοπολογία και μοντέλου πιστοποίησης και ασφάλειας.

Η λειτουργικότητα της πλατφόρμας *JXTA* είναι τυποποιημένη σε βαθμό που επιτρέπει τη δημιουργία διαλιειτουργικών υπηρεσιών και εφαρμογών. Έτσι, η δημιουργία της πλατφόρμας έγινε μέσω μιας διαδικασίας σχεδίασης, απαγκιστρωμένης από συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού, και το αποτέλεσμα είναι μια πλήρη τυποποίηση των ζωτικών σημείων του συστήματος και της υλοποίησης. Η πλατφόρμα μοντελοποιείται με τη βοήθεια έξι πρωτοκόλλων για το χειρισμό των υπηρεσιών της *JXTA*. Τα πρωτόκολλα επιτρέπουν σε ετερογενείς συσκευές να συνυπάρχουν και να επικοινωνούν μεταξύ τους, ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών τους, μιας και τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να υλοποιηθούν σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού. Αυτά τα έξι πρωτόκολλα είναι ό,τι χρειάζονται οι κόμβοι για να συνυπάρχουν σε ένα αποκεντρωμένο και αυτο-οργανωμένο περιβάλλον P2P. Για τη διατήρηση της

ετερογένειας σε μηχανισμούς μετάδοσης δεδομένων, οι υποθέσεις για το μοντέλο δικτύου κρατήθηκαν σε υψηλό βαθμό αφαιρετικότητας. Η λειτουργικότητα των πρωτοκόλλων μπορεί να συνοψισθεί στη δημοσίευση, αναζήτηση και εύρεση περιεχομένου και υπηρεσιών που οι κόμβοι διαμοιράζονται, στο σχηματισμό και συμμετοχή σε ομάδες κόμβων, καθώς και στην αδιαφανή δρομολόγηση και προώθηση μηνυμάτων.

3.2.2 Βασικές Έννοιες και Τεχνολογίες

Για την πλήρη κατανόηση της πλατφόρμας, γίνεται μια περιγραφή βασικών όρων, εννοιών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στη JXTA.

Οι Κόμβοι (Peers). Το βασικότερο συστατικό στοιχείο ενός P2P συστήματος, είναι ο κόμβος. Ένας κόμβος είναι μια εφαρμογή, η οποία εκτελείται σε ένα υπολογιστικό σύστημα, που έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με άλλους κόμβους, ώστε να λειτουργήσει ολόκληρο το P2P σύστημα. Ένα υπολογιστικό σύστημα θα μπορούσε να φιλοξενεί πολλαπλούς κόμβους διαφορετικών, ή ακόμη και ίδιων, P2P συστημάτων. Επιπλέον χαρακτηριστικά ενός κόμβου είναι η *ταυτότητά του*, καθώς ένας κόμβος πρέπει να μπορεί να διαχωριστεί από οποιονδήποτε άλλον, η συμμετοχή του σε ομάδες, μιας και ένας κόμβος από μόνος του δεν είναι χρήσιμος και η ικανότητά του για μετάδοση δεδομένων, ώστε να γίνεται εφικτή η επικοινωνία στο P2P σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, για την JXTA, ένας κόμβος είναι οποιαδήποτε δικτυωμένη συσκευή, η οποία υλοποιεί τα βασικά πρωτόκολλα της. Η κάθε συσκευή, από υπολογιστή έως PDA και κινητό τηλέφωνο, μπορεί να φιλοξενεί παραπάνω από έναν κόμβους με διαφορετικές υπηρεσίες και δεδομένα.

Στη JXTA, οι κόμβοι κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες λειτουργικότητας.

Edge Peers Αποτελούν την πλειοψηφία των κόμβων που συμμετέχουν στο P2P σύστημα. Οι Edge Peers βρίσκονται στην "άκρη" του δικτύου, εννοώντας ότι δεν χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση άλλων κόμβων του δικτύου, αλλά για τη λειτουργικότητά του. Μπορούν να αναπαρασταθούν ως "φύλλα" σε ένα υποθετικό δέντρο αναπαράστασης του δικτύου.

Rendezvous Peers Όταν νέοι κόμβοι επιθυμούν να εισέλθουν στο P2P δίκτυο, ή όταν οι υπάρχοντες κόμβοι επιθυμούν να αναζητήσουν άλλους κόμβους, δεδομένα ή υπηρεσίες, χρειάζεται ένα σημείο αναφοράς, επεξεργασίας των ενεργειών αυτών, και προώθησης των σχετικών μηνυμάτων. Το σημείο αναφοράς αυτό είναι οι Rendezvous Peers, οι οποίοι ουσιαστικά διασυνδέουν τους Edge Peers μεταξύ τους.

Relay Peers Οι Relay Peers, ή κόμβοι αναμετάδοσης, είναι υπεύθυνοι για τη διατήρηση πληροφοριών δρομολόγησης της επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους. Η πιο χαρακτηριστική λειτουργία τους συνιστά τη σύνδεση και ενεργοποίηση επικοινωνίας ανάμεσα σε κόμβους που βρίσκονται πίσω από κάποιο NAT ή Firewall.

Οι Ομάδες Κόμβων (Peer Groups). Οι Ομάδες Κόμβων αποτελούν ομαδοποίηση των κόμβων αναλόγως με τη λειτουργικότητά τους. Ο σχηματισμός μιας ομάδας συνήθως οφείλεται είτε στην ανάγκη για πρόσβαση με πιστοποιήσεις σε ένα κοινό σύστημα, σε κοινή μέθοδο μεταφοράς δεδομένων, ή στην ανάγκη για πρόσβαση σε κεντρικές οντότητες, όπως σερερς, είτε στην ανάγκη για προσφορά υπηρεσιών σε ένα (υπο)σύνολο των κόμβων του P2P συστήματος. Έτσι οι ομάδες δίνουν τη δυνατότητα ιδιωτικοποίησης ενός συστήματος, ή αντίθετα δημοσιοποίησής του. Επίσης, όταν σε δυο διαφορετικά για παράδειγμα συστήματα υπάρχει ομοιόμορφος τρόπος επικοινωνίας σε ότι αφορά στα μηνύματα και μέθοδο μεταφοράς δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα σύνδεσής τους σε μια ευρύτερη ομάδα, ώστε οι κόμβοι να έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν, χωρίς όμως να γίνει συνένωση έτσι των δυο συστημάτων. Στη JXTA, υπάρχει μια προκαθορισμένη ομάδα, το *NetPeerGroup*, στην οποία προσχωρούν όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο της JXTA. Αυτή η ομάδα προσφέρει σε όλους τους κόμβους υπηρεσίες εύρεσης, δημοσίευσης και χρήσης κόμβων, υπηρεσιών και δεδομένων, καθώς και υπηρεσίες επικοινωνίας. Κάθε ομάδα κόμβων έχει τη δυνατότητα να παρέχει μια από τις υπάρχουσες στη JXTA υπηρεσίες στους κόμβους της - οι υπηρεσίες αυτές είναι οι εξής: *Discovery Service*, *Membership Service*, *Access Service*, *Pipe Service*, *Resolver Service*, *Monitoring Service*. Έχει επίσης και τη δυνατότητα δημιουργίας νέων υπηρεσιών και διαθεσιμότητας στους κόμβους της ομάδας.

Advertisements. Όταν οι κόμβοι έχουν κάποια υπηρεσία την οποία επιθυμούν να κοινοποιήσουν στο P2P δίκτυο, χρησιμοποιούν ένα Advertisement. Τα *Advertisements* είναι έγγραφα βασισμένα σε XML, που περιγράφουν τον πόρο προς διαμοιρασμό και το περιεχόμενό του. Εκτός από τους κόμβους, όλα τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν Advertisements για τη μετάδοση πληροφοριών. Υπάρχει ιεραρχία στα Advertisements, και αναλόγως το είδος του Advertisement περιέχονται και οι αντίστοιχες πληροφορίες. Ιδιαίτερα σημαντικό μέσα σε ένα Advertisement είναι το ID του πόρου που δημοσιεύεται.

Αναγνωριστικά (IDs). Ένα απλό όνομα δεν αρκεί για την αναφορά και το διαχωρισμό των πόρων ενός P2P δικτύου. Θα μπορούσαν να υπάρχουν παραπάνω από μια ομάδες με όνομα "HomeGroup" ή παραπάνω από ένα αρχεία "me.jpg". Στη JXTA χρησιμοποιείται το λεγόμενο JXTA **ID**entifier, αλλιώς και URN¹, το οποίο είναι μια μοναδική συμβολοσειρά που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των Peers, των Peer Groups, των Pipes, του περιεχομένου (Content), των Module Classes και των Module Specifications της JXTA.

Μηνύματα (Messages). Εκτός από τα Advertisements, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν και *Μηνύματα*. Τα μηνύματα αποτελούν την ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί μέσα σε ένα δίκτυο JXTA. Αποτελούνται από ένα όνομα και το περιεχόμενο, τα οποία μαζί αναφέρονται ως Message Elements. Τα Elements μπορεί να είναι είτε σε XML είτε σε δυαδική μορφή. Τέλος, τα μηνύματα μεταδίδονται με χρήση είτε των JXTA Pipes, είτε των JXTA Sockets.

Pipes. Ως μηχανισμός επικοινωνίας, στην JXTA χρησιμοποιείται το Pipe, με βάση τα πρότυπα των συστημάτων UNIX. Στο ένα άκρο του Pipe τοποθετείται πληροφορία, η οποία εξέρχεται από το άλλο. Τα άκρα φυσικά είναι οι κόμβοι. Η μετάδοση πληροφορίας γίνεται με αδιαφανή τρόπο για τους κόμβους - δεν χρειάζεται γνώση για την υποκείμενη υποδομή. Η αρχή του *endpoint* η οποία εφαρμόζεται στα Pipes, σημαίνει ότι ο μηχανισμός προσφέρει επικοινωνία ανάμεσα στην πηγή και τον τελικό προορισμό, χωρίς κανένα ενδιαφέρον για την τοπολογία ή τη διαδρομή που ακολουθεί η πληροφορία. Τα endpoints συνδέονται μεταξύ

¹Uniform Resource Name

τους με ένα *channel*, δηλαδή κανάλι επικοινωνίας. Τρία είδη Pipes υλοποιούνται στη JXTA - τα μονής διεύθυνσης (Unicast), τα ασφαλή μονής διεύθυνσης (Unicast Secure) και τα διάδοσης (Propagating). Τα Propagating Pipes συνδέουν μια πηγή πληροφορίας με πολλούς προορισμούς.

Τα *JXTA Sockets*, είναι μια υλοποίηση πάνω σε JXTA Pipes, που εξομοιώνει το Socket API της Java, ώστε οι προγραμματιστές να τα χρησιμοποιούν με ακριβώς τον ίδιο τρόπο όπως και στη Java. Αποτελούν ένα ζευγάρι από αντίστροφα Unicast Pipes, ώστε να εξομοιώνεται η διπλή διεύθυνση κυκλοφορίας των Sockets.

Υπηρεσίες (Services). Το πιο ξεχωριστό στοιχείο της JXTA είναι οι Υπηρεσίες. Η έννοια της Υπηρεσίας στη JXTA είναι ευρεία, και εκτείνεται στην λειτουργικότητα που πρέπει να παρέχει ένα αποκεντρωμένο δίκτυο. Και οι δυο λειτουργικές οντότητες της JXTA - Κόμβοι και Ομάδες Κόμβων - αναμένεται ότι θα έχουν Υπηρεσίες τις οποίες διαθέτουν σε άλλους προς χρήση. Εκτός από βασικές προϋπάρχουσες υπηρεσίες για κόμβους και ομάδες κόμβων, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας και αξιοποίησης νέων υπηρεσιών από τους προγραμματιστές. Στη συνέχεια περιγράφονται μερικά παραδείγματα Υπηρεσιών της JXTA που προσφέρονται εξ'ορισμού.

Discovery Service Υπηρεσία που παρέχει τη δυνατότητα αναζήτησης των Advertisements για πόρους μέσα στο P2P δίκτυο.

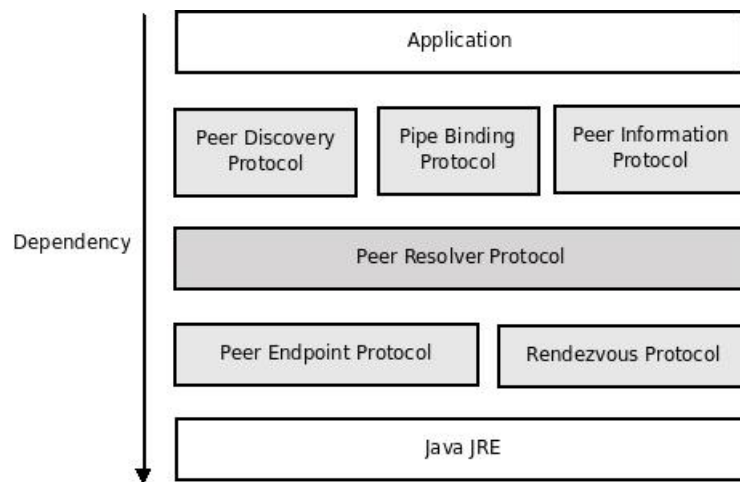
Pipe Service Υπηρεσία υπεύθυνη για τη δημιουργία των διαύλων επικοινωνίας, των Pipes, και εφαρμογή της επικοινωνίας ανάμεσα σε κόμβους.

Membership Service Υπηρεσία που χρησιμοποιείται από τις Ομάδες Κόμβων, κατά την εισαγωγή νέων στην Ομάδα, ταυτοποίησή τους, για τον έλεγχο πρόσβασης σε Υπηρεσίες και πόρους της ομάδας.

Οι Υπηρεσίες πλαισιώνουν τα έξι πρωτόκολλα λειτουργίας της JXTA, κάτι που θα γίνει σαφέστερο κατά την περιγραφή των πρωτοκόλλων. Αρκεί να πούμε τελικά ότι οι Υπηρεσίες είναι και ο πυρήνας του συστήματος P2P που δημιουργείται, καθώς προσφέρει την ουσιαστική του λειτουργικότητα.

3.2.3 Το Σύνολο Πρωτοκόλλων

Τα έξι πρωτόκολλα που αποτελούν την μοντελοποίηση της πλατφόρμας της JXTA και την αξιοποίηση των Υπηρεσιών του συστήματος, είναι τα εξής: *Peer Resolver Protocol (PRP)*, *Peer Discovery Protocol (PDP)*, *Peer Information Protocol (PIP)*, *Pipe Binding Protocol (PBP)*, *Peer Endpoint Protocol (PEP)*, *Rendezvous Protocol (RVP)*. Στο Σχήμα 3.2.3 φαίνονται τα έξι διαφορετικά πρωτόκολλα και η συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς και με το περιβάλλον εκτέλεσης της Java.



Σχήμα 3.1: Η ιεραρχία των πρωτοκόλλων της JXTA

Το Πρωτόκολλο Peer Discovery (PDP)

Το PDP είναι σχεδιασμένο ώστε να επιτρέπει σε έναν κόμβο την εύρεση (discovery) Advertisements που έχουν δημοσιευθεί από άλλους κόμβους μέσα σε ένα Peer Group. Δουλεύει σε συνδυασμό με ένα Peer Group, και είναι υλοποιημένο σαν ένα Discovery Service. Το προκαθορισμένο Peer Group στο οποίο ανήκουν όλοι οι κόμβοι, το NetPeerGroup, παρέχει ένα Discovery Service για όλους τους κόμβους χωρίς να χρειάζεται ο κάθε ξεχωριστός κόμβος να έχει το δικό του. Κάθε νέο Peer Group που δημιουργείται, παράγεται ουσιαστικά από το NetPeerGroup, καθιστώντας έτσι εφικτή τη δημοσίευση και διερεύνηση για υπηρεσίες.

Ο κόμβος που εκτελεί την αναζήτηση, στέλνει ένα μήνυμα αναζήτησης (query message) χρησιμοποιώντας το Peer Resolver Protocol, είτε προς τους απομακρυσμένους κόμβους, είτε προς την τοπική κρυφή μνήμη του στην οποία αποθηκεύονται Advertisements από κόμβους

με τους οποίους έχει επικοινωνήσει στο παρελθόν). Όταν ληφθεί ένα τέτοιο μήνυμα, κάθε κόμβος (ή η κρυφή μνήμη) ελέγχει τα Advertisements του για να βρει κάποιο που να πληροί τους όρους της αναζήτησης. Όταν βρεθεί ένα τέτοιο Advertisement, αυτό επιστρέφεται στον κόμβο που εκτέλεσε την αναζήτηση, και ο κόμβος αυτός το αποθηκεύει και στην κρυφή του μνήμη.

Όταν οι αναζητήσεις δεν επιφέρουν αποτελέσματα, δεν επιστρέφεται τίποτα στον κόμβο που κάνει την αναζήτηση. Επίσης, πολλές φορές μια αναζήτηση θα επιφέρει και Advertisements που δεν ταιριάζουν στο αίτημα του κόμβου. Αυτό γίνεται για να δώσει τη δυνατότητα στο σύστημα να κάνει το λεγόμενο Advertisement Propagation αποδοτικά, δηλαδή να μοιράζει ένα συγκεκριμένο Advertisement σε πολλούς κόμβους μαζί.

Το Πρωτόκολλο Peer Resolver (PRP)

Το PRP είναι ένα σύνολο από γενικευμένα μηνύματα για αναζήτηση και απάντηση σχεδιασμένο να διευκολύνει το σύστημα μηνυμάτων ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου της JXTA. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα, αντί να το επεξεργάζεται ο ίδιος, για επεξεργαστική ευκολία, η επεξεργασία ανατίθεται σε έναν *χειριστή μηνυμάτων (handler)*, για συγκεκριμένο τύπο μηνυμάτων, ο οποίος ευθύνεται και για την απάντηση. Τα μηνύματα αυτά μπορούν να έχουν έναν ή περισσότερους προορισμούς, θα πρέπει όμως ο κάθε ένας από αυτούς να έχει υλοποιημένο και έναν χειριστή για το συγκεκριμένο τύπο μηνύματος, ώστε να το επεξεργαστεί. Έτσι για παράδειγμα, όπως είναι αναμενόμενο, το Discovery Service έχει καθορίσει έναν χειριστή για μηνύματα αιτήσεων Discovery και απαντήσεων.

Το Πρωτόκολλο Peer Information (PIP)

Οι προδιαγραφές της JXTA περιλαμβάνουν και ένα πρωτόκολλο για χειρισμό των αιτημάτων που δημιουργούν οι κόμβοι, θέλοντας να πάρουν πληροφορίες για άλλους. Το πρωτόκολλο υλοποιείται με μια σειρά μηνυμάτων τα οποία μεταφέρονται ανάμεσα σε δυο ή και περισσότερους κόμβους. Η υλοποίηση του PIP σε ένα σύστημα JXTA είναι προαιρετική, και δεν υπάρχουν τυποποιημένοι περιορισμοί από τη JXTA για την υλοποίησή του. Ενδεχομένως θα υπάρχουν κόμβοι που δε θα υλοποιούν είτε την αναζήτηση πληροφοριών, είτε την απάντηση σε σχετικές αναζητήσεις, είτε και τα δυο. Τέλος, αναφέρεται ότι τα μηνύματα του PIP

στέλνονται μέσω αναξιόπιστων Pipes, και επομένως η παράδοσή τους δεν είναι εγγυημένη.

Το Πρωτόκολλο Peer Endpoint (PEP)

Το PEP είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει το κανάλι επικοινωνίας ανάμεσα σε έναν κόμβο με έναν ή περισσότερους άλλους, κάτι που τα πρωτόκολλα που έχουν παρουσιαστεί δεν έκαναν μέχρι στιγμής. Για όλα τα μηνύματα που χρησιμοποιούνται στα προηγούμενα πρωτόκολλα, το PEP είναι υπεύθυνο να προσδιορίσει τη διαδρομή που αυτά θα ακολουθήσουν από τον κόμβο πηγή έως τον προορισμό. Αυτό επιτυγχάνεται με διαφάνεια - έτσι, το αποτέλεσμα είναι ότι δυο κόμβοι που δεν συνδέονται άμεσα τελικά να φαίνονται συνδεδεμένοι, με εικονική προφανώς σύνδεση. Έτσι το JXTA δίκτυο που σχηματίζεται δίνει την εντύπωση πλήρως συνδεδεμένου δικτύου. Και σε αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιείται μια σειρά μηνυμάτων αίτησης και απάντησης, ώστε να λαμβάνονται πληροφορίες για ύπαρξη σύνδεσης ανάμεσα σε κόμβους. Έτσι αν δυο κόμβοι δεν έχουν άμεση σύνδεση, ο δεύτερος (όχι ο αποστολέας του μηνύματος) ελέγχει αν αυτός έχει άμεση σύνδεση με τον προορισμό, και αν όχι, ελέγχει ο επόμενος, μέχρι να βρεθεί το μονοπάτι.

Το PEP υλοποιεί και το Endpoint Service, το οποίο παρέχει τον τρόπο για μετάδοση ανάμεσα σε κόμβους. Προς το παρόν, υποστηρίζονται τα πρωτόκολλα μετάδοσης δεδομένων *TCP*, *HTTP*, *TLS*, *Beep*, *ServletHttp*, και τα οποία είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία χαμηλού επιπέδου ανάμεσα στους κόμβους.

Το Πρωτόκολλο Pipe Binding (PBP)

Το PBP βασίζεται στην υπόθεση ότι ένας κόμβος θα δημιουργήσει ένα Pipe εισόδου και απομακρυσμένοι κόμβοι που ενδιαφέρονται για μετάδοση πληροφοριών θα συνδεθούν στο Pipe αυτό. Το PBP ορίζει ένα Pipe καθώς και προδιαγράφει πώς αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία κόμβων μέσα σε μια ομάδα. Ένα Pipe είναι ένα αφαιρετικό κανάλι επικοινωνίας, κατασκευασμένο πάνω σε κάποιο πρωτόκολλο μετάδοσης του Διαδικτύου, όπως το HTTP ή το TCP/IP. Σε κάθε Pipe υπάρχουν δυο άκρα: η είσοδος από όπου λαμβάνονται δεδομένα, και η έξοδος, όπου στέλνονται δεδομένα.

Το PBP είναι χτισμένο πάνω στο Peer Endpoint Protocol. Χρησιμοποιεί επίσης το PRP για να ανακτήσει μια διαδρομή από έναν κόμβο σε έναν άλλο. Με τη σειρά του, το Peer

Resolver Protocol θα χρησιμοποιήσει το Rendezvous Protocol αν χρειάζεται η μετάδοση προς απομακρυσμένο κόμβο, έξω από την εμβέλεια του Peer Endpoint Protocol. Όπως έχει προαναφερθεί, υπάρχουν τρία είδη Pipes:

- **Unicast Pipe** Σύνδεση μιας διεύθυνσης ανάμεσα σε δυο κόμβους. Το Pipe αυτό είναι αναξιόπιστο και χωρίς ασφάλεια, και στις περισσότερες JXTA υλοποιήσεις χρησιμοποιείται το TCP/IP για τη χαμηλού επιπέδου επικοινωνία.
- **SecureUnicast Pipe** Σύνδεση μιας διεύθυνσης, όμως παρέχεται ασφάλεια με χρήση του TLS² για κρυπτογράφηση.
- **Propagate Pipe** Σύνδεση από έναν προς πολλούς απομακρυσμένους κόμβους. Επίσης αναξιόπιστη και χωρίς ασφάλεια σύνδεση.

Το Πρωτόκολλο Rendezvous (RVP)

Το RVP χρησιμοποιείται για την διάδοση μηνυμάτων ανάμεσα στους κόμβους ενός Peer Group. Οι κόμβοι που το υλοποιούν αναφέρονται ως rendezvous peers, και δεν είναι υποχρεωτικό να υλοποιείται από κάθε έναν. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό καθώς το Peer Resolver Protocol βασίζεται τόσο στο Peer Endpoint Protocol όσο και στο RVP.

3.2.4 Προγραμματισμός με την υλοποίηση της JXTA σε Java

Όπως ήταν αναμενόμενο, αφού η JXTA σχεδιάστηκε από την Sun, η κυριότερη μέχρι στιγμής υλοποίησή της έχει γίνει σε Java. Στο [8] βρίσκεται ολόκληρη η κοινότητα για το project JXTA, μαζί με ένα μεγάλο πλήθος πληροφοριών τόσο για την πλατφόρμα γενικότερα όσο και για την υλοποίησή της σε Java. Η νεότερη έκδοση της JXTA για τη Java 2 Standard Edition (J2SE) είναι η 2.5. Στην ίδια ιστοσελίδα βρίσκονται όλα τα απαραίτητα για εγκατάσταση της πλατφόρμας, ο ανοιχτός κώδικας της πλατφόρμας για λεπτομερέστερη μελέτη καθώς και το *Programmer's Guide*[7] στο οποίο βασίζεται και το παρόν εδάφιο.

Προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο χτίζεται ένα P2P σύστημα με τη JXTA, η χρήση των πρωτοκόλλων και των συστατικών στοιχείων της JXTA,

²Transport Layer Security

κρίθηκε αναγκαίο να γίνει μια συνοπτική παρουσίαση του προγραμματισμού με JXTA για τη J2SE. Στο [7] περιέχονται αναλυτικές οδηγίες για την εγκατάσταση και χρήση της πλατφόρμας, επομένως εδώ θα δοθεί βάση αποκλειστικά στον προγραμματισμό.

Το Παράδειγμα Hello World!

Μια εισαγωγή στον προγραμματισμό γίνεται πάντα με γραφή ενός προγράμματος που απλώς να εμφανίζει τη συμβολοσειρά "Hello World!". Έτσι και εδώ θα γίνει το ίδιο, όμως από μια οπτική πιο κοντά στα P2P, μέσω της JXTA. Το ενδεικτικό πρόγραμμα που ακολουθεί, απλώς εκκινεί το δίκτυο JXTA, εισάγεται ένας κόμβος στο δίκτυο με όνομα "Hello World!", και τελικά το δίκτυο τερματίζεται. Ακολουθεί ο κώδικας, και στη συνέχεια περιγραφή των σημείων ενδιαφέροντος.

Listing 3.1: HelloWorld.java

```
1 import net.jxta.platform.NetworkManager;
2 import java.text.MessageFormat;
3
4 public class HelloWorld {
5     public static void main(String[] args) {
6         NetworkManager manager = null;
7         try {
8             manager = new NetworkManager(NetworkManager.ConfigMode.EDGE, "Hello World!");
9             System.out.println("Starting JXTA");
10            manager.startNetwork();
11            System.out.println("JXTA Started");
12        } catch (Exception e) {
13            e.printStackTrace();
14            System.exit(-1);
15        }
16        System.out.println("Waiting for a rendezvous connection");
17        boolean connected = manager.waitForRendezvousConnection(12000);
18        System.out.println(MessageFormat.format("Connected :{0}", connected));
19        System.out.println("Stopping JXTA");
20        manager.stopNetwork();
```



```

21     }
22 }

```

Για την ακρίβεια, το πρόγραμμα αυτό δημιουργεί και ρυθμίζει έναν κόμβο ως Edge Peer, με όνομα "Hello World!" (γραμμή 5) με χρήση της κλάσης `NetworkManager`. Για τον κόμβο αυτό γίνονται κατά τα άλλα οι προκαθορισμένες ρυθμίσεις. Στη συνέχεια εκκινείται το δίκτυο στη γραμμή 7, μιας και η ίδια κλάση προσφέρει χειρισμό για το δίκτυο. Μιας και έχουν γίνει μόνον οι προκαθορισμένες ρυθμίσεις, το δίκτυο δεν χρειάζεται την υποστήριξη κάποιου αρχικού Rendezvous Peer για να δομηθεί, και έτσι απλώς ο κόμβος τίθεται σε αναμονή για σύνδεση με έναν default Rendezvous Peer, όπως φαίνεται στη γραμμή 14. Τελικά, το δίκτυο τερματίζεται στη γραμμή 17. Όπως αναμένεται, η έξοδος του παραπάνω τμήματος κώδικα θα είναι η ακόλουθη:

```

Starting JXTA
JXTA Started
Waiting for a rendezvous connection
Connected : true
Stopping JXTA

```

Προσαρμόζοντας τις ρυθμίσεις του δικτύου JXTA

Στη JXTA υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν επιπλέον ρυθμίσεις από τις προκαθορισμένες, ώστε οι κόμβοι και το δίκτυο που κατασκευάζονται να προσαρμοστούν περισσότερο στις ανάγκες του προγραμματιστή. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την κλάση `NetworkConfigurator` αντί της `NetworkManager`, ως εξής:

```

1 NetworkConfigurator configurator = NetworkConfigurator.newEdgeConfiguration(confURI);

```

Η κλήση αυτή δημιουργεί έναν φάκελο που δηλώνεται από το `confURI`. Για να γίνουν οι ρυθμίσεις, το αντικείμενο `configurator` παρέχει μεθόδους `setProperty`. Για παράδειγμα καλώντας

```

1 configurator.setName("Hello World!");

```

θα τεθεί σαν όνομα του κόμβου το `Hello World!`. Έτσι με αυτή και την προηγούμενη κλήση από έναν `NetworkConfigurator` παίρνουμε το ίδιο αποτέλεσμα με την κλήση της γραμμής 5 στο Listing 3.1. Αν υπάρχει κόμβος `Rendezvous` με τον οποίο πρέπει να επικοινωνήσουν οι (νέοι) κόμβοι, τότε αυτό μπορεί να γίνει ρυθμίζοντας τον `NetworkConfigurator` ως εξής:

```
1 configurator.addRdvSeedingURI(rdvAddr);
```

όπου το `rdvAddr` είναι η TCP/IP διεύθυνση του `Rendezvous Peer`. Αντίστοιχα μπορούν να ρυθμιστούν και ενδεχόμενοι `Relay Peers`. Η σύνδεση στον `Rendezvous Peer` γίνεται, ύστερα από σωστή ρύθμιση, καλώντας

```
1 RendezVousService rdv = thePeerGroup.getRendezVousService();  
2 rdv.addListener(listenerObj);
```

Αφού ληφθεί το `RendezVousService` από το αντίστοιχο `Peer Group`, αρκεί να καθοριστεί ένας `EventListener` για `RendezvousEvent` συμβάντα. Αυτό σημαίνει ότι όταν βρεθεί ο `Rendezvous Peer` μέσα στο `Peer Group`, θα αναδυθεί ένα συμβάν `RendezvousEvent`, το οποίο θα πρέπει να χειριστεί από μια μέθοδο υπεύθυνη για το χειρισμό τέτοιων συμβάντων (δηλαδή από έναν `EventListener`) και να κάνει ουσιαστικά τη σύνδεση. Αυτό γίνεται και στην κλήση της γραμμής 2, θέτοντας σαν `EventListener` το αντικείμενο `listenerObj`.

Ανακαλύπτοντας Κόμβους

Έχοντας κάνει μια περιγραφή του πως μπορεί να γίνει η ρύθμιση και εκκίνηση ενός δικτύου JXTA, το επόμενο βήμα είναι να περιγραφεί εν συντομία η διαδικασία αναζήτησης και εύρεσης Κόμβων, δηλαδή ένα `Discovery`, μιας και αποτελεί σημαντική λειτουργία της JXTA. Για να γίνει εφικό αυτό, θα πρέπει το `Peer Group` μέσα στο οποίο ο κόμβος θέλει να αναζητήσει άλλους κόμβους να παρέχει φυσικά ένα `Discovery Service`. Εφ'όσον αυτό παρέχεται, μπορεί να γίνει η ανάκτησή του με την κλήση

```
1 DiscoveryService discovery = thePeerGroup.getDiscoveryService();  
2 discovery.getRemoteAdvertisements(peerID, type, attribute, value, threshold);
```

Η δεύτερη κλήση ξεκινά τη διαδικασία αναζήτησης για Advertisements από άλλους κόμβους. Η αναζήτηση είναι παραμετροποιήσιμη, καθώς μπορούν να ζητηθούν Advertisements από συγκεκριμένο κόμβο (`peerID`), συγκεκριμένου τύπου (`type`). Επίσης μπορούν να καθοριστούν και φίλτρα κατά την αναζήτηση, με το ζεύγος παραμέτρων `attribute`, `value`, όπως για παράδειγμα ότι να επιστραφούν Advertisements με όνομα `HelloWorld`. Τέλος, ρυθμίζεται και το κατώφλι του πλήθους Advertisements που θα επιστραφούν. Όταν βρεθούν Advertisements και επιστραφούν στον κόμβο, θα αναδυθεί ένα συμβάν `DiscoveryEvent`, και ένας χειριστής αυτών των συμβάντων που θα πρέπει να έχει καθοριστεί θα εκτελέσει τις απαραίτητες ενέργειες πάνω στα αποτελέσματα της αναζήτησης. Ο χειριστής θα είναι μια μέθοδος της μορφής

```
1 public void discoveryEvent(DiscoveryEvent event) {  
2     //handle event here  
3 }
```

όπως ορίζεται από την υλοποίηση της JXTA για την J2SE.

Ένα παράδειγμα ανταλλαγής μηνυμάτων

Είδαμε τα ελάχιστα βήματα που πρέπει να γίνουν ώστε οι κόμβοι να συνδεθούν σε ένα JXTA δίκτυο, να συνδεθούν με ενδεχόμενους Rendezvous Peers και τέλος να ανακαλύψουν άλλους κόμβους ή πόρους. Για να γίνει σαφές πως μπορεί να γίνει επικοινωνία μεταξύ κόμβων καθώς και η λειτουργία των Services, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα όπου δυο κόμβοι ανταλλάσσουν ένα μήνυμα.

Για τη δημιουργία ενός Service και διαμοιρασμού του με το P2P δίκτυο αρκεί να γραφεί ο κώδικας που θα το υλοποιεί, και το βασικότερο, να δημιουργηθεί ένα Advertisement, να συνδεθεί με το Service και να δημοσιευθεί, ώστε να μπορεί να ανακαλυφθεί από άλλους κόμβους. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, δημιουργείται ένα Service το οποίο απλώς δημοσιεύει ένα Advertisement και στη συνέχεια ανταλλάσσει ένα μήνυμα με κάποιον κόμβο που βρήκε το Advertisement. Σημειώνεται ότι για τη δημοσίευση και χρήση ενός Service πρέπει να δημιουργηθούν τουλάχιστον τρία είδη Advertisements, τα `ModuleClassAdvertisement`, `ModuleSpecAdvertisement`, `PipeAdvertisement`. Εδώ, για ευκολία, δείχνεται η δημιουργία

μόνο ενός `PipeAdvertisement`, καθώς είναι για όλα η ίδια διαδικασία.

Listing 3.2: `MessageService.java`

```
1 private void createService() {
2     String serviceName = "MESSAGE-SERVICE";
3     PipeAdvertisement pipeAdv = (PipeAdvertisement) AdvertisementFactory.
        newAdvertisement(PipeAdvertisement.getAdvertisementType());
4     pipeAdv.setName("JXTAPIPE:" + serviceName);
5     pipeAdv.setType(PipeService.UnicastType);
6     pipeAdv.setPipeID(IDFactory.newPipeID(netPeerGroup.getPeerGroupID()));
7     DiscoveryService discovery = netPeerGroup.getDiscoveryService();
8     discovery.publish(pipeAdv);
9     discovery.remotePublish(pipeAdv);
10 }
11 public void messageReceived(Message msg) {
12     // process message, e.g. look for content in 'DataTag'
13     MessageElement msgElement = msg.getMessageElement(null, "DataTag");
14     if (msgElement != null) {
15         System.out.println("message received; content: " + msgElement);
16     } else
17         System.out.println("message received, but no DataTag found; message: " + msg);
18 }
```

Η μέθοδος `createService()` είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία των `Advertisements` του `Service`, όπως και γίνεται στις γραμμές 2-6 του Listing 3.2. Στη γραμμή 7 λαμβάνεται το `DiscoveryService` για το τρέχον `Peer Group`, και οι κλήσεις των γραμμών 8 και 9 είναι αυτές που δημοσιεύουν τα `Advertisements` την τοπική κρυφή μνήμη και στο `Peer Group`, αντίστοιχα.

Η μέθοδος `messageReceived(Message msg)` είναι ο χειριστής συμβάντων που προκαλούνται όταν ληφθεί ένα μήνυμα στο `Pipe` που έχει ενσωματωθεί στο `Service`. Έτσι αυτό που γίνεται εδώ είναι ότι κατά τη λήψη ενός νέου μηνύματος, ο χειριστής θα ψάξει μέσα στο μήνυμα για το στοιχείο με όνομα `"DataTag"` και στη συνέχεια θα το εκτυπώσει (είτε θα εκτυπώσει μήνυμα λάθους αν δε βρεθεί τέτοιο στοιχείο).

Στο Listing 3.3 φαίνεται ο κώδικας του κόμβου που αναζητά για ένα `Service` με όνο-

μα "MESSAGE-SERVICE". Η μέθοδος `discoverService()` καθορίζει και εκκινεί την αναζήτηση αυτή. Η κλήση της γραμμής 2 δημιουργεί τις παραμέτρους της αναζήτησης. Αυτή θα διενεργηθεί μέσα στο Peer Group `netPeerGroup`, το αντικείμενο που θα χειριστεί την επιστροφή των αποτελεσμάτων είναι το ίδιο (`this`), και επίσης καθορίζεται το όνομα του Service προς αναζήτηση, ο μέγιστος χρόνος αναμονής, και το πλήθος αποτελεσμάτων που θα επιστραφούν. Όταν επιστραφούν αποτελέσματα, καλείται ο χειριστής για συμβάντα `ServiceDiscoveryEvent` που είναι η μέθοδος `handleServiceDiscoveryEvent()`. Η μέθοδος αυτή απλώς δημιουργεί ένα νέο μήνυμα και το στέλνει μέσω του Pipe που έχει ενσωματωθεί με το Service που βρέθηκε.

Listing 3.3: ServiceDiscovery.java

```
1 private void discoverService() {
2     ServiceDiscovery discovery = new ServiceDiscovery(netPeerGroup, this, "MESSAGE-
        SERVICE", 15000, 10);
3     discovery.start(true);
4 }
5 public void handleServiceDiscoveryEvent(ModuleSpecAdvertisement mdsadv) {
6     try {
7         System.out.println("version of discovered service: " + mdsadv.getVersion());
8         OutputPipe outputPipe = netPeerGroup.getPipeService().createOutputPipe(mdsadv.
            getPipeAdvertisement(), 10000);
9         Message msg = new Message();
10        msg.addMessageElement(null, new StringMessageElement("DataTag", "hello world
            from " + InetAddress.getLocalHost().getCanonicalHostName(), null));
11        outputPipe.send(msg);
12    } catch (Exception e) {
13        System.err.println("error sending message:");
14        e.printStackTrace();
15    }
16 }
```

Παρατηρούμε ότι η JXTA λειτουργεί με τρόπο που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη δημιουργία Advertisements και δημοσίευσή τους, στην (ίσως παραμετροποιημένη) αναζήτηση για τέτοια Advertisements, και τελικά στη δημιουργία συμβάντων (Events) και χειρισμού τους

από αντίστοιχους χειριστές (Event Handlers). Με αυτό τον τρόπο λειτουργούν όλα τα στοιχεία και τα πρωτόκολλα της JXTA. Τα παραδείγματα που δόθηκαν είναι απλώς μια μικρή απλοϊκή ένδειξη του τρόπου λειτουργίας της JXTA ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητή η πλατφόρμα. Κάθε ενδιαφερόμενος για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπεται στο [7], όπου υπάρχει πληθώρα παραδειγμάτων, επεξηγήσεων και οδηγιών για όλα τα βασικά λειτουργικά στοιχεία και τα πρωτόκολλα της JXTA.

Κεφάλαιο 4

Το Σύστημα p2pInet

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα Διασύνδεσης Πολλαπλών Απομακρυσμένων και Ετερογενών Ασύρματων Δικτύων με το Διαδίκτυο (ή εν συντομία p2pInet) το οποίο έχει υλοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Γίνεται αναφορά στα κίνητρα που ώθησαν στην υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, καθώς και στους στόχους από την υλοποίηση. Ακολουθεί μια πλήρης περιγραφή του συστήματος και της λειτουργίας του, και τέλος μια αναλυτική παρουσίαση των πειραμάτων που έγιναν για την διερεύνηση της λειτουργίας του από την άποψη της ορθότητας, της ευελιξίας και της απόδοσης. Τέλος, γίνεται μια συζήτηση για τα συμπεράσματα, τις προοπτικές για εξέλιξη του συγκεκριμένου έργου, καθώς και τις δυνατότητες για περαιτέρω μελέτη και έρευνα πάνω στο θέμα.

4.1 Εισαγωγή

Έχοντας περιγράψει το σύστημα PERM το οποίο θέτει στην πράξη και υπό δοκιμή το multihoming στο εδάφιο 2.1 και έχοντας αναλύσει τις δυνατότητες και ωφέλειές του στο εδάφιο 2.2, είναι πλέον προφανή τα κέρδη από την υλοποίησή του. Όλα αυτά φανερώνουν μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπου μπορεί να φανεί χρήσιμο το Multihoming στον τομέα τόσο των ενσύρματων και ασύρματων δικτύων, όσο και σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις όπως τα δίκτυα αισθητήρων.

Αυτό που λείπει από τις υπάρχουσες λύσεις και εφαρμογές του Multihoming είναι η δυνατότητα υποστήριξης περισσότερων από ενός οντοτήτων, έως ίσως και ένα ολόκληρο τοπικό

δίκτυο, με συναθροισμένους συνδέσμους προς το Internet, όπως για παράδειγμα στην υποθετική περίπτωση μιας μικρής κοινωνίας διασκορπισμένων χρηστών, όπου μόνον μερικοί από αυτούς έχουν διαθέσιμη ευρυζωνική πρόσβαση. Ακόμη και σε μια τέτοια περίπτωση, το Multihoming μπορεί να εφαρμοστεί με τρόπο τέτοιο ώστε η αποδοτικότητα να επαυξηθεί.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια εφαρμογής αυτής της ιδέας με την ανάπτυξη ενός συστήματος που προσφέρει διαμοιρασμό των πολλαπλών διαθέσιμων συνδέσεων προς το Internet¹ σε ένα οργανωμένο δίκτυο οντοτήτων που θα τις αξιοποιούν. Στόχος μας είναι η βελτίωση της διαδικτυακής πρόσβασης και απόδοσης των οντοτήτων που συνδέονται στο σύστημα. Η απόδοση επιδιώκεται από την οπτική γωνία του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων (όπως το εύρος ζώνης), της συνδεσιμότητας και της αξιοπιστίας της, στην περίπτωση όπου ένας διαθέσιμος σύνδεσμος αποτυγχάνει, οπότε και γίνεται αδιαφανής μετάβαση σε κάποιον άλλο ενεργό. Επιπλέον, ενδιαφέρον υπάρχει προς την κατεύθυνση της οργάνωσης των διαθέσιμων συνδέσεων με χρήση σχημάτων δρομολόγησης των μεταβιβάσεων δεδομένων, καθώς και ο αντίκτυπος της επιλογής του εκάστοτε σχήματος. Τέλος, στόχος είναι η χρήση του συστήματος τόσο σε πλασματικές συνθήκες για επιβεβαίωση της λειτουργίας, όσο και σε πραγματικές συνθήκες για ποσοτικοποίηση του κέρδους μιας τέτοιας προσέγγισης.

Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα JXTA του εδαφίου 3.2 καθώς και η γλώσσα προγραμματισμού Java. Το σύστημα ονομάστηκε *p2pNet*, από το συνδυασμό των P2P δικτύων με το Internet.

4.2 Περιγραφή της Αρχιτεκτονικής

Ένας από τους στόχους του συστήματος είναι να προσφέρει συνδεσιμότητα με τρόπο αδιαφανή σε οντότητες² που συνδέονται σε αυτό, η οποία συνδεσιμότητα μοιράζεται από άλλες οντότητες που διαθέτουν και τη διαμοιράζονται. Αυτό από μόνο του υπονοεί το σχηματισμό ενός P2P δικτύου από οντότητες. Στο P2P δίκτυο θα συνδέονται όλες οι οντότητες που επιθυμούν να βελτιώσουν τη συνδεσιμότητά τους, είτε πρόκειται για οντότητες που έχουν στη

¹Η και γενικότερα προς μια πύλη (gateway) ενδιαφέροντος

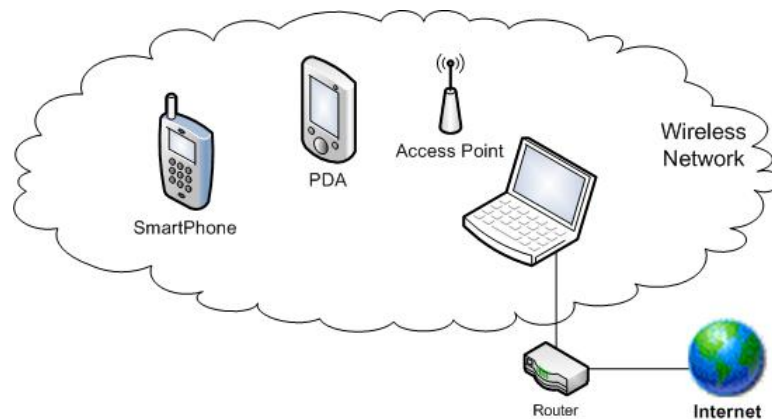
²Σαν οντότητα περιγράφεται οποιοδήποτε υπολογιστικό σύστημα που έχει τη δυνατότητα διασύνδεσης μέσω ενός ενσύρματου ή ασύρματου interface, όπως Υπολογιστές, Κινητά Τηλέφωνα, PDAs, αισθητήρες, κ.ά.

διάθεσή τους σύνδεση με το Ιντερνετ, είτε οντότητες που δεν έχουν. Αυτές που έχουν, θα τη διαμοιράζουν προς χρήση στο P2P δίκτυο, και αυτές που δεν έχουν, αλλά και αυτές που ίσως η δική τους είναι υπερφορτωμένη, θα χρησιμοποιούν τη συνδεσιμότητα των υπολοίπων. Έτσι ο πόρος που διαμοιράζεται στο P2P δίκτυο του συστήματος θα είναι το εύρος ζώνης της σύνδεσης κάποιων οντοτήτων. Όλες οι οντότητες αποτελούν και τους κόμβους του P2P δικτύου. Η επιλογή της σύνδεσης (ή του κόμβου) που θα χρησιμοποιηθεί από κάθε κόμβο που τη χρειάζεται βασίζεται σε διάφορα κριτήρια κάθε φορά, τα οποία εξαρτώνται και καθορίζονται από το σχήμα δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Ας σημειωθεί ότι σαν δρομολόγηση δεν εννοείται η διαδρομή ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου που ακολουθεί η επικοινωνία, αλλά η επιλογή της καταλληλότερης σύνδεσης προς το Internet από όλες τις διαθέσιμες - ουσιαστικά η δρομολόγηση κατευθύνει προς έναν συγκεκριμένο κόμβο την επιθυμία κάποιου άλλου για συνδεσιμότητα.

Για την περιγραφή της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, αλλά και ενός κόμβου με το Internet χρησιμοποιείται η έννοια *ροή*. Η ροή αποτελεί ουσιαστικά μια ανταλλαγή δεδομένων και θα έχει πάντοτε έναν κόμβο προέλευσης και έναν προορισμό. Δηλαδή ροή θα είναι η διαδικασία κατά την οποία ένας κόμβος κάνει μια αίτηση για δεδομένα προς έναν προορισμό, και ο προορισμός απαντά με τα δεδομένα. Κατά συνέπεια, σαν *εξωτερική ροή* θα καλείται μια ροή της οποίας η προέλευση είναι ένας κόμβος του P2P δικτύου, και προορισμός είναι κάποιος απομακρυσμένος server του Διαδικτύου. Έτσι, αυτές οι ροές θα εκτελούνται μόνον από κόμβους που διαθέτουν σύνδεση με το Internet. *Εσωτερικές ροές* θα καλούνται οι ροές των οποίων και η προέλευση και ο προορισμός είναι κάποιοι δυο κόμβοι του P2P δικτύου. Συνεπώς όταν ένας κόμβος επιθυμεί την ανταλλαγή δεδομένων με έναν απομακρυσμένο προορισμό του διαδικτύου, αλλά δεν διαθέτει συνδεσιμότητα, θα αναγκάζεται να εγκαθιστά μια εσωτερική ροή δεδομένων προς έναν κόμβο συνδεδεμένο στο Internet, ο οποίος με τη σειρά του θα εγκαθιστά μια εξωτερική ροή για να εξυπηρετήσει την αίτηση του πρώτου. Επιπλέον, θα χρησιμοποιείται και ο όρος *εξερχόμενη ροή*, με τον οποίο θα περιγράφουμε μια ροή η οποία δημιουργείται από έναν χρήστη σε κάποιο κόμβο και κατευθύνεται προς κάποιο απομακρυσμένο προορισμό στο Internet. Ουσιαστικά λοιπόν μια εξερχόμενη ροή ίσως χρειαστεί να διασπαστεί σε μια εσωτερική και μια εξωτερική ροή, ίσως όμως να ταυτίζεται μερικές φορές με την εξωτερική ροή. Τέλος σαν *εξωτερικός σύνδεσμος* του P2P δικτύου θα αναφέρεται ένας

σύνδεσμος με το Internet (δηλαδή μια ευρυζωνική σύνδεση) και σαν *εσωτερικός σύνδεσμος* θα εννοείται μια σύνδεση με κάποιον άλλο κόμβο μέσα στο P2P δίκτυο.

Έχει γίνει ήδη σαφές ο τρόπος με τον οποίο οι κόμβοι θα διαμοιράζονται τη συνδεσιμότητά τους και το πώς θα γίνεται η επικοινωνία ανάμεσά τους. Μια σχηματική απεικόνιση μιας τυχαίας σύνθεσης ενός υποθετικού σεναρίου εκτέλεσης του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Εδώ φαίνονται τρεις συσκευές - ένα SmartPhone, ένα PDA και ένας φορητός



Σχήμα 4.1: Μια δικτυακή τοπολογία που μπορεί να αξιοποιηθεί με το p2pInet

υπολογιστής - συνδεδεμένες στο ίδιο ασύρματο δίκτυο που σχηματίζεται από το Access Point. Επίσης, ο φορητός υπολογιστής με το interface τοπικού δικτύου του, είναι συνδεδεμένος μέσω ενός router στο Internet. Αν οι τρεις συσκευές συνδεθούν στο P2P δίκτυο του συστήματός μας, θα δοθεί η δυνατότητα σε όλες τις συσκευές να έχουν πρόσβαση στο Internet μέσω του συνδέσμου του φορητού υπολογιστή.

Για την υλοποίηση του P2P δικτύου χρησιμοποιείται η πλατφόρμα JXTA. Όπως έχει αναφερθεί, το πρωτόκολλο Peer Endpoint της JXTA είναι υπεύθυνο για την ανεύρεση μονοπατιών ανάμεσα σε κόμβους, και αυτό γίνεται με τρόπο αδιαφανή. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι το δίκτυο φαινομενικά είναι πλήρως συνδεδεμένο, άρα όταν ένας κόμβος εισέρχεται σε αυτό, πρακτικά μπορεί να επικοινωνήσει με όλους τους κόμβους άμεσα. Για την δόμηση του δικτύου, πρέπει να υπάρχει ένας αρχικός κόμβος, με τον οποίο συνδέεται όποιος κόμβος θέλει να συνδεθεί. Ο αρχικός αυτός κόμβος δεν είναι παρά ένας Rendezvous Peer, ο οποίος αρχικοποιεί το δίκτυο και εισάγει όλους τους καινούριους κόμβους σε αυτό. Έτσι κτίζεται ένα δίκτυο στο οποίο όσοι κόμβοι συνδέονται πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν

στο ίδιο δίκτυο με τον αρχικό κόμβο, είτε πρόκειται για ασύρματο είτε για ενσύρματο.

Έχοντας δει τον τρόπο με τον οποίο οργανώνεται το δίκτυο του συστήματος, για να οριστεί πλήρως η λειτουργία του μένει να περιγραφούν οι βασικές γραμμές λειτουργικότητας που το πλαισιώνουν. Το σύστημα υλοποιεί και υποστηρίζει τρεις γενικές λειτουργίες.

Πρώτον, η λήψη νέων εξερχόμενων ροών στους κόμβους του συστήματος οι οποίες συσσωματωτικά δημιουργούνται ενεργητικά από τους χρήστες των οντοτήτων που συμμετέχουν. Οι ροές αυτές είναι διαχωρίσιμες σε επίπεδο αρχείων και όχι χαμηλότερο, όπως το επίπεδο TCP/UDP πακέτων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μια τέτοια ροή δε διασπάται περισσότερο, άρα μετάδοση των δεδομένων μιας ροής θα σημαίνει πλήρης μετάδοση ενός αρχείου, ή σε πολλές περιπτώσεις απλώς κάποιου μηνύματος, όπως γίνεται στην περίπτωση μιας αίτησης για μια ιστοσελίδα του πρωτοκόλλου HTTP.

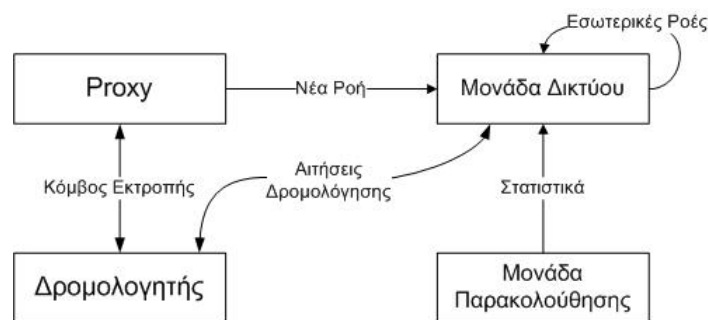
Δεύτερη έρχεται η λειτουργία της παρακολούθησης της αποδοτικότητας των συνδέσμων. Η παρακολούθηση αυτή δεν γίνεται από κάποια κεντρική οντότητα, αλλά από τον κάθε κόμβο ξεχωριστά - έτσι όλοι οι κόμβοι καταγράφουν στοιχεία για τους ενδεχόμενους συνδέσμους τους. Τα στοιχεία αυτά ποικίλουν αναλόγως με τις ανάγκες του συστήματος, αλλά σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν στατιστικά για την κυκλοφορία πάνω στους συνδέσμους (όπως το RTT³ και το επιτεύξιμο εύρος ζώνης ή ρυθμαπόδοση (throughput) των συνδέσμων) καθώς και πληροφορίες για την κατάστασή τους (η κατάσταση μοντελοποιείται ως *ενεργή* ή *ανενεργή*, και ελέγχεται διενεργώντας σχετικές μετρήσεις).

Τέλος, η λειτουργία της δρομολόγησης, ζωτικής σημασίας για το σύστημά μας. Η δρομολόγηση δεν γίνεται σε επίπεδο μονοπατιών δικτύου, διότι αυτό γίνεται από το πρωτόκολλο Peer Endpoint της JXTA. Εντούτοις, οι ροές που ανακλύπουν σε κόμβους που ζητούν συνδεσιμότητα από άλλους, δρομολογούνται (ή εκτρέπονται) ανάμεσα σε όλους τους διαθέσιμους αυτούς συνδέσμους. Δηλαδή εάν στο P2P δίκτυο σε μια υποθετική περίπτωση υπάρξουν δύο κόμβοι με ευρυζωνική σύνδεση και ένας κόμβος χωρίς καμία σύνδεση με το Internet, η λειτουργία της δρομολόγησης θα επιλέγει μια εκ των δυο ευρυζωνικών συνδέσεων των πρώτων δυο κόμβων και εκεί θα ανακατευθύνει την κάθε ροή που ανακλύπτει στον τρίτο κόμβο. Η δρομολόγηση αυτή επίσης δεν γίνεται από κεντρική οντότητα, αλλά κατανεμημένα, μεταξύ των κόμβων του συστήματος.

³Round Trip Time

4.3 Οι Λειτουργικές Μονάδες

Ήδη από την περιγραφή της λειτουργικότητας του συστήματος, έχουν αρχίσει να διαφαίνονται και οι λειτουργικές μονάδες του συστήματος. Έχει γίνει διαχωρισμός της συνολικής λειτουργικότητας του συστήματος σε τέσσερις λειτουργικές μονάδες (ή αλλιώς components, όπως αναφέρονται συνήθως σε τέτοιου είδους συστήματα): ο *proxy component*, ο οποίος συλλέγει τις αιτήσεις για εγκαθιδρύσεις εξερχόμενων ροών στον κόμβο στον οποίο αντιστοιχεί και που τις προωθεί προς τον κατάλληλο προορισμό, μια *μονάδα δικτύου* η οποία ευθύνεται για οτιδήποτε έχει να κάνει με το P2P δίκτυο, όπως σύνδεση με άλλους κόμβους, ανταλλαγές μηνυμάτων, μια *μονάδα παρακολούθησης* η οποία εκτελεί την παρακολούθηση των συνδέσμων των κόμβων και της δικτυακής κυκλοφορίας και τέλος μια *μονάδα δρομολόγησης (δρομολογητής)* η οποία δρομολογεί τις εξερχόμενες ροές που δημιουργούν οι χρήστες στους κόμβους ανάμεσα στους εξωτερικούς διαθέσιμους συνδέσμους. Καθώς θα αναπτύσσονται περισσότερο οι λειτουργικές μονάδες και οι λεπτομέρειες που τις πλαισιώνουν, χρήσιμη θα είναι η αναφορά στο Σχήμα 4.2, το οποίο δείχνει τη συσχέτιση ανάμεσα στις λειτουργικές μονάδες του συστήματος.



Σχήμα 4.2: Η συσχέτιση και αλληλεξάρτηση μεταξύ των μονάδων του συστήματος

4.3.1 Η Μονάδα Proxy

Σε κάθε κόμβο, οι χρήστες δημιουργούν νέες εξερχόμενες ροές δεδομένων με κάποιον απομακρυσμένο προορισμό. Η μονάδα Proxy παρεμβάλλεται ανάμεσα στην εφαρμογή του χρήστη που δημιουργεί τις ροές και στο επίπεδο δικτύου, συλλέγει έγκαιρα τις νέες ροές και τις κατευθύνει προς έναν κατάλληλο προορισμό. Έτσι όλες οι νέες ροές πλέον διέρχονται μέσω

του Proxy. Ο κατάλληλος προορισμός επιλέγεται σύμφωνα με τη δρομολόγηση που εκτελείται από τη Μονάδα Δρομολόγησης. Έτσι, ανάλογα βέβαια και με το σχήμα δρομολόγησης που το σύστημα χρησιμοποιεί, ο Proxy κατευθύνει τις ροές είτε προς τον εξωτερικό σύνδεσμο του ίδιου κόμβου, είτε προς έναν εσωτερικό σύνδεσμο στο P2P δίκτυο, προς κόμβο που διαθέτει εξωτερικό σύνδεσμο. Σε μερικά σχήματα δρομολόγησης ενδεχομένως παρόλο που ένας κόμβος μπορεί να διαθέτει εξωτερικό σύνδεσμο, η δρομολόγηση του επιβάλλει να εκτρέψει τις ροές του προς άλλο κόμβο με εξωτερικό σύνδεσμο. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβαίνει για παράδειγμα σε ένα σχήμα απληστίας (greedy scheme) όπου κάθε κόμβος επιλέγει εγωιστικά το σύνδεσμο που αποδίδει καλύτερα, είτε είναι ο δικός του είτε όχι.

Υλοποίηση

Ο Proxy παρεμβάλλεται στις ροές που δημιουργούνται από εφαρμογές του κόμβου και στη Μονάδα Δικτύου (ουσιαστικά στο P2P) δίκτυο και επίσης ανάμεσα στο P2P δίκτυο και σε απομακρυσμένους προορισμούς. Η παρεμβολή αυτή υλοποιείται με το Socket API της Java. Ουσιαστικά λοιπόν ο Proxy διατηρεί ένα Socket στο οποίο εισέρχονται οι αιτήσεις (π.χ. HTTP Requests) για νέες ροές, και κάθε μια ροή εξυπηρετείται από μια διαφορετική διεργασία-παιδί του Proxy. Αυτή η λειτουργία βοηθά στο να στέλνονται οι αιτήσεις στους εξωτερικούς συνδέσμους όπως ακριβώς παραλαμβάνονται, χωρίς να χρειάζεται αναμονή για την ολοκλήρωση της προηγούμενης, όπως θα γινόταν στην σειριακή αποστολή των αιτήσεων. Η λειτουργικότητα αυτή σχεδιάστηκε με νήματα (Threads) της Java. Μιας και τα νήματα για το σύστημα αποτελούν νέες διεργασίες, αυτό σημαίνει ότι λαμβάνουν το δικό τους χώρο στη μνήμη και το δικό τους ID. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό δημιουργούσε προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος, καθώς ορισμένες ιστοσελίδες παρήγαγαν μεγάλο αριθμό αιτήσεων προς εξυπηρέτηση και με μεγάλο ρυθμό, με αποτέλεσμα τη σημαντική επιβάρυνση του συστήματος σε πόρους. Αυτό οφειλόταν στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται μια διεργασία να απελευθερώσει τους πόρους που καταλαμβάνει - μέχρι να περάσει αυτό, πολλαπλές διεργασίες δημιουργούνταν και έτσι το σύστημα επιβαρυνόταν πολύ. Αυτό ελέγχθηκε με τη χρήση συγκεκριμένου πλήθους από νήματα, και ανακύκλωση των πόρων τους. Έτσι δεν χρειάζεται η απελευθέρωση των πόρων και δέσμευση εκ νέου, αλλά όταν ένα νήμα τερματίζεται, οι πόροι του δίνονται κατ'ευθείαν στο επόμενο νήμα προς εκτέλεση. Η λειτουργία αυτή παρέχεται από

την κλάση `ExecutorService` και τη `ThreadPool` της Java. Εκτός από το χειρισμό των νέων ροών, ο `Proxy` ευθύνεται για την τελική επικοινωνία με τον απομακρυσμένο προορισμό μέσω του εξωτερικού συνδέσμου. Στο σημείο αυτό ας αναφερθεί ότι πάνω σε αυτή την κυκλοφορία γίνονται οι μετρήσεις των στατιστικών που εκτελεί η Μονάδα Παρακολούθησης.

4.3.2 Η Μονάδα Δικτύου (Network Manager)

Η Μονάδα Δικτύου είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση του P2P δικτύου του συστήματος. Η λειτουργία της καλύπτει από τις εισαγωγές στο δίκτυο νέων κόμβων, μέχρι τη δημοσίευση του πόρου της διαθεσιμότητας εξωτερικού συνδέσμου. Επίσης, είναι η μονάδα που χειρίζεται εσωτερικές ροές που προέρχονται από άλλους κόμβους, τις επεξεργάζεται και απαντά αντίστοιχα. Οι ροές αυτές είναι είτε ροές που πρέπει να κατευθυνθούν στον εξωτερικό σύνδεσμο του κόμβου, είτε ροές που έχουν να κάνουν με ανταλλαγή δεδομένων που αφορούν καθαρά στο P2P δίκτυο, όπως αιτήσεις για γνωστοποίηση των επιδόσεων του συνδέσμου του κόμβου προς τους υπόλοιπους. Πληροφορίες τέτοιου είδους απαιτούνται πολλές φορές από ορισμένα σχήματα δρομολόγησης, όπως το σχήμα απληστίας, για τη λήψη των αποφάσεων δρομολόγησης. Όλη η επικοινωνία που λαμβάνει χώρα μέσα στο P2P δίκτυο βασίζεται σε αυτή τη μονάδα.

Υλοποίηση

Η Μονάδα Δικτύου ευθύνεται για τη λειτουργικότητα μέσα στο P2P δίκτυο, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην περιγραφή της. Υλοποιείται με JXTA στο μεγαλύτερο κομμάτι της, και διασυνδέει όλες τις υπόλοιπες μονάδες μεταξύ τους. Σε αυτή τη μονάδα γίνεται η ρύθμιση όλων των παραμέτρων και των απαραίτητων διαδικασιών για τη συμμετοχή ενός κόμβου στο P2P δίκτυο, η δημοσίευση της υπηρεσίας διάθεσης εξωτερικού συνδέσμου (ουσιαστικά η υπηρεσία `Proxy`, μιας και εκεί γίνεται η αξιοποίηση του συνδέσμου) και όλη η επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους. Η συμμετοχή ενός κόμβου στο P2P δίκτυο προϋποθέτει τη σύνδεσή του με έναν `Rendezvous Peer`, κάτι που στην πράξη σημαίνει ότι ο κόμβος θα έχει συνδεθεί σε κάποιο δίκτυο, στο οποίο θα υπάρχει και ένας `Rendezvous Peer` του συστήματος `p2pInet`. Δεν έχει σημασία το είδος του δικτύου (ενσύρματο, WiFi, WiMAX), ο μόνος περιορισμός που μπαίνει

εδώ είναι ότι θα πρέπει να βασίζεται πάνω στο TCP/IP μιας και αυτό είναι προϋπόθεση που τίθεται από την JXTA. Ένας κόμβος που διαθέτει εξωτερικό σύνδεσμο, το γνωστοποιεί και το δημοσιεύει στο P2P δίκτυο ως ένα Service. Για την ακρίβεια, μιας και ο Proxy είναι η μονάδα που αξιοποιεί τον εξωτερικό σύνδεσμο, δημοσιεύεται το λεγόμενο Proxy Service. Η δημοσίευση του Service γίνεται περιοδικά κατά μια περίοδο προκαθορισμένη από τη JXTA, και σταματά όταν ο εξωτερικός σύνδεσμος σταματήσει να ανταποκρίνεται, δηλαδή αποτύχει. Με αυτόν τον τρόπο, όταν ένας κόμβος εκτελεί αναζήτηση και ένας σύνδεσμος έχει πέσει, δε θα φανεί το Advertisement του και άρα δε θα ληφθεί υπ'όψιν στη διαδικασία δρομολόγησης. Η διαδικασία της αναζήτησης υλοποιείται στα πλαίσια της Μονάδας Δρομολόγησης. Για να επικοινωνήσουν οι κόμβοι μεταξύ τους χρησιμοποιούνται JXTA Sockets (διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία). Με αυτά τα Sockets γίνεται η ανταλλαγή δεδομένων πάνω στους εσωτερικούς συνδέσμους. Όταν δηλαδή ένας κόμβος A προωθεί μια ροή δεδομένων του προς ένα κόμβο B που διαθέτει εξωτερικό σύνδεσμο, η επικοινωνία γίνεται μέσω ενός Socket. Επιπλέον, όταν ο B θα επιστρέψει την απάντηση προς τον A, θα το κάνει επίσης μέσω του Socket. Η επιστροφή της απάντησης από τον B στον A γίνεται *την ίδια χρονική στιγμή με τη λήψη*, όμως ασύγχρονα. Πρακτικά, όταν ο B λάβει ένα μικρό κομμάτι της απάντησης από τον απομακρυσμένο προορισμό (δηλαδή κάποια bytes), το αναθέτει για αποστολή σε μια διεργασία που εκτελείται παράλληλα και ευθύνεται μόνο για την αποστολή των δεδομένων, η οποία το επιστρέφει επί τόπου στον A.

4.3.3 Η Μονάδα Παρακολούθησης (Network Monitor)

Η καταγραφή στατιστικών στοιχείων και μετρήσεων που σχετίζονται με την δικτυακή κυκλοφορία των συνδέσμων αλλά και με την κατάστασή τους, είναι απαραίτητη σε ένα σύστημα όπως το p2pInet. Η ανάγκη αυτή οφείλεται αρχικά στη διεξαγωγή πειραμάτων. Προκειμένου να διερευνηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος και το όφελος που προσφέρει σε μια κοινωνία οντοτήτων που συναθροίζουν τη συνδεσιμότητά τους, είναι αναγκαία η καταγραφή στατιστικών όπως είναι τα στοιχεία της δικτυακής κυκλοφορίας (όγκος δεδομένων, χρόνοι μετάδοσης, ρυθμαπόδοση, χρησιμοποίηση). Επίσης τέτοια στοιχεία απαιτούνται από πολλά σχήματα δρομολόγησης, και στο p2pInet είναι επιθυμητή η δυνατότητα ενίσχυσης και δοκιμής του συστήματος με πολλαπλά σχήματα. Έτσι, είναι απαραίτητο

να μπορούν να διατηρηθούν στατιστικά στοιχεία κυκλοφορίας. Η Μονάδα Παρακολούθησης επίσης εκτελεί διερεύνηση για αποτυχίες στους υπάρχοντες συνδέσμους. Αυτό συνίσταται στην περιοδική προσπάθεια για σύνδεση με κάποιον απομακρυσμένο προορισμό. Επιτυχείς προσπάθειες συνεπάγονται ότι ο σύνδεσμος βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, ενώ αποτυχίες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο σύνδεσμος έχει αποτύχει λόγω σφαλμάτων.

Υλοποίηση

Θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο εκτελείται η παθητική και η ενεργητική μέτρηση στατιστικών καθώς και η ενεργητική παρακολούθηση της κατάστασης του συνδέσμου. Ως παθητική μέτρηση αναφέρεται η διαδικασία κατά την οποία η Μονάδα Παρακολούθησης αποθηκεύει στοιχεία που έχουν μετρηθεί κατά την εξέλιξη της κυκλοφορίας μέσω του συνδέσμου στον Proxy. Έτσι όταν γίνεται μια μεταφορά δεδομένων από έναν απομακρυσμένο προορισμό προς έναν κόμβο του δικτύου (μέσω του Proxy) διατηρούνται στατιστικά όπως ο χρόνος και ο όγκος δεδομένων, τα οποία επεξεργάζονται και αποθηκεύονται στη Μονάδα Παρακολούθησης. Η ενεργητική μέτρηση συνίσταται στην επί τούτου περιοδική μέτρηση στοιχείων ενδιαφέροντος από τη Μονάδα Παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο για παράδειγμα μετράται το RTT. Για να μετρηθεί ο χρόνος αυτός, αρκεί η Μονάδα Παρακολούθησης να εκτελέσει ένα *ping* προς απομακρυσμένους προορισμούς. Η διαδικασία *ping* αποστέλλει μικρά πακέτα δεδομένων στον προορισμό μέσω του πρωτοκόλλου ICMP⁴ και μετρά το χρόνο από την αποστολή του πρώτου μέχρι τη λήψη του τελευταίου πακέτου. Επειδή η Java δεν υποστηρίζει πρόσβαση στο επίπεδο του ICMP, το *ping* υλοποιήθηκε ως εξής: Αποστέλλεται μέσω Socket ένα πολύ μικρού μεγέθους HTTP Request προς τον προορισμό, και κατά τη λήψη της απάντησης, η χρονομέτρηση σταματά στα πρώτα λίγα bytes (για την ακρίβεια, όσα ήταν και τα bytes του request) ώστε να εξομοιωθεί το *ping*. Τέλος, η ενεργητική παρακολούθηση της κατάστασης του συνδέσμου που εκτελείται από τη Μονάδα Παρακολούθησης, συνίσταται στην προσπάθεια εγκαθίδρυσης μιας σύνδεσης με έναν απομακρυσμένο προορισμό. Για την ακρίβεια, εκτελούνται περιοδικά μερικές προσπάθειες δημιουργίας ενός Socket με έναν απομακρυσμένο προορισμό. Εάν αποτύχουν, τότε ο σύνδεσμος θεωρείται ανενεργός. Η περιοδικότητα με την οποία εκτελούνται οι ενεργητικές μετρήσεις και των δυο περιπτώσε-

⁴Internet Control Message Protocol

ων που είδαμε, εξαρτάται κυρίως από το σχήμα δρομολόγησης. Εάν το σχήμα βασίζεται σε ευαισθητα στοιχεία, τότε επιβάλλεται μεγάλη συχνότητα στις μετρήσεις. Για παράδειγμα, στο σχήμα απληστίας βάσει του RTT, η μετρική αυτή είναι πολύ ευαίσθητη και αλλάζει διαρκώς, με αποτέλεσμα να απαιτούνται συχνές μετρήσεις της τάξης μερικών δευτερολέπτων. Στην περίπτωση ενός σχήματος όπως το σχήμα περιτροπής (Round Robin), το μόνο που έχει σημασία είναι η κατάσταση (ενεργή ή όχι) του συνδέσμου, άρα η συχνότητα μπορεί να μειωθεί μέχρι και μια μέτρηση ανά μερικά λεπτά.

4.3.4 Η Μονάδα Δρομολόγησης (Scheduler)

Η Μονάδα Δρομολόγησης χρησιμοποιεί διάφορα σχήματα Δρομολόγησης για να αποφασίσει ποιός από τους διαθέσιμους εξωτερικούς συνδέσμους ανάμεσα στους κόμβους του P2P δικτύου είναι ο καταλληλότερος για δρομολόγηση κάθε νέας ροής που συλλέγει ο Proxy Server. Πολλά σχήματα χρειάζονται δεδομένα από τους κόμβους, τα οποία εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο το κάθε σχήμα λειτουργεί. Για παράδειγμα, ένα σχήμα απληστίας βασισμένο στο RTT, δρομολογεί στο σύνδεσμο ο οποίος τη στιγμή που προκύπτει μια νέα ροή έχει το χαμηλότερο RTT. Σε άλλα σχήματα όμως, όπως είναι το σχήμα περιτροπής ή Round Robin, δε χρειάζονται τέτοια δεδομένα - το Round Robin επιλέγει με τη σειρά όλους τους διαθέσιμους συνδέσμους. Προς το παρόν στο σύστημα έχουν υλοποιηθεί αυτά τα δυο σχήματα, με το δεύτερο να είναι και αυτό που χρησιμοποιείται κατά την κανονική λειτουργία του στα πειράματα.

Το σχήμα απληστίας που έχει υλοποιηθεί λειτουργεί ως εξής: ασύγχρονα και ανεξάρτητα με οτιδήποτε άλλο συμβαίνει στο P2P δίκτυο, η μονάδα παρακολούθησης μετρά περιοδικά το RTT, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Ο δρομολογητής με τη σειρά του, και αυτός περιοδικά και ασύγχρονα, ζητά το RTT από όλους τους κόμβους που διαθέτουν εξωτερικό σύνδεσμο, και κάθε φορά που λαμβάνει νέες τιμές, επιλέγει το σύνδεσμο με το μικρότερο. Έτσι όταν ο Proxy Server ζητήσει από τον δρομολογητή το σύνδεσμο που έχει επιλεγεί για δρομολόγηση, ο δρομολογητής έχει ήδη κάνει την επεξεργασία, μειώνοντας έτσι το χρόνο που θα χρειαζόταν για να τον υπολογίσει εκείνη τη στιγμή. Αυτό σημαίνει βέβαια ότι οι τιμές του RTT δεν είναι πάντα οι πιο πρόσφατες, αλλά τουλάχιστον γίνονται με τέτοια συχνότητα ώστε να μην χαρακτηρίζονται και πεπαλαιωμένες.

Το σχήμα Round Robin λειτουργεί πιο απλά. Ο δρομολογητής ελέγχει περιοδικά ποιόι κόμβοι διαθέτουν εξωτερικό σύνδεσμο. Κάθε φορά που κάνει αυτό τον έλεγχο, ανανεώνει τη λίστα με κόμβους που διατηρεί. Όταν ο Proxy ζητήσει τον επιλεγμένο κόμβο, ο δρομολογητής του επιστρέφει έναν από τους διαθέτοντες εξωτερικό σύνδεσμο, αλλά όχι κάποιον που έχει επιλέξει ήδη. Όταν έχουν επιλεγεί όλοι, το σχήμα ξεκινά από την αρχή. Το θέμα της δρομολόγησης έχει πολύ μεγάλο βάθος, και είναι ένα από τα θέματα που απασχολούν πάντοτε τους ερευνητές. Στο σύστημα p2pInet δίνεται βάρος στη δρομολόγηση, και πάντα το ενδιαφέρον εστιάζεται σε τρόπους να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος με διαφορετικά σχήματα και στρατηγικές δρομολόγησης.

Υλοποίηση

Ο δρομολογητής είναι υπεύθυνος για την εκτέλεση αναζητήσεων Advertisements για τα Services διάθεσης εξωτερικού συνδέσμου των υπολοίπων κόμβων. Αυτό γίνεται εύκολα με χρήση του `DiscoveryService` της JXTA. Για να αποφευχθεί η άσκοπη υπερφόρτωση του P2P δικτύου με μηνύματα αναζήτησης, χρειάζεται προσαρμογή των αναζητήσεων σύμφωνα με τη δυναμικότητα των συνδέσμων. Έτσι, αν παρατηρούνται συχνά αποτυχίες στους συνδέσμους, θα πρέπει οι αναζητήσεις για κόμβους με ενεργό σύνδεσμο να γίνεται πιο συχνά. Μια τέτοια δυναμική προσαρμογή στα δεδομένα του δικτύου δεν έχει υλοποιηθεί ακόμη πλήρως, για αυτό και έχει βρεθεί μια χρυσή τομή για τη συχνότητα αναζήτησης. Πέρα από τις αναζητήσεις, ο δρομολογητής μεταβάλλει τη λειτουργία του αναλόγως με το σχήμα δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Στο σχήμα απληστίας απαιτείται η λήψη του RTT από τους κόμβους που διαθέτουν εξωτερικό σύνδεσμο εκτός από το Advertisement που δημοσιεύει την υπηρεσία τους στο δίκτυο. Για να γίνει αυτό, ο δρομολογητής μέσω ενός JXTA Pipe ζητά με ένα μήνυμα από τη Μονάδα Δικτύου το RTT, και αυτή με τη σειρά της αφού το πάρει από τη Μονάδα Παρακολούθησης του ίδιου κόμβου, το επιστρέφει στο δρομολογητή που το ζητά. Για το σχήμα Round Robin δεν χρειάζεται κάποια επιπλέον πληροφορία πέρα από τα Advertisements των κόμβων που διαθέτουν εξωτερικό σύνδεσμο. Ο δρομολογητής διατηρεί μια λίστα με τα Advertisements που βρήκε με την πιο πρόσφατη αναζήτησή του (`advrVec`), καθώς και μια λίστα με τους κόμβους που έχουν επιλεγεί κατά την τελευταία εκτέλεση του σχήματος Round Robin (`chosenVec`). Έτσι κάθε φορά που ζητείται από τον Proxy ένας κόμβος στον

οποίο θα γίνει η προώθηση της ροής, ο δρομολογητής επιστρέφει κάποιον από την `advrVec` που όμως δεν βρίσκεται και μέσα στην `chosenVec`. Αν όλοι οι κόμβοι της `advrVec` επιλέχθηκαν κατά τον τελευταίο γύρο του Round Robin, τότε η λίστα `chosenVec` εκκαθαρίζεται και η περιτροπή ξεκινά εκ νέου. Για τις λίστες χρησιμοποιείται η κλάση `Vector` της Java, η οποία έχει τη δυνατότητα να αυξάνει το μέγεθός της δυναμικά καθώς προστίθενται στοιχεία, καθώς επίσης και το πλεονέκτημα ότι παρέχει αποδοτική πρόσβαση στα στοιχεία που αποθηκεύει, χρησιμοποιώντας άμεση δεικτοδότηση των στοιχείων που περιέχει.

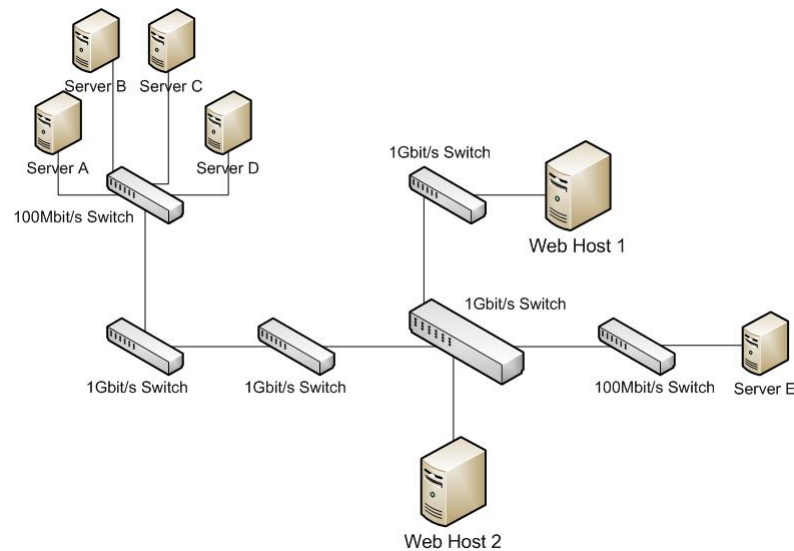
4.4 Πειραματική Αξιολόγηση

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη χρήση και δοκιμή του συστήματος `p2pNet`. Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν ελεγχόμενες δικτυακές τοπολογίες και πειράματα. Αρχικά παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η δικτυακή τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και το ελεγχόμενο δίκτυο δοκιμών που δομήθηκε πάνω σε αυτήν. Έπειτα, παρουσιάζεται μια σειρά αρχικών πειραμάτων που έγιναν για την απομονωμένη δοκιμή και εξέταση της Μονάδας `Proxy`, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο επιβαρύνεται το σύστημα από τη χρήση του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πειράματα που έγιναν με ελεγχόμενη δικτυακή κυκλοφορία με χρήση ολόκληρου του P2P συστήματος. Τέλος, συζητώνται τα συμπεράσματα οι προοπτικές τόσο της παρούσας εργασίας όσο και γενικότερα του θέματος του `Multihoming`.

4.4.1 Η Τοπολογία του Δικτύου για τα Πειράματα

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η τοπολογία του πραγματικού δικτύου (και όχι του P2P) που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Στο σχήμα μπορεί να δει κανείς συνολικά πέντε Servers (A έως E) και δυο Web Hosts (1 και 2). Επίσης, φαίνεται η μεταξύ τους διασύνδεση μέσω Switches. Για να έχει ο αναγνώστης μια ιδέα για τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στο δίκτυο, αναγράφεται σε κάθε Switch ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δυαδικών δεδομένων (bit rate). Επίσης, αξ σημειωθεί ότι το κεντρικό (και μεγαλύτερο σε μέγεθος στο σχήμα) Switch, διαθέτει μια ευρυζωνική σύνδεση στο Internet ρυθμού μετάδοσης δεδομένων 1Gbit/sec. Πάνω σε αυτό το δίκτυο κατασκευάζονται οι πειραματικές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται. Στην εκάστοτε τοπολογία συμμετέχουν οι (Servers A - E) και οι προορισμοί

που φιλοξενούν δεδομένα είναι οι δυο Web Hosts.



Σχήμα 4.3: Η φυσική τοπολογία πάνω στην οποία κτίζονται τα πειραματικά δίκτυα, ανάμεσα στους Servers A-E

4.4.2 Περιγραφή της Κυκλοφορίας των Πειραμάτων

Για τη διεξαγωγή όλων των ακόλουθων πειραμάτων, δημιουργήθηκε ένα σύνολο από χαρακτηριστικές δικτυακές κυκλοφορίες, που εξομοιώνουν τη διαδικτυακή συμπεριφορά ενός μέσου χρήστη. Η κυκλοφορία διαχωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: κυκλοφορία *Μεγάλου Όγκου Δεδομένων*, *Μέσου Όγκου Δεδομένων* και τέλος *Πλήρους Ιστοσελίδας*. Η κυκλοφορία πάνω στην οποία έγιναν τα πειράματα περιορίστηκε σε HTTP, έτσι οι ροές που δημιουργούνται από κάθε κατηγορία κυκλοφορίας περιλαμβάνουν την αποστολή αίτησης για κάθε αρχείο του συνόλου, και στη συνέχεια απάντηση από τον προορισμό με το αρχείο.

Κυκλοφορία Μεγάλου Όγκου Δεδομένων Η εξομοίωση της “βαριάς” κυκλοφορίας όσον αφορά τον όγκο δεδομένων γίνεται με αυτή την κατηγορία κυκλοφορίας. Οι ροές που δημιουργούνται εδώ μεταδίδουν αρχεία της τάξης εκατοντάδων megabytes. Για την ακρίβεια, για δοκιμή αυτού του είδους κυκλοφορίας μεταφέρονται 10 αρχεία μεγέθους περίπου 700MB το κάθε ένα. Τα αρχεία αυτά βρίσκονται στο *Web Host 2* που φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Κυκλοφορία Μέσου Όγκου Δεδομένων Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται οι ροές που δημιουργούνται και μεταδίδουν αρχεία που το μέγεθός τους δεν ξεπερνά το 1MB. Έτσι, για την εκτέλεση των πειραμάτων έγινε η μεταφορά 100 αρχείων μεγέθους περίπου 800KB το κάθε ένα. Και αυτά τα αρχεία βρίσκονται στο *Web host 2* του Σχήματος 4.3.

Κυκλοφορία Πλήρους Ιστοσελίδας Για την αξιολόγηση της κυκλοφορίας σε ιστοσελίδες του διαδικτύου, σε αυτή την ομάδα πειραμάτων μετράται η μετάδοση μιας πλήρους ιστοσελίδας προς έναν κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι θα μεταδοθούν όλα τα αρχεία της ιστοσελίδας στο χρήστη. Πρακτικά αυτό γίνεται με την αναδρομική μετάδοση όλων των αρχείων που βρίσκονται στο δέντρο της ιστοσελίδας (το δέντρο κατασκευάζεται ουσιαστικά από την αρχική σελίδα, τους φακέλους και τους υποφακέλους τους, και τα τελικά αρχεία). Η ιστοσελίδα περιέχει συνολικά περίπου 1430 αρχεία σε πλήθος, των οποίων το μέγεθος έχει μέση τιμή 50,57KB και τυπική απόκλιση 180,24KB. Η ιστοσελίδα βρίσκεται στο *Web Host 1* του Σχήματος 4.3.

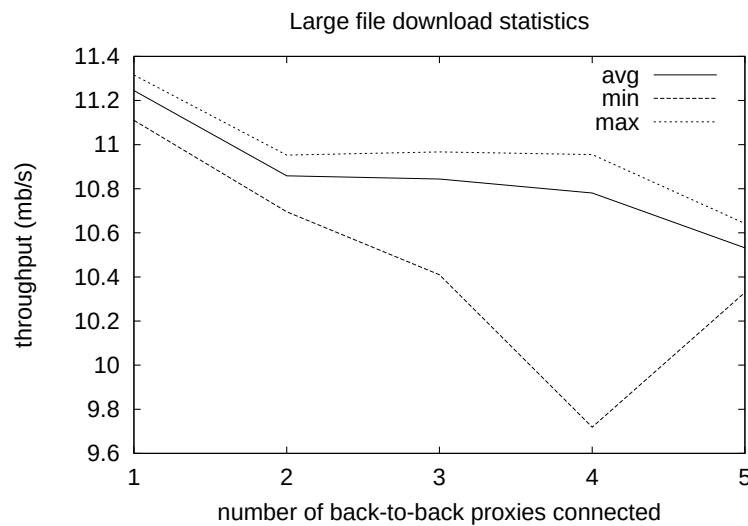
Είναι χρήσιμο για τη συνέχεια να σημειωθεί ότι ο συνολικός όγκος δεδομένων που καταλαμβάνουν και οι τρεις διαφορετικές κυκλοφορίες μαζί (αφού κάθε φορά εκτελούνται και οι τρεις) είναι περίπου 7144.82 megabytes δεδομένων.

4.4.3 Πειραματική Ανάλυση του Proxy

Πάνω στο δίκτυο του Σχήματος 4.3 κατασκευάστηκαν ελεγχόμενες τοπολογίες χρησιμοποιώντας τη Μονάδα Proxy ώστε να διαπιστωθεί η απόδοσή της. Τα πειράματα βασίζονται στη μέτρηση της ρυθμαπόδοσης (throughput) της κυκλοφορίας που δημιουργήθηκε ώστε να φανεί το κατά πόσο επιβαρύνεται η κυκλοφορία από τη λειτουργία του Proxy. Η διαδικασία αξιολόγησης περιλαμβάνει τη σταδιακή ανάπτυξη και επιβάρυνση του δικτύου με Proxies και την παραγωγή της ίδιας ακριβώς κυκλοφορίας σε κάθε περίπτωση. Η κυκλοφορία παράγεται σε τρία διαφορετικά στάδια, σύμφωνα με τα σύνολα πειραμάτων που ορίστηκαν στο 4.4.2.

Κατασκευάστηκαν και μετρήθηκε η ρυθμαπόδοση σε πέντε διαφορετικές τοπολογίες πάνω στο ελεγχόμενο δίκτυο. Η πρώτη, που αποτελεί και τη βάση για τις συγκρίσεις, αποτελείται από έναν υπολογιστή του δικτύου συνδεδεμένο με έναν Proxy που βρίσκεται στο ίδιο σύ-

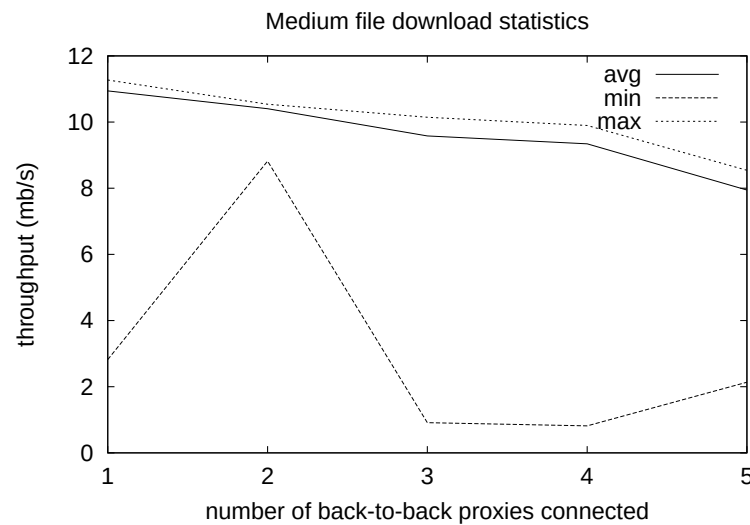
στημα, στον οποίο δημιουργούνται οι ροές που αντιστοιχούν στα σύνολα πειραμάτων που περιγράφηκαν. Στη συνέχεια, τοποθετείται ένας δεύτερος Proxy σειριακά συνδεδεμένος με τον πρώτο, μέσω του οποίου επαναλαμβάνονται τα ίδια σύνολα πειραμάτων. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθούν τα πειράματα για τοπολογία πέντε συνδεδεμένων back-to-back Proxies. Στα Σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6 φαίνονται οι μετρήσεις της ρυθμαπόδοσης για τα τρία σύνολα πειραμάτων, και για τις έξι συνολικά τοπολογίες σε κάθε πείραμα.



Σχήμα 4.4: Η ρυθμαπόδοση για τις πέντε τοπολογίες και το πρώτο σύνολο πειραμάτων (Μεγάλο Μέγεθος Όγκου Δεδομένων Κυκλοφορίας)

Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω σχήματα, η ρυθμαπόδοση της κυκλοφορίας στις πέντε διαφορετικές τοπολογίες επιδέχεται μικρή μείωση κάθε φορά που προστίθεται ένας Proxy στην αλυσίδα. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι συνολικές πτώσεις της μέγιστης, μέσης και ελάχιστης ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στις πέντε τοπολογίες.

Σημειώνεται ότι τόσο στο Σχήμα 4.6 για το πείραμα της πλήρους ιστοσελίδας, όσο και στον Πίνακα 4.1 δεν έχουν εμφανιστεί οι μετρήσεις για τη μέγιστη και ελάχιστη ρυθμαπόδοση, καθώς τόσο η ποικιλία στα μεγέθη των αρχείων όσο και το γενικότερο μικρό μέγεθός τους προκαλούν μεγάλες και απότομες αυξομειώσεις στη ρυθμαπόδοση, οι οποίες σε καμία



Σχήμα 4.5: Η ρυθμαπόδοση για τις πέντε τοπολογίες και το δεύτερο σύνολο πειραμάτων (Μεσαίο Μέγεθος Όγκου Δεδομένων Κυκλοφορίας)

Σύνολο Πειραμάτων	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Μεγάλος Όγκος	0.71	0.68	1.39
Μεσαίος Όγκος	2.99	2.73	8.00
Πλήρης Ιστοσελίδα	0.24	-	-

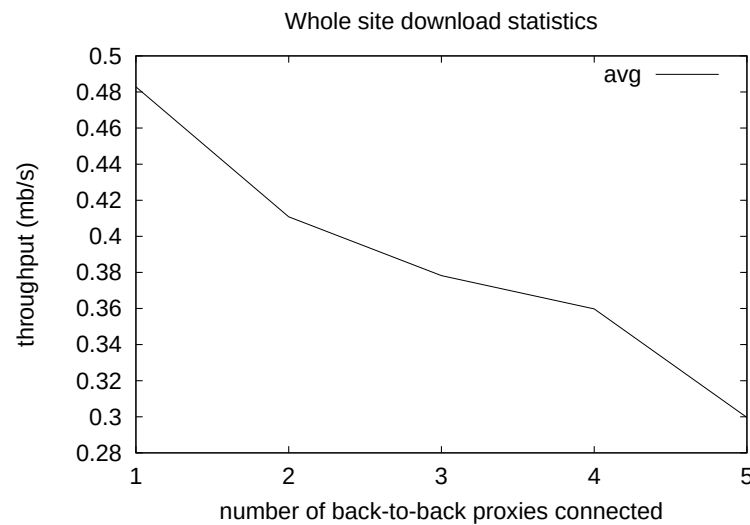
Πίνακας 4.1: Οι συνολικές πτώσεις στη ρυθμαπόδοση (σε MB/s)

περίπτωση δεν είναι ενδεικτικές.

4.4.4 Πειραματική Ανάλυση του Συστήματος p2pInet

Για την ανάλυση του συστήματος, τόσο όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου δρομολόγησης που χρησιμοποιείται, όσο και σχετικά με την ανταπόκριση του συστήματος στις τρεις διαφορετικές τεχνητές κυκλοφορίες δεδομένων, σχεδιάστηκε το πείραμα που περιγράφεται στο παρόν εδάφιο.

Στο πείραμα, κατασκευάζονται τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες, πάνω στο δίκτυο του Σχήματος 4.3. Κάθε τοπολογία αποτελείται από έναν σταθερό κόμβο (συγκεκριμένα τον



Σχήμα 4.6: Η ρυθμαπόδοση για τις πέντε τοπολογίες και το τρίτο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Πλήρους Ιστοσελίδας)

Server A του σχήματος), ο οποίος εξομοιώνει τη λειτουργία ενός κόμβου που δε διαθέτει σύνδεση με το Διαδίκτυο, και επιπλέον κόμβους (τους Servers B, C, D, E) συνδεδεμένους με το Διαδίκτυο που εξυπηρετούν τις ροές του πρώτου κόμβου (από τα τρία διαφορετικά σύνολα ροών που περιγράφηκαν). Έτσι, σχηματίζονται τοπολογίες με δυο, τρεις, τέσσερις και πέντε κόμβους, εκ των οποίων πάντα ο ένας είναι αυτός που δημιουργεί τις ροές. Διαδοχικά για κάθε τοπολογία εκτελούνται και μετρώνται και οι τρεις κυκλοφορίες δεδομένων, και καταγράφονται πειραματικά αποτελέσματα αντίστοιχα με αυτά του εδαφίου 4.4.3.

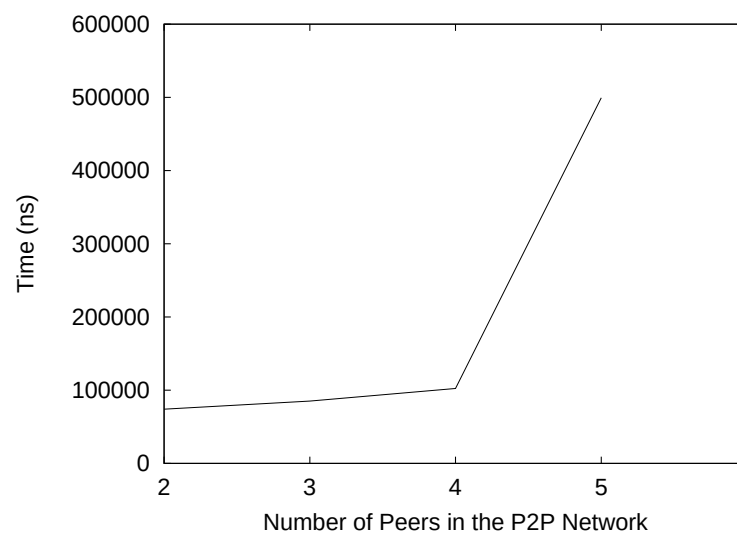
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά, καθώς και τα συμπεράσματα, που αφορούν αρχικά στον αλγόριθμο δρομολόγησης και στη συνέχεια στη συνολική λειτουργία του συστήματος.

Ανάλυση του Αλγόριθμου Δρομολόγησης Round Robin

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης Round Robin είναι αυτός που χρησιμοποιείται κυρίως στο σύστημα p2pInet προς το παρόν. Ο λόγος είναι η αποδοτική του λειτουργία καθώς το σύστημα δεν επιβαρύνεται με το κόστος επιπλέον επικοινωνίας για ανταλλαγή επιπρόσθετων δεδομέ-

νων δρομολόγησης, και η ομοιόμορφη κατανομή του φόρτου που δημιουργούν συνολικά οι ροές από έναν κόμβο που δεν διαθέτει εξωτερικό σύνδεσμο. Παρόλο που πρόκειται για απλό αλγόριθμο, είναι απαραίτητο να φανεί η ορθότητα λειτουργίας του και τα πλεονεκτήματα που τον χαρακτηρίζουν.

Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κατά την εκτέλεση δυο πειραμάτων. Αρχικά, κατά τη διάρκεια των δοκιμών του συστήματος, καταγράφηκε ο συνολικός μέσος χρόνος υπολογισμών που καταναλώθηκε για την εκτέλεση του αλγορίθμου. Έτσι δίνεται ένα μέτρο της συνολικής επιβάρυνσης που έχει η λειτουργία του αλγορίθμου στην απόδοση του συστήματος. Στο Σχήμα 4.7 φαίνονται οι χρόνοι αυτοί για τις πέντε πειραματικές τοπολογίες του συστήματος. Όπως διαπιστώνει κανείς από το Σχήμα 4.7, οι χρόνοι εκτέλεσης του

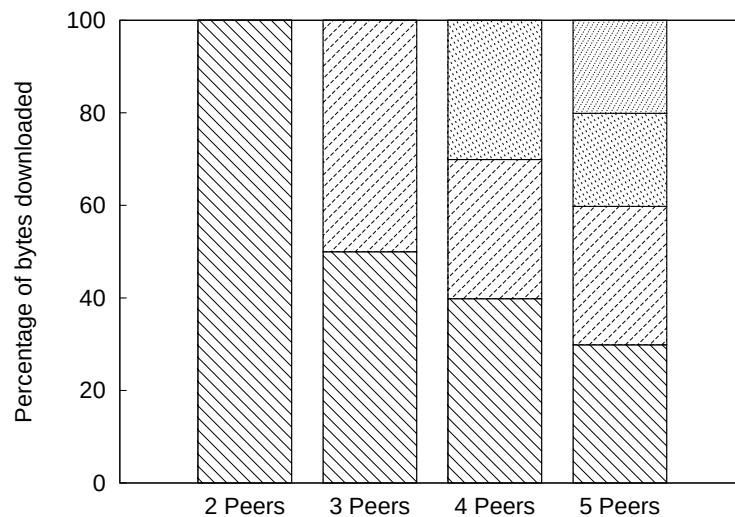


Σχήμα 4.7: Χρόνος εκτέλεσης (σε nanosec) του αλγόριθμου Round Robin για τις πέντε διαφορετικές τοπολογίες P2P δικτύου

αλγόριθμου είναι πολύ μικροί για να γίνουν αισθητοί από το χρήστη του συστήματος. Σε αυτό βοηθά κυρίως η εκ των προτέρων συγκέντρωση των στοιχείων για τους κόμβους που διαθέτουν εξωτερικό σύνδεσμο. Στην τοπολογία των πέντε κόμβων, όπου πρέπει να γίνει η δρομολόγηση ανάμεσα στους τέσσερις με εξωτερικό σύνδεσμο και άρα η πιο χρονοβόρα, ο χρόνος δεν ξεπερνά το μισό microsecond. Έτσι ο αλγόριθμος, όταν καλείται να υπολογίσει

το αποτέλεσμα της δρομολόγησης, έχοντας έτοιμα τα στοιχεία που χρειάζονται, εκτελείται ταχύτατα.

Εκτός από τον ελάχιστο χρόνο υπολογισμού, ο αλγόριθμος Round Robin έχει το πλεονέκτημα ότι επιτυγχάνει ομοιόμορφη κατανομή του συνολικού δικτυακού φόρτου. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από το Σχήμα 4.8, όπου φαίνεται, σε κάθε μια από τις τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες, το ποσοστό των συνολικών bytes δεδομένων του πειράματος που ανέλαβε προς μετάδοση ο κάθε ένας κόμβος, πέραν βεβαίως αυτού που δημιουργούσε τις ροές δεδομένων.



Σχήμα 4.8: Ποσοστό από τα συνολικά bytes δεδομένων που κατέβασε ο κάθε κόμβος με εξωτερικό σύνδεσμο, για τις τέσσερις πειραματικές τοπολογίες

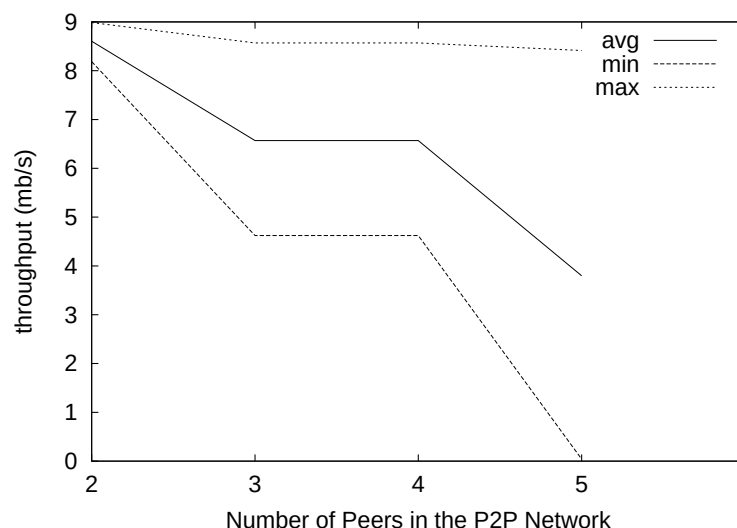
Στο Σχήμα αυτό φαίνεται ότι καθώς αυξάνονται οι κόμβοι που διαθέτουν εξωτερικούς συνδέσμους, διαμοιράζεται ο φόρτος μεταξύ τους ομοιόμορφα. Έτσι, όταν υπάρχει ένας κόμβος πέραν του αρχικού κόμβου (χωρίς εξωτερικό σύνδεσμο), φυσικά εξυπηρετεί το 100% του φόρτου. Όταν προστεθεί ένας δεύτερος, το ποσοστό μοιράζεται σχεδόν εξίσου, και στο καθεξής αυτή η συμπεριφορά επαναλαμβάνεται σταθερά.

Συμπερασματικά, τα οφέλη από τη χρήση του Round Robin είναι ξεκάθαρα. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε χρόνο που δεν γίνεται αντιληπτός από το χρήστη, μιας και δεν ξεπερνά

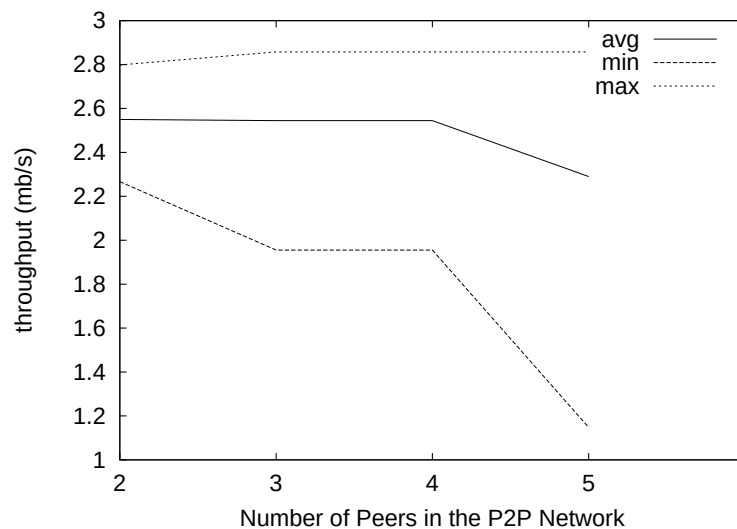
το μισό microsecond. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εκτελεί πλήρως ομοιόμορφη κατανομή του συνολικού φόρτου ανάμεσα στους διαθέσιμους εξωτερικούς συνδέσμους. Εκτός αυτών όμως, ο αλγόριθμος χαρακτηρίζεται από το σημαντικό μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνει υπ'όψιν του τη κυκλοφοριακή συμφόρηση στους εξωτερικούς συνδέσμους του δικτύου, κάτι που σε περίπτωση περισσότερων και ταυτόχρονων ροών δεδομένων μπορεί να έχει καθοριστική σημασία στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Ανάλυση της ρυθμαπόδοσης (throughput)

Με χρήση του αλγόριθμου δρομολόγησης Round Robin, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μετράται και η ρυθμαπόδοση των μεταδόσεων δεδομένων (και για τα τρία σύνολα κυκλοφορίας). Στα Σχήματα που ακολουθούν (4.9, 4.10 και 4.11) φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών για όλες τις τοπολογίες. Οι μετρήσεις της ρυθμαπόδοσης έγιναν στον κόμβο που δημιουργεί τις ροές, και που δεν διαθέτει εξωτερικό σύνδεσμο, ώστε να φανεί καθαρά η απόδοση στις δικτυακές κυκλοφορίες που επιτυγχάνεται στον κόμβο αυτό (που έχει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον).

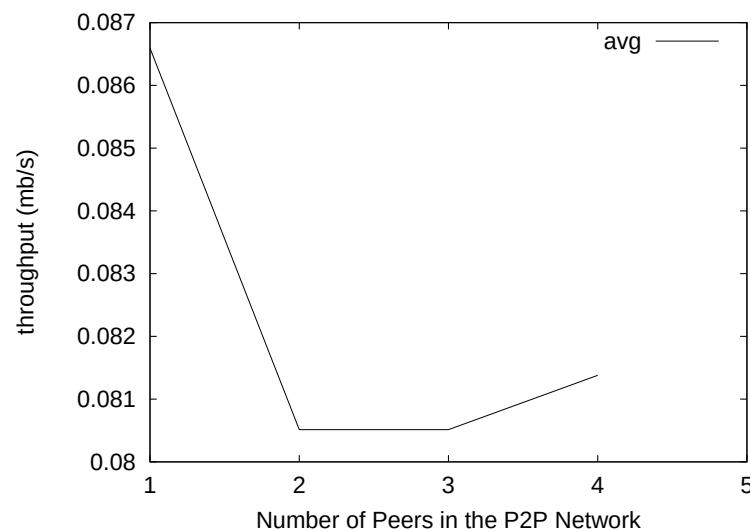


Σχήμα 4.9: Η ρυθμαπόδοση για τις τέσσερις τοπολογίες και το πρώτο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Μεγάλου Όγκου)



Σχήμα 4.10: Η ρυθμαπόδοση για τις τέσσερις τοπολογίες και το δεύτερο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Μεσαίου Όγκου)

Οι γραφικές παραστάσεις αυτές μας οδηγούν σε μερικά σημαντικά συμπεράσματα. Σε αυτές φαίνεται ότι η ρυθμαπόδοση του δικτύου παρουσιάζει φθίνουσα πορεία όταν προστίθενται περισσότεροι κόμβοι στο P2P δίκτυο. Ενώ για λίγους κόμβους κινείται σε ικανοποιητικά επίπεδα, όταν οι κόμβοι αυξάνονται παρατηρούμε ότι η ρυθμαπόδοση πέφτει σημαντικά. Η πώση είναι πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση της κυκλοφορίας μεγάλου όγκου, και όχι τόσο σημαντική για μια πλήρη ιστοσελίδα, που αποτελείται από πολλά και μικρά αρχεία. Στην κυκλοφορία μέσου όγκου δεδομένων, η πώση δεν είναι μεγάλη, όμως η ρυθμαπόδοση εξαρχής είναι σημαντικά μειωμένη με αντίστοιχες τιμές που παρατηρούνται με χρήση απλών Proxy Servers (βλ. Σχήμα 4.4). Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι το γεγονός ότι οι μηχανισμοί μετάδοσης δεδομένων της JXTA (Pipes και Sockets) βασίζονται στη μετάδοση μηνυμάτων και όχι σε μετάδοση πραγματικού χρόνου (*Streams στο Θαα Σοσκετ ΑΠΠ*). Έτσι, όσο τα μονοπάτια του P2P δικτύου γίνονται πιο πολύπλοκα καθώς προστίθενται κόμβοι, τόσο αυξάνεται και η συνολική επιβάρυνση από τη μετάδοση μηνυμάτων, καθώς τα μονοπάτια στη JXTA δεν είναι ελεγχόμενα από τον προγραμματιστή. Για να γίνει εμφανέστερη η πτώση της ρυθμαπόδοσης, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές



Σχήμα 4.11: Η ρυθμαπόδοση για τις τέσσερις τοπολογίες και το τρίτο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Πλήρους Ιστοσελίδας)

Σύνολο Πειραμάτων	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Μεγάλος Όγκος	4.81	8.15	0.57
Μεσαίος Όγκος	0.26	1.12	0.06
Πλήρης Ιστοσελίδα	0.006	-	-

Πίνακας 4.2: Οι συνολικές πτώσεις στη ρυθμαπόδοση (σε MB/s)

της ρυθμαπόδοσης.

Για βελτίωση της ρυθμαπόδοσης στη μετάδοση δεδομένων μέσω JXTA Sockets που έχει υλοποιηθεί στο σύστημα, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ασύγχρονης αποστολής δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι όσο ένας κόμβος με εξωτερικό σύνδεσμο διαβάζει δεδομένα από έναν απομακρυσμένο προορισμό, δεν τα αποστέλλει στον αρχικό κόμβο της ροής την ίδια στιγμή, αλλά για να μην καθυστερεί με την αποστολή, την αναθέτει σε ένα νήμα που τρέχει παράλληλα και εκτελεί αυτό την αποστολή. Για συγχρονισμό ανάμεσα στην αρχική διεργασία του κόμβου και το νήμα αποστολής χρησιμοποιείται η κλάση της Java `BlockingQueue`. Η κλάση αυτή αποτελεί μια ουρά δεδομένων, η οποία αναστέλλει τη λειτουργία της όσο δεν περιέχονται

δεδομένα στην ουρά, μέχρι να υπάρξουν. Έτσι, όσο τοποθετούνται από τον κόμβο δεδομένα στην ουρά, το νήμα τα στέλνει, και όσο η ουρά είναι άδεια, το νήμα μπλοκάρει. Πρόκειται για υλοποίηση του γνωστού Σχήματος Επικοινωνίας Παραγωγού-Καταναλωτή (*Producer - Consumer*). Όπως είναι κατανοητό, αυτό μπορεί να βελτιστοποιεί την αποστολή των δεδομένων, προσφέρει όμως και μια μικρή επιπλέον καθυστέρηση στην αποστολή. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις της ρυθμαπόδοσης που παρουσιάστηκαν στο παρόν εδάφιο έγιναν με το βελτιωμένο τρόπο επικοινωνίας.

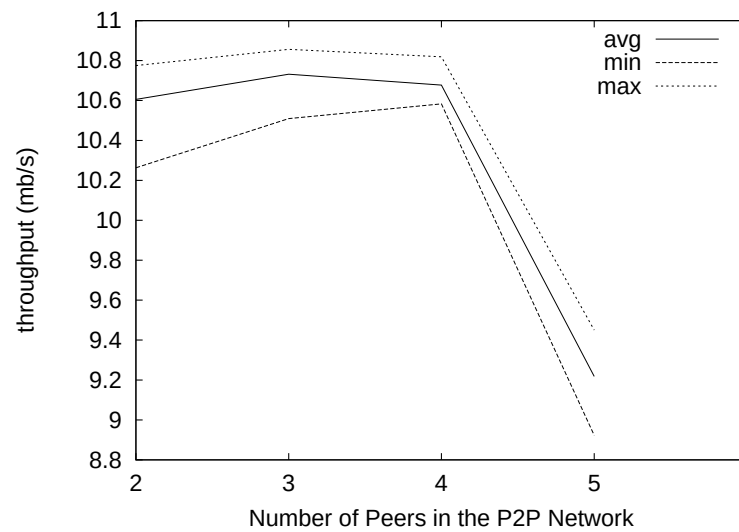
Ανάλυση της υλοποίησης με το Socket API της Java

Προκειμένου να φανεί το κόστος επικοινωνίας της JXTA στην περίπτωση κυκλοφορίας πραγματικού χρόνου που εκτελείται εδώ, υλοποιήθηκε στο σύστημα μηχανισμός επικοινωνίας των κόμβων για τη μετάδοση των ροών μέσα στο P2P δίκτυο με χρήση του Socket API της Java. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, έγιναν τροποποιήσεις τόσο στη διαδικασία εκτέλεσης του αλγορίθμου δρομολόγησης, όσο και στην εκτέλεση της μετάδοσης των δεδομένων μιας ροής ανάμεσα σε κόμβους του P2P δικτύου, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Ο δρομολογητής, έχοντας συγκεντρώσει τα Advertisements των κόμβων που κοινοποιούν τον εξωτερικό τους σύνδεσμο, και έχοντας εκτελέσει τον αλγόριθμο δρομολόγησης πάνω στα Advertisements αυτά, επιστρέφει στη μονάδα Proxy του αρχικού κόμβου την IP διεύθυνση του κόμβου που επιλέχθηκε, η οποία περιέχεται μέσα στο Advertisement του κόμβου. Έτσι με τη σειρά του, ο αρχικός κόμβος συνδέεται μέσω Socket με τον κόμβο που επιλέχθηκε από το δρομολογητή, και μεταβιβάζει την προς εξυπηρέτηση ροή μέσω του Socket αυτού.

Τα αποτελέσματα είναι σαφώς βελτιωμένα, πράγμα που τονίζει την πτώση της απόδοσης λόγω του μηχανισμού επικοινωνίας βασισμένου σε μηνύματα και μονοπάτια υψηλού επιπέδου (αφού τα μονοπάτια είναι στο επίπεδο της JXTA και όχι του TCP όπως στην περίπτωση της Java) της JXTA. Στα Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14 φαίνονται οι αντίστοιχες μετρήσεις της ρυθμαπόδοσης για τον εναλλακτικό μηχανισμό επικοινωνίας που μελετάται εδώ.

Τα αποτελέσματα είναι εμφανώς βελτιωμένα από αυτά της προηγούμενης παραγράφου. Αυτό φανερώνει ισχυρά το πλεονέκτημα χρήσης του Socket API της Java. Αυτή η μέθοδος όμως δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως η καταλληλότερη, διότι παρεμβάλλει και έναν διαφορετικό τρόπο επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους πέραν αυτών που καθορίζονται από

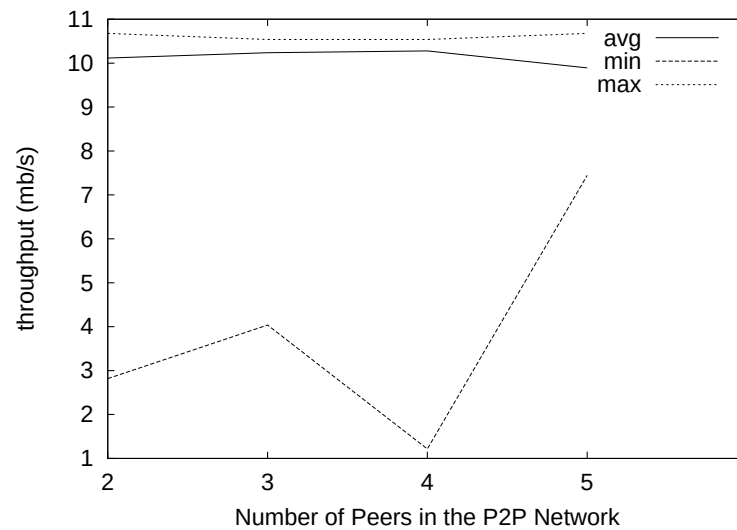


Σχήμα 4.12: Η ρυθμαπόδοση για τις τέσσερις τοπολογίες και το πρώτο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Μεγάλου Όγκου), με χρήση του Java Socket API

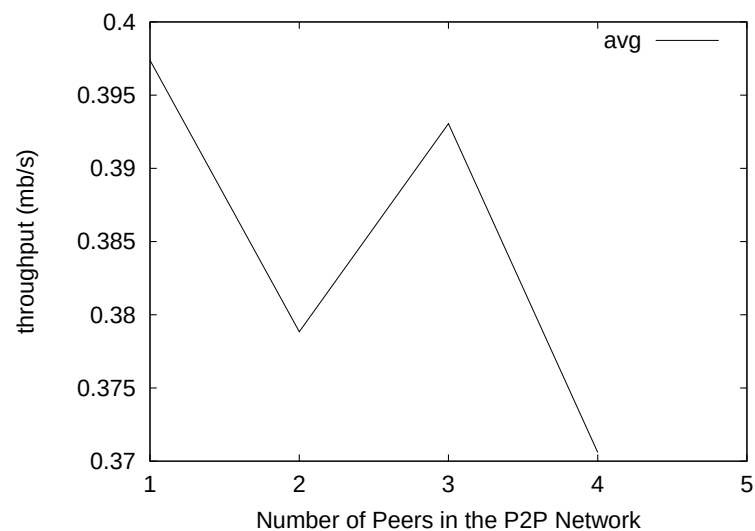
Σύνολο Πειραμάτων	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Μεγάλος Όγκος	1.51	1.66	1.41
Μεσαίος Όγκος	0.39	6.23	0.14
Πλήρης Ιστοσελίδα	0.027	-	-

Πίνακας 4.3: Οι συνολικές πτώσεις στη ρυθμαπόδοση (σε MB/s)

την πλατφόρμα και τα πρωτόκολλα της JXTA. Τελικά, παρατηρούμε ότι οι πτώσεις της ρυθμαπόδοσης ανάμεσα στις τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες δεν είναι σημαντικές, κάτι που φαίνεται και στον Πίνακα 4.3. Εδώ, η μοναδική αξιοσημείωτη διαφορά στο μέσο όρο της ρυθμαπόδοσης είναι στην κυκλοφορία με δεδομένα μεγάλου όγκου. Αυτό ίσως να παρατηρείται λόγω της φυσικής απόστασης του κόμβου που προστίθεται στην τελευταία και μεγαλύτερη τοπολογία (αφού εκεί παρατηρείται η χαμηλότερη τιμή), αφού στο δίκτυο παρεμβάλλονται περισσότεροι ενδιάμεσοι φορείς δικτύου από ότι στις πρώτες τοπολογίες (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.13: Η ρυθμαπόδοση για τις τέσσερις τοπολογίες και το δεύτερο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Μεσαίου Όγκου), με χρήση του Java Socket API



Σχήμα 4.14: Η ρυθμαπόδοση για τις τέσσερις τοπολογίες και το τρίτο σύνολο πειραμάτων (Κυκλοφορία Πλήρους Ισοσελίδας), με χρήση του Java Socket API

Κεφάλαιο 5

Επίλογος

Η πειραματική ανάλυση του συστήματος p2pInet σχεδιάστηκε με τρόπο που να αξιολογεί και να χαρακτηρίζει όλες τις βασικές λειτουργίες του συστήματος. Τα πειράματα έγιναν σε ελεγχόμενες τοπολογίες και με ελεγχόμενη δικτυακή κυκλοφορία, ώστε να επαληθευτεί πλήρως η λειτουργία του συστήματος, και να βγουν κάποια βασικά συμπεράσματα για την απόδοσή του. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων, και μια αναφορά σε δυνατότητες για μελλοντική έρευνα και επέκταση.

5.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν, η χρήση και υλοποίηση ενός Proxy Component στο σύστημα παρουσιάζει υψηλή απόδοση και μικρή επιβάρυνση στις συνολικές επιδόσεις του δικτύου. Επίσης, ο αλγόριθμος Round Robin λειτουργεί, όπως ήταν επιθυμητό, με επίσης υψηλή απόδοση και έχει σημαντική χρησιμότητα για την εξισορρόπηση φόρτου, όμως μειονεκτεί σε περιπτώσεις όπου οι σύνδεσμοι προς το Διαδίκτυο επιβαρύνονται με πολλαπλές ροές, καθώς αδυνατεί να λάβει υπ'όψιν αυτές τις επιβαρύνσεις. Τέλος, η υλοποίηση δυο διαφορετικών μηχανισμών επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου (αφενός μετάδοση μέσω JXTA Sockets, αφετέρου μέσω του Java Socket API) παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την απόδοση της μετάδοσης. Όπως παρουσιάστηκε, η χρήση μηνυμάτων πάνω από τα λογικά μονοπάτια της JXTA δεν αποδίδει καλά, σε σχέση με την απόδοση του καθαρότερου, αμεσότερου και χαμηλότερου επιπέδου μηχανισμού επικοινωνίας που παρέχει το

Socket API της Java. Αυτό μας ωθεί στην έρευνα για περαιτέρω βελτιώσεις στην επικοινωνία χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα της JXTA.

Στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό σύμφωνα με τα δεδομένα της υλοποίησης του συστήματος, η ιδέα αξιοποίησης του Multihoming πάνω σε ένα P2P σύστημα κόμβων φέρει αισιοδοξία, όμως εμπεριέχει αδυναμίες που πηγάζουν από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται επιπλέον έρευνα και ανάλυση των παραμέτρων της υλοποίησης, ώστε να δημιουργηθεί ένα πλήρες, αξιόπιστο και αποδοτικό σύστημα. Το σύστημα p2pInet αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση και θέτει τις βάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο συνδυασμό του Multihoming και των ετερογενών και Peer-to-Peer δικτυακών συστημάτων.

5.2 Μελλοντική Έρευνα

Έχοντας μελετήσει την υπάρχουσα έρευνα πάνω στο ερευνητικό αντικείμενο του Multihoming, είναι ξεκάθαρο πως αποτελεί ένα θέμα που ήδη απασχολεί, αλλά και θα απασχολήσει μεγάλο κομμάτι της έρευνας πάνω στα δίκτυα υπολογιστών και το Internet. Το σύστημα που υλοποιείται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί μια ιδέα αξιοποίησης τόσο του Multihoming, όσο και των σύγχρονων ασύρματων (και μη) δικτύων και της τεχνολογίας των δικτύων Ομοτίμων (P2P). Οι τεχνικές αυτές συνδυάζονται και επιδιώκεται ένα αποτέλεσμα που θα χρησιμεύσει στην έρευνα αλλά και στην πράξη.

Η πειραματική ανάλυση που έγινε, καλύπτει βασικές πτυχές και λειτουργίες του συστήματος, ώστε να χαρακτηριστεί πλήρως η λειτουργικότητά του καθώς και βασικά χαρακτηριστικά της απόδοσής του. Το σύστημα παρέχει πολλές προοπτικές περαιτέρω έρευνας, μελέτης και αξιολόγησης. Η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος είναι κάτι που ερευνάται διαρκώς. Επίσης, μια προοπτική μελέτης είναι η επίδραση που έχουν διάφορα σχήματα δρομολόγησης στη λειτουργία του συστήματος, μιας και έτσι όχι μόνο το σύστημα θα πλησιάσει σε πιο πρακτικές και ρεαλιστικές εφαρμογές, αλλά και θα καλυφθούν πολλές περιπτώσεις λειτουργίας που δεν μελετήθηκαν ακόμη.

Η γλώσσα προγραμματισμού Java αποτελεί μια πλατφόρμα που πλέον χρησιμοποιείται ευρέως, και από μεγάλο σύνολο διαφορετικών συσκευών. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο

συγκεκριμένο σύστημα, να βελτιωθεί και να επεκταθεί ώστε να υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του από μεγαλύτερη ποικιλία συσκευών, ενδεχομένως και με ακόμη μεγαλύτερη ετερογένεια στα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Μερικές σκέψεις γίνονται πάνω σε πρωτόκολλα όπως τα Bluetooth, ZigBee που χρησιμοποιούνται από σύγχρονα κινητά τηλέφωνα.

Πέρα από την υλοποίηση περαιτέρω βελτιώσεων για το σύστημα σε όλες αυτές τις βάσεις, δίνονται και πολλές ευκαιρίες για διεξαγωγή πειραμάτων σε περισσότερες τοπολογίες και περιπτώσεις μελέτης. Μια μελέτη που βρίσκεται υπό σχεδίαση περιλαμβάνει εγκατάσταση του δικτύου, χρήση και αξιολόγησή του σε ένα μεγάλο μητροπολιτικό και ασύρματο δίκτυο υπολογιστών, το Patras Wireless.

5.2.1 Το μητροπολιτικό δίκτυο Patras Wireless.

Το Ασύρματο Δίκτυο Patras Wireless[12] αποτελεί ένα ανοιχτό ασύρματο δίκτυο, βασισμένο στην τεχνολογία 802.11b[1]. Ο σκοπός του Patras Wireless είναι περισσότερο πειραματικός, και εστιάζει σε εμπορικές ασύρματες συσκευές δικτύου που λειτουργούν στο λειτουργικό σύστημα Linux. Η κυριότερη προσπάθεια των ιδρυτών του Patras Wireless συνίσταται στην αξιολόγηση των επιδόσεων της ομάδας πρωτοκόλλων TCP/IP, αναφορικά με την αξιοπιστία των ασύρματων συνδέσμων. Το Patras Wireless, ενώ εδρεύει στην περιοχή της Πάτρας, καλύπτει μια ευρύτερη περιοχή γύρω από την πόλη της Πάτρας. Στην ιστοσελίδα [12] υπάρχουν λεπτομερείς πληροφορίες, τόσο για το δίκτυο όσο και για την τοπολογία του, τα σημεία εκπομπής, και τις συσκευές που υποστηρίζονται.

Το Patras Wireless αποτελεί κίνητρο για περαιτέρω μελέτη, επέκταση και βελτιστοποίηση του συστήματος p2pInet. Έχει ξεκινήσει μια προσπάθεια να εγκατασταθεί το σύστημα στο Patras Wireless, και να χρησιμοποιηθεί ώστε να φτάσουμε σε χειροπιαστά αποτελέσματα και συμπεράσματα, τα οποία όμως θα βασίζονται σε πραγματικές συνθήκες χρήσης του συστήματος, πραγματικές τοπολογίες και κυκλοφορίες, και όχι ελεγχόμενες όπως έχει γίνει προς στιγμήν. Το μέγεθος του Patras Wireless και η ευρεία χρήση του είναι ελκυστικά χαρακτηριστικά για το σύστημα που υλοποιήθηκε εδώ. Στο Patras Wireless, θα μπορέσει να διερευνηθεί σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια κάθε συστατικό στοιχείο του συστήματος, να γίνει μια ακριβέστερη αξιολόγησή του, και τελικά να γίνουν επεκτάσεις και βελτιστοποιήσεις οι οποίες θα βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία και κίνητρα.

Βιβλιογραφία

- [1] *The IEEE Standards Association 802 Standards Family Index*, <http://standards.ieee.org/getieee802/portfolio.html>
- [2] *LAN/MAN Wireless LAN Standards*, <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>
- [3] *Broadband Wireless Metropolitan Area Network (WirelessMAN)*, <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>
- [4] N.Thompson, G.He, H.Luo, *Flow Scheduling for End-host Multihoming* in IEEE INFO-COM 2006.
- [5] A.Akella, B.Maggs, S.Seshan, A.Shaikh, R.Sitaraman, *A Measurement-Based Analysis of Multihoming*.
- [6] *Mastering JXTA: Building Java Peer-to-Peer Applications*, Joseph D. Gradecki, Wiley Publishing Inc.
- [7] *JXTA Java Standard Edition v2.5: Programmers Guide*, από το JXTA Community στο <https://jxta.dev.java.net/>
- [8] Επίσημη ιστοσελίδα του project JXTA για το J2SE <https://jxta.dev.java.net/>
- [9] *Balancing Connections over Multiple Links*, <http://tetro.net/misc/multilink.html>
- [10] *Link Aggregation and High Availability with Bonding*, <http://linux-ip.net/html/ether-bonding.html>
- [11] *Routing for multiple uplinks/providers*, <http://lartc.org/howto/lartc.rpdb.multiple-links.html>
- [12] *Επίσημη Ιστοσελίδα του Μητροπολιτικού Δικτύου Patras Wireless*, <http://www.patraswireless.net/>