

Πανεπιστήμιο Κρήτης
Σχολή Θετικών και Τεχνολογικών Επιστημών
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

Αρχιτεκτονικές δικτύων προσωπικής περιοχής βασισμένων στην τεχνολογία Bluetooth

Μανόλης Σταματογιαννάκης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηράκλειο, Νοέμβριος 2003

Αρχιτεκτονικές δικτύων προσωπικής περιοχής βασισμένων στην τεχνολογία Bluetooth

Εργασία που υποβλήθηκε από το
Μανόλη Σταματογιαννάκη
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απόκτηση
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Συγγραφέας:

Μανόλης Σταματογιαννάκης
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εισηγητική Επιτροπή:

Βασίλης Χριστοφίδης,
Επίκουρος Καθηγητής, Επόπτης

Σπύρος Λάλης,
Επίκουρος Καθηγητής, Μέλος,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Απόστολος Τραγανίτης, Καθηγητής, Μέλος

Δεκτή:

Δημήτρης Πλεξουσάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Ηράκλειο, Νοέμβριος 2003

Στους γονείς μου.

Αρχιτεκτονικές δικτύων προσωπικής περιοχής βασισμένων στην τεχνολογία Bluetooth

Μανόλης Σταματογιαννάκης
Μεταπτυχιακή Εργασία
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η πρόοδος της τεχνολογίας έχει καταφέρει να σμικρύνει και να μας προσφέρει σε προσιτές τιμές σύνθετες ηλεκτρονικές συσκευές. Το είδος των συσκευών ποικίλει από εξελιγμένα ρολόγια χειρός, έως κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές μεγέθους παλάμης και ψηφιακές συσκευές αναπαραγωγής ήχου και εικόνας. Ο αριθμός τέτοιων προσωπικών συσκευών που μεταφέρουμε και χρησιμοποιούμε καθημερινά έχει αυξηθεί σημαντικά.

Παρά το γεγονός όμως πως ο αριθμός των συσκευών που μεταφέρουμε αυξάνει, οι συσκευές είναι πάντα σε απομόνωση ή μια από την άλλη. Η εμφάνιση φθηνών ραδιοτεχνολογιών μικρής εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης επιτρέπει στις συσκευές να σπάσουν την απομόνωση τους, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία τους με κατανομημένο τρόπο, το διαμοιρασμό των πόρων τους και την αλληλεπίδραση τους με άλλες συσκευές στο εγγύς περιβάλλον όπου βρίσκονται. Το δίκτυο που αποτελείται από τις προσωπικές συσκευές ενός χρήστη και χρησιμοποιείται για τη μεταξύ τους επικοινωνία, ονομάζεται δίκτυο προσωπικής περιοχής (ΔΠΠ).

Το Bluetooth φαίνεται να είναι η τεχνολογία που θα επικρατήσει και θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση δικτύων προσωπικής περιοχής. Τα δίκτυα Bluetooth είναι δομημένα σαν μικροί αστεροειδείς σχηματισμοί που ονομάζονται μικροδίκτυα (piconets). Είναι κοινή η αντίληψη πως τα μικροδίκτυα είναι ανεπαρκή για την υλοποίηση δικτύων προσωπικής περιοχής και για το λόγο αυτό μελετάται η επέκταση των μικροδικτύων σε πιο σύνθετους σχηματισμούς που ονομάζονται scatternets.

Σε αυτή την εργασία σκιαγραφούμε τα χαρακτηριστικά των δικτύων προσωπικής περιοχής όσον αφορά το σχηματισμό τους, τη μορφή της επικοινωνίας σε αυτά και το μοντέλο βλαβών τους. Προτείνουμε έπειτα πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα χαρακτηριστικά αυτά, ώστε να βελτιώσουμε την απόδοση ενός σχηματισμού scatternet με μορφή δακτυλίου. Με πειράματα δείχνουμε πως η πρόταση μας υπερτερεί σε σχέση με ένα scatternet ίδιας μορφής που αγνοεί τα χαρακτηριστικά των δικτύων προσωπικής περιοχής, επιτυγχάνοντας δι-

πλάσιο συνολικό ρυθμό μετάδοσης καθώς ο φόρτος αυξάνεται. Επίσης δείχνουμε πως η πρόταση μας συγκρίνεται επίσης ευνοϊκά και με ένα σχηματισμό μικροδικτύου.

Επόπτης:

Βασίλης Χριστοφίδης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Bluetooth Based Personal Area Network Architectures

Manolis Stamatogiannakis

Master of Science Thesis

Computer Science Department

University of Crete

Abstract

In the last years technology managed to miniaturize and offer in affordable prices complex electronic devices. The devices range from sophisticated watches, to mobile phones, to palm sized computers, to digital media players. We find ourselves carrying and using an increasing number of such personal devices in our everyday life.

While the number of personal devices we carry increases, they remain isolated from each other. The emergence of cheap, short-range, energy-efficient radio technologies enables the personal devices to overcome the isolation barrier, thus enabling distributed operation, sharing of resources and seamless interaction with other devices in their area. The network consisting of the personal devices of a user, over which they communicate, is called personal area network (PAN).

The most prominent radio technology for the implementation of personal area networks is Bluetooth. Bluetooth networks are structured as small star-shaped, centrally controlled formations called piconets. It is widely acknowledged that for the realization of personal area networks using Bluetooth, we need to extend piconets to more complex constructs, called scatternets.

In this work we outline the characteristics of personal area networks regarding formation, traffic patterns and failure model. We then propose how these characteristics can be exploited to improve performance of a ring-shaped scatternet. We prove with experiments that our proposal is superior to a similar ring-shaped scatternet that ignores the features of personal area networks, doubling the aggregate throughput while the load increases. We also show that our proposal compares favourably to a piconet based formation.

Supervisor:

Vassilis Christophides

Assistant Professor

Computer Science Department

University of Crete

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει τη μεταπτυχιακή μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επόπτες καθηγητές μου κ. Βασίλη Χριστοφίδη και κ. Σπύρο Λάλη για τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ακόμα ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Απόστολο Τραγανίτη για τη συμμετοχή του στην επιτροπή εξέτασης της εργασίας αυτής.

Επίσης ευχαριστώ το Τμήμα Επιστήμης Ύπολογιστών για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου καθώς και το Εργαστήριο Κατανεμημένων Συστημάτων του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας για την υλικοτεχνική υποδομή και στήριξη που μου παρείχε.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καλό φίλο Γιώργο Ζαχαριουδάκη συμφοιτητή και μόνιμο συνεργάτη εδώ και χρόνια. Η άψογη συνεργασία του και η καλή παρέα του βοήθησαν να περνάνε εποικοδομητικά και ευχάριστα οι ώρες δουλειάς μαζί του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη το Γιάννη Αγιομυργιαννάκη για την υπερπολύτιμη βοήθεια του κατά τη συγγραφή και την προετοιμασία της υπεράσπισης της εργασίας αυτής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω κάθε καλό φίλο που με συντρόφευσε στην πορεία μου μέχρι εδώ. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Γιάννα Ανδριανοπούλου, τους Νίκο Ριζόπουλο, Αντώνη Σμαρδά, Μίλτο Βασιλάκη, Λουκά Νίκαινα, Νίκο Μπέρδο και φυσικά το Χρήστο Παπαχρήστο καθώς και τους υπόλοιπους φίλους στη csdlista.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θέλω να το απευθύνω στην οικογένειά μου που με στήριξε συναισθηματικά και υλικά σε όλη την πορεία μου μέχρι σήμερα. Ως ελάχιστη ένδειξη σεβασμού και αναγνώρισης για τη δική τους προσφορά και τις θυσίες που έχουν κάνει για τη δική μου μόρφωση, αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς μου Μιχάλη και Μαρία και στα λατρεμένα αδέρφια μου Αντώνη και Ελένη.

Μανόλης Σταματογιαννάκης

Περιεχόμενα

Περίληψη	vii
Abstract	ix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Πλαίσιο εργασίας	1
1.2 Συνεισφορά εργασίας	3
1.3 Δομή εργασίας	4
2 Η τεχνολογία Bluetooth	5
2.1 Επισκόπηση αρχιτεκτονικής	6
2.1.1 Αρχιτεκτονική υλοποίησης	6
2.1.2 Τοπολογία δικτύων Bluetooth	8
2.2 Λειτουργία επιπέδου ραδιοσυχνοτήτων	10
2.2.1 Χαρακτηριστικά πομπού	10
2.2.2 Frequency Hopping	11
2.2.3 Ορισμός Καναλιού	11
2.3 Λειτουργία επιπέδου Baseband	13
2.3.1 Μορφή Πακέτων	13
2.3.2 Τύποι πακέτων	14
2.3.3 Έλεγχος και διόρθωση λαθών	14
2.3.4 Οι καταστάσεις του Bluetooth	15
2.3.4.1 Κατάσταση αναμονής	16
2.3.4.2 Κατάσταση αναζήτησης	17
2.3.4.3 Καταστάσεις ανίχνευσης/απάντησης αναζητήσεων	18

2.3.4.4	Κατάσταση αίτησης σύνδεσης	18
2.3.4.5	Κατάσταση ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης	19
2.3.4.6	Καταστάσεις χειραψίας κυρίου/υποτελή	20
2.3.4.7	Κατάσταση σύνδεσης	20
2.4	Λειτουργία επιπέδου L2CAP	21
2.4.1	Λογικά κανάλια	22
2.4.2	Ομαδική επικοινωνία	22
2.4.3	Πολυπλεξία σε επίπεδο εφαρμογών	23
2.4.4	Κατάτμηση και ανακατασκευή πακέτων	23
2.4.5	Ποιότητα υπηρεσιών (QoS)	23
2.4.6	Παράμετροι σύνδεσης L2CAP	23
2.5	Προφίλ χρήσης του Bluetooth	24
2.5.1	Προφίλ BNEP	24
2.5.2	Προφίλ PAN	24
3	Επισκόπηση περιοχής	25
3.1	ΔΠΠ Bluetooth και μικροδίκτυα	25
3.2	ΔΠΠ Bluetooth βασισμένα σε scatternets	27
3.2.1	Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού για scatternets	27
3.2.2	Τοπολογίες και αλγόριθμοι σχηματισμού για scatternets	29
3.2.2.1	Μη-κανονικές τοπολογίες	29
3.2.2.2	Δενδρικές τοπολογίες	30
3.2.2.3	Τοπολογίες δακτύλιου	31
3.2.3	Δρομολόγηση σε scatternets	32
3.3	Σύνοψη σχετικής δουλειάς	34
4	Περιβάλλον ΔΠΠ και δακτύλιοι	37
4.1	Το περιβάλλον ΔΠΠ	37
4.1.1	Απαιτήσεις για τις τεχνολογίες υλοποίησης ΔΠΠ	38
4.1.2	Μοντέλο λειτουργίας των ΔΠΠ	39
4.1.3	Περιβάλλοντα ΔΠΠ και Bluetooth	40
4.2	Δακτύλιοι Bluetooth	42
4.2.1	Αρχικοποίηση	43
4.2.2	Συγχώνευση δακτυλίων	44
4.2.3	Αντιμετώπιση βλαβών	45
4.2.4	Δρομολόγηση	46

4.2.4.1	Δακτύλιοι διπλής κατεύθυνσης	46
4.2.4.2	Μορφή πακέτων & κόστος δρομολόγησης	47
4.2.4.3	Ανακάλυψη και ανανέωση αποστάσεων	48
4.2.4.4	Απαλοιφή “νεκροζώντανων” πακέτων	49
5	Μετρήσεις και αποτελέσματα	51
5.1	Περιβάλλον Μετρήσεων	51
5.1.1	Τύποι και διάταξη συσκευών	51
5.1.2	Η στοιβά Bluetooth Bluez	52
5.1.3	Υλοποίηση τοπολογιών	54
5.1.4	Υλοποίηση δακτυλίου μιας κατεύθυνσης	55
5.1.5	Υλοποίηση δακτυλίου δύο κατευθύνσεων	56
5.1.6	Υλοποίηση μικροδικτύου με δρομολόγηση	57
5.2	Μετρήσεις επιδόσεων	58
5.2.1	Αρχικές μετρήσεις	58
5.2.2	Σενάριο 1: 1 σύνδεση	59
5.2.3	Σενάριο 2: 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση	65
5.2.4	Σενάριο 3: 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	67
5.2.5	Σενάριο 4: 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	70
5.2.6	Σενάριο 5: 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	72
5.2.7	Σενάριο 6: 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	74
5.2.8	Συνολική σύγκριση επιδόσεων τοπολογιών	79
5.3	Βελτιωμένη διαδικασία ίασης	80
6	Συμπεράσματα & μελλοντική εργασία	89
6.1	Συμπεράσματα	89
6.2	Μελλοντική εργασία	90
A	Λεξικό τεχνικών όρων & ακρονύμων	93

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Αρχιτεκτονική του Bluetooth	6
2.2	Τοπολογία του Bluetooth	9
2.3	Τοπολογία scatternet στο Bluetooth	9
2.4	Υπολογισμός του επόμενου hop	12
2.5	Υλοποίηση καναλιού διπλής κατεύθυνσης στο Bluetooth	12
2.6	Μορφή πακέτων Bluetooth	13
2.7	Λειτουργία των Automatic Retransmission Querys (ARQs) στο Bluetooth	15
2.8	Μηχανή καταστάσεων του Bluetooth	16
2.9	Αναζήτηση συσκευών και δημιουργία σύνδεσης στο Bluetooth	19
3.1	Scatternets σε σχήμα δακτυλίου	32
4.1	Δρομολόγηση σε μικροδίκτυο	41
4.2	Αριθμός μικροδικτύων για διαφορετικές τοπολογίες	43
4.3	Αρχικοποίηση 6 συσκευών με τη χρήση προφίλ	43
4.4	Βελτίωση της τοπικότητας σε δακτυλίους διπλής κατεύθυνσης	47
4.5	Μορφή πακέτου για δακτύλιο Bluetooth δύο κατευθύνσεων	47
5.1	Τοπολογίες μετρήσεων	52
5.2	Υλοποίηση δακτυλίου μιας κατεύθυνσης	55
5.3	Υλοποίηση δακτυλίου δύο κατευθύνσεων	56
5.4	Υλοποίηση μικροδικτύου με δρομολόγηση	57
5.5	Ρυθμός μετάδοσης σε μικροδίκτυο καθώς προσθέτονται ανενεργές συνδέσεις	59
5.6	Ρυθμός μετάδοσης σε μικροδίκτυο καθώς προσθέτονται ενεργές συνδέσεις	60
5.7	Δακτύλιος μιας κατεύθυνσης με συνδέσεις σε κατάσταση μειωμένων ευθυνών	61
5.8	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης από τη συσκευή #1	61

5.9	Απώλειες πακέτων για μεταδόσεις από τη συσκευή #1	62
5.10	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης από τη συσκευή #2	63
5.11	Απώλειες πακέτων για μεταδόσεις από τη συσκευή #2	64
5.12	Χρόνοι roundtrip από τη συσκευή #1	65
5.13	Σενάριο 2: 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση	65
5.14	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση	66
5.15	Χρόνοι roundtrip για 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση	67
5.16	Σενάριο 3: 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	68
5.17	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	68
5.18	Απώλειες πακέτων για 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	69
5.19	Χρόνοι roundtrip για 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	70
5.20	Σενάριο 4: 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	71
5.21	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	71
5.22	Απώλειες πακέτων για 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	72
5.23	Χρόνοι roundtrip για 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση	73
5.24	Σενάριο 5: 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	73
5.25	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	74
5.26	Απώλειες πακέτων για 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	75
5.27	Χρόνοι roundtrip για 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	75
5.28	Σενάριο 6: 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	76
5.29	Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	76
5.30	Απώλειες πακέτων για 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	78
5.31	Χρόνοι roundtrip για 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις	78
5.32	Συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης για τα 6 σενάρια	79
5.33	Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά σύνδεση για τα 6 σενάρια	80
5.34	Ιστογράμματα αριθμού συσκευών που ανακαλύφθηκαν για διαφορετικές διάρκειες αναζήτησης	81
5.35	Χρόνοι σύνδεσης χωρίς πρωτότερη αναζήτηση.	82
5.36	Χρόνοι σύνδεσης ενώ έχει προηγηθεί αναζήτηση. Ο χρόνος της αναζήτησης δε συμπεριλαμβάνεται.	83
5.37	Ιστόγραμμα χρόνων σύνδεσης χωρίς πρωτότερη αναζήτηση	85
5.38	Ιστόγραμμα χρόνων σύνδεσης ενώ έχει προηγηθεί αναζήτηση	85
5.39	Μέσος χρόνος ίασης δακτυλίου σε συνάρτηση με την πιθανότητα e να επιτύ- χει η βελτιωμένη διαδικασία ίασης	86
5.40	Ιστόγραμμα χρόνων βελτιωμένης διαδικασίας ίασης για $e = 0.8$ και $C_{Fail} =$ $5sec$	87

Κατάλογος πινάκων

2.1	Συχνότητες περιοχής ISM ανά περιοχή του κόσμου	10
2.2	Επιδόσεις ACL πακέτων Bluetooth	15
4.1	Πεδία πακέτου L2CAP για δρομολόγηση σε δακτύλιο	47
5.1	Διαθέσιμες συσκευές Bluetooth	51

Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο εργασίας

Τα δίκτυα προσωπικής περιοχής (Personal Area Networks - PANs - ΔΠΠ) είναι δίκτυα τα οποία διασυνδέουν τις προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές που μεταφέρουμε. Επίσης τα ΔΠΠ διασυνδέουν τις προσωπικές συσκευές ενός χρήστη με αυτές άλλων χρηστών και γενικότερα συσκευές στο εγγύς τους περιβάλλον. Η ανάγκη για τα ΔΠΠ δημιουργήθηκε σταδιακά τις τελευταίες δεκαετίες, οπότε η εξέλιξη των ψηφιακών ηλεκτρονικών τεχνολογιών, έχει επιτρέψει τη δημιουργία προσιτών προσωπικών φορητών ηλεκτρονικών συσκευών.

Οι προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές συνοδεύουν τους χρήστες στις μετακινήσεις τους και έχουν ως σκοπό να τους διευκολύνουν στις καθημερινές του ασχολίες, αλλά και να τους προσφέρουν ψυχαγωγία. Αρχικά οι συσκευές αυτές ήταν σχετικά απλές (π.χ. κάποιο εξελιγμένο ψηφιακό ρολόι) και λίγες στον αριθμό. Με τον καιρό όμως ολοένα νέες συσκευές προσφαιρόνται στην αγορά, με αποτέλεσμα σήμερα να έχουμε συχνά στην κατοχή μας ένα μεγάλο αριθμό τέτοιων συσκευών. Οι συσκευές αυτές ποικίλουν στις δυνατότητες και τη λειτουργία τους και περιλαμβάνουν φορητές συσκευές αναπαραγωγής ήχου (cd, mp3 players), ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, κινητά τηλέφωνα, μικρούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές (notebooks, PDAs).

Όλες αυτές οι συσκευές, αν και μεταφέρονται ταυτόχρονα από το χρήστη, δεν έχουν κάποιο πρακτικό τρόπο να επικοινωνήσουν. Μέχρι σήμερα για να συμβεί κάποια επικοινωνία μεταξύ συσκευών χρησιμοποιούνται καλώδια. Η χρήση καλωδίων περιορίζει έμμεσα την ελευθερία επικοινωνίας, καθώς η παρουσία τους είναι ενοχλητική και ο χρήστης φροντίζει να απαλλαγεί από αυτήν το συντομότερο. Επίσης η χρήση καλωδίων εμποδίζει την επικοινωνία των συσκευών ενός χρήστη με τις συσκευές του περιβάλλοντος του και κατ' επέκταση

την κινητικότητα του ίδιου του χρήστη. Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ των προσωπικών συσκευών έγινε πιο έντονη. Αυτό οφείλεται στο ότι η πρόοδος στην τεχνολογία κατασκευής ηλεκτρονικών συσκευών, επέτρεψε στην ολοκλήρωση όλο και πιο πολύπλοκων λειτουργιών στις προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές. Η προσθήκη όλο και περισσότερων λειτουργιών στην ίδια μικρή συσκευή κάνει την κάθε συσκευή χωριστά χρησιμότερη, όμως καθιστά τις συσκευές ως σύνολο πιο δύσχρηστες. Αυτό συμβαίνει γιατί ο χρήστης θα πρέπει να αναλάβει το διαμοιρασμό των δεδομένων που θέλει μεταξύ των συσκευών, αλλά και τη διαχείριση τους.

Όσον αφορά τις πιο ισχυρές προσωπικές συσκευές, που είναι κυρίως οι φορητοί υπολογιστές και οι προσωπικοί ψηφιακοί βοηθοί (Personal Digital Assistants - PDAs), η λύση στην ανάγκη επικοινωνίας ήρθε από το χώρο των υπολογιστών από όπου προέρχονται. Η λύση αυτή είναι η χρήση κάποιας τεχνολογίας ασύρματου τοπικού δικτύου (Wireless LAN). Η πιο διαδεδομένη από αυτές τις τεχνολογίες είναι η τεχνολογία WiFi[49] που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11. Οι τεχνολογίες ασύρματων τοπικών δικτύων προορίζονταν αρχικά για την αντικατάσταση παραδοσιακών τεχνολογιών τοπικού δικτύου (π.χ. Ethernet) και τα χαρακτηριστικά τους αντικατοπτρίζουν το γεγονός αυτό. Δηλαδή έχουν εμβέλεια μερικές δεκάδες μέτρα και επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Η παρουσία αυτών των χαρακτηριστικών έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη κατανάλωση ενέργειας από τις τεχνολογίες αυτές, πράγμα που τις κάνει ακατάλληλες για τη δικτύωση προσωπικών συσκευών. Άλλες τεχνολογίες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση μικρών προσωπικών ηλεκτρονικών συσκευών, παρουσίαζαν άλλα προβλήματα. Η τεχνολογία IrDA απαιτεί οπτική επαφή για να λειτουργήσει. Η τεχνολογία DECT δεν κατάφερε να εξαπλωθεί καθώς απαιτούσε ένα προστατευμένο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για τη λειτουργία της. Τέλος η τεχνολογία GSM που χρησιμοποιείται στα κινητά τηλέφωνα έχει σημαντικό κόστος παραγωγής και στη χρήση.

Στα μέσα της δεκαετίας του '90 η εταιρία Ericsson αναγνώρισε την αδυναμία των τεχνολογιών που ήταν τότε διαθέσιμες να διασυνδέσουν τις μικρές προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές με ικανοποιητικό τρόπο. Επίσης διέκρινε πως μια τέτοια τεχνολογία χρειαζόταν και είχε δυνατότητες εμπορικής επιτυχίας. Η Ericsson καθόρισε σαν κύρια επιθυμητά χαρακτηριστικά της νέας τεχνολογίας τη χαμηλή κατανάλωση, την ανεξαρτησία από εγκαταστάσεις υποδομής για τη λειτουργία της, το μικρό μέγεθος και κόστος κατασκευής. Η τεχνολογία αυτή πήρε τελικά το όνομα Bluetooth και η πρώτη έκδοση των προδιαγραφών της παρουσιάστηκε το 1999. Σχεδόν άμεσα αναγνωρίστηκε σαν η τεχνολογία που θα επικρατήσει στο περιβάλλον των δικτύων προσωπικής περιοχής (ΔΠΠ- PANs).

Το Bluetooth επιβάλλει περιορισμούς στην ελευθερία επικοινωνίας των συσκευών του, επιτρέποντας την επικοινωνία μόνο σε αυστηρούς σχηματισμούς αστέρα, που ονομάζονται

μικροδίκτυα. Οι προδιαγραφές του Bluetooth αναφέρουν τη δυνατότητα επικοινωνίας πέρα από τα όρια ενός μικροδίκτυο, επιτρέποντας στα μικροδίκτυα να μοιράζονται συσκευές. Ο σχηματισμός που προκύπτει ονομάζεται scatternet, όμως δεν περιγράφεται ο τρόπος υλοποίησης και λειτουργίας του. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η έρευνα στην περιοχή των δικτύων προσωπικής περιοχής να στραφεί προς τις ιδιαιτερότητες του Bluetooth και την επίλυση τους, αφήνοντας κατά μέρος τον κύριο σκοπό της, δηλαδή να προτείνει αρχιτεκτονικές και τρόπους λειτουργίας για τα ΔΠΠ.

Πιστεύουμε πως ο ζωτικός χώρος της τεχνολογίας Bluetooth είναι περιορισμένος στα δίκτυα προσωπικής περιοχής. Για εφαρμογές εκτός των ΔΠΠ υπάρχουν ήδη αρκετές τεχνολογίες αλλά εμφανίζονται και καινούριες που εμφανίζουν σαφή πλεονεκτήματα έναντι του Bluetooth. Για το λόγο αυτό θεωρούμε πως η έρευνα πάνω στις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας Bluetooth είναι απαραίτητη, θα πρέπει να γίνεται όμως πάντα υπό το πρίσμα του απώτερου σκοπού της, δηλαδή της δημιουργίας αρχιτεκτονικών για δίκτυα προσωπικής περιοχής.

Η λειτουργία των ΔΠΠ εξετάζεται στο έργο 2WEAR[1] στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα εργασία. Στο 2WEAR διερευνήθηκαν γενικότερα οι μηχανισμοί δυναμικής δημιουργίας ΔΠΠ από φορετές (wearable) συσκευές που επικοινωνούν μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Δόθηκε έμφαση στη δημιουργία ενός μηχανισμού επικοινωνίας συσκευών που είναι ταυτόχρονα ανεξάρτητος της πλατφόρμας κάθε συσκευής ενώ ταυτόχρονα είναι ελαφρύς (lightweight) ώστε να μπορεί να δουλέψει και στις πιο “αδύναμες” συσκευές.

1.2 Συνεισφορά εργασίας

Στην εργασία αυτή αρχικά σκιαγραφούμε τα χαρακτηριστικά των δικτύων προσωπικής περιοχής (ΔΠΠ). Τα χαρακτηριστικά αυτά που προκύπτουν από τα προτεινόμενα σενάρια χρήσης των ΔΠΠ έχουν αγνοηθεί στη μέχρι τώρα έρευνα. Αφορούν τον τρόπο δημιουργίας και επέκτασης ενός δικτύου προσωπικής περιοχής καθώς και τον τρόπο παρουσίασης “βλαβών”.

Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, θα προτείνουμε μια βελτιωμένη εκδοχή της τοπολογίας δακτυλίου που έχει προταθεί στα [11, 30] για τη δημιουργία ΔΠΠ με την τεχνολογία Bluetooth. Η πρότασή μας εκμεταλλεύεται καλύτερα το πλεονέκτημα της τοπολογίας που είναι το μεγάλο αθροιστικό εύρος ζώνης (aggregate bandwidth) ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις καθυστερήσεις που αποτελεί το κύριο πρόβλημα της. Η διαφοροποίηση της πρότασής μας έγκειται στη χρήση και των δύο κατευθύνσεων του δακτυλίου. Για την επιλογή της συντομότερης διαδρομής από τις δύο διαθέσιμες χρησιμοποιούμε πίνακες με υποδείξεις δρομο-

λόγησης και προτείνουμε έναν τρόπο για την ενημέρωσή τους.

Οι βελτιώσεις που προκύπτουν από την πρότασή μας αποδεικνύονται με πειράματα. Υλοποιήσαμε την τοπολογία που προτείναμε με πραγματικές συσκευές Bluetooth και δείξαμε πως υπάρχει βελτίωση στη χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη σε κάθε συσκευή καθώς και στις καθυστερήσεις των πακέτων.

Επίσης δείξαμε πως οι βελτιώσεις που προτείναμε στη μέθοδο ίασης της τοπολογίας αποφέρουν μεγάλα οφέλη στα πλαίσια των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος ΔΠΠ. Δεδομένου πως είχαμε στη διάθεσή μας περιορισμένο αριθμό συσκευών, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ίαση της τοπολογίας επεξεργαστήκαμε με στατιστικές μεθόδους τα αποτελέσματα που προήλθαν από πραγματικές μετρήσεις.

1.3 Δομή εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 θα περιγράψουμε την αρχιτεκτονική και τη λειτουργία της τεχνολογίας Bluetooth. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 3 θα περιγράψουμε τη δουλειά που έχει γίνει πάνω στην τεχνολογία Bluetooth και αφορά τα δίκτυα προσωπικής περιοχής. Αναγνωρίζοντας την έλλειψη οριοθέτησης του περιβάλλοντος ΔΠΠ, στο κεφάλαιο 4 θα καθορίσουμε με μια σειρά από υποθέσεις τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Βάσει των χαρακτηριστικών αυτών, στο ίδιο κεφάλαιο θα προτείνουμε συγκεκριμένους τρόπους βελτίωσης της τοπολογίας δακτυλίου ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις των περιβαλλόντων ΔΠΠ. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα των προτάσεων που κάναμε για τη συγκεκριμένη τοπολογία. Τα συνολικά συμπεράσματα και μερικές προτάσεις μελλοντικής εργασίας παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.

Κεφάλαιο 2

Η τεχνολογία Bluetooth

Η ιστορία της τεχνολογίας Bluetooth[14] ξεκινά στα μέσα της δεκαετίας του '90 όταν η εταιρία Ericsson ξεκίνησε τη μελέτη για την ανάπτυξη μιας τεχνολογίας βασισμένη σε ραδιοκύματα (radio interface) που θα αντικαθιστούσε τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών. Η νέα τεχνολογία προοριζόταν να χρησιμοποιηθεί σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, ασύρματα ακουστικά και περιφερειακά υπολογιστών και η αγορά στην οποία στόχευε ήταν άνθρωποι που ασχολούνταν με τις επιχειρήσεις και ταξίδευαν συχνά. Βάσει αυτών, σαν απαιτήσεις από τη νέα τεχνολογία οριοθετήθηκαν τα ακόλουθα:

- Λειτουργία σε παγκόσμιο επίπεδο.
- Λειτουργία σε περιβάλλοντα χωρίς υποδομή (ad-hoc λειτουργία).
- Υποστήριξη μεταφοράς τόσο δεδομένων όσο και φωνής.
- Μικρό μέγεθος και κόστος.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Το 1998 η Ericsson και άλλες 4 εταιρίες (Nokia, IBM, Toshiba, Intel), σχημάτισαν μια ομάδα ειδικού ενδιαφέροντος[6] (Special Interest Group - SIG) με σκοπό την προτυποποίηση και προώθηση της νέας τεχνολογίας. Εξ' αρχής σκοπός ήταν να προκύψει από το Bluetooth SIG ένα ανοικτό (open) και δωρεάν (royalty free) πρότυπο. Η πρώτη έκδοση του προτύπου δημοσιεύτηκε το 1999. Μέχρι το 2001, πάνω από 1500 εταιρίες είχαν υιοθετήσει την τεχνολογία, υπογράφοντας συμφωνία με το Bluetooth SIG.

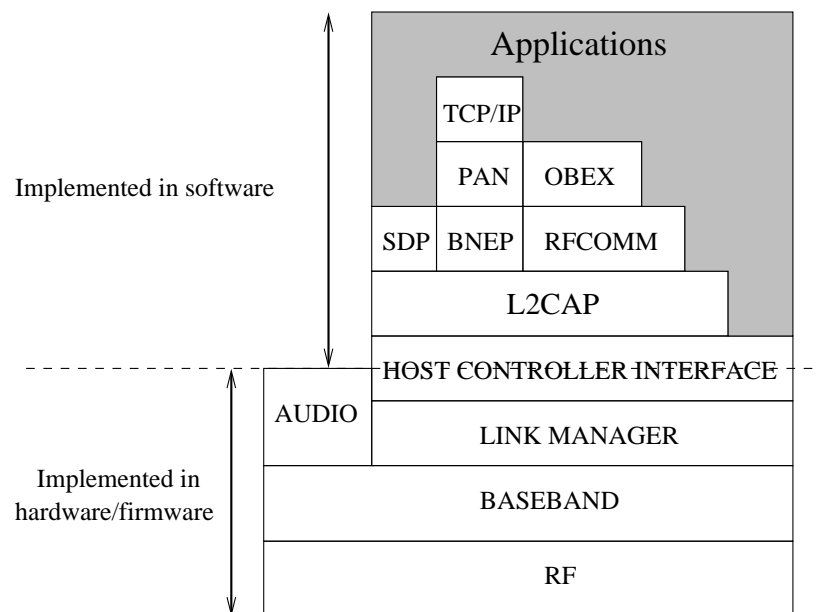
Σήμερα το πρότυπο του Bluetooth βρίσκεται στην έκδοση 1.1[44] και έχει τύχει ευρείας αποδοχής από τη βιομηχανία, με νέα προϊόντα που το χρησιμοποιούν να εμφανίζονται συνεχώς. Το Bluetooth SIG εργάζεται τώρα ταυτόχρονα προς τις εκδόσεις 1.2 και 2 του προτύπου. Η έκδοση 1.2 θα έχει μικρές βελτιώσεις πάνω στο υπάρχον πρότυπο, ενώ η έκδοση 2 αναμένεται να δώσει λύσεις σε πολλά από τα προβλήματα που αποτέλεσαν κίνητρο για αυτή την εργασία.

Στο μεταξύ η ομάδα εργασίας της IEEE που προετοιμάζει το πρότυπο 802.15[17] που αφορά τα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής επέλεξε το Bluetooth σαν την τεχνολογία στην οποία θα στηριχθεί το πρότυπο.

2.1 Επισκόπηση αρχιτεκτονικής

2.1.1 Αρχιτεκτονική υλοποίησης

Το Bluetooth έχει δομηθεί σαν ένα σύνολο στρωμάτων όπως φαίνονται στο σχήμα 2.1. Μια υλοποίηση (στοίδα) του Bluetooth, περιέχει τόσο μέρη υλικού (hardware) όσο και μέρη λογισμικού. Η δόμηση σε στρώματα απλοποιεί την υλοποίηση συσκευών Bluetooth αλλά και διευκολύνει την συγγραφή του μέρους της στοίδας Bluetooth που υλοποιείται σε λογισμικό.



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική του Bluetooth

Τα μέρη που απεικονίζονται στο σχήμα 2.1 περιγράφονται συνοπτικά αμέσως παρα-

κάτω. Τα σημαντικότερα από αυτά περιγράφονται και πιο διεξοδικά στις επόμενες ενότητες.

- Επίπεδο ραδιοσυχνοτήτων (RF): Σε αυτό το επίπεδο υλοποιείται το κανάλι επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το Bluetooth με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 2.2. Επίσης το επίπεδο αυτό ασχολείται με τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του σήματος, παρέχοντας στο επίπεδο Baseband μια ιδεατή ροή bits.
- Επίπεδο Baseband: Το επίπεδο αυτό αντιστοιχεί περίπου στο επίπεδο ελέγχου μέσου (Medium Access Control - MAC) του Bluetooth. Δηλαδή στο επίπεδο αυτό γίνεται η διαίτησία της χρήσης του καναλιού. Επίσης στο επίπεδο αυτό μετατρέπεται η ροή από bits που έρχεται από το επίπεδο ραδιοσυχνοτήτων σε πακέτα Bluetooth.
- Επίπεδο ελέγχου ζεύξης (Link Manager - LM): Χρησιμοποιεί τις δυνατότητες που παρέχει το baseband επίπεδο για να δημιουργήσει ζεύξεις (links) με άλλες συσκευές Bluetooth, εφαρμόζοντας το πρωτόκολλο LM (Link Manager Protocol - LMP).
- Επίπεδο διεπαφής ελέγχου (Host Controller Interface - HCI): Το επίπεδο αυτό προσφέρει στα στρώματα που βρίσκονται πάνω από αυτό πρόσβαση σε λειτουργίες χαμηλότερων επιπέδων. Είναι υλοποιημένο εν μέρει σε λογισμικό firmware που τρέχει στη συσκευή Bluetooth και εν μέρει σε λογισμικό που τρέχει στη συσκευή που ελέγχει αυτήν. Έτσι επιτυγχάνεται διαφανής επικοινωνία των προγραμμάτων της συσκευής ελεγκτή με τη συσκευή Bluetooth πάνω από οποιοδήποτε δίαυλο επικοινωνίας (π.χ. σειριακό UART, USB). Πέρα από αυτά το επίπεδο HCI δεν έχει άλλες λειτουργίες και γι' αυτό δε θα αναλυθεί περισσότερο.
- Επίπεδο λογικών καναλιών (Logical Link Control and Adaptation Protocol - L2CAP): Το επίπεδο αυτό έχει σαν κύριο σκοπό να παρέχει στα υψηλότερα επίπεδα πολλαπλά λογικά κανάλια πάνω από μια ζεύξη. Επίσης παρέχει στα υψηλότερα επίπεδα μέγιστη μονάδα μετάδοσης (Maximum Transmission Unit - MTU) μεγέθους μέχρι και 64K. Αυτό το κατορθώνει κάνοντας κατάτμηση/ανακατασκευή των πακέτων από τα υψηλότερα επίπεδα σε/από πακέτα που μπορεί να χειριστεί το επίπεδο Baseband.
- Υποστήριξη ήχου (Audio): Το επίπεδο αυτό κωδικοποιεί (κατά CVSD[16]) και στέλνει ήχο χωρίς καμία μεσολάβηση του Host Controller. Σ' αυτή την εργασία δε θα ασχοληθούμε περαιτέρω με το επίπεδο αυτό.

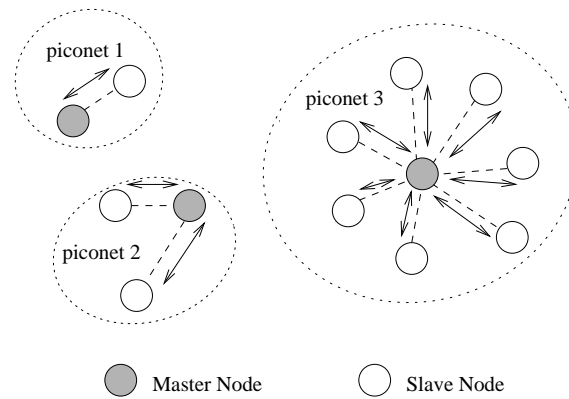
Τα επίπεδα αυτά εμφανίζονται σε όλες τις υλοποιήσεις Bluetooth. Τα υπόλοιπα επίπεδα, που εμφανίζονται στο σχήμα 2.1, υπάρχουν ή όχι ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούμε τη συσκευή Bluetooth.

- RFCOMM: Το επίπεδο αυτό προσομοιώνει το πρωτόκολλο RS-232 για σειριακή επικοινωνία πάνω από το επίπεδο L2CAP. Έτσι μια πληθώρα εφαρμογών που έχουν προγραμματιστεί για να δουλεύουν πάνω από σειριακή πόρτα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, με το Bluetooth να μεταφέρει τα δεδομένα αντί του παραδοσιακού σειριακού καλωδίου.
- OBEX (Object Exchange): Το επίπεδο αυτό αποτελείται από ένα σύνολο πρωτοκόλλων για μεταφορά αντικειμένων πάνω από συνδέσεις Bluetooth. Τα πρωτόκολλα αυτά προϋπήρχαν του Bluetooth και δούλευαν πάνω από την τεχνολογία IrDA. Έτσι εφαρμογές που χρησιμοποιούσαν OBEX πάνω από IrDA μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν.
- BNEP (Bluetooth Network Encapsulation Protocol): Το επίπεδο αυτό υλοποιεί ένα πρωτόκολλο ενθυλάκωσης πακέτων από άλλου τύπου δίκτυα και τη μεταφορά τους πάνω από Bluetooth. Περισσότερα γι' αυτό αναφέρονται στην ενότητα 2.5.1.
- PAN (Personal Area Networking): Το επίπεδο αυτό έχει σαν σκοπό να δώσει τα απαραίτητα για τη δημιουργία ad-hoc TCP/IP δικτύων πάνω από το Bluetooth. Περισσότερα γι' αυτό αναφέρονται στην ενότητα 2.5.2.
- Πρωτόκολλο ανακάλυψης υπηρεσιών (Service Discovery Protocol - SDP): Το επίπεδο SDP είναι επιτρέπει σε μια συσκευή να ανακαλύψει τις υπηρεσίες που προσφέρουν άλλες συσκευές. Χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική πελάτη-εξυπηρετητή και η επικοινωνία γίνεται μέσω των λογικών καναλιών που προσφέρει το επίπεδο L2CAP.

2.1.2 Τοπολογία δικτύων Bluetooth

Τα δίκτυα που σχηματίζουν οι συσκευές Bluetooth έχουν μορφή αστέρα. Η τοπολογία αυτή προκύπτει από τον κεντρικοποιημένο τρόπο με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος του καναλιού μετάδοσης και περιγράφεται στην ενότητα 2.2.3. Οι “αστέρες” που σχηματίζουν οι συσκευές Bluetooth ονομάζονται μικροδίκτυα. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται 3 μικροδίκτυα με 2, 3 και 8 συσκευές αντίστοιχα.

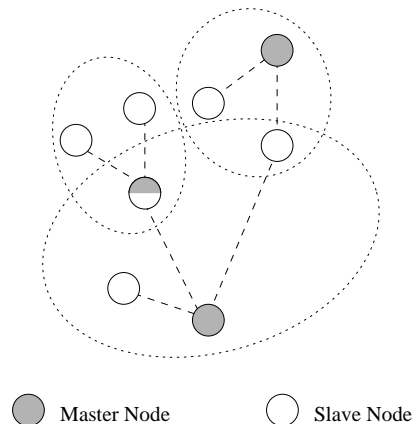
Η (μια) συσκευή σε κάθε μικροδίκτυο που αναλαμβάνει τον έλεγχο του μικροδικτύου ονομάζεται συσκευή-κύριος (master). Οι υπόλοιπες συσκευές ονομάζονται συσκευές-υποτελείς (slaves). Η τοπολογία αστέρα του Bluetooth χαρακτηρίζεται ως αυστηρή, γιατί άμεση επικοινωνία υπάρχει μόνο μεταξύ συσκευής-κυρίου και των συσκευών-υποτελών του και ποτέ μεταξύ δύο συσκευών-υποτελών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Το μέγεθος



Σχήμα 2.2: Τοπολογία του Bluetooth

των μικροδικτύων μπορεί να φτάσει μέχρι 8 συσκευές: 1 συσκευή-κύριος και 7 συσκευές-υποτελείς.

Το Bluetooth προβλέπει τη δυνατότητα μια συσκευή να ανήκει σε παραπάνω από ένα μικροδίκτυο ή ισοδύναμα στα μικροδίκτυα να περιέχουν κοινές συσκευές. Ένα σύνολο από μικροδίκτυα τα οποία έχουν κοινές συσκευές σχηματίζοντας ένα συνδεδεμένο απλό γράφο με τις ακμές μεταξύ συσκευών-κυρίων και συσκευών-υποτελών, ονομάζεται scatternet. Ένα παράδειγμα scatternet φαίνεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Τοπολογία scatternet στο Bluetooth

Για να μπορούν οι συσκευές να συμμετέχουν σε πολλά μικροδίκτυα μαζί πρέπει να κάνουν καταμερισμό του χρόνου τους μεταξύ των μικροδικτύων. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κάποια από τις καταστάσεις σύνδεσης που περιγράφονται στην ενότητα 2.3.4.7 για να τους “επιτραπεί” η απουσία από τα μικροδίκτυα στα οποία συμμετέχουν. Πάντα βέβαια ισχύει ο περιορισμός που αναφέρθηκε στην ενότητα 2.2.3, πως κάθε συσκευή μπορεί να παίξει το ρόλο του κυρίου σε ένα και μόνο μικροδίκτυο.

Τα scatternets υπόσχονται αύξηση της συνολικής χωρητικότητας (bandwidth) που είναι διαθέσιμη για επικοινωνία καθώς κάθε μικροδίκτυο χρησιμοποιεί διαφορετικό κανάλι, οπότε η συνολικά διαθέσιμη χωρητικότητα αυξάνει. Επίσης με τη χρήση αλγορίθμων δρομολόγησης μπορούν να επιτρέψουν επικοινωνία με κόμβους οι οποίοι δε βρίσκονται σε απόσταση εμβέλειας. Τα scatternets παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία δικτύων προσωπικής περιοχής βασισμένα στο Bluetooth, γιατί επιτρέπουν την ευέλικτη σύνδεση συστάδων συσκευών και βοηθούν να ξεπεραστεί ο περιορισμός των 8 συσκευών ανά μικροδίκτυο.

Όμως τα scatternets δεν είναι επαρκώς καθορισμένα στην περιγραφή του Bluetooth. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι συσκευές που να υποστηρίζουν scatternets να έχουν κυκλοφορήσει σχετικά πρόσφατα (τέλη του 2002) και να έχουν περιορισμούς στην υποστήριξη τους. Επίσης αφού ο κάθε κατασκευαστής υλοποιεί την υποστήριξη για scatternets χωρίς να βασίζεται σε κάποια αυστηρή περιγραφή, η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων scatternets είναι αμφίβολη.

2.2 Λειτουργία επιπέδου ραδιοσυχνοτήτων

2.2.1 Χαρακτηριστικά πομπού

Για να είναι ελεύθερη (licence free) η χρήση των συσκευών Bluetooth επιλέχθηκε να λειτουργούν στην περιοχή (band) των 2.4GHz, που είναι γνωστή ως ISM band (Industrial Scientific Medical band). Οι συχνότητες που περιλαμβάνει η ISM band ανά χώρα, φαίνονται στον πίνακα 2.1. Συσκευές Bluetooth κατασκευασμένες για διαφορετικές περιοχές δεν είναι συμβατές. Στο εξής θα αναφερόμαστε μόνον στις συσκευές που λειτουργούν σε όλο το φάσμα της περιοχής ISM.

Περιοχή	Συχνότητες	Διαθέσιμα Hops
Ιαπωνία	2471-2497MHz	$f = 2473 + kMHz, k = 0, \dots, 22$
Γαλλία, Ισπανία	2446.5-2483.5MHz	$f = 2454 + kMHz, k = 0, \dots, 22$
Υπόλοιπος Κόσμος	2400-2483.5MHz	$f = 2402 + kMHz, k = 0, \dots, 78$

Πίνακας 2.1: Συχνότητες περιοχής ISM ανά περιοχή του κόσμου

Στο σήμα που εκπέμπεται γίνεται διαμόρφωση GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) και η ταχύτητα εκπομπής είναι 1Msymbol/sec. Η ισχύς εκπομπής των συσκευών Bluetooth κυμαίνεται από 1mW έως 100mW. Ανάλογα με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους, οι συσκευές κατατάσσονται σε 3 κλάσεις, με μέγιστη ισχύ 1mW, 2.5mW και 100mW. Ανάλογα

με την ισχύ εκπομπής, οι συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν μέχρι απόσταση 5m, 20m, και 100m αντίστοιχα.

2.2.2 Frequency Hopping

Στην ISM band, επειδή ακριβώς δεν απαιτείται άδεια ή μίσθωση για τη χρήση της, λειτουργούν και άλλες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων όπως HomeRF και IEEE 802.11, καθώς και οικιακές συσκευές όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων. Για να μπορέσει να λειτουργήσει παρά τις πιθανές αυτές παρεμβολές, το Bluetooth χρησιμοποιεί την τεχνική Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)[38].

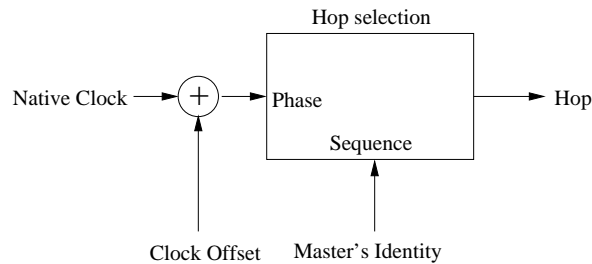
Πιο αναλυτικά, χωρίζει το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων σε περιοχές του 1MHz οι οποίες ονομάζονται διαδοχικά διαβατικά τμήματα (hops). Τα διαθέσιμα hops φαίνονται στον πίνακα 2.1. Κάθε συσκευή Bluetooth εκπέμπει σε ένα hop για διάστημα 625μsec και έπειτα αλλάζει hop. Η επιλογή του επόμενου hop γίνεται με καθορισμένο ψευδοτυχαίο τρόπο. Για να επικοινωνήσουν δύο συσκευές Bluetooth θα πρέπει να συγχρονίσουν τον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν hops. Περισσότερα για αυτό το θέμα αναφέρονται στην ενότητα 2.2.3. Στην περίπτωση που στη συχνότητα του hop υπάρχει κάποια παρεμβολή και διαπιστωθεί λάθος στη λήψη του πακέτου, ζητείται η επαναμετάδοση του. Περισσότερα για τα σχήματα ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών που χρησιμοποιεί το Bluetooth και τον τρόπο που γίνονται οι αναμεταδόσεις, αναφέρονται στην ενότητα 2.3.3.

Η χρήση της τεχνικής FHSS είναι και ένας από τους λόγους που το κόστος των συσκευών Bluetooth είναι χαμηλό. Εναλλακτική της τεχνικής FHSS είναι η τεχνική DSSS[38] (Direct Sequence Spread Spectrum) που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία WiFi[49]. Η τεχνική DSSS επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, αλλά είναι πιο ακριδή στην υλοποίηση της, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και είναι πιο ευαίσθητη στις παρεμβολές[32, 19].

2.2.3 Ορισμός Καναλιού

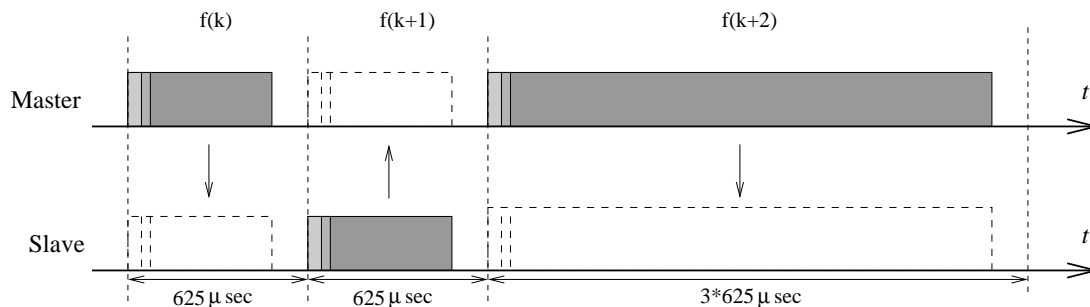
Το κανάλι του Bluetooth υλοποιείται με το συνδυασμό της χρήσης ενός σχήματος Frequency Hopping και Time Division Duplex (FH/TDD). Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.2, το κανάλι διαιρείται χρονικά σε χρονοθυρίδες (timeslots) των 625μsec, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο hop. Έχουμε δηλαδή 1600hops/sec. Σε κάθε χρονοθυρίδα μεταδίδεται ένα και μόνο πακέτο. Όπως θα δούμε στην ενότητα 2.3.2 υπάρχουν τύποι πακέτων που καταλαμβάνουν περισσότερες χρονοθυρίδες. Κατά τη διάρκεια μετάδοσης τέτοιων πακέτων η συχνότητα μετάδοσης δεν αλλάζει.

Δύο ή περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούν την ίδια ακολουθία από hops σχηματίζουν ένα μικροδίκτυο. Μια από αυτές παίζει το ρόλο της συσκευής-κυρίου (master) στο μικροδίκτυο και βάσει της διεύθυνσης της επιλέγεται η ακολουθία (Sequence) hops που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης κάθε φορά το επόμενο hop στην ακολουθία αυτή, δηλαδή η φάση (Phase) της ακολουθίας, επιλέγεται βάσει της τιμής του ρολογιού της συσκευής-κυρίου. Για να υπολογίζουν όλα τα μέλη ενός μικροδικτύου το ίδιο hop αν και έχουν διαφορετικό ρολόι, οι συσκευές-υποτελείς προσθέτουν στο τοπικό ρολόι (native clock) τη διαφορά (offset) που έχει αυτό από το ρολόι της συσκευής-κυρίου. Η διαφορά αυτή αποκτάται κατά τη χειραγία που προηγείται της δημιουργίας ζεύξης και περιγράφεται στην ενότητα 2.3.4.6. Ημεση συνέπεια του τρόπου που γίνεται ο υπολογισμός του επόμενου hop σε ένα μικροδίκτυο είναι πως μια συσκευή δεν μπορεί να παίξει το ρόλο του κυρίου σε πάνω από ένα μικροδίκτυο. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται πως γίνεται ο υπολογισμός του επόμενου hop.



Σχήμα 2.4: Υπολογισμός του επόμενου hop

Η συσκευή-κύριος ελέγχει επίσης πλήρως τη λειτουργία του μικροδικτύου. Οι συσκευές-υποτελείς παραμένουν ανενεργές στο μικροδίκτυο και εκπέμπουν μόνο αν τους δώσει η συσκευή-κύριος “το λόγο”. Το σχήμα που ακολουθείται φαίνεται στο σχήμα 2.5. Στις άρτιες χρονοθυρίδες εκπέμπει πάντα η συσκευή-κύριος, ενώ στις περιττές εκπέμπει πάντα μια συσκευή-υποτελής. Δηλαδή το αμφίδρομο του καναλιού στο Bluetooth επιτυγχάνεται με πολυπλεξία στο χρόνο, έχουμε δηλαδή ένα σχήμα TDD.



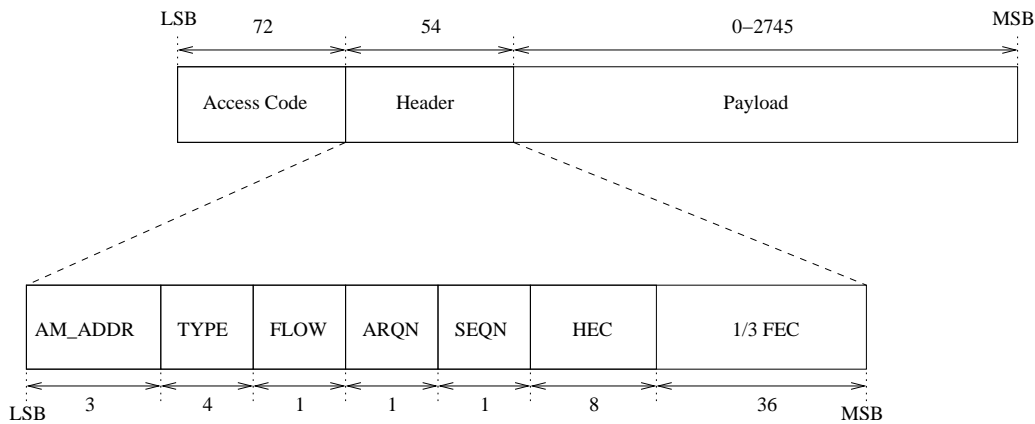
Σχήμα 2.5: Υλοποίηση καναλιού διπλής κατεύθυνσης στο Bluetooth

Για να δώσει το λόγο σε κάποια συσκευή-υποτελή, η συσκευή-κύριος στέλνει ένα ειδικού τύπου πακέτο που απευθύνεται σε αυτήν. Αφού λάβει το πακέτο, η συσκευή-υποτελής εκπέμπει την επόμενη περιττή χρονοθυρίδα. Η εκπομπή της απευθύνεται μόνο στη συσκευή-κύριο. Ο λόγος που υπάρχει αυτός ο περιορισμός, είναι πως επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας: οι συσκευές-υποτελείς μπορούν να μείνουν ανενεργές χωρίς να παρακολουθούν καν το κανάλι μέχρι την επόμενη άρτια χρονοθυρίδα.

2.3 Λειτουργία επιπέδου Baseband

2.3.1 Μορφή Πακέτων

Όπως αναφέραμε, σε κάθε χρονοθυρίδα μπορεί να ανταλλαχθεί ένα πακέτο. Τα πακέτα έχουν τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.6. Η σημασία του κάθε πεδίου περιγράφεται αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 2.6: Μορφή πακέτων Bluetooth

- Κωδικός Πρόσβασης (Access Code): Ο κωδικός πρόσβασης βοηθάει τις συσκευές Bluetooth να διαπιστώσουν αν το πακέτο αφορά τη διαδικασία αίτησης σύνδεσης, τη διαδικασία αναζήτησης ή αν αφορά επικοινωνία στο συγκεκριμένο μικροδίκτυο. Αντίστοιχα οι κωδικοί αυτοί ονομάζονται DAC (Device Access Code), IAC (Inquiry Access Code), CAC (Channel Access Code).
- Επικεφαλίδα (Header)
 - ▶ Διεύθυνση μέλους (AM_ADDRESS): Χρησιμοποιείται για να ξεχωρίζουν οι ενεργές συσκευές-υποτελείς του ίδιου μικροδικτύου σε ποια από αυτές απευθύνεται η συσκευή-κύριος, και αντίστροφα.

- ▶ Τύπος πακέτου (TYPE): Δείχνει τον τύπο του πακέτου.
 - ▶ Ένδειξη ροής (FLOW): Ενημερώνει για το αν ο αποστολέας του πακέτου μπορεί ή όχι να λάβει επιπλέον πακέτα δεδομένων χωρίς να υπάρξει υπερχειλίση.
 - ▶ Ένδειξη σωστής λήψης (ARQN): Ενημερώνει για το αν ο αποστολέας έλαβε σωστά ή όχι το τελευταίο πακέτο.
 - ▶ Ένδειξη επαναμετάδοσης (SEQN): Χρησιμοποιείται για να ξεχωρίσει ο παραλήπτης αν το πακέτο που έλαβε πρόκειται για νέο πακέτο ή επαναμετάδοση.
 - ▶ Έλεγχος λάθους επικεφαλίδας (HEC): Περιέχει πληροφορία που βοηθάει τον παραλήπτη να ελέγξει την ακεραιότητα της επικεφαλίδας.
- Φορτίο (Payload): Τα δεδομένα τα οποία μεταφέρει το πακέτο, μαζί με μια δικιά τους επικεφαλίδα και κώδικα για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών. Το πεδίο αυτό μπορεί να μην υπάρχει σε πακέτα ελέγχου.

2.3.2 Τύποι πακέτων

Τα πακέτα του Bluetooth, μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες: πακέτα ήχου, πακέτα δεδομένων και πακέτα ειδικού τύπου. Όλα ακολουθούν τη μορφή που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3.1.

Τα πακέτα δεδομένων του Bluetooth μπορεί να καταλαμβάνουν 1, 3 ή 5 χρονοθυρίδες και να είναι ή όχι προστατευμένα με κώδικα διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction code - FEC code). Ένα πακέτο με τύπο DMx καταλαμβάνει x χρονοθυρίδες και είναι προστατευμένο με κώδικα FEC. Ένα πακέτο με τύπο DHx καταλαμβάνει x χρονοθυρίδες και δεν περιέχει κώδικα FEC. Το ωφέλιμο για το χρήστη φορτίο και οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται για τα διάφορα είδη πακέτων δεδομένων φαίνονται στον πίνακα 2.2. Η μετάδοση είναι συμμετρική όταν αποστολέας και παραλήπτης χρησιμοποιούν πακέτα ίδιου μήκους (σε χρονοθυρίδες) και ασύμμετρη διαφορετικά.

Τα κυριότερα πακέτα ειδικού τύπου είναι τα πακέτα ID, NULL, POLL και FHS.

2.3.3 Έλεγχος και διόρθωση λαθών

Με τη λήψη κάθε πακέτου ελέγχεται η επικεφαλίδα του, για το αν έφτασε ακέραια, με τη χρήση του HEC. Έπειτα, αν υπάρχει φορτίο, γίνεται χρήση του FEC κώδικα του, αν το πακέτο είναι τύπου DMx , και ελέγχεται ο 16bit CRC κώδικας του.

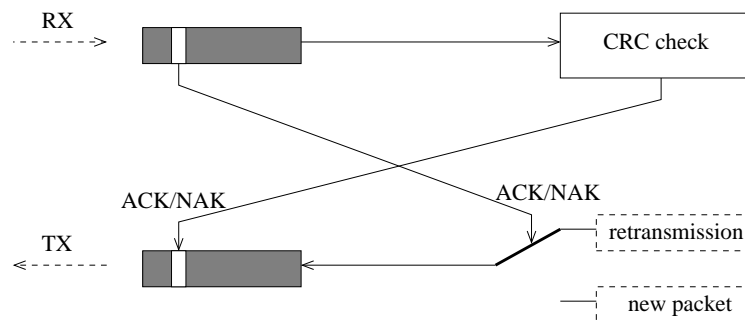
Αν επικεφαλίδα και φορτίο είναι έγκυρα, τότε στο επόμενο πακέτο που θα σταλεί προς τον αποστολέα του, το ARQN bit θα έχει τιμή 1. Αλλιώς θα έχει τιμή 0. Στη δεύτερη πε-

Τύπος	Φορτίο χρήστη	Rate (symmetric)	Rate (forward)	Rate (reverse))
<i>DM1</i>	0-17bytes	108.8kbps	108.8kbps	108.8kbps
<i>DH1</i>	0-27bytes	172.8kbps	172.8kbps	172.8kbps
<i>DM3</i>	0-121bytes	387.2kbps	387.2kbps	54.4kbps
<i>DH3</i>	0-183bytes	390.4kbps	585.6kbps	86.4kbps
<i>DM5</i>	0-224bytes	286.7kbps	477.8kbps	36.3kbps
<i>DH5</i>	0-339bytes	433.9kbps	723.2kbps	57.6kbps

Πίνακας 2.2: Επιδόσεις ACL πακέτων Bluetooth

ρίπτωση ο αποστολέας του πακέτου το επαναμεταδίδει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτύχει η μετάδοση.

Σε κάθε πακέτο με ARQN bit με τιμή 1 που λαμβάνει μια συσκευή Bluetooth, αντιστρέφει την τιμή του SEQN bit στην επικεφαλίδα του επόμενου πακέτου που θα στείλει. Έτσι ο παραλήπτης μπορεί να διαπιστώσει αν ένα πακέτο πρόκειται για αναμετάδοση ή όχι συγκρίνοντας το SEQN του με αυτό του προηγούμενου πακέτου. Επειδή η επαναμετάδοση των πακέτων ζητείται ρητώς (explicitly), η αίτηση επαναμετάδοσης ονομάζεται αυτόματη (Automatic Retransmission Query - ARQ). Στο σχήμα 2.7 απεικονίζεται πώς δουλεύει το σχήμα επαναμετάδοσης του Bluetooth.

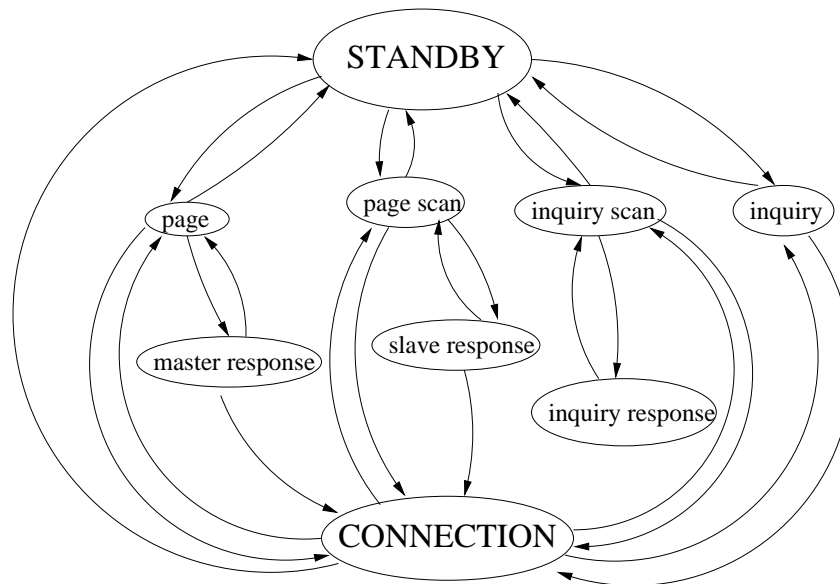


Σχήμα 2.7: Λειτουργία των Automatic Retransmission Querys (ARQs) στο Bluetooth

2.3.4 Οι καταστάσεις του Bluetooth

Η λειτουργία σε χαμηλό επίπεδο των συσκευών Bluetooth, μπορεί να μοντελοποιηθεί σα μια μηχανή καταστάσεων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.8. Κάθε χρονική στιγμή η συσκευή Bluetooth, μπορεί να βρίσκεται σε μια μόνο κατάσταση. Ο περιορισμός αυτός επηρεάζει αρνητικά τη συμπεριφορά του Bluetooth λόγω του χρόνου που χρειάζεται για να γίνουν

οι μεταβάσεις από κατάσταση σε κατάσταση, ειδικά όταν η αρχική κατάσταση αντιστοιχεί σε κάποια χρονοδώρα διαδικασία (π.χ. αναζήτηση άλλων συσκευών).



Σχήμα 2.8: Μηχανή καταστάσεων του Bluetooth

Οι καταστάσεις περιγράφονται αμέσως παρακάτω. Οι περισσότερες καταστάσεις αποτελούνται από κάποιες διαδικασίες που εκτελούνται σ' αυτές. Θα αναφερόμαστε στο εξής στις διαδικασίες αυτές με το όνομα της κατάστασης που αντιστοιχούν.

2.3.4.1 Κατάσταση αναμονής (Standby)

Η κατάσταση αναμονής είναι η εξ' ορισμού (default) κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι συσκευές Bluetooth. Στην κατάσταση αυτή η συσκευή Bluetooth καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια, καθώς λειτουργεί μόνο το τοπικό ρολόι.

Περιοδικά η συσκευή αφήνει την κατάσταση αναμονής για να μεταβεί σε μια από τις καταστάσεις ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης (Page Scan) ή ανίχνευσης αναζητήσεων (Inquiry Scan). Αυτό είναι απαραίτητο για να μπορέσουν άλλες συσκευές να συνδεθούν σ' αυτήν και να ανακαλύψουν την ύπαρξη της αντίστοιχα. Αντίθετα από την αυτόματη αυτή περιοδική μετάβαση, η μετάβαση στις καταστάσεις αίτησης σύνδεσης (Page) και αναζήτησης (Inquiry) γίνεται μόνο έπειτα από απαίτηση από κάποια τοπική εφαρμογή.

2.3.4.2 Κατάσταση αναζήτησης (Inquiry)

Στην κατάσταση Inquiry εκτελούνται οι διαδικασίες που επιτρέπουν σε μια συσκευή να ανακαλύψει ποιες άλλες συσκευές υπάρχουν στο περιβάλλον της. Οι παράμετροι που δέχεται από τα υψηλότερα επίπεδα είναι ο μέγιστος χρόνος που θα διαρκέσει και ο μέγιστος αριθμός των αποτελεσμάτων που θα επιστρέψει. Η συσκευή φεύγει από την κατάσταση αναζήτησης είτε αφού συλλέξει τον αριθμό απαντήσεων που καθορίστηκε, είτε αφού περάσει ο καθορισμένος χρόνος αναζήτησης.

Έπειτα από μια επιτυχή διαδικασία αναζήτησης, το αποτέλεσμα είναι η συσκευή που εκτέλεσε την αναζήτηση να μάθει τις διευθύνσεις και τις τιμές των ρολογιών που ανακαλύφθηκαν καθώς και κάποιες άλλες πληροφορίες γι αυτές. Όπως θα δούμε παρακάτω, δεν ανακαλύπτονται πάντα όλες οι συσκευές που βρίσκονται στην εμβέλεια μιας συσκευής που πραγματοποιεί αναζήτηση.

Κατά τη διαδικασία αναζήτησης σε κάθε χρονοθυρίδα αποστολής των 625μsec η συσκευή μεταδίδει δύο πακέτα ID σε δύο διαφορετικές συχνότητες¹ Στη χρονοθυρίδα λήψης που έπεται η συσκευή περιμένει για δύο πακέτα-απαντήσεις σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Τα πακέτα-απαντήσεις είναι τύπου FHS.

Καθώς στη διαδικασία αναζήτησης δεν υφίσταται η λογική διαχωρισμού των συσκευών σε συσκευές-κυρίους και συσκευές υποτελείς, πρέπει να επαναοριστεί ο τρόπος που επιλέγεται η ακολουθία hopping. Αυτή λοιπόν παράγεται χρησιμοποιώντας τον κώδικα IAC αντί της διεύθυνσης της συσκευής. Αυτή η διαδικασία δίνει 32 hops, τα οποία χωρίζονται σε δύο ομάδες (trains) των 16. Κάθε ομάδα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί τουλάχιστο 256 φορές πριν χρησιμοποιηθεί η άλλη.

Οπότε ο ελάχιστος χρόνος που διαρκεί μια πλήρης αναζήτηση, υπολογίζεται[31] ως εξής:

$$T_{inqTX} = T_{inqRX} = N_{trains} \times N_{hops} \times t_{hop} \times N_{repeat}$$

$$T_{inq} = T_{inqTX} + T_{inqRX} = 2 \times \left(2 \times 16 \times \frac{625}{2} \times 256 \right) \mu sec = 5.12sec$$

Σύμφωνα όμως με όσα αναφέρονται στο [44] λόγω παρεμβολών και της εξασθένησης του σήματος με την απόσταση, για να ανακαλύψει η διαδικασία αναζήτησης με μεγάλη πιθανότητα όλες τις συσκευές που βρίσκονται σε εμβέλεια, απαιτείται να σαρωθεί τουλάχιστο 2 φορές κάθε ομάδα, δηλαδή χρόνος $2 \times 5.12sec = 10.24sec$.

¹ Αυτό σημαίνει πως η συχνότητα του hopping διπλασιάζεται κατά τη διαδικασία αναζήτησης και γίνεται 3200hops/sec.

2.3.4.3 Καταστάσεις ανίχνευσης/απάντησης αναζητήσεων (Inquiry Scan/Response)

Όταν μια συσκευή Bluetooth βρίσκεται σε κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων περιμένει σε μια συγκεκριμένη συχνότητα για πιθανά πακέτα αναζήτησης (πακέτα ID) για διάστημα ισοδύναμο με 16 hops, δηλαδή $16 \times 625\mu\text{sec} = 10\text{msec}$. Η συχνότητα στην οποία περιμένει καθορίζεται από το τοπικό ρολόι τη στιγμή που η συσκευή μπαίνει στην κατάσταση και αλλάζει κάθε 1.28sec.

Για να μειωθεί η πιθανότητα περισσότερες από μια συσκευές να “ακούσουν” το ίδιο πακέτο αναζήτησης και να απαντήσουν σε αυτό ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται ένα σχήμα τυχαίας οπισθοχώρησης (random backoff). Οι συσκευές δηλαδή αλλάζουν κατάσταση για ένα τυχαίο διάστημα από 0 έως 1023 χρονοθυρίδες. Αν όταν επιστρέψουν στην κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων ανιχνεύσουν ξανά πακέτο αναζήτησης, περνούν στην κατάσταση απάντησης αναζητήσεων για να απαντήσουν σε αυτό.

Στην κατάσταση απάντησης σε αναζητήσεις η συσκευή στέλνει ένα FHS πακέτο για να δηλώσει την παρουσία της και έπειτα επιστρέφει στην κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων, όπου η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή. Το σχήμα αυτό κάνει μια συσκευή να απαντήσει στην ίδια αναζήτηση παραπάνω από μια φορές.

Για να εξασφαλιστεί η ανακάλυψη των συσκευών σε λογικά χρονικά πλαίσια, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ανιχνεύσεων αναζητήσεων έχει καθοριστεί να είναι το πολύ 2.56sec, όσο δηλαδή διαρκεί η σάρωση της μιας από τις δύο ομάδες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση.

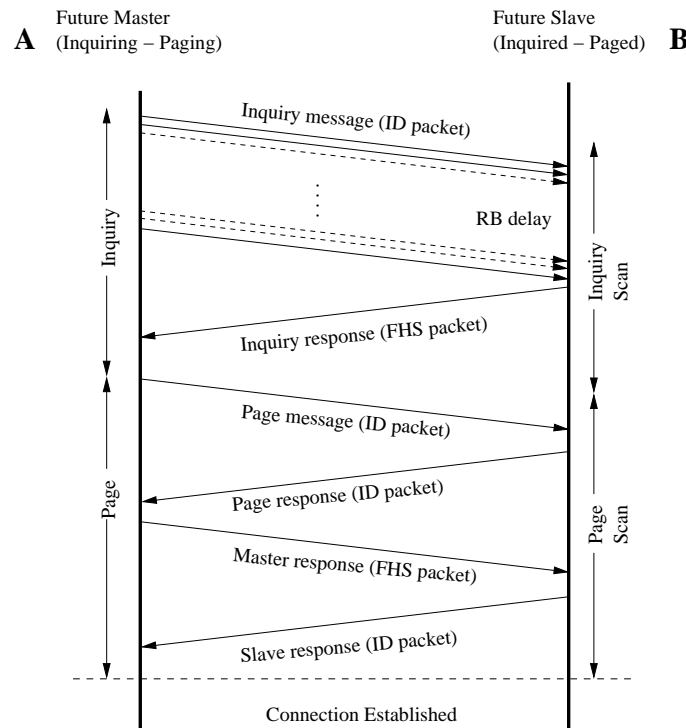
Οι διαδικασίες αναζήτησης και ανίχνευσης/απάντησης αναζήτησης μαζί με τις διαδικασίες αίτησης σύνδεσης και ανίχνευσης αίτησης σύνδεσης που θα εξετάσουμε παρακάτω, απεικονίζονται στο σχήμα 2.9.

2.3.4.4 Κατάσταση αίτησης σύνδεσης (Page)

Η κατάσταση αυτή χρησιμεύει ως ενδιάμεση κατάσταση για τη μετάβαση στην κατάσταση σύνδεσης. Στην κατάσταση αυτή μπαίνει μια συσκευή όταν δοκιμάζει να συνδεθεί σε μια άλλη συσκευή της οποίας τη διεύθυνση γνωρίζει. Η συσκευή αυτή που μπαίνει στην κατάσταση Page θα είναι και η συσκευή-κύριος του μικροδικτύου που θα προκύψει.

Η διαδικασία υποβολής αίτησης σύνδεσης (paging) έχει αρκετές ομοιότητες με την διαδικασία αναζήτησης συσκευών. Η συσκευή που υποβάλει την αίτηση (έστω A). Όπως και στη διαδικασία αναζήτησης, η συσκευή A στέλνει δύο πακέτα ID σε κάθε χρονοθυρίδα των 625μsec και περιμένει απάντηση σε δύο διαφορετικές συχνότητες στην επόμενη χρονοθυρίδα. Αν ληφθεί απάντηση τότε η συσκευή μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας κυρίου.

Η ακολουθία hopping που χρησιμοποιεί η A επιλέγεται βάσει της διεύθυνσης της συ-



Σχήμα 2.9: Αναζήτηση συσκευών και δημιουργία σύνδεσης στο Bluetooth

σκευής στην οποία θέλει να συνδεθεί (έστω B). Τα πακέτα ID που στέλνει η συσκευή A περιέχουν το Device Access Code της B, οπότε δεν συγχέονται με τα ID πακέτα αναζήτησης που περιέχουν το Inquiry Access Code. Η A ξεκινάει τη διαδικασία από τη συχνότητα αυτή όπου πιστεύει πως ακούει η B τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η τιμή αυτή μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια αν είναι γνωστή η τιμή του ρολογιού της B. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι γνωστή από προηγούμενη διαδικασία αναζήτησης, καθώς περιέχεται στο πακέτο FHS με το οποίο απαντάει η B στην A. Αν δεν είναι γνωστή, τότε η συσκευή A επιλέγει τυχαία μια συχνότητα.

Όπως και στη διαδικασία αναζήτησης, η ακολουθία hopping χωρίζεται σε δύο ομάδες των 16 hops. Οι δύο ομάδες ορίζονται βάσει της συχνότητας που ξεκινά η αναζήτηση. Η πρώτη ομάδα hops περιλαμβάνει τις 16 πιο κοντινές συχνότητες στη συχνότητα που ξεκινά η διαδικασία. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τις 16 μακρινότερες. Ο χρόνος που χρειάζεται για να καλυφθεί κάθε ομάδα είναι 1.28sec.

2.3.4.5 Κατάσταση ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης (Page Scan)

Η κατάσταση αυτή μοιάζει με την κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων. Η συσκευή B επιλέγει βάσει του ρολογιού της μια από τις συχνότητες της ακολουθίας hops που αντιστοιχεί

στην διεύθυνση της. Στη συχνότητα αυτή περιμένει για τυχόν πακέτα από κάποια συσκευή που θέλει να συνδεθεί μαζί της για διάστημα ισοδύναμο με 16 hops. Η συχνότητα στην οποία περιμένει αλλάζει κάθε 1.28sec.

Καθώς εδώ τα ID πακέτα από τη διαδικασία αίτησης σύνδεσης απευθύνονται σε μια μόνο συγκεκριμένη συσκευή δεν χρειάζεται το σχήμα random backoff. Αν η συσκευή λάβει ένα ID πακέτο που απευθύνεται σε αυτήν μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας υποτελή.

Το μέγιστο διάστημα μεταξύ δύο περασμάτων από την κατάσταση ανίχνευσης σύνδεσης μπορεί να είναι 0sec (συνεχής ανίχνευση), 1.28sec ή 2.56sec. Ένδειξη για το ποιο μέγιστο διάστημα από τα τρία χρησιμοποιεί η συσκευή B, περιέχεται στο πακέτο FHS που στέλνει αυτή σαν απάντηση σε αναζήτηση.

2.3.4.6 Καταστάσεις χειραψίας κυρίου/υποτελή (Master/Slave Response)

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, πάντα πρώτη η συσκευή B μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας υποτελή. Από την κατάσταση αυτή στέλνει προς τη συσκευή A ένα ίδιο ID πακέτο με αυτό που την έκανε να μπει στην κατάσταση χειραψίας υποτελή.

Αν η A λάβει το πακέτο, τότε μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας κυρίου και στέλνει ένα πακέτο FHS στη συσκευή B. Περιμένει έπειτα ένα πακέτο FHS από τη B. Αν όλα πάνε καλά, οι συσκευές θα μπορέσουν να συγχρονιστούν χρησιμοποιώντας την πληροφορία στα FHS πακέτα και θα περάσουν στην κατάσταση σύνδεσης.

Αν κάποιο από τα πακέτα FHS δεν έρθει μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, κάποιο λάθος έχει συμβεί και η συσκευή που το περιμένει επιστρέφει στην προηγούμενη κατάσταση της.

2.3.4.7 Κατάσταση σύνδεσης (Connection)

Η κατάσταση σύνδεσης προκύπτει μετά από μια επιτυχημένη χειραψία συσκευής-κυρίου και συσκευής-υποτελή. Στην κατάσταση αυτή οι συσκευές που μόλις τελείωσαν επιτυχώς τη χειραψία είναι μέλη του ίδιου μικροδικτύου. Η συσκευή που ήρθε στην κατάσταση σύνδεσης περνώντας από την κατάσταση αίτησης σύνδεσης γίνεται η συσκευή-κύριος, ενώ αυτή που απάντησε στην αίτηση γίνεται συσκευή-υποτακτικός. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση της εναλλαγής ρόλων (role switch).

Όσο μια συσκευή Bluetooth είναι συνδεδεμένη με κάποια άλλη συσκευή, η σύνδεση μπορεί να πάρει μία από τις παρακάτω μορφές.

- Ενεργή (Active mode): Σε μια ενεργή σύνδεση, η συσκευή συμμετέχει ανελλιπώς σε όλες τις επικοινωνίες. Όσο μια συσκευή είναι ενεργή, η συσκευή-κύριος της αναθέτει

μια διεύθυνση ενεργού μέλους (Active Member Address). Η διεύθυνση αυτή περιέχεται στο πεδίο AM_ADDR (μήκος 3bits) των πακέτων που απευθύνονται στη συσκευή. Έτσι αποφεύγεται η ανάγκη να χρησιμοποιείται η πλήρης διεύθυνση της συσκευής (μήκος 48bits) σε κάθε πακέτο που στέλνει ή λαμβάνει. Η αποστολή δεδομένων γίνεται μόνο κατά τη διάρκεια των R_x time (χρονοθυρίδων) ενώ η λήψη των δεδομένων κατά τη διάρκεια των T_x time slots. Φυσικά αν η συσκευή διαπιστώσει πως δεν πρόκειται να συμβεί κάτι που την αφορά για ένα χρονικό διάστημα, μπορεί να μην παρακολουθεί το κανάλι για το διάστημα αυτό.

- Μειωμένων ευθυνών (Sniff mode): Σε μια σύνδεση μειωμένων ευθυνών η συσκευή θεωρείται ενεργό μέλος του μικροδικτύου, δηλαδή διατηρεί τη διεύθυνση ενεργού μέλους της. Δεν υποχρεούται όμως να ακούει σε όλες τις χρονοθυρίδες T_x παρά μόνο σε συγκεκριμένες που είναι τοποθετημένες σε τακτά διαστήματα. Για κάθε τέτοια χρονοθυρίδα θα πρέπει να ακούει το κανάλι για μερικές ακόμα συνεχόμενες χρονοθυρίδες. Στα διαστήματα που δεν παρακολουθεί το κανάλι η συσκευή μπορεί είτε να μένει ανενεργή για εξοικονόμηση ενέργειας, είτε και να συμμετέχει σε κάποιο άλλο μικροδίκτυο[3].
- Σε αναστολή (Hold mode): Μια σύνδεση σε αναστολή διατηρεί τη διεύθυνση ενεργού μέλους της όμως δε δέχεται πακέτα δεδομένων. Το διάστημα που βρίσκεται σε αναστολή συμφωνείται με τη συσκευή-κύριο. Κατά το διάστημα αυτό μπορεί είτε να μένει ανενεργή για εξοικονόμηση ενέργειας ή να ασχοληθεί με χρονοδότες διαδικασίες όπως η αναζήτηση συσκευών.
- Σε στάση (Park mode): Οι συνδέσεις σε στάση δε διατηρούν τη διεύθυνση μέλους τους στο μικροδίκτυο. Αντί αυτής τους ανατίθεται μια διεύθυνση μέλους σε στάση. Η συσκευή μένει συγχρονισμένη με το μικροδίκτυο και περιοδικά επικοινωνεί με τη συσκευή-κύριο για να μπορέσει κάποια στιγμή να ξαναγίνει ενεργό μέλος. Η τοποθέτηση μιας σύνδεσης σε στάση μπορεί να γίνει είτε για εξοικονόμηση ενέργειας, είτε για να ελευθερώσει η συσκευή-κύριος μια διεύθυνση ενεργού μέλους και να μπορέσει να επικοινωνήσει με περισσότερες από 7 συσκευές-υποτακτικούς χωρίς καμία από αυτές να εγκαταλείψει το μικροδίκτυο.

2.4 Λειτουργία επιπέδου L2CAP

Σκοπός του επιπέδου L2CAP είναι:

- η πολυπλεξία λογικών καναλιών πάνω από μια μόνο ζεύξη
- η παροχή δυνατότητας ομαδικής επικοινωνίας
- η κατάτμηση και ανακατασκευή πακέτων για την παροχή μεγαλύτερου MTU στα υψηλότερα επίπεδα
- η παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσιών (QoS)

Πώς επιτυγχάνονται αυτοί οι στόχοι καθώς και μερικές επιπλέον λεπτομέρειες για το L2CAP περιγράφονται αμέσως παρακάτω.

2.4.1 Λογικά κανάλια

Οι μεταδόσεις στα ανώτερα επίπεδα γίνονται χρησιμοποιώντας τα λογικά κανάλια L2CAP. Χαρακτηριστικό των καναλιών L2CAP είναι πως διατηρούν τα όρια των πακέτων που μεταφέρουν. Προσφέρουν δηλαδή υπηρεσία αυτόνομων μηνυμάτων (datagrams) και όχι ροής δεδομένων (stream).

Τα κανάλια που προσφέρονται είναι τόσο κανάλια με σύνδεση (connection oriented) όσο και χωρίς (connectionless). Τα κανάλια διαχωρίζονται μεταξύ τους με τη χρήση προσδιοριστή καναλιού (CID) που αντιστοιχίζεται σε κάθε άκρο ενός καναλιού. Οι προσδιοριστές έχουν μέγεθος 16bit, και οι πρώτοι 64 έχουν δεσμευθεί για ειδικούς σκοπούς, αν και μόνο σε 3 από αυτούς έχει αποδοθεί σημασία.

Τα λογικά κανάλια του L2CAP θεωρούνται αξιόπιστα, δηλαδή πως παραδίδουν τα πακέτα ακέραια και με τη σειρά αποστολής τους. Ωστόσο το L2CAP βασίζεται στο επίπεδο Baseband για να δώσει αυτές τις εγγυήσεις, χωρίς να προσφέρει κάτι παραπάνω από αυτό.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως αν και το επίπεδο Baseband προσφέρει έλεγχο ροής μέσω του FLOW bit στην επικεφαλίδα των πακέτων, τελικά στο επίπεδο L2CAP δεν υπάρχει έλεγχος ροής. Αυτό συμβαίνει γιατί η πληροφορία του FLOW bit δεν “μεταδίδεται” στα επίπεδα πάνω από το Baseband, οπότε μπορούν να συμβούν υπερχειλίσεις σε αυτά.

2.4.2 Ομαδική επικοινωνία

Τα κανάλια χωρίς σύνδεση είναι αυτά που μεταφέρουν την ομαδική επικοινωνία. Για τα κανάλια χωρίς σύνδεση χρησιμοποιείται πάντα ο δεσμευμένος CID 0x0002. Οι ομάδες επικοινωνίας ορίζονται μέσω των αριθμών πολύπλεξης εφαρμογών που περιγράφονται παρακάτω.

2.4.3 Πολυπλεξία σε επίπεδο εφαρμογών

Για να μην εκτίθονται οι CIDs στις εφαρμογές το επίπεδο L2CAP προσθέτει άλλο ένα επίπεδο αφαίρεσης, τους αριθμούς πολύπλεξης εφαρμογών και πρωτοκόλλων ή PSMs (Protocol and Service Multiplexors). Οι PSMs είναι το αντίστοιχο των αριθμών πόρτας του TCP. Η χρήση τους επιτρέπει σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν κανάλια χωρίς σύνδεση (CID=0x0002) να λαμβάνουν μόνο τα πακέτα που τις ενδιαφέρουν.

Οι PSMs πρέπει να είναι περιττοί αριθμοί. Ο περιορισμός αυτός φαίνεται ανούσιος και ήδη αγνοείται από ορισμένες υλοποιήσεις του L2CAP[5].

2.4.4 Κατάτμηση και ανακατασκευή πακέτων

Για την κατάτμηση και ανακατασκευή πακέτων από το L2CAP χρησιμοποιείται ένα πεδίο στην επικεφαλίδα του φορτίου του πακέτου Baseband. Ανάλογα με την τιμή του το πακέτο προσδιορίζεται ως αρχή ή ως συνέχεια ενός L2CAP πακέτου. Τα Baseband πακέτα στα οποία χωρίζεται ένα L2CAP πακέτο μπορεί να διαφέρουν στον τύπο τους (είναι όμως φυσικά πάντα πακέτα δεδομένων).

2.4.5 Ποιότητα υπηρεσιών (QoS)

Τα υψηλότερα επίπεδα μπορούν να ζητήσουν από το L2CAP εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Οι υλοποιήσεις του L2CAP όμως δεν υποχρεούνται να υλοποιήσουν και να προσφέρουν τέτοιες εγγυήσεις. Αν μια εφαρμογή ζητήσει QoS και η τοπική υλοποίηση του L2CAP το υποστηρίζει, τότε γίνεται διαπραγμάτευση με την απομακρυσμένη υλοποίηση κατά τη σύνδεση για να διαπιστωθεί αν μπορεί να εξασφαλιστεί η QoS που ζητά η εφαρμογή.

2.4.6 Παράμετροι σύνδεσης L2CAP

Κατά τη δημιουργία μιας σύνδεσης L2CAP εκτός από την προαιρετική διαπραγμάτευση του QoS, διαπραγματεύονται πάντα το MTU που θα παρέχει το L2CAP και το μέγιστο χρόνο τον οποίο επιχειρείται η σωστή μετάδοση ενός πακέτου L2CAP προτού το πακέτο απορριφθεί (flush timeout). Χρησιμοποιώντας flush timeout διαφορετικό του ∞ το L2CAP μπορεί να προσφέρει μη αξιόπιστες συνδέσεις, πράγμα χρήσιμο για εφαρμογές όπως π.χ. η μεταφορά εικόνας σε πραγματικό χρόνο.

2.5 Προφίλ χρήσης του Bluetooth

Τα προφίλ χρήσης του Bluetooth (Bluetooth profiles) είναι μια σειρά από περιγραφές για το πώς να υλοποιηθούν μια σειρά από υπηρεσίες. Σκοπός τους είναι η διαλειτουργικότητα πρωτοκόλλων επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων σε επίπεδο εφαρμογής. Το Bluetooth SIG έχει εκδώσει λεπτομερείς περιγραφές τους [45, 42, 43] που έρχονται να συμπληρώσουν τη βασική περιγραφή του Bluetooth[44].

2.5.1 Προφίλ BNEP

Το προφίλ BNEP[42] (Bluetooth Network Encapsulation Protocol) περιγράφει έναν πρότυπο τρόπο για την ενθυλάκωση πακέτων άλλων πρωτοκόλλων σε πακέτα L2CAP και τη μεταφορά τους πάνω από Bluetooth. Από την αρχή κύριος στόχος του ήταν η ενθυλάκωση και μεταφορά Ethernet frames, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και με άλλα πρωτόκολλα. Για το λόγο αυτό σαν ελάχιστη L2CAP MTU που χρειάζεται να δουλέψει, ορίστηκαν τα 1691byte, που προκύπτουν αθροίζοντας το μέγιστο μέγεθος ενός Ethernet frame με το μέγεθος των επικεφαλίδων που χρειάζονται για την ενθυλάκωση.

2.5.2 Προφίλ PAN

Το προφίλ PAN[43] περιγράφει πως δύο ή περισσότερες συσκευές Bluetooth μπορούν να σχηματίσουν ένα ad-hoc δίκτυο. Επίσης περιγράφει πως ο ίδιος μηχανισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόσβαση σε άλλα δίκτυα μέσω κάποιου σημείου πρόσβασης τους (network access point).

Η ονομασία “PAN” μπορεί να θεωρηθεί παραπλανητική, καθώς οι υπηρεσίες αυτές αντιστοιχούν ευθέως με τις υπηρεσίες δικτύου που προσφέρει η τεχνολογία WiFi, δηλαδή υπηρεσίες Wireless LAN. Η περιγραφή του θέτει ρητά τα ad-hoc TCP/IP δίκτυα σαν σκοπό της ύπαρξης του προφίλ PAN. Για να διευκολυνθεί η χρήση υπαρχόντων υλοποιήσεων TCP/IP, στο επίπεδο PAN οι συσκευές ανταλλάσσουν Ethernet frames χρησιμοποιώντας το BNEP για την ενθυλάκωση τους σε Bluetooth πακέτα.

Επισκόπηση περιοχής

Οι κύριες διαφοροποιήσεις στις ερευνητικές εργασίες σχετικές με τα δίκτυα προσωπικής περιοχής βασισμένα στο Bluetooth (ΔΠΠ Bluetooth) αφορούν κυρίως τη χρήση ή όχι των scatternets. Η χρήση των scatternets επιβάλλεται κυρίως από την ανάγκη να επικοινωνούν περισσότερες από 8 συσκευές ταυτόχρονα. Οι εργασίες που αναγνωρίζουν την ανάγκη αυτή ως επιτακτική, εστιάζουν στην εύρεση τρόπων για τη συγκρότηση και τη λειτουργία των scatternets, καθώς αυτά είναι ελλιπώς ορισμένα από το Bluetooth SIG. Όσες εργασίες δεν επικεντρώνονται στη χρήση των scatternets, ασχολούνται με τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας στα μικροδίκτυα. Η βελτιστοποίηση αυτή είναι αναγκαία γιατί τα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν ένα μοναδικό κανάλι και συνεπώς έχουν σταθερό εύρος ζώνης διαθέσιμο, ανεξάρτητα από τον αριθμό των συσκευών που συμμετέχουν.

3.1 ΔΠΠ Bluetooth και μικροδίκτυα

Οι Miorandi και Zanella στο [33] ασχολούνται με τη βέλτιστη επιλογή της συσκευής κυρίου σε ένα μικροδίκτυο ώστε να ελαχιστοποιείται η καθυστέρηση των πακέτων. Δεδομένου ενός πίνακα με τη μέση κυκλοφορία πακέτων μεταξύ κάθε ζεύγους συσκευών, υπολογίζουν μια αναλυτική έκφραση που δίνει ποια συσκευή πρέπει να έχει το ρόλο του κυρίου για να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση. Η έκφραση αυτή είναι πολύπλοκη στον υπολογισμό και γι' αυτό την προσεγγίζουν με μια απλούστερη έκφραση. Προτείνουν η συσκευή-κύριος να διατηρεί τον πίνακα κίνησης, να επαναυπολογίζει τη βέλτιστη συσκευή περιοδικά και όταν διαπιστώσει πως δεν αποτελεί πια τη βέλτιστη συσκευή-κύριο να ζητάει αλλαγή ρόλου με τη νέα βέλτιστη συσκευή. Η προσέγγιση τους, αν και ενδιαφέρουσα, πιθανό να έχει προβλήματα σε περιβάλλον ΔΠΠ λόγω των περιορισμένων πόρων των συσκευών. Μπορεί να

αποτελέσει πάντως τη βάση για την αρχική δημιουργία ενός βέλτιστου μικροδικτύου.

Η απόδοση των ΔΠΠ Bluetooth βασισμένα σε μικροδίκτυα περιορίζεται από την αυστηρή τοπολογία αστέρα των μικροδικτύων, καθώς τα δεδομένα που ανταλλάσσουν οι υποτελείς πρέπει να δρομολογηθούν μέσω της συσκευής κυρίου με αποτέλεσμα να απαιτούνται διπλάσιες χρονοθυρίδες για τη μεταφορά. Οι Cordeiro et al. στο [8] προτείνουν ένα σχήμα που επιτρέπει σε δύο υποτελείς να επικοινωνήσουν απευθείας. Για να γίνει η απευθείας επικοινωνία εισάγουν τις χρονοθυρίδες από υποτελή σε υποτελή (slave to slave slot). Οι χρονοθυρίδες αυτές δεσμεύονται δυναμικά από τη συσκευή-κύριο μετά από αίτηση ενός ενδιαφερόμενου υποτελή. Η συσκευή-κύριος, αφού δεσμεύσει τις χρονοθυρίδες, ενημερώνει τους υποτελείς για το πρόγραμμα των προσεχών χρονοθυρίδων. Το σχήμα, όπως ήταν αναμενόμενο, σχεδόν διπλασιάζει τη χρήσιμη πληροφορία που μπορεί να μεταδοθεί στη μονάδα του χρόνου (goodput) καθώς και μειώνει σχεδόν στο μισό την καθυστέρηση στην παραλαβή των πακέτων. Ακόμη, εμμέσως το σχήμα τους διευκολύνει την πιο αποδοτική λειτουργία των scatternets, καθώς κατά τη διάρκεια των χρονοθυρίδων από υποτελή σε υποτελή η συσκευή κύριος είναι ελεύθερη να συμμετάσχει σε κάποιο άλλο μικροδίκτυο χωρίς να υπάρξει κανένα επιπλέον κόστος καθυστέρησης λόγω της απουσίας του. Τα θετικά του σχήματος πάντως μάλλον θα παραμείνουν σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς αποτελεί ριζοσπαστική αλλαγή στην τωρινή περιγραφή του Bluetooth και πολύ δύσκολα θα υιοθετηθεί επίσημα.

Οι Kalia et al. στο [24] συγκρίνουν με τη χρήση προσομοίωσης τις επιδόσεις ενός σχηματισμού μικροδικτύου με σχηματισμούς scatternet με ίδιο αριθμό κόμβων. Τα αποτελέσματα τους δείχνουν πως η χρήση scatternets διπλασιάζει την διαπερατότητα (throughput) και μειώνει στο ένα τρίτο τις καθυστερήσεις. Τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα της χρήσης των scatternets.

Ο M. Leopold στο [28] πραγματοποιεί μια σειρά απλών πειραμάτων μεταξύ δύο συσκευών. Τα πειράματα αφορούν την ταχύτητα ανακάλυψης των συσκευών και τη μέγιστη διαπερατότητα που επιτυγχάνεται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα περιβάλλοντα ΔΠΠ παρουσιάζει η μελέτη που γίνεται για το πώς επηρεάζεται η ανακάλυψη συσκευών και η μέγιστη διαπερατότητα από την απόσταση μεταξύ δύο συσκευών. Τα πειράματα έδειξαν πως η ταχύτητα ανακάλυψης των συσκευών δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την απόσταση των συσκευών. Αντίθετα η μέγιστη διαπερατότητα φάνηκε να επηρεάζεται πολύ από την απόσταση των συσκευών. Συγκρίνοντας συνδέσεις που χρησιμοποιούν τους δύο “ακραίους” τύπους πακέτων, *DM1* και *DH5*, η σύνδεση που χρησιμοποιεί τον πρώτο τύπο πακέτων παρουσίασε μεγαλύτερη σταθερότητα καθώς η απόσταση αυξάνει, παραμένοντας όμως πιο αργή στις περισσότερες περιπτώσεις. Ο Leopold πραγματοποίησε τα διάφορα πειράματα και σε περιβάλλον προσομοίωσης. Τελικά φάνηκε πως υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που αναμένονταν βάσει των προδιαγραφών του Bluetooth, των αποτε-

λεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση και τα αποτελέσματα που τελικά μετρήθηκαν με τη χρήση πραγματικών συσκευών. Για παράδειγμα ενώ η θεωρητική μέγιστη διαπερατότητα που επιτυγχάνει το Bluetooth με πακέτα *DH5* είναι *723.2kbps*, η μέγιστη διαπερατότητα που μετρήθηκε μεταξύ δύο πραγματικών συσκευών ήταν *424kbps*, ενώ με τις προσομοιώσεις μετρήθηκε *375kbps*. Αυτό δείχνει πως η έρευνα πάνω στο Bluetooth θα πρέπει να δώσει μεγαλύτερη έμφαση σε πραγματικά πειράματα και να μην περιορίζεται μόνο στην προσομοίωση και τη θεωρητική μελέτη.

3.2 ΔΠΠ Bluetooth βασισμένα σε scatternets

Οι Johansson et al. [20] αναγνωρίζουν την ανάγκη ανάπτυξης ΔΠΠ και τον κεντρικό ρόλο που θα έχει η τεχνολογία Bluetooth σε αυτά. Θεωρούν πως τα ΔΠΠ Bluetooth θα στηρίζονται στη δημιουργία και λειτουργία των scatternets. Αναγνωρίζοντας τον ελλιπή ορισμό των scatternets στην περιγραφή του Bluetooth θεωρούν σαν κύριους τομείς έρευνας για τα ΔΠΠ Bluetooth :

- την ανάπτυξη αλγορίθμων και μηχανισμών που να καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας των scatternets, δηλαδή με ποιο τρόπο γίνεται ο χρονοπρογραμματισμός της παρουσίας μιας συσκευής στα μικροδίκτυα στα οποία συμμετέχει.
- την ανάπτυξη αλγορίθμων σχηματισμού scatternets καθώς επίσης και τη διερεύνηση της συμπεριφοράς διαφόρων τοπολογιών.
- την ανάπτυξη αλγορίθμων δρομολόγησης για scatternets.

Θα παρουσιάσουμε παρακάτω την δουλειά που έχει γίνει έως τώρα σε καθέναν από τους τομείς αυτούς.

3.2.1 Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού για scatternets

Οι Johansson et al. στο [20] εξετάζουν τα χαρακτηριστικά μιας οικογένειας αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για scatternets (Scatternet Scheduling Algorithms) που βασίζονται στα σημεία ραντεβού (rendezvous points). Οι περισσότεροι από τους αλγορίθμους που έχουν προταθεί ανήκουν σε αυτήν την οικογένεια. Ένα σημείο ραντεβού είναι μια χρονοθυρίδα όπου η συσκευή-κύριος ενός μικροδικτύου και μια συσκευή-υποτελής που μετέχει και σε άλλα μικροδίκτυα έχουν συμφωνήσει να “συναντηθούν” και να επικοινωνήσουν. Οι αλγόριθμοι αυτής της οικογένειας διαφοροποιούνται μεταξύ τους στον τρόπο επιλογής του σημείου ραντεβού και στη διάρκεια του ραντεβού και φυσικά στον τρόπο που υλοποιούν τα

ραντεβού. Οι συγγραφείς καταλήγουν πως οι αλγόριθμοι που επιβάλλουν συνέπεια στα ραντεβού δίνουν καλύτερες εγγυήσεις για την καθυστέρηση στην κυκλοφορία, ενώ αυτοί που επιτρέπουν “στήσιμο” στο ραντεβού προσαρμόζονται καλύτερα στην κυκλοφορία.

Οι Baatz et al. στο [2] περιγράφουν ένα σχήμα υλοποίησης scatternets με σημεία ραντεβού, που χρησιμοποιεί την κατάσταση σύνδεσης περιορισμένων ευθυνών (sniff mode). Το σχήμα τους επιτρέπει στις συσκευές να μην παρουσιαστούν στο σημείο του ραντεβού. Οι συσκευές αυτόνομα αποφασίζουν για την παρουσία τους ή όχι στα σημεία των ραντεβού χρησιμοποιώντας μονάδες πίστωσης. Για κάθε χρονοθυρίδα παρουσίας σε ένα μικροδίκτυο, χρεώνεται μια μονάδα. Αν ένα μικροδίκτυο είναι “πλουσιότερο” από το ενεργό μικροδίκτυο, τότε μπορεί να γίνει αυτό ενεργό για να παρουσιαστεί στο σημείο ραντεβού του. Οι μονάδες που πληρώνονται και αυτές που δε χρησιμοποιούνται αναδιανέμονται για να υπάρξει ισότητα. Οι ίδιοι στο [3] βελτιώνουν το σχήμα, αυξάνοντας εκθετικά το χρόνο μεταξύ των ραντεβού που αφορούν ένα μικροδίκτυο αν το μικροδίκτυο δεν έχει κίνηση.

Οι προδιαγραφές του Bluetooth ορίζουν πως αν μια συσκευή δεν “παρουσιαστεί” τη στιγμή που ορίστηκε κατά την είσοδο της σε κάποια κατάσταση σύνδεσης χαμηλής κατανάλωσης (βλέπε ενότητα 2.3.4.7), τότε η άλλη συσκευή μπορεί να θεωρηθεί πως η σύνδεση διακόπηκε. Συνεπώς, σχήματα όπως των Baatz et al. που χρησιμοποιούν τις υπάρχουσες καταστάσεις σύνδεσης χαμηλής κατανάλωσης για τον καθορισμό των σημείων ραντεβού, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν να μην τηρούνται τα ραντεβού απαιτούν αλλαγή της σημασιολογίας των καταστάσεων αυτών για να δουλέψουν. Για το λόγο αυτό οι N. Johannson et al. στο [18] προτείνουν μια νέα κατάσταση σύνδεσης χαμηλής κατανάλωσης που ονομάζουν κατάσταση JUMP. Στην κατάσταση JUMP οι συσκευές που συμμετέχουν σε πολλά μικροδίκτυα χωρίζουν το χρόνο τους σε ψευδοτυχαία διαστήματα που ονομάζονται RV-windows (rendezvous windows). Οι συσκευές-κύριοι υποχρεούνται να ελέγχουν στην αρχή κάθε RV-windows της συσκευής-υποτελή αν αυτή βρίσκεται στο μικροδίκτυο που ελέγχουν. Αν “παρουσιαστεί” η συσκευή, θεωρούν πως αυτή θα συμμετέχει στο μικροδίκτυο τους μέχρι το επόμενο RV-window. Διαφορετικά θεωρούν πως η συσκευή δεν υπάρχει στο μικροδίκτυο για το διάστημα αυτό. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες καταστάσεις σύνδεσης χαμηλής ενέργειας, η κατάσταση JUMP θεωρεί πως η συσκευή δε θα εμφανιστεί τη στιγμή που ορίστηκε. Η κατάσταση JUMP παρέχει ένα μηχανισμό για την υλοποίηση των scatternets χωρίς να επιβάλει το πώς θα χρησιμοποιηθεί αυτός, πώς δηλαδή θα επιλέγουν οι συσκευές σε πιο μικροδίκτυο θα παρουσιαστούν.

Για να μπορέσουν να υλοποιηθούν scatternets χωρίς τη χρήση κάποιας κατάστασης σύνδεσης χαμηλής κατανάλωσης, οι Rao et al. στο [39] χωρίζουν το χρόνο σε διαστήματα των 14 χρονοθυρίδων και προτείνουν οι συσκευές-κύριοι να αποφασίζουν στο τέλος κάθε τέτοιου διαστήματος σε ποιον υποτελή θα απευθυνθούν σε κάθε μια από τις 14 επόμενες

χρονοθυρίδες. Έτσι κάθε συσκευή που συμμετέχει σε πολλά μικροδίκτυα θα μπορεί να ενημερώνει τη συσκευή-κύριο του κάθε μικροδικτύου για τις δεσμεύσεις που έχει στα άλλα μικροδίκτυα ώστε η συσκευή να μην πρέπει να είναι ποτέ παρούσα σε δύο μικροδίκτυα ταυτόχρονα. Ωστόσο η ιδέα αυτή δεν αναλύεται περισσότερο.

Οι εργασίες που παρουσιάστηκαν ως εδώ έχουν σε μεγάλο βαθμό εκπονηθεί έχοντας κατά νου scatternets μεγάλης κλίμακας. Τα scatternets μεγάλης κλίμακας έχουν από λόγο ύπαρξης σε κατανεμημένα δίκτυα αισθητήρων (distributed sensor networks), είναι όμως μάλλον δύσκολο να εμφανιστούν σε περιβάλλοντα ΔΠΠ. Με το σκεπτικό αυτό οι Har-Shai et al. στο [15] προτείνουν ένα απλούστερο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού για μικρής κλίμακας scatternets. Ο αλγόριθμος τους στηρίζεται στην κατάσταση σύνδεσης σε αναστολή (hold mode) και αποτιμά μια έκφραση για να αποφασίζει πότε και σε ποιο μικροδίκτυο πρέπει να μεταβεί μια συσκευή. Η έκφραση αποτιμάται ξεχωριστά για κάθε μικροδίκτυο που μετέχει η συσκευή και το αποτέλεσμα της εξαρτάται από τον όγκο δεδομένων που έχει αυτή στην ουρά για αυτό. Σε κάθε μετάβαση η έκφραση δίνει ένα χρόνο για τον οποίο η συσκευή δεσμεύεται πως θα παραμείνει στο νέο μικροδίκτυο. Πριν τη μετάβαση η συσκευή ζητάει από τη συσκευή-κύριο του μικροδικτύου που εγκαταλείπει, να θέσει τη σύνδεση τους σε αναστολή για το διάστημα δέσμευσης. Για να αποφευχθεί η σπατάλη χρονοθυρίδων εξαιτίας συχνών αλλαγών μικροδικτύων καθώς και οι μεγάλες καθυστερήσεις εξαιτίας μακράς παραμονής σε ένα μικροδίκτυο, η έκφραση προβλέπει ένα άνω και ένα κάτω όριο στους χρόνους παραμονής. Σε μετρήσεις που έκαναν έδειξαν πως ο αλγόριθμος αυτός, υπερτερεί ελαφρώς ενός δικού τους αλγορίθμου βασισμένου στην κατάσταση μειωμένων ευθυνών (sniff mode) ο οποίος ήταν βελτιστοποιημένος για μικρά scatternets.

3.2.2 Τοπολογίες και αλγόριθμοι σχηματισμού για scatternets

3.2.2.1 Μη-κανονικές τοπολογίες

Οι Salonidis et al. στα [40, 41] παρατηρούν πως η ασύμμετρη διαδικασία αναζήτησης συσκευών του Bluetooth δεν ταιριάζει καλά στις περιπτώσεις αμοιβαίας σύνδεσης. Ως τέτοιο παράδειγμα αναφέρουν ένα σενάριο όπου πολλοί χρήστες πατούν ένα κουμπί στις συσκευές, τους περιμένοντας αυτές να ανακαλύψουν η μια την άλλη και να σχηματίσουν ένα συνδεδεμένο δίκτυο scatternet. Για την εξυπηρέτηση τέτοιων σεναρίων προτείνουν μια συμμετρική διαδικασία αναζήτησης, που βασίζεται στην εναλλαγή για τυχαία¹ διαστήματα μεταξύ των καταστάσεων αναζήτησης και ανίχνευσης αναζήτησης. Προτείνουν έπειτα έναν αλγόριθμο για το σχηματισμό scatternets, που χρησιμοποιεί αυτή τη διαδικασία. Ο αλγόριθ-

¹ Αν η εναλλαγή γίνεται με ντετερμινιστικό τρόπο, υπάρχει περίπτωση να μην επιτευχθεί ποτέ η σύνδεση.

μος τους υποστηρίζει μέχρι 8 μικροδίκτυα δουλεύει σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση εκλέγεται μια συσκευή συντονιστής. Η εκλογή έχει τη μορφή δυαδικού δένδρου με “αναμετρήσεις” κόμβων ανά δύο. Ταυτόχρονα με την εκλογή συγκεντρώνονται και προωθούνται προς το συντονιστή τα πακέτα FHS όλων των συσκευών. Στη δεύτερη φάση ο συντονιστής επιλέγει κεντρικά το ρόλο κάθε συσκευής και επικοινωνεί με τις συσκευές που θα παίξουν το ρόλο του κυρίου ενημερώνοντας αυτές για τους υποτελείς τους. Ο τρόπος που γίνεται η επιλογή των ρόλων δεν καθορίζεται στις εργασίες [40, 41]. Στην τρίτη φάση το μικροδίκτυο που δημιουργήθηκε για την ενημέρωση των συσκευών-κυρίων διαλύεται και σχηματίζονται τα τελικά μικροδίκτυα σύμφωνα με τις αποφάσεις του συντονιστή. Μετρήσεις σε περιβάλλον προσομοίωσης έδειξαν πως ο χρόνος εκτέλεσης είναι υπογραμμικός και κυμαίνεται μεταξύ 1sec και 6sec ανάλογα με τον αριθμό συσκευών και το σε πόσο διάστημα “φτάνουν” όλες οι συσκευές.

Οι Law et al. στα [27, 26] παρουσιάζουν ένα αλγόριθμο κατασκευής scatternet που λειτουργεί κατανεμημένα. Ο αλγόριθμος κατασκευάζει το τελικό scatternet συγχωνεύοντας “κομμάτια” ανά δύο σε κάθε φάση. Κάθε “κομμάτι” μπορεί να είναι μικροδίκτυο, scatternet ή ανεξάρτητος κόμβος. Τα “κομμάτια” συμπληρώνονται με κόμβους σε κάθε φάση μέχρι να σχηματιστεί ένα μικροδίκτυο k συσκευών. Τα μικροδίκτυο k συσκευών δεν αλλάζουν, παρά μόνο συνδέονται με άλλα μικροδίκτυα. Η επιλογή των “κομματιών” που συγχωνεύονται γίνεται με τυχαίο τρόπο. Τελικά όμως, όπως αποδεικνύεται αναλυτικά, το scatternet που σχηματίζεται έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από το k που ορίστηκε και από τον αριθμό των συσκευών n που μετέχουν. Επίσης οι συγγραφείς αποδεικνύουν αναλυτικά και με μετρήσεις πως ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται σε $O(\log n)$ βήματα με $O(kn)$ μηνύματα συνολικά. Δεν μελετάται όμως η συμπεριφορά των scatternets που κατασκευάζονται κατά τη λειτουργία τους.

3.2.2.2 Δενδρικές τοπολογίες

Οι Zaruba et al. στο [50] παρουσίασαν πρώτοι την ιδέα να δομηθούν τα scatternets σε δενδρική μορφή και προτείνουν δύο αλγόριθμους για να γίνει αυτό. Ο πρώτος αλγόριθμος χτίζει το δενδρικό scatternet ξεκινώντας από τη συσκευή-ρίζα και προσθέτοντας συσκευές ανά επίπεδα. Ο δεύτερος αλγόριθμος δημιουργεί ταυτόχρονα πολλά μικρότερα δενδροειδή scatternets τα οποία έπειτα συγχωνεύονται. Χαρακτηριστικό της τοπολογίας που προκύπτει από τους δύο αλγόριθμους είναι πως η σχέση πατέρα-παιδιού στην δενδρική τοπολογία αντιστοιχεί σε μια σχέση κυρίου-υποτελή σε ένα Bluetooth μικροδίκτυο. Προτείνουν η δρομολόγηση να γίνεται με τη διατήρηση σε κάθε κόμβο πληροφορίας για το ποιοι κόμβοι βρίσκονται κάτω από αυτόν, οπότε να ξέρει πού θα πρέπει να προωθήσει κάθε πακέτο ώστε

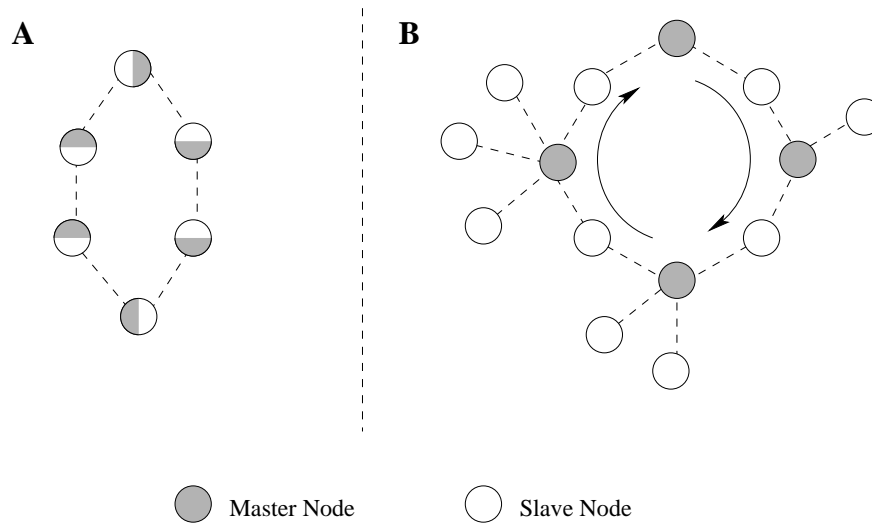
αυτό να φτάσει στον προορισμό του.

Οι Tan et al. παρουσιάζουν στα [47, 48, 46] έναν αλγόριθμο σχηματισμού δενδρικών scatternets. Ο αλγόριθμος τους λειτουργεί κατανεμημένα χωρίς κανένα κεντρικό έλεγχο και επιτρέπει άφιξη και αναχώρηση των συσκευών οποιαδήποτε στιγμή. Ο αλγόριθμος λειτουργεί κατασκευάζοντας δενδρικά scatternets όλο και μεγαλύτερου μεγέθους και ενώνοντας τα σε μεγαλύτερα. Η συσκευή που ενώνει τα scatternets επιλέγεται τυχαία, όμως μια συσκευή που ήδη λειτουργεί σαν κύριος ενός μικροδικτύου μπορεί να μεταβιβάσει την υποχρέωση σε έναν από τους υποτελείς του. Αυτό μπορεί να συνεχιστεί αναδρομικά μέχρι να φτάσουμε σε κάποιο “φύλλο” του δένδρου, δηλαδή μια συσκευή-υποτελή που δε θα λειτουργεί και σαν συσκευή-κύριος. Συγκρίνοντας τους γύρους εκτέλεσης του αλγόριθμού τους με αυτούς των αλγόριθμων στα [41, 27] προέκυψε πως είναι ελαφρά καλύτερος από τον πρώτο και παρασάγγας από το δεύτερο. Αν και δεν ασχολούνται με τη δρομολόγηση, αυτή σίγουρα μπορεί να γίνει με τον τρόπο που πρότειναν οι Zaruba et al.

3.2.2.3 Τοπολογίες δακτυλίου

Οι Guerin et al. μελετώντας το πρόβλημα του σχηματισμού των scatternets στο [13], έδειξαν πως αν N συσκευές ανταλλάσσουν ανά δύο δεδομένα (επικοινωνία $N \times N$) με τον ίδιο ρυθμό, η μέγιστη διαπερατότητα για μια γραμμική ή κυκλική τοπολογία επιτυγχάνεται με 2 συσκευές ανά μικροδίκτυο. Στην ίδια εργασία προτείνουν και δοκιμάζουν σε περιβάλλον προσομοίωσης ένα απλό αλγόριθμο σχηματισμού scatternets με κατανεμημένη λειτουργία. Αν και ο αλγόριθμός τους αποδείχθηκε ανεπαρκής γιατί παρήγαγε μη συνδεδεμένες τοπολογίες στις περισσότερες περιπτώσεις, προέκυψε σαν γενικό συμπέρασμα πως η συμπεριφορά των αλγόριθμων εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο κατανομής των συσκευών στο χώρο.

Οι Foo και Chua στο [11] μελετούν παραπέρα την ιδέα των scatternets σε σχήμα δακτυλίου. Προτείνουν όλοι οι κόμβοι στο δακτύλιο να έχουν διπλό ρόλο, δηλαδή να δρουν σε ένα μικροδίκτυο ως κύριοι και σε ένα ως υποτελείς όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.1. Αναφέρουν πως η τοπολογία δακτυλίου πλεονεκτεί των δενδρικών τοπολογιών σε αξιοπιστία (δύο διαδρομές μεταξύ κάθε ζεύγους συσκευών) και σε απλότητα δρομολόγησης δεδομένων, μειονεκτεί όμως σε καθυστέρηση μετάδοσης, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών. Συγκρίνοντας την τοπολογία δακτυλίου με την τοπολογία που παράγεται από τον αλγόριθμο των Law et al. στα [27, 26], βρίσκουν πως ο αλγόριθμος τους υπερτερεί σε χωρητικότητα και καθυστέρηση μετάδοσης για scatternets μέχρι 120 συσκευές. Παρουσιάζουν επίσης ένα αλγόριθμο σχηματισμού scatternets σε σχήμα δακτυλίου που έχει επιδόσεις ανάλογες με του αλγορίθμου των Law et al.



Σχήμα 3.1: Scatternets σε σχήμα δακτυλίου

Οι Lin et al. στο [30] διερευνούν μια πιο χαλαρή τοπολογία δακτυλίου, που σχηματίζεται από συσκευές κυρίου και συσκευές-υποτελείς, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος 3.1. Καθορίζουν η προώθηση των δεδομένων να γίνεται προς μια μόνο κατεύθυνση. Προτείνουν την αρχική δημιουργία του δακτυλίου με ένα κεντρικοποιημένο σχήμα, όπου για την ακριβή τοπολογία αποφασίζει μια συσκευή-συντονιστής, που εκλέγεται με τον τρόπο που περιγράφεται στο [41]. Για τις περιπτώσεις που “σπάει” ο δακτύλιος, προτείνουν μια διαδικασία επανασύνδεσης του, ενώ ταυτόχρονα η λειτουργία του συνεχίζεται αντιστρέφοντας τη φορά προώθησης. Σύγκριναν τέλος την τοπολογία που προτείνουν με ένα μικροδίκτυο που χρησιμοποιεί την κατάσταση σύνδεσης σε στάση (park mode) και ένα scatternet με τοπολογία αστέρα (δηλαδή ένα “μικροδίκτυο” από μικροδίκτυα). Χρησιμοποιώντας από 1 έως 16 συνδέσεις, προέκυψε πως η τοπολογία δακτυλίου επιτυγχάνει πάντα μεγαλύτερη διαπερατότητα. Όσον αφορά τις καθυστερήσεις το μικροδίκτυο υπερτερεί όσο για λιγότερες από 8 συνδέσεις, ενώ για 8-16 συνδέσεις ο δακτύλιος είναι αυτός που παρουσιάζει μικρότερες καθυστερήσεις.

3.2.3 Δρομολόγηση σε scatternets

Οι κυρίως προσεγγίσεις που υπάρχουν για τη δρομολόγηση σε scatternets είναι δύο. Η πρώτη δε λαμβάνει υπ’ όψιν την τοπολογία των scatternets και προσπαθεί να χρησιμοποιήσει γενικούς αλγόριθμους δρομολόγησης, δανεισμένους κυρίως από τον ευρύτερο τομέα των Mobile AdHoc Networks. Η δεύτερη προσέγγιση προτείνει ταυτόχρονα συγκεκριμένες τοπολογίες για τα scatternets και αλγόριθμους δρομολόγησης που δουλεύουν βάσει της το-

πολογίας αυτής. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε γενικούς αλγόριθμους δρομολόγησης καθώς όσοι αφορούν συγκεκριμένες τοπολογίες παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα μαζί με τις τοπολογίες αυτές.

Οι πιο χαρακτηριστικοί από τους αλγόριθμους δρομολόγησης για Mobile AdHoc Networks είναι οι Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV)[35], Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)[36] και Dynamic Source Routing (DSR)[22, 23]. Η συμπεριφορά των αλγόριθμων αυτών μελετάται εκτενώς στην εργασία [21] των Johansson et al.

Οι αλγόριθμοι DSDV και AODV λειτουργούν δημιουργώντας ιδεατές διαδρομές πάνω από τις οποίες περνούν τα πακέτα. Για τη διατήρηση των διαδρομών αυτών οι κόμβοι πρέπει να τηρούν πίνακες δρομολόγησης. Η διαφορά τους έγκειται κυρίως στο ότι ο DSDV δρα “προληπτικά” (proactively) φροντίζοντας να διατηρεί διαδρομές έστω και αν αυτές δε χρησιμοποιούνται, ενώ ο AODV δρα “αναδραστικά” (reactively) διατηρώντας μόνο τις διαδρομές οι οποίες χρησιμοποιούνται και δημιουργώντας νέες κατ’ ανάγκη. Εξαρχής η τήρηση πινάκων δρομολόγησης δεν ταιριάζει σε περιβάλλοντα ΔΠΠ όπου οι πόροι των κόμβων μπορεί να είναι περιορισμένοι. Επιπλέον οι Johansson et al. μέτρησαν ότι ο DSDV δεν προσαρμόζεται καλά σε κινητικότητα των κόμβων ενώ ο AODV έχει μεγάλο επιπλέον κόστος σε πακέτα (packet overhead) εξαιτίας των μηνυμάτων ελέγχου που ανταλλάσσουν οι κόμβοι. Για τους λόγους αυτούς οι αλγόριθμοι DSDV και AODV δεν έχουν καν εξεταστεί (από όσο γνωρίζουμε) για χρήση σε Bluetooth scatternets.

Ο αλγόριθμος DSR έπειτα, βασίζεται στην ανακάλυψη διαδρομών προς τη συσκευή προορισμού και την καταγραφή σε κάθε πακέτο της διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει μέχρι τον προορισμό του. Δηλαδή ο αλγόριθμος έχει κάποιο κόστος ανά πακέτο που μεταδίδεται.

Οι Bhagwat και Segall στο [4] προτείνουν τον αλγόριθμο Routing Vector Method (RVM) που είναι μια προσαρμογή του DSR για Bluetooth scatternets. Προτείνουν ο RVM να υλοποιηθεί κάτω από το επίπεδο L2CAP, οπότε το κόστος ανά πακέτο θα επιβαρύνει τα baseband πακέτα. Δεδομένου όμως πως τα πακέτα baseband μπορεί να είναι πολύ μικρά, βλέπε πίνακα 2.2, το κόστος είναι δυσβάσταχτο. Προτείνουν λοιπόν την ανάθεση μιας 3bit διεύθυνσης σε κάθε μικροδίκτυο και τη χρησιμοποίηση των διευθύνσεων αυτών για τη δρομολόγηση. Έτσι το τελικό επιπλέον κόστος ανά πακέτο μειώνεται στα 6bits ανά βήμα διαδρομής (3 για τη διεύθυνση του μικροδικτύου και 3 για άλλη πληροφορία) έναντι των 51bits που θα χρειαζόνταν διαφορετικά.

Οι Choi και Choi στο [7] ακολουθούν σχεδόν όμοια προσέγγιση, μόνο που προτείνουν τη χρήση των διευθύνσεων ενεργού μέλους, για να κωδικοποιηθεί με συμπαγή τρόπο η διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει ένα πακέτο. Η λύση αυτή όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε στατικά scatternets καθώς η συσκευή-κύριος μπορεί να αλλάξει τις διευθύνσεις

ενεργού μέλους των υποτελών του.

Οι Prabhu και Chockalingam στο [37] παρουσιάζουν επίσης μια παραλλαγή του DSR η οποία ταιριάζει καλύτερα σε περιβάλλοντα ΔΠΠ όπου οι συσκευές πολύ πιθανό να έχουν περιορισμένη ενέργεια διαθέσιμη. Προτείνουν λοιπόν μεταξύ εναλλακτικών διαδρομών προς ένα προορισμό, να επιλέγεται αυτή που θα χρησιμοποιηθεί βάσει της διαθέσιμης ενέργειας κατά μήκος της και όχι από το μήκος της, όπως γίνεται συνήθως.

3.3 Σύνοψη σχετικής δουλειάς

Η δουλειά σχετική με δίκτυα προσωπικής περιοχής βασισμένα σε Bluetooth που έχει γίνει μέχρι σήμερα εστιάζει κυρίως σε μεγάλης κλίμακας scatternets. Η χρήση αποκλειστικά μικροδικτύων θεωρείται γενικά πολύ περιοριστική και αναφέρεται κυρίως σα μέτρο σύγκρισης [24]. Η επικέντρωση σε μεγάλης κλίμακας scatternets γίνεται κυρίως για να τονιστεί η κλιμακωσιμότητα των λύσεων που προτείνονται. Τελικά οι λύσεις που προτείνουν οι διάφορες εργασίες μπορούν μεν σε μεγάλο βαθμό να δουλέψουν και σε περιβάλλοντα ΔΠΠ, όμως η μη εστίαση σε αυτά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, έχει σαν αποτέλεσμα να μένουν χωρίς απάντηση ή να αντιμετωπίζονται ανεπαρκώς ζητήματα που είναι σημαντικά για τα περιβάλλοντα αυτά. Τέτοια ζητήματα είναι κυρίως η ίαση μιας τοπολογίας και η συνένωση ίδιου τύπου τοπολογιών. Η δουλειά που έχει γίνει πάνω στη συμπεριφορά των μικροδικτύων, επηρεάζει μάλλον έμμεσα τα ΔΠΠ και δείχνει την ανάγκη της χρήσης των scatternets.

Οι προσεγγίσεις των Salonidis et al. [40, 41] και Law et al. [27, 26] εστιάζουν στην εκ του μηδενός δημιουργία τοπολογιών scatternets. Όσον αφορά τα ΔΠΠ οι συσκευές Bluetooth βρίσκονται ενσωματωμένες σε συσκευές που μεταφέρει μαζί του ο χρήστης. Οι συσκευές κάθε χρήστη αποτελούν από μόνες τους μια συνδεδεμένη τοπολογία, οπότε είναι πολύ πιο σημαντικό να καθοριστεί πώς συγχωνεύονται δύο τοπολογίες, παρά να βρεθεί τρόπος για τη δημιουργία τους εκ του μηδενός. Επίσης δεν περιγράφουν ικανοποιητικούς τρόπους ίασης της τοπολογίας.

Η πρόταση των Zaruba et al. [50] για τη δημιουργία δενδρικών scatternets πάσχει επίσης από παρόμοια προβλήματα. Οι Tan et al. [47, 48, 46] λύνουν σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα αυτά, μια και προτείνουν τρόπους αυξητικής (incremental) δημιουργίας της τοπολογίας καθώς και μεθόδους ίασης. Οι λύσεις όμως που παρουσιάζουν για την ίαση της τοπολογίας δεν είναι προσαρμοσμένες στα ΔΠΠ και το μοντέλο βλαβών σε αυτά. Επίσης γενικά η δρομολόγηση σε δενδροειδείς τοπολογίες απαιτεί μηχανισμούς δυσανάλογα πολύπλοκους με το μέγεθος που πρακτικά έχουν τα ΔΠΠ. Οι Tan et al. [47, 48, 46] δεν ασχολούνται με τους μηχανισμούς αυτούς ενώ η πρόταση των Zaruba et al. απαιτεί αλλαγές στους πίνακες δρομο-

λόγησης πολλών συσκευών για κάθε αλλαγή στην τοπολογία. Πιο σημαντικό πάντως είναι πως οι “πίνακες” δρομολόγησης που απαιτούνται για το σχήμα αυτό θα πρέπει να είναι πολύπλοκοι στη δομή και τον τρόπο ενημέρωσης, καθώς θα πρέπει να αντικατοπτρίζουν τη δενδροειδή δομή της τοπολογίας.

Όσον αφορά τους γενικούς αλγόριθμους δρομολόγησης για scatternets, ο RVM των Bhagwat και Segall [4] αποτελεί σχετικά ικανοποιητική λύση για στατικές διατάξεις. Όμως θα παρουσιάσει προβλήματα σε πιο δυναμικά περιβάλλοντα, καθώς η σχετική αρίθμηση που χρησιμοποιεί για την καταγραφή των διαδρομών στα πακέτα, καθιστά πιθανό να φτάσουν αυτά σε λάθος προορισμό. Επίσης, παρά την προσπάθεια που έγινε για να μειωθεί το κόστος της μεθόδου, αυτή εξακολουθεί να είναι πολύ ακριβή εξαιτίας του ότι δρομολογεί πακέτα baseband. Επειδή τα πακέτα baseband είναι πολύ μικρά, ακόμα και η ελάχιστη επιδάρυνση ανά πακέτο είναι σημαντική. Επίσης, αφού οι αναμεταδόσεις πακέτων στο Bluetooth γίνονται στο επίπεδο baseband, το κόστος της δρομολόγησης θα πληρώνεται ξανά για κάθε πιθανή αναμετάδοση μέχρι το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του.

Οι τοπολογίες δακτυλίου τέλος μπορεί να μην κλιμακώνονται σε μεγάλο αριθμό συσκευών, όμως από τα αποτελέσματα των Foo-Chua[11] και Lin et al.[30] φαίνονται επαρκείς για τα μεγέθη που μπορεί να φτάσουν τα ΔΠΠ(λίγες δεκάδες συσκευών). Επίσης οι τοπολογίες δακτυλίου είναι ελκυστικές γιατί απλοποιούν τη δρομολόγηση. Μέχρι τώρα όμως η δουλειά πάνω σε scatternets σε τοπολογία δακτυλίου έχει επικεντρωθεί σε γενικές διαδικασίες σύνθεσης και ίασης της τοπολογίας. Πιστεύουμε πως αν γίνουν κάποιες υποθέσεις που αφορούν τα ΔΠΠ, η τοπολογία δακτυλίου μπορεί να βελτιωθεί ώστε να αποτελέσει μια καλή λύση για το περιβάλλον αυτό.

Κεφάλαιο 4

Περιβάλλον ΔΠΠ και δακτύλιοι

4.1 Το περιβάλλον ΔΠΠ

Σήμερα παρουσιάζεται η τάση να χρησιμοποιούμε και να μεταφέρουμε μαζί μας ένα ολοένα αυξανόμενο αριθμό ηλεκτρονικών συσκευών, όπως κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, συσκευές αναπαραγωγής ήχου (mp3, cd, minidisc players), μικρούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές (notebooks, PDAs). Η τάση αυτή αν και σήμερα είναι πιο εμφανής στους οπαδούς των νέων τεχνολογιών, αναμένεται να εξαπλωθεί σε ευρύτερες κοινωνικές ομάδες.

Για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συσκευών χρησιμοποιούνται κυρίως καλώδια. Η χρήση όμως καλωδίων είναι προβληματική καθώς ο χρήστης είτε θα πρέπει να ανεχθεί τη συνεχή παρουσία τους, είτε θα πρέπει να αναλάβει το βάρος να τα συνδέει και αποσυνδέει κάθε φορά. Ακόμη, συχνά κάθε συσκευή χρησιμοποιεί και διαφορετικό τύπο καλωδίων, με αποτέλεσμα ο χρήστης να πρέπει να έχει μαζί του πλειάδα διαφορετικών τύπων καλωδίων.

Η χρήση των καλωδίων απαιτεί να υπάρξει φυσική επαφή για να δημιουργηθεί μια σύνδεση. Αυτό δυσχεραίνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συσκευών δύο χρηστών. Μια τέτοια ανταλλαγή γίνεται ιδιαίτερα επίπονη ως αδύνατη αν οι χρήστες βρίσκονται σε περιβάλλον με στενότητα χώρου, όπως για παράδειγμα ένα πολυσύχναστο κατάστημα. Η ανάγκη φυσικής επαφής καθιστά επίσης απαγορευτική την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συσκευών του χρήστη και άλλων συσκευών διεσπαρμένων στο περιβάλλον όπου βρίσκεται.

Τέλος, εκτός από δυσκολίες στην ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών, τα καλώδια δεν επιτρέπουν και το διαμοιρασμό των υλικών πόρων των συσκευών. Για πα-

ράδειγμα ένας χρήστης που έχει μαζί του ένα κινητό τηλέφωνο, έναν υπολογιστή PDA και μια συσκευή αναπαραγωγής ήχου, έχει στη διάθεση του 3 οθόνες διαφορετικών δυνατοτήτων και 3 διαφορετικούς τρόπους εισαγωγής εντολών και δεδομένων στις συσκευές. Αυτό από τη μία αναγκάζει το χρήστη να μάθει να χειρίζεται κάθε συσκευή χωριστά ενώ από την άλλη κάνει τις συσκευές πιο ογκώδεις, αφού κάθε συσκευή θα πρέπει να είναι εντελώς αυτόνομη από κάθε πλευρά.

Όλα αυτά ανέδειξαν την ανάγκη της ανάπτυξης τεχνολογιών για την ασύρματη διασύνδεση των προσωπικών συσκευών ενός χρήστη, καθώς και τη διασύνδεση των προσωπικών συσκευών ενός χρήστη με συσκευές στο κοντινό του περιβάλλον. Τα δίκτυα που σχηματίζονται διασυνδέοντας τις συσκευές αυτές ονομάζονται δίκτυα προσωπικής περιοχής (Personal Area Networks - PANs - ΔΠΠ). Διάφορες τεχνολογίες που έχουν προταθεί για την υλοποίηση των ΔΠΠ παρουσιάζονται στο [52]. Οι τεχνολογίες που φαίνεται να επικρατούν τελικά είναι εκείνες που χρησιμοποιούν τη μετάδοση ραδιοκυμάτων. Πάντως δεν αποκλείεται μελλοντικά αυτό να αλλάξει, καθώς πρωτοποριακές ιδέες, όπως για παράδειγμα η χρήση της αγωγιμότητας του ανθρωπίνου σώματος για τη μεταφορά δεδομένων [51], θα ωριμάζουν.

4.1.1 Απαιτήσεις για τις τεχνολογίες υλοποίησης ΔΠΠ

Η τεχνολογία υλοποίησης των ΔΠΠ θα πρέπει κατ' αρχήν να μην παρουσιάζει τα προβλήματα των καλωδίων. Θα πρέπει λοιπόν να επιτρέπει την εύκολη επέκταση του δικτύου των προσωπικών συσκευών ενός χρήστη ώστε να συμπεριλάβει και συσκευές άλλων χρηστών ή “δημόσιες” συσκευές που βρίσκονται στο γύρω χώρο του. Ειδικά για την επικοινωνία με “δημόσιες” συσκευές, καλό θα είναι η τεχνολογία υλοποίησης να μην απαιτεί οι συσκευές τους να βρίσκονται σε οπτική επαφή. Επίσης η τεχνολογία θα πρέπει να επαρκεί για μεγάλο εύρος εφαρμογών και συσκευών, ώστε να μη χρειαστεί αν είναι δυνατό η ταυτόχρονη χρήση κάποιας άλλης τεχνολογίας, ειδικά για την εξυπηρέτηση εφαρμογών και συσκευών με ιδιαίτερες απαιτήσεις.

Ακόμη μια σειρά από απαιτήσεις προέρχονται από τη φύση των συσκευών που συμμετέχουν στα ΔΠΠ. Επειδή οι περισσότερες προσωπικές συσκευές είναι μικρές σε μέγεθος, η τεχνολογία θα πρέπει να μπορεί να υλοποιηθεί σε μικρό χώρο, ώστε να είναι δυνατή η ενσωμάτωση της στις συσκευές χωρίς να αυξήσει το μέγεθος τους. Εκτός από το μέγεθος των συσκευών δε θα πρέπει να επηρεάζεται και η τιμή τους από το μέγεθος της τεχνολογίας, θα πρέπει δηλαδή αυτή να έχει χαμηλό κόστος παραγωγής. Επίσης καθώς οι συσκευές λειτουργούν με μπαταρία, θα πρέπει η τεχνολογία υλοποίησης των ΔΠΠ να καταναλώνει πολύ λίγη ενέργεια. Δεδομένου του ότι ο χρήστης δεν θα κινείται σε προστατευμένο περιβάλλον,

η τεχνολογία θα πρέπει να είναι ανθεκτική σε παρεμβολές κάθε τύπου, αλλά και να μην προκαλεί κατά το δυνατό παρεμβολές σε άλλες συσκευές.

Τέλος, η τεχνολογία θα πρέπει να έχει μικρή εμβέλεια. Η απαίτηση αυτή επιβάλλεται έμμεσα από τις απαιτήσεις για χαμηλή κατανάλωση, μέγεθος και αποφυγή των παρεμβολών σε άλλες συσκευές. Όμως ταυτόχρονα η μικρή εμβέλεια φέρνει την αντίληψη του περιβάλλοντος που έχουν οι συσκευές στην αντίληψη του περιβάλλοντος που θα έχει ο χρήστης. Για παράδειγμα, αν οι συσκευές έχουν εμβέλεια μερικών εκατοντάδων μέτρων, αντιλαμβάνονται μια περιοχή πολύ μεγαλύτερη από αυτή που αντιλαμβάνεται ο χρήστης τους. Έτσι η παρέμβαση και ο έλεγχος του ΔΠΠ από το χρήστη δυσχεραίνονται, καθώς ο χρήστης θα αναγκαστεί να δει τα πράγματα από την προοπτική του συστήματος του για να μπορέσει να κάνει την παρέμβαση που θέλει.

4.1.2 Μοντέλο λειτουργίας των ΔΠΠ

Τα δίκτυα προσωπικής περιοχής μπορούν να ενταχθούν στην ευρύτερη περιοχή των Mobile AdHoc δικτύων. Όμως ο σκοπός τους και ο τρόπος χρήσης τους, τους προσδίδει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Μέχρι σήμερα οι ιδιαιτερότητες αυτές δεν έχουν ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν. Σε μεγάλο βαθμό η έρευνα πάνω στα ΔΠΠ έχει το χαρακτήρα μεταφοράς της εργασίας που έχει γίνει στην ευρύτερη περιοχή των Mobile AdHoc δικτύων πάνω στις τεχνολογίες με τις οποίες υλοποιούνται τα ΔΠΠ.

Για το λόγο αυτό θεωρούμε σκόπιμο να ορίσουμε ένα πλαίσιο που να περιγράφει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ΔΠΠ και της λειτουργίας τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά, που έχουν λίγο-πολύ αγνοηθεί, θα πρέπει να αρχίσουν να λαμβάνονται υπ' όψιν καθώς διερευνούμε πιο ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές και συστήματα ανάπτυξης ΔΠΠ. Τα χαρακτηριστικά αυτά παίζουν για την ανάπτυξη και επιλογή μιας αρχιτεκτονικής για ΔΠΠ το ρόλο που έπαιξαν οι απαιτήσεις που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.1.1 για την διερεύνηση και ανάπτυξη τεχνολογιών πάνω στις οποίες θα στηριχθούν τα ΔΠΠ.

- **Ομαδοποίηση συσκευών:** Στα Mobile AdHoc δίκτυα οι συσκευές θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αυτό δεν ισχύει στα ΔΠΠ, καθώς οι συσκευές μετακινούνται ανά ομάδες μαζί με το χρήστη στον οποίο ανήκουν. Σημαντικό είναι πως ακόμα και όταν δύο ομάδες συνδεθούν για να επικοινωνήσουν κάποια μέλη τους, μετά από την αποσύνδεση τους πάλι προκύπτουν οι ίδιες δύο αρχικές ομάδες.
- **Εμφάνιση και αναχώρηση συσκευών:** Η εμφάνιση και αναχώρηση συσκευών στα ΔΠΠ γίνεται είτε κατά ομάδες, είτε μεμονωμένα. Οι ομαδικές αποχωρήσεις οφείλονται στην ομαδοποίηση των συσκευών ανά χρήστη. Οι μεμονωμένες αποχωρήσεις από

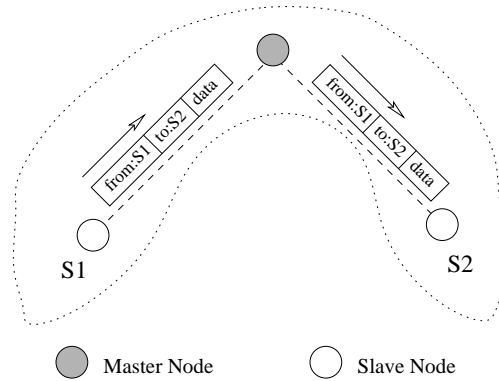
την άλλη, αντιστοιχούν σε εγκατάλειψη ή σβήσιμο της συσκευής. Σημαντικό είναι πως συνεχόμενες τυχαίες αναχωρήσεις συσκευών είναι σπάνιες. Θα πρέπει λοιπόν οι αρχιτεκτονικές για ΔΠΠ να βελτιστοποιήσουν κατά το δυνατό την αντίδραση τους σε αυτές τις πιο συχνές περιπτώσεις.

- **Τοπικότητα επικοινωνίας:** Η ομαδοποίηση των συσκευών εκτός από τον τρόπο κίνησης τους, επηρεάζει και τον τρόπο επικοινωνίας τους. Δηλαδή, οι συσκευές ενός χρήστη επικοινωνούν κυρίως μεταξύ τους και σπανιότερα με συσκευές που δεν ανήκουν στο χρήστη. Παρουσιάζεται δηλαδή μια τοπικότητα στην επικοινωνία. Τοπικότητα παρουσιάζεται επίσης και στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών της ίδιας ομάδας-χρήστη. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υπηρεσίες που προσφέρει μια συσκευή δεν είναι το ίδιο χρήσιμες για όλες τις άλλες. Μέσα σε ένα ΔΠΠ θα πρέπει η τοπικότητα της επικοινωνίας να διατηρείται κατά το δυνατό, δηλαδή να παρεμβάλλονται όσο το δυνατό λιγότερες τρίτες συσκευές μεταξύ των συσκευών που επικοινωνούν. Η διατήρηση της τοπικότητας από τη μία βελτιώνει τις επιδόσεις ΔΠΠ, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει την ενέργεια που ξοδεύεται από τις παρεμβαλλόμενες τρίτες συσκευές.
- **Αριθμός συσκευών:** Οι συσκευές στα ΔΠΠ είναι λίγες στον αριθμό, το πολύ λίγες δεκάδες. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη εμβέλεια τους. Ακόμα και αν βρεθούν πολλοί χρήστες συγκεντρωμένοι σε ένα χώρο, συνήθως οι χρήστες επιθυμούν οι συσκευές τους να μπορούν να επικοινωνήσουν με τις συσκευές συγκεκριμένων χρηστών και να απομονωθούν από τις συσκευές των υπολοίπων. Συνεπώς η κλιμακωσιμότητα είναι δευτερεύουσας σημασίας για τις αρχιτεκτονικές ΔΠΠ.
- **Δυνατότητες συσκευών:** Μέσα σε ένα ΔΠΠ μπορεί να συμμετέχουν και συσκευές μειωμένων δυνατοτήτων, όπως για παράδειγμα εξελιγμένα ρολόγια χειρός. Συνεπώς οι όποιες προτάσεις για συστήματα ΔΠΠ θα πρέπει να μην έχουν μεγάλες απαιτήσεις υπολογιστικών πόρων και ενέργειας από πλευράς συσκευών για να λειτουργήσουν.

4.1.3 Περιβάλλοντα ΔΠΠ και Bluetooth

Η τεχνολογία Bluetooth εξαιτίας των χαρακτηριστικών της (μικρή εμβέλεια, μικρό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας) και της ευρείας διάδοσης της τα τελευταία χρόνια, αποτελεί μια από τις επικρατέστερες υποψήφιας τεχνολογίες για την ανάπτυξη δικτύων προσωπικής περιοχής. Η αυστηρή τοπολογία αστέρα των μικροδικτύων όμως, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο αριθμό συσκευών ανά μικροδίκτυο, αποτελούν εμπόδιο για την άμεση υιοθέτηση του Bluetooth σαν τη de-facto τεχνολογία δικτύων προσωπικής περιοχής.

Η αυστηρή τοπολογία αστέρα επιβάλλει την ύπαρξη μηχανισμών δρομολόγησης ακόμα και σε πολύ απλές διατάξεις. Η δρομολόγηση αυτή είναι σχετικά απλή καθώς περιλαμβάνει μέχρι δύο διαβατικά τμήματα (hops), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Όμως, δεδομένου πως και τα δύο διαβατικά τμήματα χρησιμοποιούν το ίδιο φυσικό κανάλι, τελικά τα χρήσιμα δεδομένα που μπορούν να περάσουν από αυτό στη μονάδα του χρόνου μειώνονται στο μισό.



Σχήμα 4.1: Δρομολόγηση σε μικροδίκτυο

Ένα άλλο πρόβλημα με τα μικροδίκτυα είναι το όριο των συνολικά 8 συσκευών (7 συσκευές-υποτελείς και 1 συσκευή-κύριος). Αν και 8 συσκευές επαρκούν για αρκετά σενάρια χρήσης των δικτύων προσωπικής περιοχής, είναι πολύ πιθανό να αποδειχθούν λίγες για μελλοντικά σενάρια. Επιπλέον, ακόμα και αν οι 8 συσκευές σε ένα μικροδίκτυο επαρκούν αριθμητικά για κάποια σενάρια, τελικά ίσως να μην επαρκούν από άποψη απόδοσης καθώς όλες οι συσκευές σε ένα μικροδίκτυο μοιράζονται το ίδιο κανάλι οπότε το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) ανά συσκευή μειώνεται.

Η συμμετοχή μιας συσκευής σε πολλά μικροδίκτυα, η υποστήριξη δηλαδή του σχηματισμού scatternets, έρχεται να βοηθήσει τη λύση των προβλημάτων αυτών. Οι σχηματισμοί scatternet επιτρέπουν την επέκταση του δικτύου σε παραπάνω από 8 συσκευές ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε κάθε συσκευή, καθώς πλέον οι συσκευές δε μοιράζονται ένα μοναδικό κανάλι. Τα scatternets θα αποτελούσαν τέλεια λύση για τη δημιουργία δικτύων προσωπικής περιοχής, αν δεν υπήρχε περιορισμός στον αριθμό των μικροδικτύων στα οποία μπορεί να συμμετέχει μια συσκευή. Έτσι, όποτε δύο συσκευές χρειάζονταν να επικοινωνήσουν θα μπορούσαν να σχηματίσουν ένα μικροδίκτυο για να γίνει η επικοινωνία χωρίς να περιορίζουν την δυνατότητα επικοινωνίας του με άλλες συσκευές, ενώ ταυτόχρονα θα απαλειφόταν η ανάγκη ύπαρξης μηχανισμών δρομολόγησης.

Όμως οι ελλείψεις προδιαγραφές που έδωσε το Bluetooth SIG για τη λειτουργία των scatternets, τα κατέστησαν περισσότερο περιοχή θεωρητικής έρευνας παρά λύση σε πρακτικά προβλήματα. Οι πρώτες συσκευές με υποστήριξη σχηματισμού scatternets κυκλοφο-

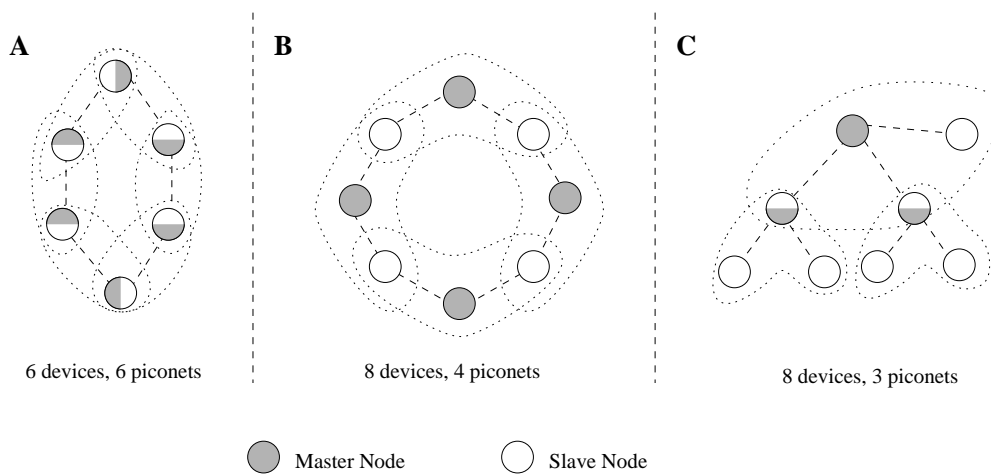
ρήσαν στα τέλη του 2002. Οι συσκευές αυτές επιτρέπουν τη συμμετοχή της συσκευής σε 2 το πολύ μικροδίκτυα [9, 10]. Αυτό καθιστά αναγκαία τη μελέτη τοπολογιών για scatternets ώστε οι συσκευές να μπορούν καταρχήν να επικοινωνήσουν με όσες συσκευές θέλουν και κατά δεύτερο να γίνει αυτό αποδοτικά.

4.2 Δακτύλιοι Bluetooth

Πιστεύουμε πως η τοπολογία δακτυλίου αποτελεί μια καλή λύση για τη να διασύνδεση των συσκευών ενός ΔΠΠ βασισμένου στο Bluetooth. Η συμμετρία και η απλότητα της τοπολογίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να εξασφαλιστούν με σχετικά απλό τρόπο οι ιδιότητες που περιγράψαμε στην ενότητα 4.1.2. Όπως αναφέραμε, οι Foo & Chua στο [11] και Lin et al. στο [30] έχουν μελετήσει την τοπολογία δακτυλίου για Bluetooth scatternets. Η δουλειά τους αφορούσε κυρίως τις επιδόσεις της τοπολογίας και δεν έχουν εστιάσει τη μελέτη τους στα περιβάλλοντα ΔΠΠ.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της τοπολογίας δακτυλίου έναντι άλλων τοπολογιών, είναι πως προσφέρει το μεγαλύτερο αθροιστικό εύρος ζώνης (aggregate bandwidth). Αυτό συμβαίνει γιατί σε ένα δακτύλιο τα μικροδίκτυα (άρα και τα διαθέσιμα φυσικά κανάλια) είναι περισσότερα από αυτά σε άλλες τοπολογίες με τον ίδιο αριθμό συσκευών. Αν ένας δακτύλιος έχει R μικροδίκτυα με S συσκευές-υποτελείς το καθένα, τότε ο αριθμός των συσκευών είναι $D = R \cdot S \Leftrightarrow R = \frac{D}{S}$. Γενικότερα, αν ο αριθμός των συσκευών-υποτελών ανά μικροδίκτυο κυμαίνεται $1 \leq S_{min} \leq S \leq S_{max} \leq 7$, τότε για τον αριθμό των μικροδικτύων ισχύει $\frac{D}{S_{max}} \leq R \leq \frac{D}{S_{min}}$, δηλαδή $R = O(D)$. Σε άλλες τοπολογίες ο αριθμός των μικροδικτύων είναι γενικά μικρότερος για τον ίδιο αριθμό συσκευών. Για παράδειγμα, σε μια δενδρική τοπολογία, όπως αυτή που περιγράφουν οι Tan et al. [47, 48, 46], ισχύει $R = O(\log(D))$. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο αριθμός των καναλιών για τρεις διαφορετικές τοπολογίες. Στο μέρος Α του σχήματος είναι ένας δακτύλιος με $S = 1$ (Foo & Chua [11]), στο μέρος Β ένας δακτύλιος με $S = 2$ και στο μέρος C μια δενδρική τοπολογία.

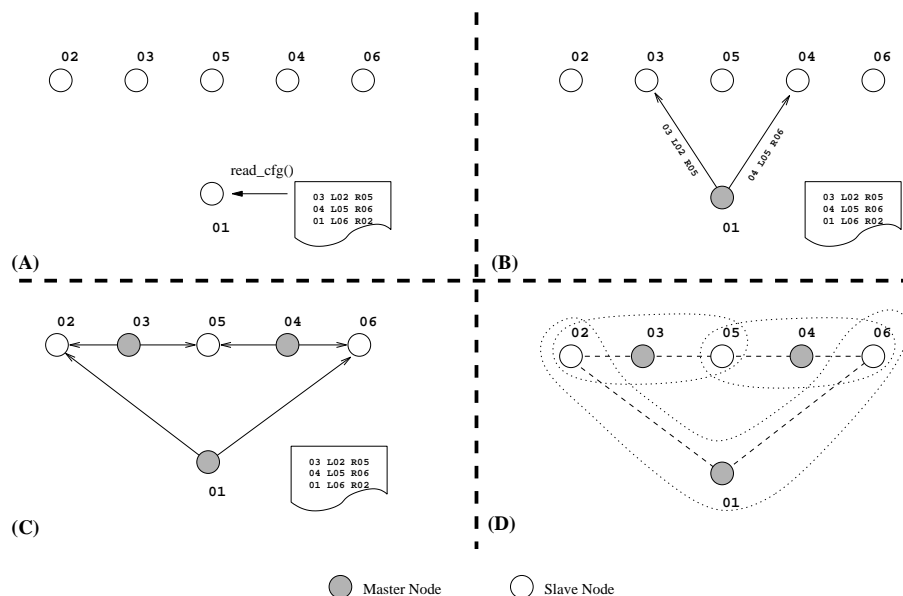
Το μειονέκτημα της τοπολογίας δακτυλίου από την άλλη, είναι πως και η μέση απόσταση δύο συσκευών d_{avg} αυξάνει επίσης γραμμικά με τον αριθμό των συσκευών, $d_{avg} = O(D)$. Αυτό σημαίνει αυξημένες καθυστερήσεις καθώς προσθέτουμε συσκευές. Όμως δεδομένης της τοπικότητας της επικοινωνίας που υπάρχει στα ΔΠΠ, πιστεύουμε πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα οφέλη του αυξημένου αθροιστικού εύρους ζώνης, ενώ ταυτόχρονα να περιορίσουμε κατά το δυνατό τις καθυστερήσεις λόγω της απόστασης των συσκευών στο δακτύλιο.



Σχήμα 4.2: Αριθμός μικροδικτύων για διαφορετικές τοπολογίες

4.2.1 Αρχικοποίηση

Σε περιβάλλοντα ΔΠΠ οι συσκευές του συστήματος είναι γνωστές κατά την αρχικοποίηση του, καθώς ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο χρήστη και σπάνια προσθέτονται νέες. Για το λόγο αυτό, προτείνουμε η αρχικοποίηση να γίνεται με τη χρήση κάποιων “προφίλ”. Το προφίλ είναι μια περιγραφή της τοπολογίας που πρέπει να κατασκευαστεί. Μια συσκευή αναλαμβάνει να διαβάσει το προφίλ και να ενημερώσει τις υπόλοιπες για τις συνδέσεις τις οποίες θα πρέπει να δημιουργήσουν. Η διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Αρχικοποίηση 6 συσκευών με τη χρήση προφίλ

Αρχικά όλες οι συσκευές περιμένουν ένα μήνυμα αρχικοποίησης από κάποια άλλη συσκευή. Μια από τις συσκευές διαβάζει το προφίλ από ένα αρχείο και ενημερώνει τις συσκευές για τις συνδέσεις που πρέπει να δημιουργήσουν. Οι συσκευές δημιουργούν τις συνδέσεις αυτές και έτσι δημιουργείται ο δακτύλιος.

Οι Lin et al. [30], όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.2.2.3, χρησιμοποιούν ένα πρωτόκολλο εκλογής συντονιστή ο οποίος αναλαμβάνει να καθοδηγήσει την κατασκευή του δακτυλίου. Κατά την εκλογή του συντονιστή χρησιμοποιείται η διαδικασία αναζήτησης του Bluetooth για να εντοπιστούν συσκευές. Η προσέγγιση αυτή έχει μεν νόημα όταν θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα δακτύλιο από πολλές άγνωστες συσκευές στο γύρω χώρο, όμως όσον αφορά τα ΔΠΠ παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα-ελλείψεις:

- Κατά την αναζήτηση συσκευών οι συσκευές διαφορετικών χρηστών δε διαχωρίζονται με κανένα τρόπο. Συνεπώς, τελικά στο δακτύλιο μπορεί να συμπεριληφθούν και συσκευές που δεν ανήκουν στο χρήστη.
- Ο χρήστης δεν έχει εύκολο τρόπο να κατασκευάσει ένα δακτύλιο με συγκεκριμένες από τις συσκευές του, χωρίς να κλείσει αυτές που δε θέλει.
- Η υποστήριξη scatternet από μια συσκευή δεν είναι δεδομένη. Επίσης, με την ανακάλυψη συσκευών δεν γίνεται αυτόματα γνωστό ποιες συσκευές υποστηρίζουν scatternet. Συνεπώς, η διαδικασία που περιγράφουν οι Lin et al. [30] θα δουλέψει μόνο αν ο συντονιστής σταθεί τυχερός στις επιλογές που θα κάνει.
- Η εκλογή συντονιστή κοστίζει πολύ σε χρόνο, καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία αναζήτησης τουλάχιστο μια φορά.

Παρόμοια προβλήματα παρουσιάζουν και οι αλγόριθμοι των Foo & Chua [11] για το σχηματισμό δακτυλίων Bluetooth. Η αρχικοποίηση με προφίλ λύνει αυτά τα προβλήματα καθώς το προφίλ αφού προετοιμαστεί μια φορά, έπειτα περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη γρήγορη και σωστή δημιουργία του δακτυλίου, με τον τρόπο που επιθυμεί ο χρήστης. Επίσης, επειδή τα προφίλ μπορούν να συσχετιστούν με μια σειρά από λειτουργίες που θα μπορεί να κάνει το σύστημα αυτόνομα, μια ένδειξη αποτυχίας δημιουργίας του δακτυλίου έχει απτή σημασία για το χρήστη και του δίνει τη δυνατότητα να αντιδράσει κατάλληλα ή να αναπροσαρμόσει τις προσδοκίες του από το σύστημα.

4.2.2 Συγχώνευση δακτυλίων

Η συγχώνευση τοπολογιών είναι μεγάλης σημασίας στο περιβάλλον ΔΠΠ, καθώς επιτρέπει σε δύο ομάδες συσκευών να επικοινωνήσουν. Η συγχώνευση στην τοπολογία δακτυ-

λίου γίνεται με το “άνοιγμα” δύο υπαρχόντων δακτυλίων και την ένωση των άκρων τους. Καθώς συνήθως η συγχώνευση γίνεται για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες συγκεκριμένων συσκευών, λογικό είναι το “άνοιγμα” των δακτυλίων να γίνει σπάζοντας μία από τις συνδέσεις των συσκευών αυτών. Όμως, δεδομένης της τοπικότητας επικοινωνίας μεταξύ συσκευών του ίδιου χρήστη, καλό είναι οι συγχωνεύσεις να μην χωρίζουν σε δύο μέρη τις συσκευές του ίδιου χρήστη. Έτσι από τη μια συνεχίζεται να γίνεται αποδοτικά η τοπική επικοινωνία μεταξύ των συσκευών ενός χρήστη και από την άλλη δημιουργείται η ελάχιστη επιδάρυνση στο δακτύλιο από τις συσκευές διαφορετικών χρηστών που θέλουν να επικοινωνήσουν.

4.2.3 Αντιμετώπιση βλαβών

Είναι φανερό πως σε περιβάλλοντα ΔΠΠ μια βλάβη στην τοπολογία είναι πολύ πιθανό να γίνει άμεσα αντιληπτή από το χρήστη. Ο χρήστης όμως παρόλα αυτά δεν μπορεί να κάνει καμία ενέργεια για να διορθωθεί η βλάβη, παρά να περιμένει. Η ίαση της τοπολογίας λοιπόν θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα.

Μετά από μια βλάβη η τοπολογία δακτυλίου συνήθως μειώνεται σε γραμμική τοπολογία. Αν συμβούν πολλές τυχαίες βλάβες μαζί, τότε ο δακτύλιος χωρίζεται σε πολλές γραμμικές τοπολογίες. Η ίαση του δακτυλίου συμπεριλαμβάνει τη συνένωση δημιουργία ξανά ενός συνδεδεμένου δακτυλίου. Οι Foo & Chua [11] δεν ασχολούνται με μεθόδους ίασης του δακτυλίου σε περίπτωση βλάβης. Οι Lin et al. [30] προτείνουν ένα γενικό τρόπο ίασης που χρησιμοποιεί την αναζήτηση συσκευών για να βρεθούν οι συσκευές που πρέπει να συνδεθούν για να ιανθεί η τοπολογία. Όμως, όπως αναφέραμε, οι “βλάβες” στα ΔΠΠ προκύπτουν από δύο κυρίως αιτίες: την απομάκρυνση ομάδας συσκευών και την ανεξάρτητη απενεργοποίηση κάποιας συγκεκριμένης είτε γιατί απενεργοποιήθηκε από το χρήστη είτε γιατί “έμεινε” από μπαταρία. Γνωρίζοντας τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνουν οι βλάβες, μπορούμε να βελτιώσουμε το χρόνο ίασης του δακτυλίου σε σχέση με τη γενική διαδικασία που προτείνουν οι Lin et al. [30]

Για να μικρύνει λοιπόν ο χρόνος ίασης, κάθε συσκευή θα πρέπει να κρατά τις διευθύνσεις των δύο γειτόνων της που απέχουν από αυτήν δύο διαβατικά τμήματα. Επίσης, κατά τη συγχώνευση δακτυλίων οι συσκευές που επικοινωνούν απευθείας με συσκευές άλλης ομάδας θα πρέπει να κρατούν τη διεύθυνση της συσκευής με την οποία συνδέονταν πριν την συγχώνευση. Έτσι για τη διαδικασία ίασης στις περισσότερες περιπτώσεις θα απαιτείται μια μόνη δημιουργία σύνδεσης, χωρίς να χρειάζεται να καταφύγει η συσκευή στη διαδικασία αναζήτησης. Φυσικά θα υπάρξουν και περιπτώσεις όπου η μέθοδος αυτή που προτείνουμε δε θα λειτουργήσει, γιατί π.χ. εμφανίστηκε “βλάβη” ταυτόχρονα σε δύο συνεχόμενες συσκευές. Στο κεφάλαιο 5 μελετάμε το κέρδος που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση αυτή

σε σχέση με διάφορους τρόπους εμφάνισης λαθών.

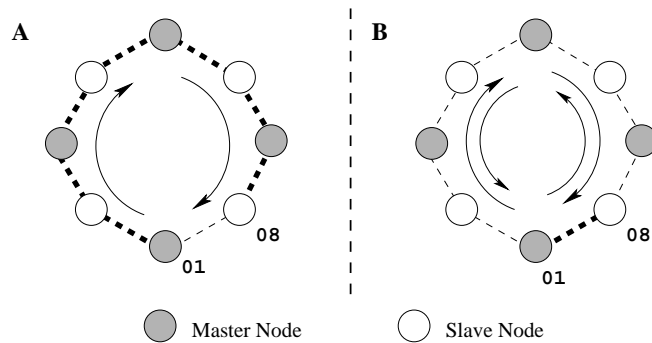
4.2.4 Δρομολόγηση

4.2.4.1 Δακτύλιοι διπλής κατεύθυνσης

Το πρόβλημα της δρομολόγησης σε δακτύλιο θεωρείται τετριμμένο και περιορίζεται στην επιλογή κατεύθυνσης για τα δεδομένα που στέλνονται σε ένα συγκεκριμένο προορισμό. Η πιο απλή προσέγγιση, είναι να επιλέξουμε μια μόνο φορά κίνησης των πακέτων στο δακτύλιο. Την επιλογή αυτή κάνουν οι Lin et al. [30], ενώ οι Foo & Chua [11] δεν αναφέρονται καθόλου στο πρόβλημα. Θεωρούμε πως εξαιτίας της κακής κλιμακωσιμότητας της τοπολογίας του δακτυλίου, η επιλογή να κινούνται τα πακέτα κατά μια μόνο φορά δεν είναι καλή. Σε ένα δακτύλιο μιας κατεύθυνσης, πολλά από τα πακέτα θα ταξιδέψουν περισσότερο από όσο χρειάζεται για να φτάσουν στον προορισμό τους, ενώ ταυτόχρονα περισσότερες συσκευές θα επιβαρυνθούν με τη μεταφορά τους. Έτσι από τη μια θα μεγαλώσουν οι καθυστερήσεις, ενώ από την άλλη θα μειωθεί το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο σε κάθε συσκευή. Επίσης θα χρειάζεται συνολικά περισσότερη ενέργεια για τη μετάδοση ενός μηνύματος.

Για το λόγο αυτό, προτείνουμε να χρησιμοποιούνται και οι δύο κατευθύνσεις του δακτυλίου για τη δρομολόγηση των πακέτων και το πακέτο να στέλνεται από τη συντομότερη διαδρομή. Η επιλογή αυτή γίνεται για να μεταφερθεί η τοπικότητα στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών και στο δακτύλιο. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται ένα παράδειγμα πως συμβαίνει αυτό. Ο δακτύλιος στο μέρος Α του σχήματος είναι μονής κατεύθυνσης, οπότε για να στείλει δεδομένα η συσκευή 01 στη συσκευή 08 πρέπει να απασχοληθούν και τα 4 κανάλια που είναι διαθέσιμα. Αν όμως ο δακτύλιος ήταν διπλής κατεύθυνσης, όπως φαίνεται στο μέρος Β, η επικοινωνία θα χρησιμοποιούσε μόνο 1 κανάλι, αφήνοντας τα υπόλοιπα 3 εντελώς ελεύθερα για άλλες επικοινωνίες. Επίσης η απόσταση που διανύει ένα πακέτο, άρα και ο χρόνος καθυστέρησης του μειώνεται. Εκμεταλλευόμαστε δηλαδή καλύτερα τα πολλά κανάλια που μας παρέχει ο δακτύλιος, ενώ ταυτόχρονα μειώνουμε την καθυστέρηση.

Στο σχήμα 4.4 η περίπτωση που παρουσιάζεται είναι η πιο ακραία που μπορεί να συμβεί στο συγκεκριμένο δακτύλιο. Γενικά όμως, αν η επικοινωνία σε ένα δακτύλιο ήταν ομοιόμορφη, δηλαδή κάθε συσκευή επικοινωνούσε με κάθε άλλη με την ίδια συχνότητα, τότε η επιλογή της συντομότερης διαδρομής θα επιδρούσε θετικά στα μισά πακέτα.

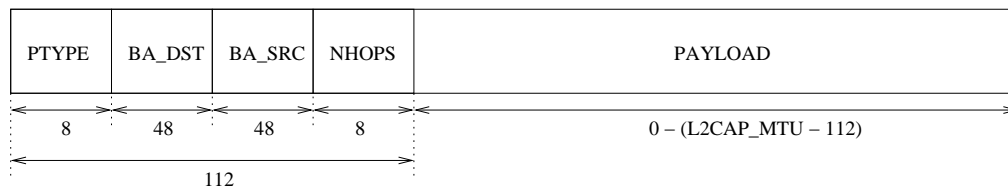


Σχήμα 4.4: Βελτίωση της τοπικότητας σε δακτυλίους διπλής κατεύθυνσης

4.2.4.2 Μορφή πακέτων & κόστος δρομολόγησης

Θα περιγράψουμε τώρα πως μπορεί να γίνει η δρομολόγηση χρησιμοποιώντας και τις δύο κατευθύνσεις του δακτυλίου. Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η μορφή των πακέτων που προτείνουμε για χρησιμοποιηθεί, ενώ οι σημασίες των πεδίων του πακέτου φαίνονται στον πίνακα 4.1. Επιλέξαμε η δρομολόγηση να γίνεται σε πακέτα επιπέδου L2CAP, δηλαδή όσα εμφανίζονται στο σχήμα 4.5 αποτελούν το φορτίο (payload) ενός L2CAP πακέτου.

Default L2CAP_MTU=5376



Σχήμα 4.5: Μορφή πακέτου για δακτύλιο Bluetooth δύο κατευθύνσεων

Όνομα	Μέγεθος (bits)	Περιγραφή
PTYPE	8	Τύπος πακέτου
BA_DST	48	Διεύθυνση συσκευής-παραλήπτη
BA_SRC	48	Διεύθυνση συσκευής-αποστολέα
NHOPS	8	Αριθμός προωθήσεων
PAYLOAD	var	Μεταφερόμενα δεδομένα

Πίνακας 4.1: Πεδία πακέτου L2CAP για δρομολόγηση σε δακτύλιο

Το πεδίο PTYPE χρησιμεύει για να διαχωρίζονται τα πακέτα δεδομένων από πακέτα άλλου τύπου. Το πεδίο NHOPS αρχικοποιείται στην τιμή 0 από τον αποστολέα του πακέτου

και η τιμή του αυξάνεται κατά 1 πριν κάθε μετέπειτα προώθηση του. Η χρησιμότητα του περιγράφεται παρακάτω.

Η επιλογή να γίνεται η δρομολόγηση σε επίπεδο L2CAP οδηγεί σε μια σχετικά μεγάλη επικεφαλίδα, καθώς αυτή πρέπει να περιέχει τις διευθύνσεις αποστολέα και παραλήπτη του πακέτου. Οι Bhagwat & Segall στο [4] προτείνουν τον αλγόριθμο RVM όπου εφαρμόζοντας δρομολόγηση σε πακέτα baseband, κατάφεραν αντί για τα συνολικά 96bits διευθύνσεων σε κάθε πακέτο να χρησιμοποιήσουν 6bits ανά διαβατικό τμήμα που περνάει το πακέτο. Αν και με την πρώτη ματιά η δρομολόγηση σε δακτύλιο σε επίπεδο L2CAP φαίνεται ασύμφορη, τελικά τα πράγματα είναι διαφορετικά. Υπολογίζουμε το κόστος των δύο μεθόδων χρησιμοποιώντας το εξ ορισμού μέγεθος πακέτου για τα πακέτα L2CAP (672bytes) και baseband πακέτα τύπου DH1 (27bytes):

$$Cost = \frac{Header\ bits}{Total\ bits} \quad (4.1)$$

$$Cost_{Ring-L2CAP} = \frac{112}{672 \cdot 8} = 0.0208\bar{3} \quad (4.2)$$

$$Cost_{RVM-baseband} = \frac{6}{27 \cdot 8} = 0.02\bar{7} \quad (4.3)$$

Ο υπολογισμός έγινε με ευνοϊκούς όρους για τη δρομολόγηση RVM που προτείνουν οι Baghwat & Segall[4], καθώς θεωρήσαμε πως τα πακέτα διανύουν ένα μόνο διαβατικό τμήμα. Αν θεωρήσουμε όμως πως τα πακέτα θα διανύσουν ένα επιπλέον διαβατικό τμήμα, το κόστος αυτομάτως θα διπλασιαστεί. Επίσης επειδή οι αναμεταδώσεις στο Bluetooth γίνονται στο επίπεδο baseband, αν και η δρομολόγηση γίνεται στο επίπεδο αυτό, τότε σε περιβάλλοντα με πολύ θόρυβο το κόστος της θα πολλαπλασιάζεται με τη συχνότητα των αναμεταδόσεων. Με τη δρομολόγηση σε επίπεδο L2CAP αντίθετα, δεν πληρώνουμε επιπλέον κόστος δρομολόγησης για κάθε baseband πακέτο που αναμεταδίδεται. Βλέπουμε λοιπόν πως η δρομολόγηση σε επίπεδο L2CAP είναι πιο συμφέρουσα σε κόστος επικεφαλίδας ακόμα και από βελτιστοποιημένες μεθόδους δρομολόγησης σε επίπεδο baseband.

4.2.4.3 Ανακάλυψη και ανανέωση αποστάσεων

Όπως είπαμε, οι συσκευές στέλνουν τα πακέτα προς τον προορισμό τους χρησιμοποιώντας την κατεύθυνση που αντιστοιχεί στην συντομότερη διαδρομή. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γνωρίζουν τη συντομότερη διαδρομή για κάθε συσκευή με την οποία επικοινωνούν. Αυτό γίνεται ανακαλύπτοντας, διατηρώντας και ανανεώνοντας την απόσταση μιας συσκευής για καθεμιά από τις δύο δυνατές διαδρομές. Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως ακόμα και αν οι πληροφορίες μιας συσκευής για την πιο σύντομη διαδρομή προς μια άλλη είναι λανθασμένες, τα πακέτα θα εξακολουθούν να φτάνουν στον προορισμό τους. Προσπα-

θούμε όμως να αποφύγουμε αυτήν την κατάσταση, ανανεώνοντας τα μήκη των διαδρομών με τρόπο που θα περιγράψουμε παρακάτω.

Για τη μέτρηση του μήκους μιας διαδρομής χρησιμοποιούνται ειδικού τύπου πακέτα, που ονομάζουμε τροχιοδεικτικά. Τα τροχιοδεικτικά πακέτα έχουν τη μορφή που παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.5, και διαχωρίζονται από τα πακέτα δεδομένων με τη βοήθεια του πεδίου PTYPE. Στο πεδίο του φορτίου, περιέχουν 8bits που κωδικοποιούν το μήκος που γνωρίζει η συσκευή που τα έστειλε για τη διαδρομή πάνω στην οποία ταξιδεύουν προς τη συσκευή παραλήπτη. Αν η συσκευή που στέλνει το πακέτο δεν έχει τέτοια πληροφορία διαθέσιμη, τότε συμβατικά στέλνει την τιμή 0 σα φορτίο του πακέτου.

Η αρχική ανακάλυψη μιας συντομότερης διαδρομής γίνεται πριν την επικοινωνία δύο συσκευών. Τότε η συσκευή που ξεκινά την επικοινωνία στέλνει δύο “τροχιοδεικτικά” πακέτα, ένα προς κάθε κατεύθυνση, προς τη δεύτερη συσκευή. Όπως περιγράψαμε, κατά την προώθηση των πακέτων το πεδίο NHOPS της επικεφαλίδας αυξάνεται. Έτσι τελικά η συσκευή παραλήπτης μαθαίνει για το μήκος των δύο διαδρομών. Στέλνει έπειτα δύο όμοια πακέτα για να μάθει και η πρώτη συσκευή με τον ίδιο τρόπο τα μήκη των δύο διαδρομών. Οι συσκευές διατηρούν έπειτα τα μήκη και των δύο δυνατών διαδρομών και κάθε φορά στέλνουν τα πακέτα για τη συγκεκριμένη συσκευή από τη συντομότερη από τις δύο.

Κάθε πακέτο που λαμβάνεται ή προωθείται από μια συσκευή περιέχει στο πεδίο NHOPS την απόσταση της συσκευής από τον αποστολέα του πακέτου. Οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιήσουν την πληροφορία αυτή για να ενημερώσουν το μήκος των διαδρομών προς τον αποστολέα του πακέτου που γνωρίζουν. Αν το μήκος διαδρομής που γνωρίζει η συσκευή είναι διαφορετικό από την τιμή του πεδίου NHOPS, τότε η συσκευή ενημερώνει το μήκος που γνωρίζει με τη νέα τιμή. Αν η ενημέρωση προκαλέσει αλλαγή στη διαδρομή που μέχρι τώρα χρησιμοποιούνταν, τότε η επόμενη αποστολή πακέτου θα γίνει από τη νέα διαδρομή. Ο παραλήπτης θα ενημερωθεί έτσι για τη νέα απόσταση, αν δεν τη γνώριζε ήδη.

4.2.4.4 Απαλοιφή “νεκροζώντανων” πακέτων

“Νεκροζώνταννα” πακέτα ονομάζουμε τα πακέτα των οποίων ο παραλήπτης δεν υπάρχει στο δακτύλιο ή να αποχώρησε όσο το πακέτο ταξίδευε προς αυτόν. Τέτοια πακέτα είναι προφανές πως θα περιφέρονται επ’ άπειρον καταναλώνοντας πόρους αν δεν απαλειφθούν με κάποιον τρόπο. Ο εντοπισμός των πακέτων αυτών γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Αν μια συσκευή λάβει ένα πακέτο με αποστολέα την ίδια, τότε αυτό σημαίνει πως ο παραλήπτης δεν υπάρχει στο δακτύλιο και το πακέτο είναι πακέτο-“zombie”.
- Αν ο μετρητής NHOPS σε ένα πακέτο έχει φτάσει μια μέγιστη τιμή NHOPS_MAX, τότε

και ο παραλήπτης και ο αποστολέας του πακέτου έχουν φύγει από το δακτύλιο και το πακέτο είναι “νεκροζώντανο”.

Και στις δύο περιπτώσεις το πακέτο δεν προωθείται παραπέρα. Οι Lin et al. στο [30] προτείνουν τη χρήση μόνο ενός “dirty bit” για τον εντοπισμό των “νεκροζώντανων” πακέτων. Η πρόταση τους όμως δεν καλύπτει την περίπτωση που και ο αποστολέας και ο παραλήπτης του πακέτου αποχωρήσουν.

Η τιμή του NHOPS_MAX περιορίζει τον αριθμό των συσκευών που μπορούν να συμμετάσχουν στο δακτύλιο. Το όριο όμως είναι πιο πολύ θεωρητικό καθώς το NHOPS_MAX έχει μήκος 8bits όπως και το πεδίο NHOPS, έχει οπότε μέγιστη τιμή 255. Εξαιτίας της κακής κλιμακωσιμότητας του δακτυλίου, θα υπάρξουν προβλήματα απόδοσης αρκετά πριν οι συσκευές φτάσουν τις 255.

Κεφάλαιο 5

Μετρήσεις και αποτελέσματα

Για να συγκρίνουμε το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων με το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης που προτείνουν οι Foo & Chua[30], θα χρησιμοποιήσουμε μια σειρά από σενάρια που αντικατοπτρίζουν τη μορφή της επικοινωνίας σε ένα ΔΠΠ. Αφού υλοποιήσουμε τις δύο τοπολογίες, θα μετρήσουμε και θα συγκρίνουμε τις επιδόσεις τους στα σενάρια αυτά. Επίσης θα συγκρίνουμε τις επιδόσεις αυτές με τις επιδόσεις στα ίδια σενάρια ενός μικροδικτύου όπου οι υποτελείς επικοινωνούν μέσω του κυρίου.

5.1 Περιβάλλον Μετρήσεων

5.1.1 Τύποι και διάταξη συσκευών

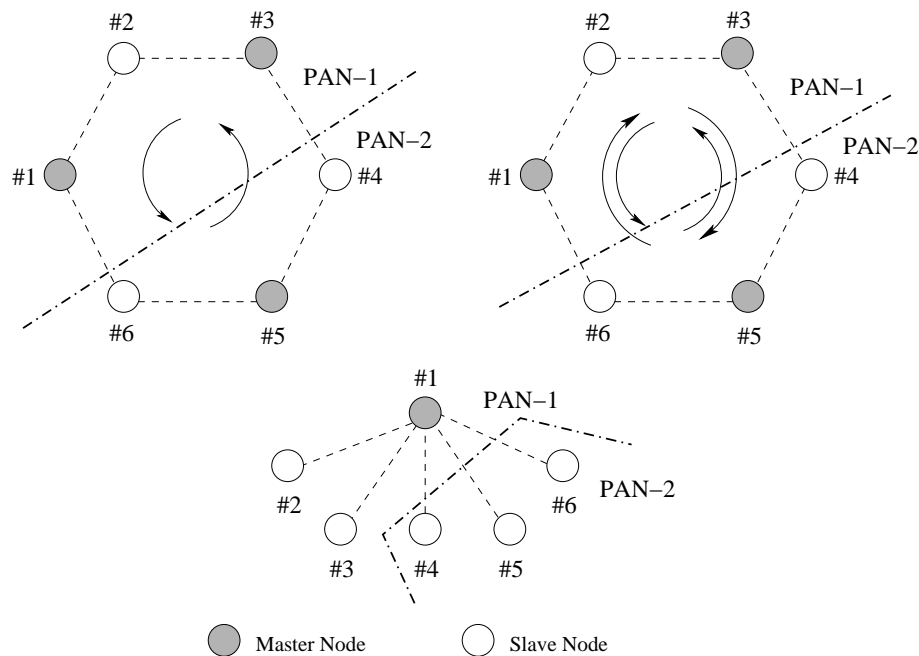
Οι μετρήσεις θα γίνουν με τη χρήση πραγματικών συσκευών. Οι συσκευές οι οποίες είχαμε στη διάθεση μας και χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Συσκευή	Τύπος Υλοποίησης	Διαθέσιμος Αριθμός
Anycorn USB-100	CSR Bluecore2 v16.4	3
Gigabyte GN-BTD01	CSR Bluecore2 v14.3	2
Wiretek 10M	CSR Bluecore2 v15.3	1
3COM 3CREB96	CSR Bluecore1b v11.3	1
Level One MDU-0001USB	Telennomm Inc. v18	1

Πίνακας 5.1: Διαθέσιμες συσκευές Bluetooth

Από τις διαθέσιμες συσκευές μόνο εκείνες που είναι βασισμένες στην υλοποίηση CSR Bluecore2 v16.4 του Bluetooth υποστηρίζουν λειτουργία scatternet. Ακόμη όμως και αυτές

δεν μπορούν να ανήκουν σε παραπάνω από δύο μικροδίκτυα ταυτόχρονα. Το γεγονός αυτό μας περιορίζει στη χρήση 6 συσκευών για τις μετρήσεις μας. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τις 6 συσκευές που βασίζονται στην υλοποίηση CSR Bluecore2 του Bluetooth. Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν και πως τοποθετούνται στις τρεις διατάξεις φαίνονται στο σχήμα 5.1.



	#1	#2	#3	#4	#5	#6
OEM	Gigabyte	Anycom	Gigabyte	Anycom	Wiretek	Anycom
Bluecore2 Firmware	v14.3	v16.4	v14.3	v16.4	v15.3	v16.4

Σχήμα 5.1: Τοπολογίες μετρήσεων

Νοητά χωρίζουμε τις 6 συσκευές σε δύο ομάδες των 3 συσκευών, που αντιστοιχούν σε ΔΠΠ διαφορετικών χρηστών. Με αυτό τον τρόπο θα μπορέσουμε παρακάτω να ορίσουμε τις τοπικές και εξωτερικές συνδέσεις που χρησιμοποιούμε στα σενάρια που εξετάζουμε. Στις τοπολογίες δακτυλίου οι συσκευές Anycom παίζουν το ρόλο υποτελή σε δύο μικροδίκτυα.

5.1.2 Η στοίβα Bluetooth Bluez

Η υλοποίηση όλων των προγραμμάτων έγινε στο λειτουργικό σύστημα Linux. Υπάρχουν αρκετές στοίβες Bluetooth διαθέσιμες για το Linux[25, 5, 34]. Κρίναμε σαν πιο κατάλ-

ληλη από αυτές τη στοίδα Bluetooth Bluez[5]. Η στοίδα Bluez αναπτύχθηκε από την εταιρία Qualcomm και το Μάιο του 2001 δόθηκε στο κοινό υπό την άδεια χρήσης GPL[12]. Υιοθετήθηκε σαν η επίσημη στοίδα Bluetooth για τον πυρήνα Linux και αποτελεί βασικό μέρος του από την έκδοση 2.4.21 (Δεκέμβριος 2002). Αυτό καθώς και το γεγονός ότι έχει την πιο ενεργή κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών μας οδήγησαν στο να την επιλέξουμε. Χρησιμοποιήσαμε την έκδοση 2.4.22-mh1 του πυρήνα Linux και την έκδοση του Bluez που περιέχει.

Το Bluez παρέχει πρόσβαση σε διάφορα επίπεδα του Bluetooth μέσω BSD sockets. Συνοπτικά οι τύποι sockets που παρέχει το Bluez είναι οι ακόλουθοι.

- HCI sockets: Επιτρέπει την απευθείας αποστολή εντολών στη συσκευή Bluetooth.
- L2CAP sockets με σύνδεση: Επιτρέπει την αποστολή αυτόνομων μηνυμάτων σε σειρά πάνω από μια σύνδεση επιπέδου L2CAP. Κάθε μήνυμα αντιστοιχεί σε ένα πακέτο L2CAP. Τα μηνύματα παραδίδονται με τη σειρά που στάλθηκαν, ενώ τα όρια τους διατηρούνται.
- L2CAP sockets χωρίς σύνδεση: Επιτρέπει την αποστολή αυτόνομων πακέτων L2CAP. Χρησιμοποιεί μόνο τη χαμηλού επιπέδου σύνδεση (ACL) χωρίς να δημιουργεί σύνδεση επιπέδου L2CAP.
- SCO sockets: Επιτρέπει την αποστολή και λήψη πακέτων ήχου.
- RFCOMM sockets: Παρέχουν στα προγράμματα την αφαίρεση της ροής δεδομένων. Επιτρέπουν δηλαδή την αποστολή δεδομένων χωρίς να διατηρούνται τα όρια μεταξύ των μεμονωμένων “μηνυμάτων” που στέλνονται.

Στις μετρήσεις μας θα χρησιμοποιήσουμε L2CAP sockets με σύνδεση, μια και αυτό είναι το πιο χαμηλό επίπεδο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε χωρίς να χρειαστεί να παρέμβουμε στην ίδια τη στοίδα. Θα χρησιμοποιήσουμε το εξ’ ορισμού μέγεθος πακέτου L2CAP το οποίο είναι 672bytes. Από αυτά, 14bytes (112bits) χρησιμοποιούνται σαν επικεφαλίδα, αφήνοντας 658bytes για δεδομένα. Στο επίπεδο baseband επιλέξαμε τη χρήση των πακέτων *DH1*.

Το επίπεδο L2CAP βασίζεται στο επίπεδο baseband για να παράσχει έλεγχο ροής δεδομένων. Ο έλεγχος ροής αφορά μέχρι και την παράδοση των L2CAP πακέτων στο μέρος της στοίδας (Bluez) που τρέχει στον υπολογιστή. Αφού τα δεδομένα παραληφθούν παραμένουν αποθηκευμένα έως κάποια εφαρμογή χρήστη τα ζητήσει. Ο χώρος αποθήκευσης είναι ξεχωριστός για κάθε socket και σταθερός. Αν τα πακέτα παραλαμβάνονται από την

εφαρμογή χρήστη με αργό ρυθμό, τελικά θα έχουμε υπερχείλιση του αποθηκευτικού χώρου και απώλεια δεδομένων. Η παροχή ελέγχου ροής σε αυτό το επίπεδο ξεφεύγει από τα πλαίσια της λειτουργίας του L2CAP και γι αυτό δεν αντιμετωπίζεται. Αναμένουμε λοιπόν να έχουμε απώλειες πακέτων κατά τις μετρήσεις μας.

5.1.3 Υλοποίηση τοπολογιών

Για κάθε τοπολογία υλοποιήσαμε μια βιβλιοθήκη σε γλώσσα C που αναλαμβάνει να εκτελέσει την όποια δρομολόγηση χρειάζεται. Επίσης παρέχει μια σειρά από συναρτήσεις που επιτρέπουν στο πρόγραμμα που χρησιμοποιούνται για την αποστολή μηνυμάτων σε άλλες συσκευές. Οι συναρτήσεις αυτές είναι:

- `void *alloc_buf(int buflen)`: Δεσμεύει χώρο για ένα μήνυμα με μέγιστο μήκος `buflen`. Πριν από τη διεύθυνση που επιστρέφει έχει δεσμευτεί και χώρος για την επικεφαλίδα του μηνύματος. Έτσι αποφεύγεται η δέσμευση κάθε φορά νέου χώρου στη μνήμη ώστε να προστεθεί και η επικεφαλίδα πριν σταλεί το μήνυμα.
- `void free_buf(void *buf)`: Αποδεσμεύει το χώρο που έχει δεσμευθεί από την `alloc_buf()`, συμπεριλαμβανομένου και του χώρου για την επικεφαλίδα.
- `struct handle *make_handle(char *bda)`: Επιστρέφει μια δομή που χρησιμοποιώντας την μπορεί ένα πρόγραμμα να στείλει δεδομένα στη συσκευή με διεύθυνση Bluetooth `bda`.
- `int bt_send(struct handle *h, void *buf, int buflen)`: Στέλνει `buflen` δεδομένα ξεκινώντας από τη διεύθυνση `buf` προς τον παραλήπτη που αντιστοιχεί στη δομή `h`. Η διεύθυνση `buf` πρέπει να έχει δεσμευθεί με την `alloc_buf()`.

Καθώς σκοπός μας είναι η μέτρηση της απόδοσης των τοπολογιών, δε συμπεριλάβαμε στη βιβλιοθήκη τη δυνατότητα να παραδίδει τα δεδομένα στα προγράμματα που τη χρησιμοποιούν. Οι μετρήσεις γίνονται απευθείας από το μέρος της βιβλιοθήκης που αναλαμβάνει την προώθηση των μηνυμάτων.

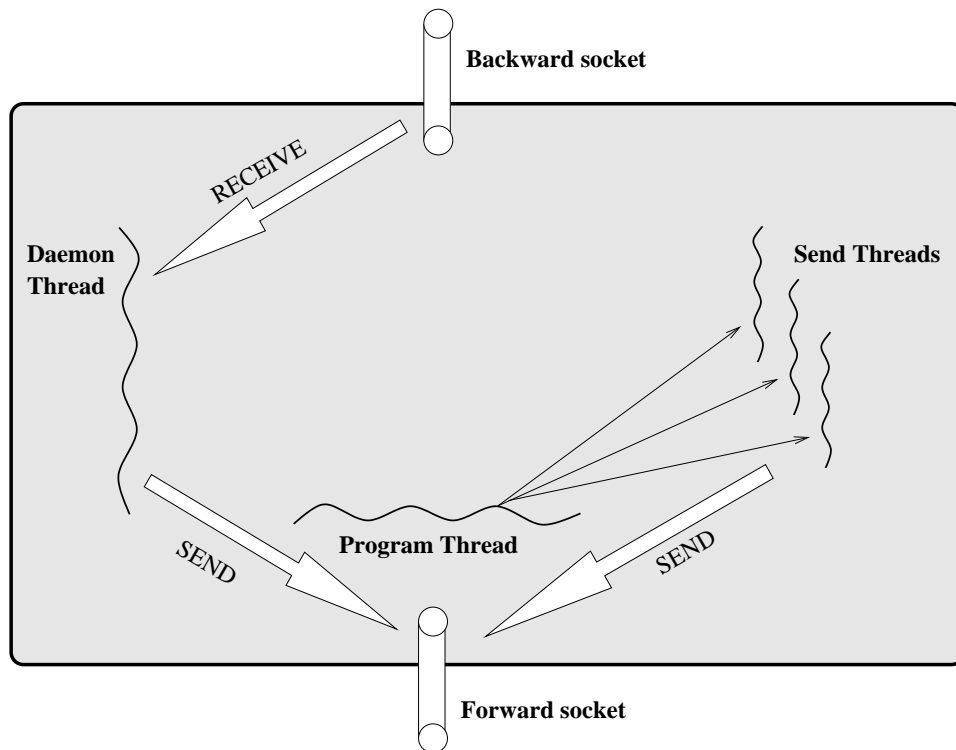
Ο ψευδοπαράλληλισμός που χρειάζεται για την “ταυτόχρονη” εκτέλεση της δρομολόγησης από τη βιβλιοθήκη και της αποστολής δεδομένων από το πρόγραμμα που τη χρησιμοποιεί, επιτυγχάνεται με τη χρήση της βιβλιοθήκης νημάτων POSIX[29] του Linux. Η χρήση νημάτων POSIX έχει το πλεονέκτημα πως απλοποιεί την επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων του προγράμματος, καθώς όλα τα νήματα μοιράζονται τον ίδιο χώρο μνήμης. Επίσης μας επιτρέπει να καθορίσουμε εμείς την προτεραιότητα των νημάτων. Αυτό γίνεται με

τη χρήση της συνάρτησης `rthread_yield()` που επιβάλλει στο νήμα που εκτελείτε όταν γίνεται η κλήση της να σταματήσει την εκτέλεση του για να μπορέσει να εκτελεστεί κάποιο άλλο νήμα. Η `rthread_yield()` καλείται από τη `bt_send()` έπειτα από κάθε αποστολή πακέτου. Επίσης καλείται το νήμα της βιβλιοθήκης που προωθεί τα πακέτα στον προορισμό τους, αφού προωθεί ένα εισερχόμενο πακέτο από κάθε socket που αποτελεί είσοδο πακέτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή των τριών προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις μας.

5.1.4 Υλοποίηση δακτυλίου μιας κατεύθυνσης

Δακτύλιος μιας κατεύθυνσης: Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η δομή του προγράμματος που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις για το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης.



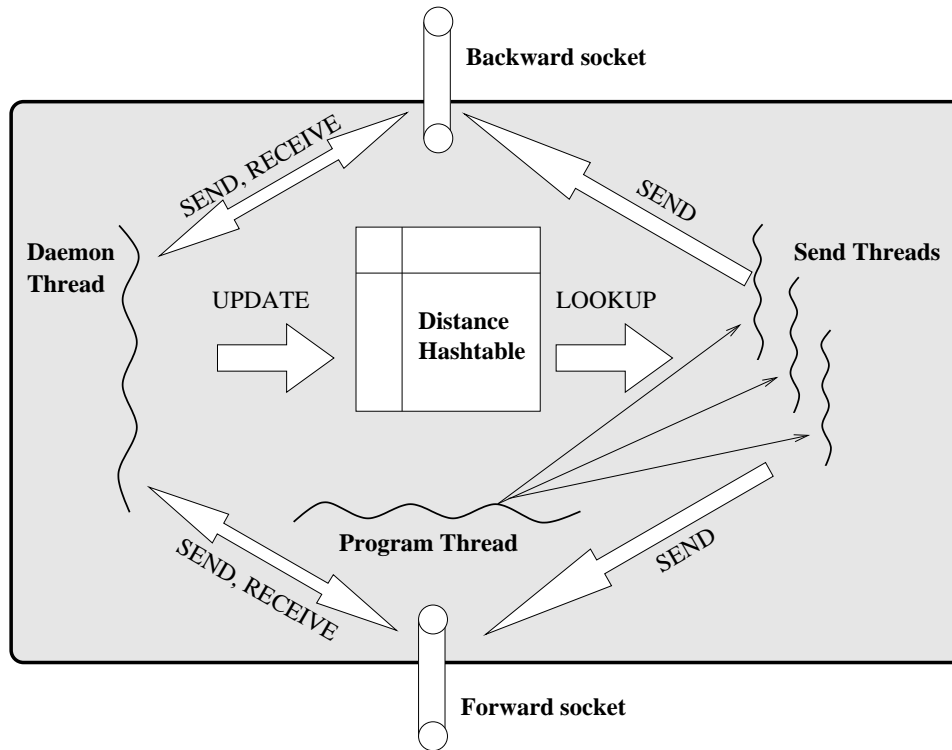
Σχήμα 5.2: Υλοποίηση δακτυλίου μιας κατεύθυνσης

Κατά την αρχικοποίηση της βιβλιοθήκης, δημιουργείται ένα νήμα-δαίμονας (daemon thread) που αναλαμβάνει να ελέγχει το socket “backward” για εισερχόμενα δεδομένα. Αν τα δεδομένα που διαβάζει προορίζονται για την τοπική συσκευή τα καταμετρά στα στατιστικά που κρατά. Αλλιώς τα προωθεί στο socket “forward”.

Το πρόγραμμα με το οποίο συνδέεται η βιβλιοθήκη δημιουργεί ένα νήμα αποστολής (send thread) για κάθε συσκευή στην οποία στέλνει δεδομένα. Τα νήματα αυτά στέλνουν τα πακέτα απευθείας στο socket “forward” χρησιμοποιώντας την `bt_send()`.

5.1.5 Υλοποίηση δακτυλίου δύο κατευθύνσεων

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η δομή του προγράμματος που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις για το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων.



Σχήμα 5.3: Υλοποίηση δακτυλίου δύο κατευθύνσεων

Κατά την αρχικοποίηση της βιβλιοθήκης, δημιουργείται ξανά ένα νήμα-δαίμονας (daemon thread) που ελέγχει όμως τόσο το socket “backward” όσο και το socket “forward” για εισερχόμενα δεδομένα. Αν τα δεδομένα που διαβάζει προορίζονται για την τοπική συσκευή τα καταμετρά στα στατιστικά που κρατά. Αλλιώς τα προωθεί στο άλλο socket.

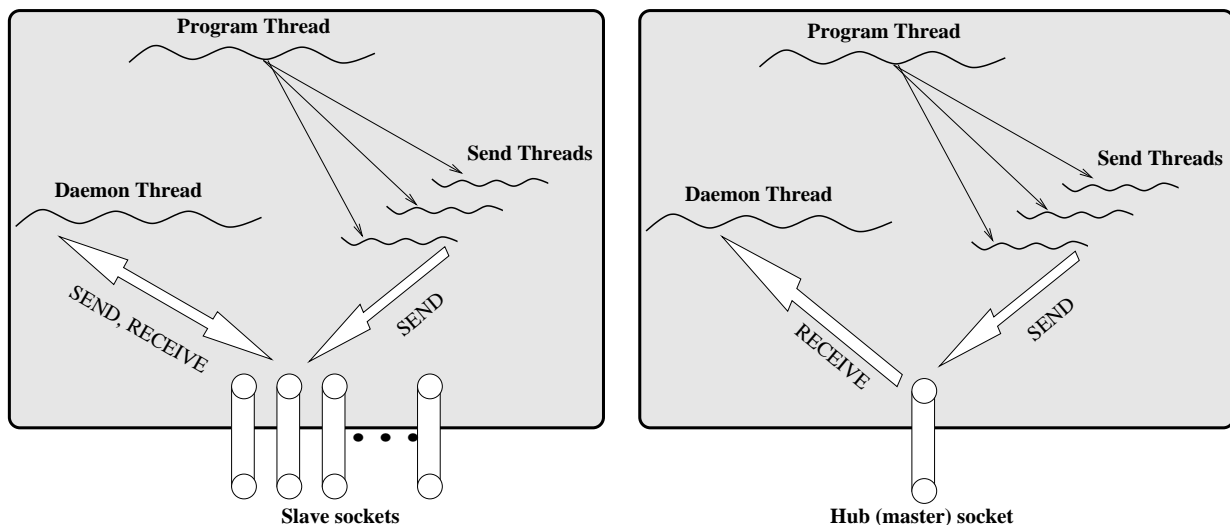
Τα τροχοδεικτικά πακέτα στέλνονται κατά την εκτέλεση της `make_handle()` και το νήμα-δαίμονας αναλαμβάνει να ενημερώσει έναν πίνακα αποστάσεων όποτε λάβει τα πακέτα απάντησης. Καθώς δεν κάναμε πειράματα και μετρήσεις σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον, οι αποστάσεις δεν ανανεώνονται όπως περιγράψαμε στην ενότητα 4.2.4.3 έπειτα από

την αρχικοποίηση τους. Σε περίπτωση που οι δύο διαδρομές προς μια συσκευή ισαπέχουν, χρησιμοποιείται η διαδρομή που αντιστοιχεί στο socket “backward”.

Για να στείλουν τα νήματα αποστολής δεδομένα σε κάποια συσκευή, χρησιμοποιούν ξανά τη `bt_send()`. Η `bt_send()` βρίσκει μέσω του πίνακα αποστάσεων τη συντομότερη απόσταση προς τον παραλήπτη και στέλνει το πακέτο στο σωστό socket. Για να αποφευχθούν οι συνεχείς αναζητήσεις στον πίνακα αποστάσεων, η διεύθυνση μνήμης που περιέχει την πληροφορία αποθηκεύεται στη δομή που επιστρέφει η `make_handle()`.

5.1.6 Υλοποίηση μικροδικτύου με δρομολόγηση

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η δομή του προγράμματος που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις για το μικροδίκτυο με δρομολόγηση διαμέσου της συσκευής κυρίου. Το σχήμα περιλαμβάνει δύο μέρη, καθώς το πρόγραμμα λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το αν η τοπική συσκευή είναι ή όχι κύριος στο μικροδίκτυο.



Σχήμα 5.4: Υλοποίηση μικροδικτύου με δρομολόγηση

Στο αριστερό μέρος του σχήματος φαίνεται η λειτουργία του προγράμματος όταν η τοπική συσκευή είναι κύριος στο μικροδίκτυο. Τότε το νήμα-δαίμονας που δημιουργεί η βιβλιοθήκη κατά την αρχικοποίηση της αναλαμβάνει να ελέγχει τα sockets προς τους υποτελείς και να παραλαμβάνει τα πακέτα που φτάνουν. Ανάλογα με το αν τα πακέτα προορίζονται για την τοπική συσκευή ή όχι, είτε τα καταμετρά στα στατιστικά που κρατάει είτε τα προωθεί στο σωστό socket. Η `bt_send()` που χρησιμοποιούν τα νήματα αποστολής στέλνει τα πακέτα απευθείας στο socket που αντιστοιχεί στον προορισμό τους.

Στο δεξί μέρος του σχήματος φαίνεται η λειτουργία του προγράμματος όταν η τοπική συσκευή είναι υποτελής στο μικροδίκτυο. Το νήμα-δαίμονας σε αυτήν την περίπτωση περιορίζεται στο να λαμβάνει τα εισερχόμενα πακέτα από το socket προς τον κύριο και να τα καταμετρά στα στατιστικά που κρατάει. Η `bt_send()` που χρησιμοποιούν τα νήματα αποστολής στέλνει τα πακέτα στη συσκευή κύριο μέσω του socket για να τα προωθήσει αυτός στον προορισμό τους.

5.2 Μετρήσεις επιδόσεων

5.2.1 Αρχικές μετρήσεις

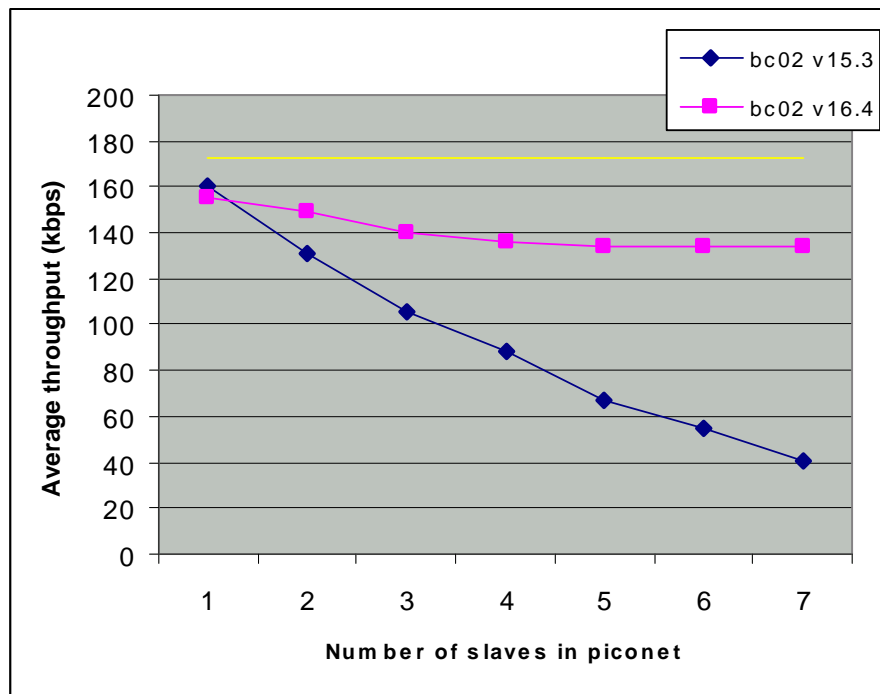
Πριν κάνουμε μετρήσεις βασισμένες σε διάφορους βαθμούς τοπικότητας της επικοινωνίας στα δύο ΔΠΠ που ορίσαμε, κάναμε μερικές πιο απλές μετρήσεις. Η πιο ενδιαφέρουσα, αφορούσε την επίπτωση που έχουν οι υπάρχουσες ανενεργές (`idle`) συνδέσεις σε ένα μικροδίκτυο.

Ξεκινήσαμε από ένα μικροδίκτυο με δύο συσκευές όπου ο κύριος στέλνει δεδομένα προς τον αρχικά ένα υποτελή του. Σταδιακά προσθέσαμε ανενεργές συνδέσεις στο μικροδίκτυο. Δηλαδή συνδέσεις προς υποτελείς πάνω από τις οποίες δεν ανταλλάσσονται δεδομένα. Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος μετράμε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στην αρχική ενεργή σύνδεση. Το πείραμα έγινε χρησιμοποιώντας τα συνοδευτικά προγράμματα της στοίβας Bluez, που επιτρέπουν τη γρήγορη εκτέλεση τέτοιων πειραμάτων χωρίς να χρειαστεί να γράψουμε οι ίδιοι κάποιο πρόγραμμα.

Εκτελέσαμε το πείραμα με δύο διαφορετικές συσκευές σαν κυρίους. Συγκεκριμένα με τη συσκευή Wiretek 10M που βασίζεται στην υλοποίηση CSR Bluecore2 v15.3 και με μια από τις συσκευές Anycom USB-100 που βασίζονται στην υλοποίηση CSR Bluecore2 v16.4. Στο [10] αναφέρεται πως, εξαιρουμένης της λειτουργίας `scatternet`, οι συσκευές βασισμένες στο CSR Bluecore2 με έκδοση `firmware` 16.4 αναμένεται να έχουν ίδια συμπεριφορά με εκείνες με έκδοση `firmware` 15.3. Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στο σχήμα 5.5.

Όπως βλέπουμε, ο επιτυγχανόμενος ρυθμός μετάδοσης παρουσιάζει σχεδόν γραμμική πτώση όταν χρησιμοποιούμε την συσκευή με παλαιότερη έκδοση `firmware` σαν κύριο. Αντίθετα, με τη νεότερη έκδοση `firmware` ο ρυθμός μετάδοσης αφού παρουσιάσει μια μικρή πτώση με τις πρώτες ανενεργές συνδέσεις σταματάει να μειώνεται παραπέρα όσο προσθέτουμε και άλλες. Δεν ισχύει δηλαδή ο ισχυρισμός στο [10].

Αυτό μας κάνει να αναθεωρήσουμε την επιλογή μας να χρησιμοποιήσουμε μια συσκευή με `firmware` έκδοση 14.3 για τις μετρήσεις στο μικροδίκτυο με δρομολόγηση. Για το λόγο αυτό θα αντιστρέψουμε την αντιστοίχιση των συσκευών #1 και #2 όπως αυτή εμφανί-



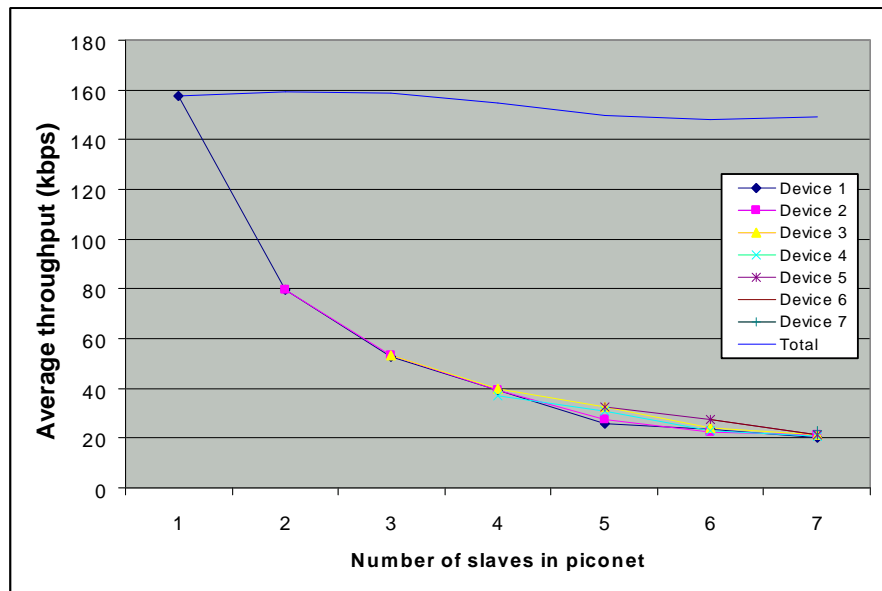
Σχήμα 5.5: Ρυθμός μετάδοσης σε μικροδίκτυο καθώς προσθέτονται ανενεργές συνδέσεις

ζεται στο σχήμα 5.1 όταν εκτελούμε τα πειράματα με μικροδίκτυο, ώστε ο κύριος να αντιστοιχεί σε συσκευή με έκδοση firmware 16.4. Επίσης με το πείραμα αυτό βλέπουμε πως ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνουμε με τις συσκευές μας και το Bluetooth είναι χαμηλότερος από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που αναφέρουν οι προδιαγραφές του Bluetooth για πακέτα *DH1*.

Επαναλάβαμε το πείραμα με τη συσκευή Anycom ως κύριο, μόνο που αυτή τη φορά οι συνδέσεις που προσθέταμε ήταν ενεργές. Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στο σχήμα 5.6. Βλέπουμε πως η χωρητικότητα του καναλιού περίπου ισοκατανέμεται μεταξύ συνδέσεων με ίσο φόρτο και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παραμένει σχεδόν σταθερός έπειτα από μια μικρή μείωση.

5.2.2 Σενάριο 1: 1 σύνδεση

Θα προχωρήσουμε τώρα στη σύγκριση των τοπολογιών εξετάζοντας έξι διαφορετικά σενάρια. Σε κάθε σενάριο προσθέτουμε μια επιπλέον σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών της τοπολογίας. Οι συνδέσεις διαφοροποιούνται σε τοπικές και εξωτερικές, ανάλογα με το αν ανήκουν ή όχι οι συσκευές που επικοινωνούν στο ίδιο ΔΠΠ. Όπως αναφέραμε, οι έξι συσκευές χωρίζονται σε δύο ΔΠΠ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Τα διαφορετικά σενάρια αν-



Σχήμα 5.6: Ρυθμός μετάδοσης σε μικροδίκτυο καθώς προσθέτονται ενεργές συνδέσεις

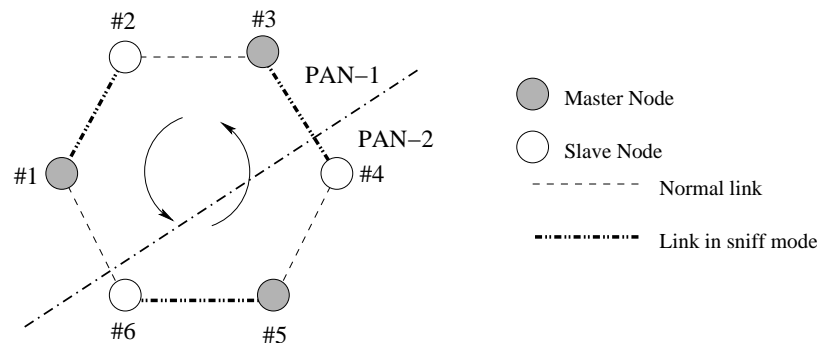
τιπροσωπεύουν διαφορετικούς βαθμούς τοπικότητας των συνδέσεων. Οι επιδόσεις των τοπολογιών καθώς προσθέτονται συνδέσεις, θα εξαρτηθούν από το αν μπορούν ή όχι να μεταφέρουν την τοπικότητα των (υψηλού επιπέδου) συνδέσεων στην πραγματική (χαμηλότερου επιπέδου) επικοινωνία στην τοπολογία.

Αρχικά θα συγκρίνουμε τις τρεις τοπολογίες υπό το φόρτο μιας μόνο σύνδεσης. Θα εξετάσουμε όλες τις δυνατές συνδέσεις ξεκινώντας από τη συσκευή #1. Επειδή και στις τρεις τοπολογίες που εξετάζουμε οι συσκευές λειτουργούν με δύο διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τη θέση τους στην τοπολογία, θα επαναλάβουμε το πείραμα εξετάζοντας όλες τις δυνατές συνδέσεις ξεκινώντας από τη συσκευή #2.

Στέλνουμε λοιπόν από τη συσκευή #1 (και έπειτα από τη #2) 400 πακέτα των 672bytes προς κάθε άλλη συσκευή. Μετρούμε το μέσο ρυθμό μετάδοσης για κάθε 10000bytes που λαμβάνονται από την εκάστοτε συσκευή προορισμό.

Στο [10] αναφέρεται πως η υλοποίηση CSR Bluecore2 v16.4 όταν λειτουργεί σε ένα μικροδίκτυο ως κύριος και σε ένα δεύτερο ως υποτελής τότε προτεραιότητα δίνεται στη λειτουργία ως υποτελής. Προτείνεται η χρήση της κατάστασης μειωμένων ευθυνών (sniff mode) για να ξοδεύει η συσκευή λιγότερο χρόνο ως υποτελής και να αντιμετωπίζονται έτσι οι δύο συνδέσεις με πιο δίκαιο τρόπο. Αν και στις διατάξεις δακτυλίου που χρησιμοποιούμε, οι συσκευές δεν λειτουργούν ως κύριοι και υποτελείς σε διαφορετικά μικροδίκτυα, θεωρήσαμε πως θα ήταν καλό να διερευνήσουμε τη συμπεριφορά του δακτυλίου μιας κατεύθυνσης, αν θέσουμε κάθε δεύτερη σύνδεση Bluetooth στην τοπολογία σε κατάσταση μειωμένων ευθυ-

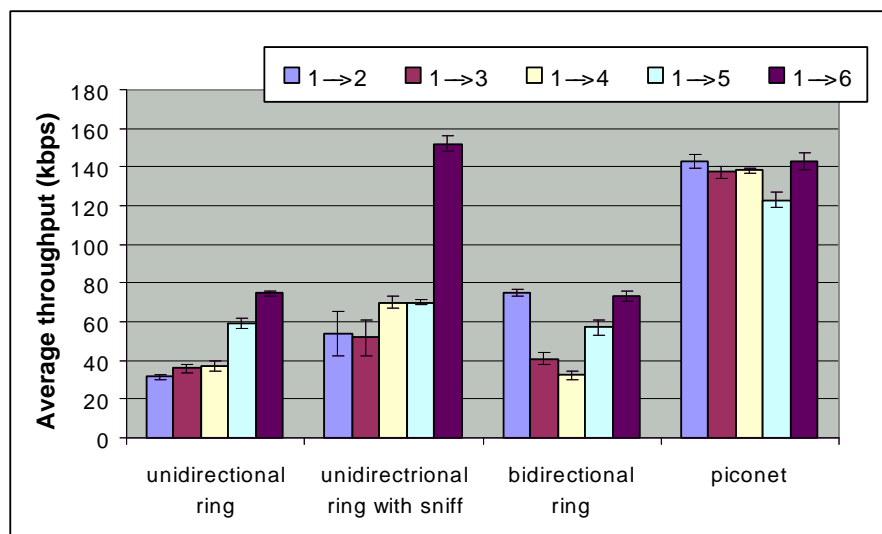
νών. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Δακτύλιος μιας κατεύθυνσης με συνδέσεις σε κατάσταση μειωμένων ευθυνών

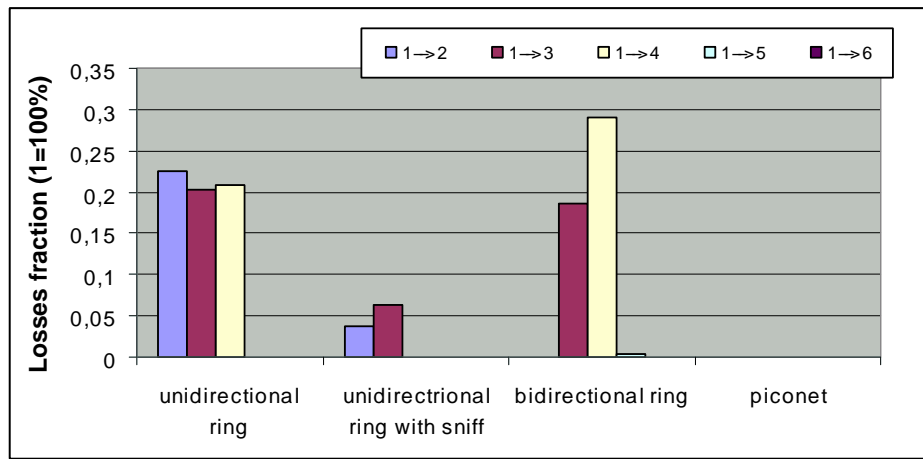
Στο σχήμα 5.8 φαίνονται οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης που επιτεύχθηκαν για συνδέσεις που ξεκινούν από τη συσκευή #1. Όπως ήταν αναμενόμενο, η διάταξη του μικροδικτύου είναι αυτή που πετυχαίνει τους μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, καθώς όλες οι συσκευές απέχουν ένα βήμα (hop) από τη συσκευή #1 και δεν εμπλέκεται ποτέ κάποια συσκευή που λειτουργεί σε scatternet και πιθανώς δε μπορεί να λειτουργήσει σε πλήρη ταχύτητα. Παρατηρούμε επίσης πως η χρήση της κατάστασης μειωμένων ευθυνών, δείχνει να βοηθάει στην επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης.

Αυτό που προκαλεί εντύπωση, είναι πως ο ρυθμός μετάδοσης στις τοπολογίες δακτυλίων φαίνεται να μειώνεται με την απόσταση από τον αποστολέα των δεδομένων. Αυτό δεν είναι αναμενόμενο και στο σημείο αυτό δε μπορεί να εξηγηθεί άμεσα.



Σχήμα 5.8: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης από τη συσκευή #1

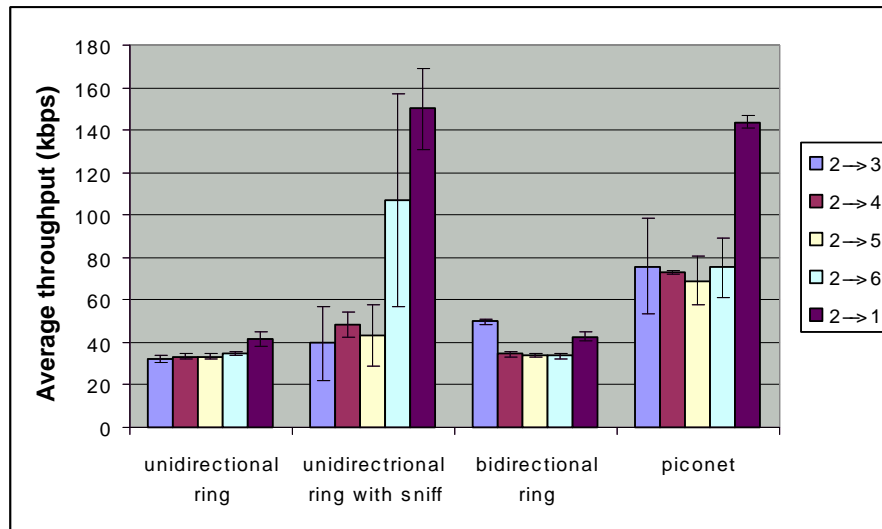
Στο σχήμα 5.9 φαίνεται το κλάσμα των πακέτων που δεν παραλήφθηκαν για καθεμία από τις 5 συνδέσεις. Οι απώλειες αυτές, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.1.2, προκύπτουν όταν τα πακέτα δεν μπορούν να προωθηθούν με τον ίδιο ρυθμό τον οποίο λαμβάνονται εξαιτίας του περιορισμένου χώρου αποθήκευσης για τα πακέτα που λαμβάνονται. Παρατηρούμε πως όποτε η συσκευή προορισμού απέχει ένα βήμα (hop) από τη συσκευή #1, δεν έχουμε απώλειες πακέτων. Αυτό οφείλεται στο ότι το Bluez δεν περιορίζει το χώρο που αποθηκεύονται τα πακέτα που είναι έτοιμα για αποστολή, καθώς και στο ότι ο παραλήπτης δεν επιβαρύνεται με άλλα καθήκοντα οπότε μπορεί και παραλαμβάνει τα πακέτα που έρχονται.



Σχήμα 5.9: Απώλειες πακέτων για μεταδόσεις από τη συσκευή #1

Στο σχήμα 5.10 φαίνονται οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης που επιτεύχθηκαν για συνδέσεις που ξεκινούν από τη συσκευή #2. Ξανά το μικροδίκτυο δείχνει να έχει τις καλύτερες επιδόσεις. Παρόλα αυτά οι επιδόσεις του περιορίζονται στο μισό περίπου από αυτές που είδαμε στο σχήμα 5.8, με εξαίρεση την σύνδεση 2→1. Αυτό οφείλεται στο ότι τα δεδομένα πρέπει να περάσουν δύο φορές από το ίδιο (μοναδικό) φυσικό κανάλι.

Ο δακτύλιος μιας κατεύθυνσης, παρουσιάζει αυξημένες επιδόσεις όσον αφορά τους ρυθμούς μετάδοσης προς τις δύο κοντινότερες συσκευές στη #2 ακολουθώντας τη φορά ροής των δεδομένων στο δακτύλιο. Παρουσιάζει όμως και μεγάλες τυπικές αποκλίσεις από τη μέση τιμή του ρυθμού μετάδοσης. Αρχικά στο πείραμα οι ρυθμοί μετάδοσης είναι χαμηλοί, της τάξης του 1.5kbps . Οι ρυθμοί αυξάνουν απότομα στο τέλος του πειράματος όταν τα τελευταία πακέτα φύγουν από τη συσκευή #2. Η συμπεριφορά αυτή δε μπορεί να φανεί στο σχήμα 5.10, δείχνει όμως πως η χρήση της κατάστασης μειωμένων ευθυνών σε ορισμένες συνδέσεις, όπως την παρουσιάσαμε στο σχήμα 5.7, είναι τελικά ωφέλιμη μόνο για τις συσκευές που λαμβάνουν δεδομένα από μια τέτοια σύνδεση.



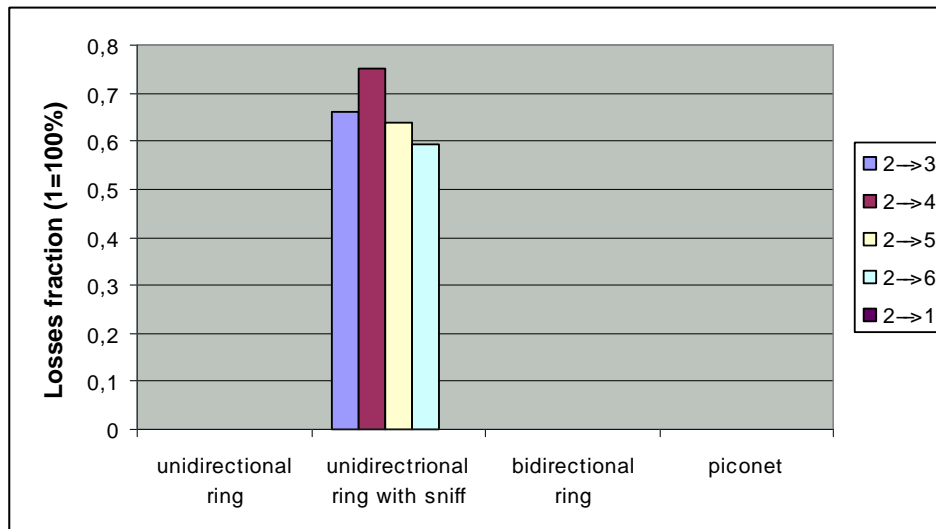
Σχήμα 5.10: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης από τη συσκευή #2

Όσον αφορά τις δύο άλλες τοπολογίες δακτυλίου, βλέπουμε πως οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης δεν αλλάζουν τόσο πολύ με την απόσταση από τη συσκευή #2 όσο άλλαζαν με την απόσταση από τη συσκευή #1. Επίσης παρατηρούμε πως οι μέγιστοι από τους μέσους ρυθμούς μετάδοσης που επιτεύχθηκαν μεταδίδοντας από τη συσκευή #2, προσεγγίζουν τους ελάχιστους από αυτούς που επιτεύχθηκαν μεταδίδοντας από τη συσκευή #1.

Στο σχήμα 5.11 έπειτα, φαίνεται το κλάσμα των πακέτων που δεν παραλήφθηκαν για καθεμία από τις 5 συνδέσεις που ξεκινούν από τη συσκευή #2. Βλέπουμε πως μόνο ο δακτύλιος που χρησιμοποιεί συνδέσεις μειωμένης ευθύνης παρουσιάζει απώλειες πακέτων, και μάλιστα σημαντικότερες. Αυτό μας ωθεί στο να απορρίψουμε την περαιτέρω εξέταση της χρήσης συνδέσεων μειωμένης ευθύνης.

Ο συνδυασμός των γεγονότων πως οι μέγιστοι επιτυγχάνόμενοι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης όταν μεταδίδουμε από τη συσκευή #2 προσεγγίζουν τους ελάχιστους όταν μεταδίδουμε από τη #1 και πως δεν έχουμε απώλειες όταν μεταδίδουμε από τη συσκευή #2, μας βοηθά να συμπεράνουμε πως ο περιοριστικός παράγοντας των επιδόσεων των δύο δακτυλίων που εξετάζουμε είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν οι συσκευές που λειτουργούν σαν υποτελείς σε δύο μικροδίκτυα (#2, #4, #6) να προωθούν τα πακέτα. Αυτό εξηγεί και το γεγονός πως στο σχήμα 5.8 φαίνεται να μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης στους δακτυλίους ανάλογα με την απόσταση των συσκευών που επικοινωνούν.

Τέλος, στο σχήμα 5.12 φαίνονται οι χρόνοι roundtrip που επιτυγχάνονται για τις διάφορες τοπολογίες. Καθώς για τη μέτρηση του roundtrip χρησιμοποιείται ένα μόνο πακέτο για τους δακτυλίους δεν προέκυψαν διαφορές ανάλογα με το ποια συσκευή στέλνει το πακέτο.



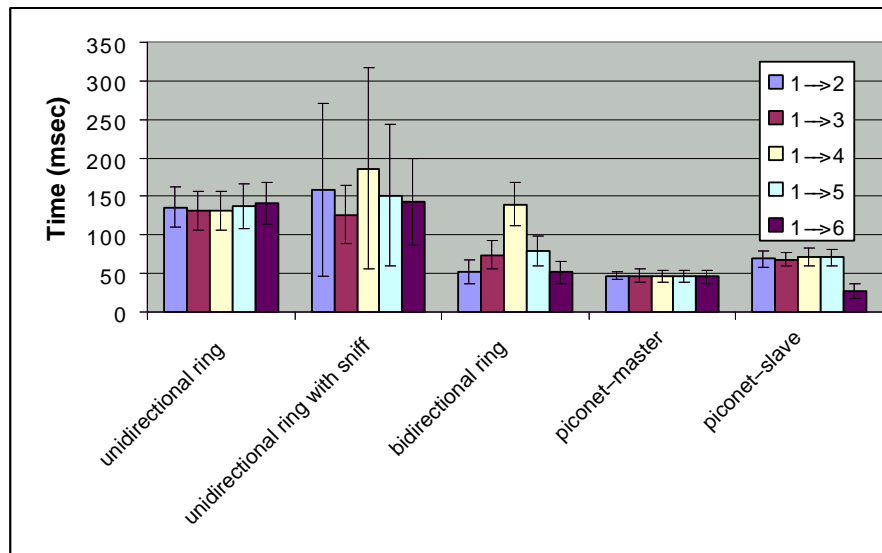
Σχήμα 5.11: Απώλειες πακέτων για μεταδόσεις από τη συσκευή #2

Παρατίθενται λοιπόν μόνο οι χρόνοι που μετρήθηκαν από τη συσκευή #1. Αντίθετα για το μικροδίκτυοτα αποτελέσματα είναι διαφορετικά αν μετράμε το χρόνο roundtrip από τη συσκευή κύριο ή κάποιο υποτελή. Για το μικροδίκτυολοιπόν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλογα με το αν η συσκευή #1 είναι κύριος ή υποτελής¹.

Το μικροδίκτυο όπως αναμενόταν εμφανίζει τους χαμηλότερους χρόνους roundtrip. Επίσης ο δακτύλιος μιας κατεύθυνσης παρουσιάζει σχεδόν σταθερό μέσο χρόνο roundtrip, ανεξάρτητα από την απόσταση από τη συσκευή. Αυτό είναι λογικό καθώς τα πακέτα ταξιδεύουν προς μια μόνο κατεύθυνση, οπότε για να επιστρέψουν στον αρχικό τους αποστολέα πρέπει πάντα να διανύσουν ολόκληρο το δακτύλιο. Στο δακτύλιο δύο κατευθύνσεων που το πακέτο χρησιμοποιεί πάντα τη συντομότερη διαδρομή ο χρόνος αλλάζει ανάλογα με την απόσταση των συσκευών και είναι στη χειρότερη περίπτωση ίσος με το χρόνο roundtrip στο δακτύλιο μιας κατεύθυνσης.

Επίσης ξανά παρατηρούμε μεγάλες τυπικές αποκλίσεις στο δακτύλιο που χρησιμοποιεί την κατάσταση μειωμένων ευθυνών. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο ότι ο έλεγχος για δεδομένα (polling) των συνδέσεων μειωμένων ευθυνών γίνεται σε αραιά διαστήματα από τις συσκευές-κυρίους. Έτσι το πόσο γρήγορα θα γίνει η προώθηση του πακέτου roundtrip πάνω από μια σύνδεση μειωμένης ευθύνης, εξαρτάται από το κατά πόσο σύντομα μετά την άφιξη του θα συμβεί ο επόμενος έλεγχος της σύνδεσης.

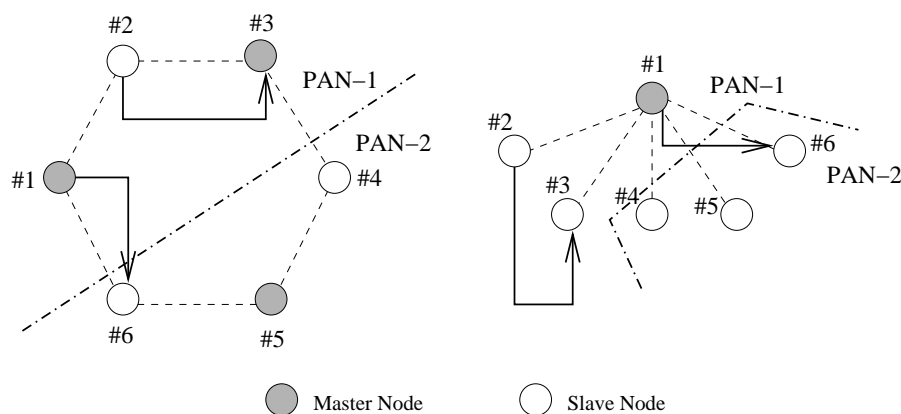
¹Σε επόμενες μετρήσεις χρόνων roundtrip, ο ρόλος της συσκευής #1 φαίνεται στο σχήμα περιγραφής του σεναρίου για το οποίο γίνονται οι μετρήσεις.



Σχήμα 5.12: Χρόνοι roundtrip από τη συσκευή #1

5.2.3 Σενάριο 2: 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση

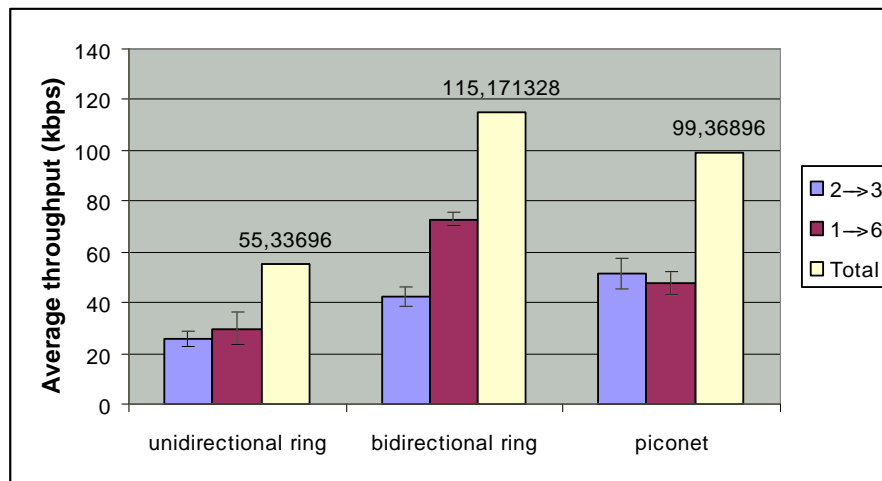
Ξεκινάμε τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των τοπολογιών με διάφορους βαθμούς τοπικότητας στις συνδέσεις, χρησιμοποιώντας μια σύνδεση εντός του PAN1 (τοπική) και μια σύνδεση από το PAN1 στο PAN2 (εξωτερική). Εξαιτίας του τρόπου σύνδεσης των δακτυλίων που περιγράψαμε στην ενότητα 4.2.2 η εξωτερική σύνδεση θα είναι είτε μεταξύ των συσκευών 1 και 6, είτε μεταξύ των 3 και 4. Επιλέξαμε τη σύνδεση 1→6. Σαν εσωτερική σύνδεση σε ένα ΔΠΠ επιλέξαμε τη 2→3. Οι συνδέσεις φαίνονται στο σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Σενάριο 2: 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση

Στο σχήμα 5.14 φαίνονται οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για καθεμιά από τις τοπολογίες αυτές. Ξανά κάθε μέτρηση λαμβάνεται με τη συμπλήρωση της λήψης 10000bytes. Στέλ-

νομε 2000 πακέτα για κάθε σύνδεση και φροντίζουμε να μην συμπεριλάβουμε στον υπολογισμό του μέσου ρυθμού μετάδοσης τις πρώτες μετρήσεις που λαμβάνονται, καθώς αυτές δε γίνονται υπό το φόρτο όλων των συνδέσεων που έχουμε ξεκινήσει.



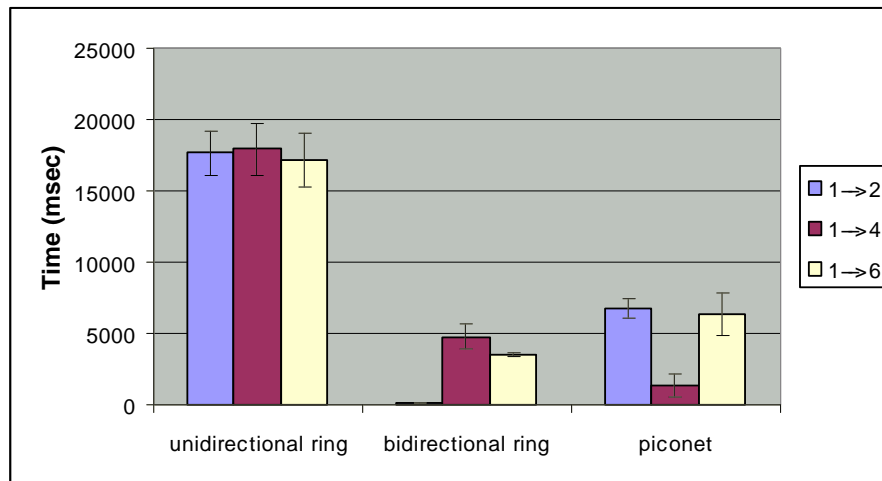
Σχήμα 5.14: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση

Βλέπουμε πως ο δακτύλιος διπλής κατεύθυνσης υπερτερεί των άλλων δύο διατάξεων. Πετυχαίνει διπλάσιο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης από το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης και ελαφρώς μεγαλύτερο από το μικροδίκτυο. Η διαφορά στις επιδόσεις των δύο δακτυλίων οφείλεται στην καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων από το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μικρή μόνο διαφορά μεταξύ των συνολικών μέσων ρυθμών μετάδοσης του μικροδικτύου και του δακτυλίου διπλής κατεύθυνσης. Ο δακτύλιος διπλής κατεύθυνσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13, χρησιμοποιεί δύο μικροδίκτυα για να εξυπηρετήσει τις δύο συγκεκριμένες συνδέσεις. Παρόλο όμως που έχει διπλάσιο εύρος ζώνης διαθέσιμο για την επικοινωνία, οι επιδόσεις είναι παραπλήσιες. Αυτό δείχνει πως η παρουσία συσκευών που λειτουργούν σε δύο μικροδίκτυα (scatternet mode) περιορίζει σημαντικά τις επιδόσεις έστω και αν αυτές παραμένουν ανενεργές σε ένα από τα δύο μικροδίκτυα που συμμετέχουν. Αυτό το γεγονός, που είχε φανεί και από τα αποτελέσματα της ενότητας 5.2.2, συνήθως αγνοείται όταν εξετάζονται οι επιδόσεις διαφόρων σχηματισμών scatternets ([11, 46]).

Στο σχήμα 5.15 φαίνονται οι χρόνοι roundtrip που μετρήθηκαν ενόσω οι συνδέσεις 1→6 και 2→3 ήταν ενεργές. Επιλέξαμε να μετράμε τους χρόνους roundtrip μεταξύ της συσκευής #1 και των συσκευών #2, #4, #6. Οι χρόνοι που μετρήθηκαν είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μια τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από αυτούς που φαίνονται στο σχήμα 5.12.

Η αύξηση των χρόνων roundtrip οφείλεται στο ότι τα πακέτα που χρησιμοποιούνται



Σχήμα 5.15: Χρόνοι roundtrip για 1 τοπική και 1 εξωτερική σύνδεση

για τη μέτρηση συναντάνε ουρές από πακέτα δεδομένων στη διαδρομή τους με αποτέλεσμα να καθυστερούν. Βλέπουμε λοιπόν πως στο δακτύλιο δύο κατευθύνσεων οι ουρές είναι μικρότερες, πράγμα που σημαίνει πως ο υπάρχον φόρτος είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένος.

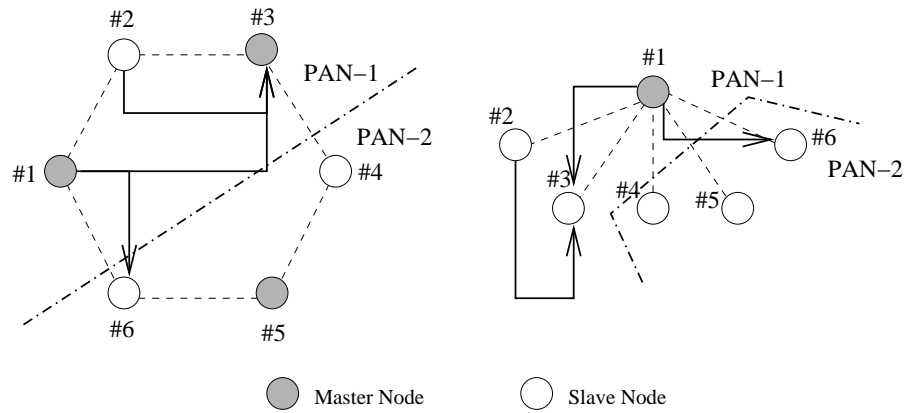
Τέλος, σημειώνουμε πως στο πείραμα αυτό δεν παρατηρήσαμε απώλειες πακέτων.

5.2.4 Σενάριο 3: 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

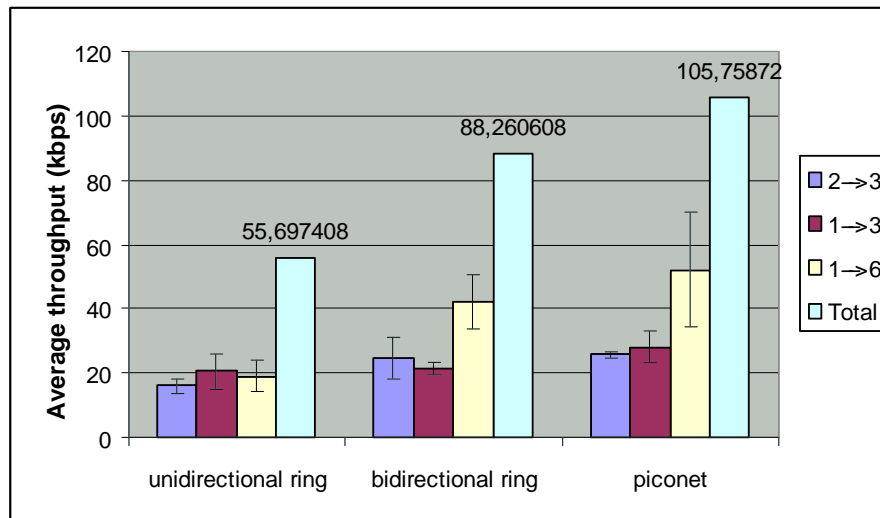
Για να εξετάσουμε το σενάριο αυτό διατηρούμε τις συνδέσεις που είχαμε πριν (1→6, 2→3) και προσθέτουμε τη σύνδεση 1→3. Όλες οι συνδέσεις φαίνονται στο σχήμα 5.16. Η νέα σύνδεση είναι επίσης αντίθετης φοράς με τη ροή του δακτυλίου μιας κατεύθυνσης. Μια καλύτερη συνένωση των 2 ΔΠΠ που θα βοηθούσε να αποφευχθεί αυτό προϋποθέτει συνεργασία όλων των συσκευών κάθε ΔΠΠ για την επιλογή του σημείου συνένωσης. Αν και αυτό δεν είναι ανέφικτο εξαιτίας του μικρού μεγέθους των ΔΠΠ, νομίζουμε πως είναι καλύτερη λύση η χρήση δακτυλίου δύο κατευθύνσεων σε συνδυασμό με τον απλό τρόπο συνένωσης που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2.

Στο σχήμα 5.17 φαίνονται οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για καθεμιά από τις τοπολογίες που εξετάζουμε. Παρατηρούμε πως ο συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης για το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης παραμένει σταθερός σε σχέση με το σενάριο 3 (σχήμα 5.17). Ο συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης έμεινε περίπου ο ίδιος για το μικροδίκτυο, ενώ παρουσίασε μικρή μείωση για το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων.

Η σταθερότητα στο δακτύλιο μιας κατεύθυνσης οφείλεται στο ότι η σύνδεση που προστέθηκε ξεκινά από τη συσκευή #1 από την οποία ήδη ξεκινούσε μια σύνδεση. Η προσθήκη



Σχήμα 5.16: Σενάριο 3: 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

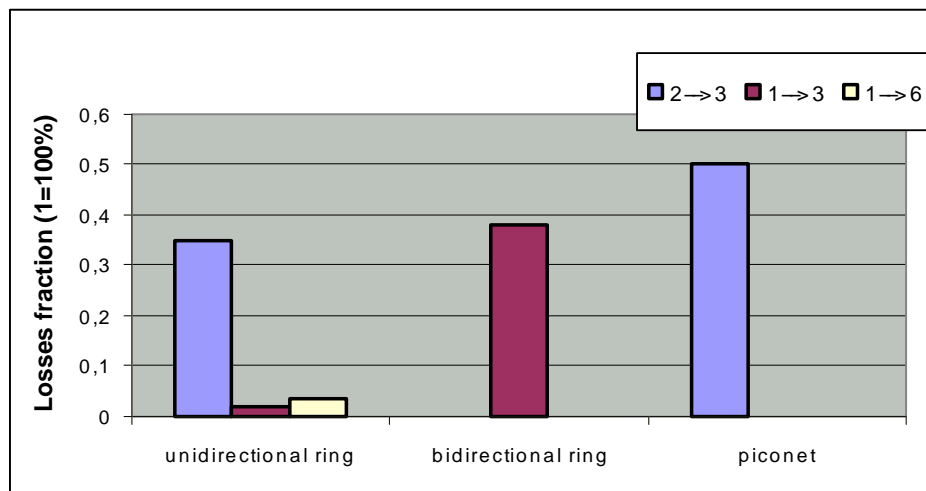


Σχήμα 5.17: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

της νέας σύνδεσης δεν αλλάζει τίποτα στα όσα συμβαίνουν σε χαμηλότερο επίπεδο καθώς μόνο το περιεχόμενο των πακέτων αλλάζει. Έτσι ο συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης παραμένει σταθερός.

Στο μικροδίκτυο ο συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης παρέμεινε περίπου σταθερός γιατί η σύνδεση ξεκινά από τη συσκευή #1 που παίζει το ρόλο του κυρίου στη διάταξη. Έτσι η προσθήκη της 1→3 δεν απαιτεί δρομολόγηση και άρα δεν έχουμε επιπλέον “έξοδα” δρομολόγησης που επηρεάζουν το συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης.

Τέλος για το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων, βλέπουμε πως ο μέσος ρυθμός δεδομένων που περνάνε από τη συσκευή #2 προς την #3 (δηλαδή ο συνολικός μέσος ρυθμός για τις συνδέσεις 1→3 και 2→3) παραμένει σταθερός σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Η μείωση στο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης, οφείλεται στο ότι η συσκευή #1 διαμοίρασε το χρόνο της για να στέλνει εξ' ίσου πακέτα προς τις #3 και #6. Όπως φαίνεται όμως στο σχήμα 5.18 δε φτάνουν όλα τα πακέτα στον προορισμό τους. Έτσι ουσιαστικά ο χρόνος για τα πακέτα αυτά σπαταλήθηκε, ενώ θα μπορούσε να έχει ξοδευθεί για να σταλούν πακέτα προς την #6, τα οποία θα παραλαμβάνονταν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένας μηχανισμός ελέγχου ροής θα ευνοούσε τη διάταξη του δακτυλίου δύο κατευθύνσεων. Δε θα συνέβαινε όμως το ίδιο για το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης, όπου μπορεί να μειώνονταν οι απώλειες πακέτων, όμως ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δε θα αύξανε.

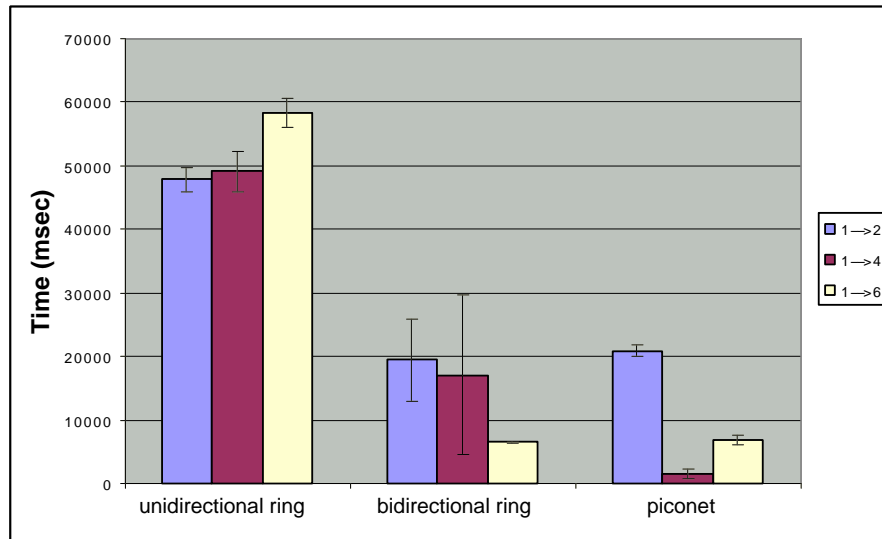


Σχήμα 5.18: Απώλειες πακέτων για 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ακόμα το ποσοστό των απωλειών για τη σύνδεση 2→3 στο μικροδίκτυο. Το ποσοστό αυτό οφείλεται στο ότι η συσκευή #2 μπορεί και στέλνει δεδομένα προς την #3 με κάποιο ρυθμό r . Με τον ίδιο συνολικό ρυθμό μπορεί και η #1 να στέλνει δεδομένα προς την #3. Ο ρυθμός αυτός μοιράζεται σε $r/2$ για δεδομένα της 2→3 και $r/2$

για δεδομένα της 1→3. Λογικό είναι λοιπόν να χάνονται τα μισά πακέτα από τη #2 στην #3 καθώς περιμένουν στον (πεπερασμένο) προσωρινό χώρο αποθήκευσης στην #1 για να προωθηθούν.

Τέλος στο σχήμα 5.19 φαίνονται οι χρόνοι roundtrip για τις τρεις τοπολογίες, υπό το φόρτο του συγκεκριμένου σεναρίου. Βλέπουμε πως με τη χρήση του δακτυλίου δύο κατευθύνσεων, αποφεύγουμε τη δημιουργία μεγάλων ουρών.



Σχήμα 5.19: Χρόνοι roundtrip για 2 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

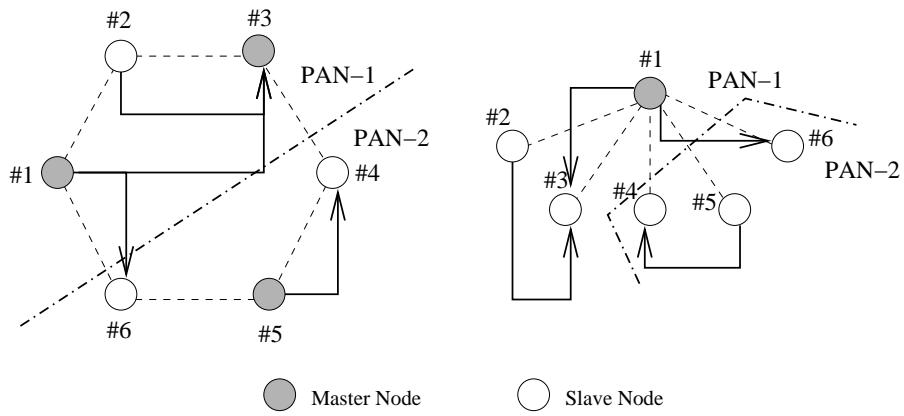
5.2.5 Σενάριο 4: 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

Ξανά διατηρώντας τις συνδέσεις του σεναρίου 3, προσθέτουμε και τη σύνδεση 5→4. Η νέα τοπική σύνδεση αφορά αυτή τη φορά το PAN2. Όλες οι συνδέσεις που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο σχήμα 5.20.

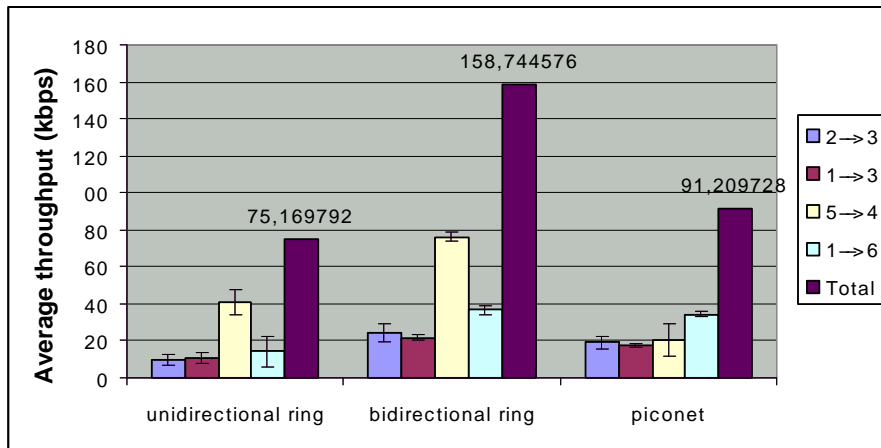
Στο σχήμα 5.21 φαίνονται οι ρυθμοί μετάδοσης που μετρήθηκαν σε καθεμιά από τις 3 διατάξεις. Ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων έχει διπλάσιο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης και σημαντικά μεγαλύτερο από το μικροδίκτυο.

Παρατηρώντας τις επιδόσεις του δακτυλίου δύο κατευθύνσεων σε αυτό το σενάριο (σχήμα 5.21) σε σύγκριση με το προηγούμενο (σχήμα 5.17) βλέπουμε πως οι επιδόσεις των συνδέσεων που υπήρχαν και στο προηγούμενο σενάριο (2→3, 1→3, 1→6) παρέμειναν σταθερές. Η διαφορά στο συνολικό ρυθμό μετάδοσης λοιπόν αντιστοιχεί καθαρά στις επιδόσεις της σύνδεσης 5→4.

Η μικρή αύξηση του συνολικού μέσου ρυθμού μετάδοσης στο δακτύλιο μιας κατεύ-



Σχήμα 5.20: Σενάριο 4: 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

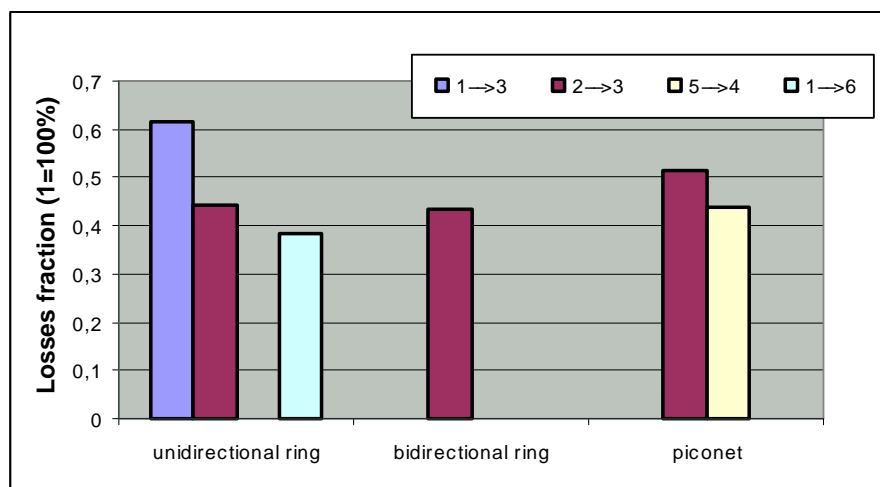


Σχήμα 5.21: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

θυνσης από την άλλη οφείλεται ξανά στην προσθήκη της 5→4. Όμως η προσθήκη της 5→4 επηρέασε αρνητικά τις επιδόσεις των 2→3 και 1→3 με αποτέλεσμα η αύξηση στο συνολικό μέσο ρυθμό εξαιτίας της 5→4 να είναι μετριαστεί.

Αυτό δείχνει πως ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων εκμεταλλεύεται καλύτερα την τοπικότητα της επικοινωνίας από το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης, καθώς η επικοινωνία στο PAN1 (2→3, 1→3) δεν επηρεάζει την επικοινωνία στο PAN2 (5→4). Το αποτέλεσμα είναι να έχει ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων υψηλότερες επιδόσεις. Στο μικροδίκτυο τέλος δείχνει να έχει επέλθει κορεσμός και η νέα σύνδεση είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί ο μέσος ρυθμός μετάδοσης στις υπόλοιπες συνδέσεις.

Οι απώλειες πακέτων για το σενάριο αυτό φαίνονται στο σχήμα 5.22. Οι απώλειες στο δακτύλιο δύο κατευθύνσεων παρέμειναν ίδιες όπως στο προηγούμενο σενάριο. Στο μικροδίκτυο παρουσιάστηκαν επιπλέον απώλειες που οφείλονται στα ίδια αίτια που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.2.4. Τέλος, στο δακτύλιο μιας κατεύθυνσης οι απώλειες αυξήθηκαν κατά πολύ, δείγμα πως έχει επέλθει κορεσμός και σε αυτή την τοπολογία.

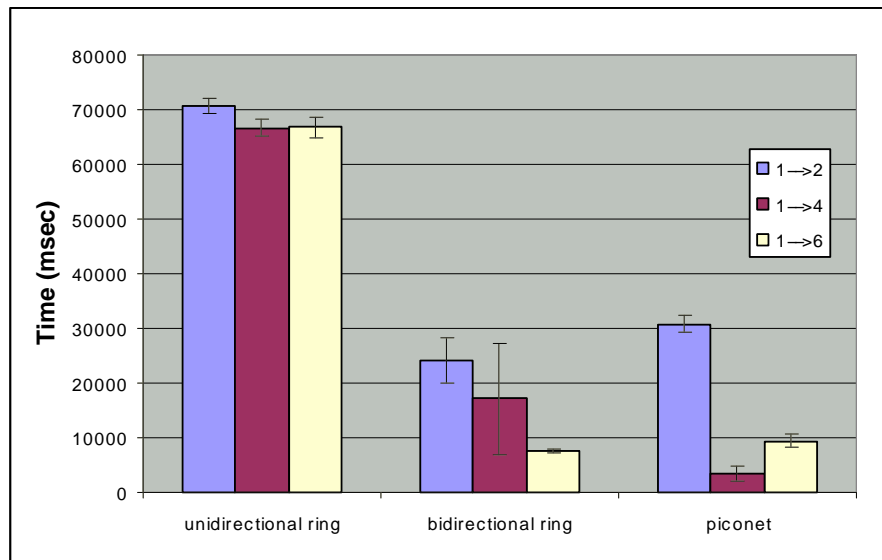


Σχήμα 5.22: Απώλειες πακέτων για 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

Τέλος στο σχήμα 5.23 φαίνονται οι χρόνοι roundtrip υπό το φόρτο του συγκεκριμένου σεναρίου. Βλέπουμε πως μόνο στην περίπτωση του δακτυλίου μιας κατεύθυνσης αυξάνουν οι χρόνοι roundtrip άρα και οι ουρές που συναντάνε τα πακέτα.

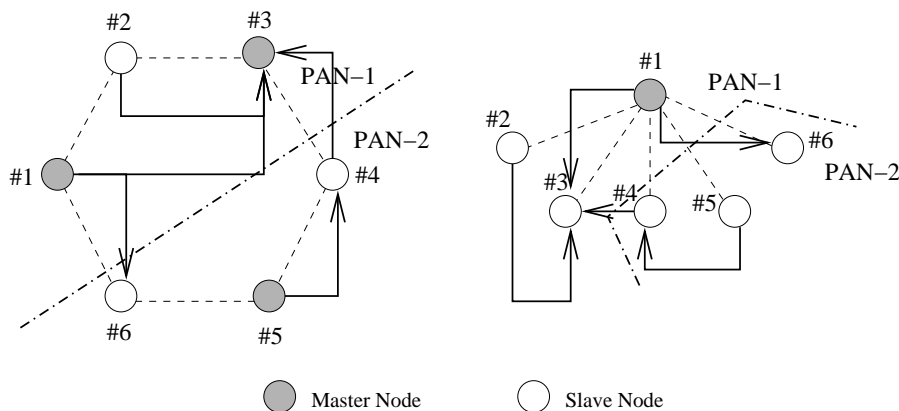
5.2.6 Σενάριο 5: 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις

Σε αυτό το σενάριο διατηρώντας τις υπάρχουσες συνδέσεις από το σενάριο 4, προσθέσαμε μια επιπλέον εξωτερική σύνδεση. Επιλέξαμε τη σύνδεση 4→3. Όλες οι συνδέσεις



Σχήμα 5.23: Χρόνοι roundtrip για 3 τοπικές και 1 εξωτερική σύνδεση

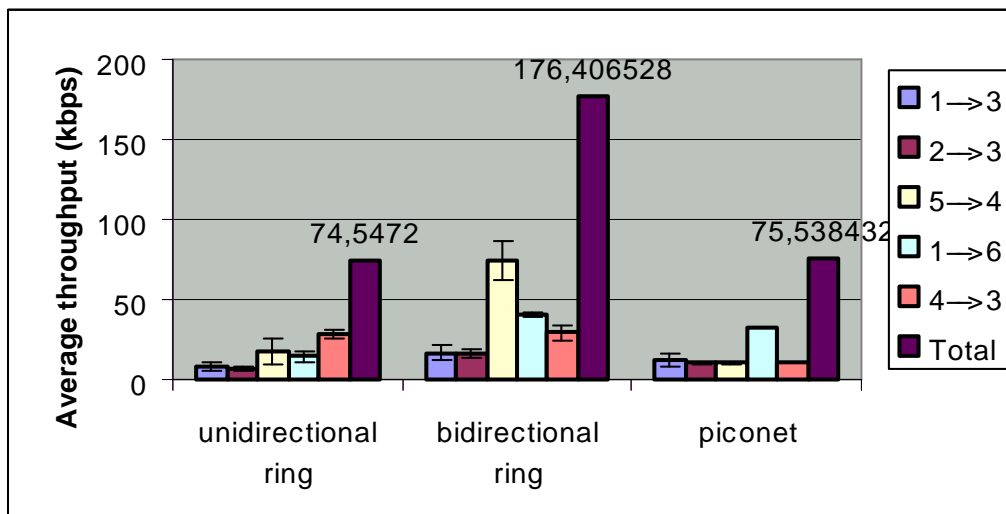
που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σενάριο φαίνονται στο σχήμα 5.24. Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτεύχθηκαν σε αυτό το σενάριο φαίνονται στο σχήμα 5.25.



Σχήμα 5.24: Σενάριο 5: 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις

Στο σενάριο αυτό ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων επιτυγχάνει υπερδιπλάσιο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση και με τις δύο άλλες διατάξεις. Η επιπλέον βελτίωση του συνολικού μέσου ρυθμού μετάδοσης για το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων δείχνει πως η διάταξη δεν έχει επέλθει ακόμα κορεσμός.

Ο δακτύλιος μιας κατεύθυνσης παρουσιάζει σταθερό συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με το σενάριο 4. Η προσθήκη δηλαδή της επιπλέον σύνδεσης απλά απορρόφησε πόρους από τις υπόλοιπες, πράγμα που δείχνει τον κορεσμό της διάταξης. Στο μικροδίκτυο



Σχήμα 5.25: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις

έχουμε επιπλέον πτώση του μέσου ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Μόνο η σύνδεση 1→6 παρουσιάζει σταθερό μέσο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο.

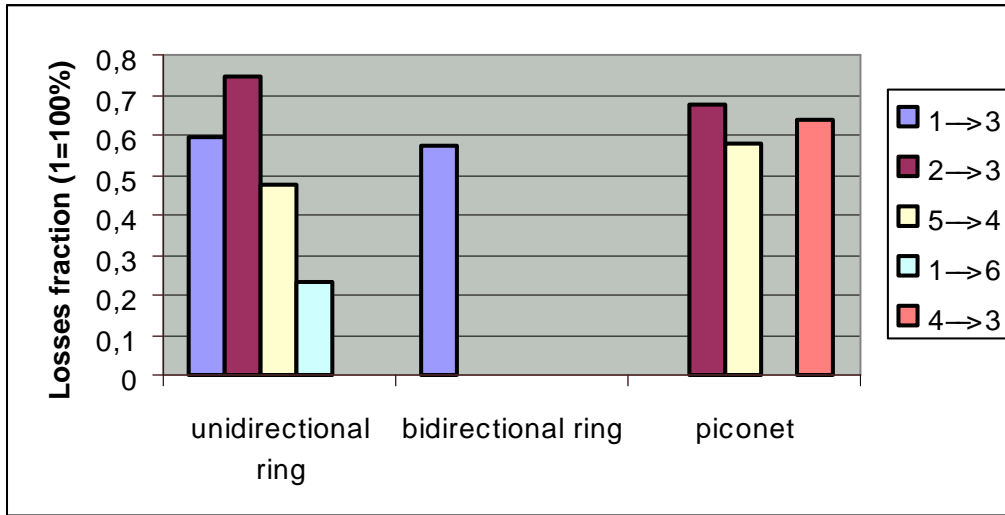
Οι απώλειες πακέτων για το σενάριο αυτό φαίνονται στο σχήμα 5.26. Καθώς στις ήδη κορεσμένες διατάξεις του δακτυλίου μιας κατεύθυνσης και του μικροδικτύου προστέθηκε και άλλη μια σύνδεση, οι απώλειες πακέτων αυξήθηκαν ακόμα παραπέρα. Στο δακτύλιο μιας κατεύθυνσης δεν παρουσιάστηκαν επιπλέον απώλειες, καθώς η επιλογή πάντα της συντομότερης διαδρομής έχει σαν αποτέλεσμα και τα πακέτα της νέας σύνδεσης να χρειάζονται να διανύσουν ένα μόνο βήμα προς τον προορισμό τους.

Τέλος στο σχήμα 5.27 φαίνονται οι χρόνοι roundtrip υπό το φόρτο του σεναρίου 5. Για το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης, οι χρόνοι roundtrip αυξάνουν επιπλέον, δείγμα επιπλέον αύξησης των ουρών στη διάταξη. Το ίδιο συμβαίνει και για το μικροδίκτυο, ενώ για το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων οι χρόνοι roundtrip παραμένουν περίπου σταθεροί.

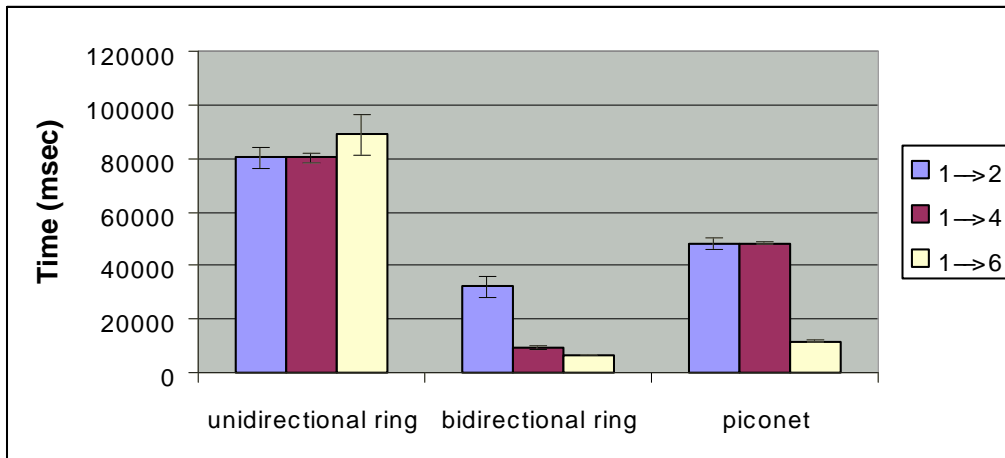
5.2.7 Σενάριο 6: 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις

Στο τελευταίο αυτό σενάριο, διατηρώντας τις υπάρχουσες συνδέσεις από το σενάριο 5, προσθέτουμε μια επιπλέον τοπική σύνδεση στο PAN2. Επιλέξαμε τη σύνδεση 6→5. Όλες οι συνδέσεις που χρησιμοποιούνται στο σενάριο 6 φαίνονται στο σχήμα 5.24. Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτεύχθηκαν σε αυτό το σενάριο φαίνονται στο σχήμα 5.29.

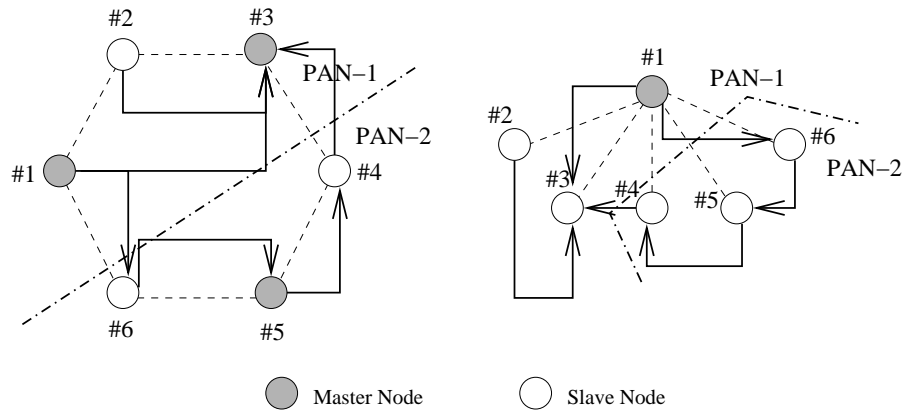
Για το σενάριο αυτό δε στάθηκε δυνατό να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις για την τοπολογία του μικροδικτύου. Μετά την εκκίνηση και της τελευταίας από τις 6 συνδέσεις,



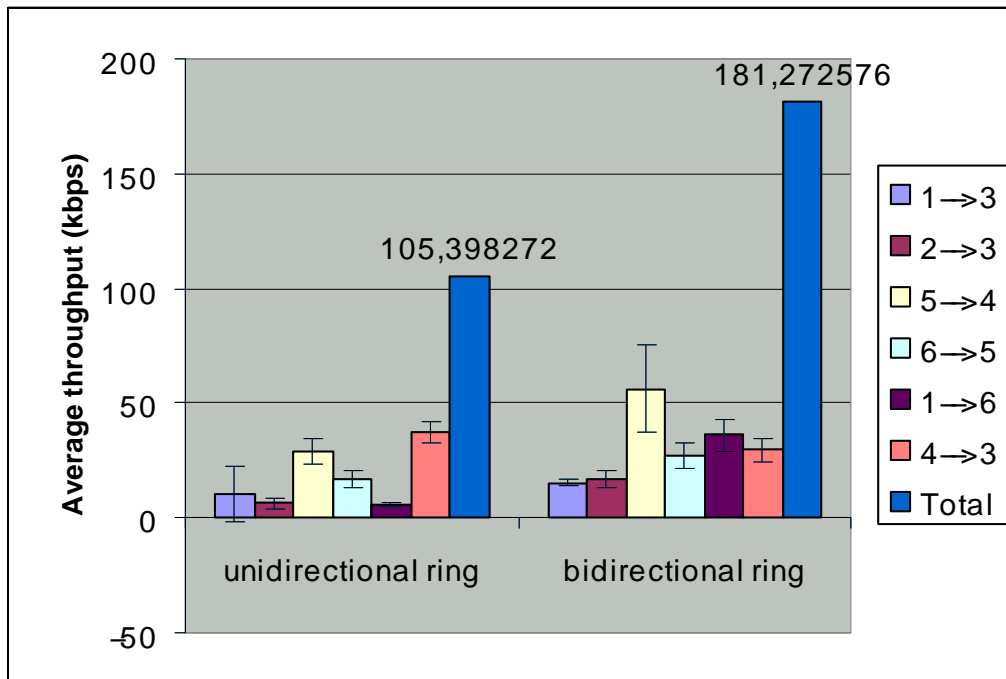
Σχήμα 5.26: Απώλειες πακέτων για 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις



Σχήμα 5.27: Χρόνοι roundtrip για 3 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις



Σχήμα 5.28: Σενάριο 6: 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις



Σχήμα 5.29: Μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις

οι υπολογιστές που φιλοξενούσαν τις συσκευές Bluetooth “πάγωναν” και χρειαζόταν να τις επανεκινήσουμε. Δεν μπορέσαμε να εντοπίσουμε το ακριβές αίτιο του “παγώματος” αυτού, καθώς δεν βρήκαμε κάποια χρήσιμη πληροφορία στο αρχείο γεγονότων (log) του πυρήνα. Το γεγονός αυτό δείχνει μάλλον προς πρόβλημα σε κάποια από τις συσκευές, χωρίς να μπορεί να αποκλειστεί και η συμπεριφορά να οφείλεται στη στοίβα Bluez.

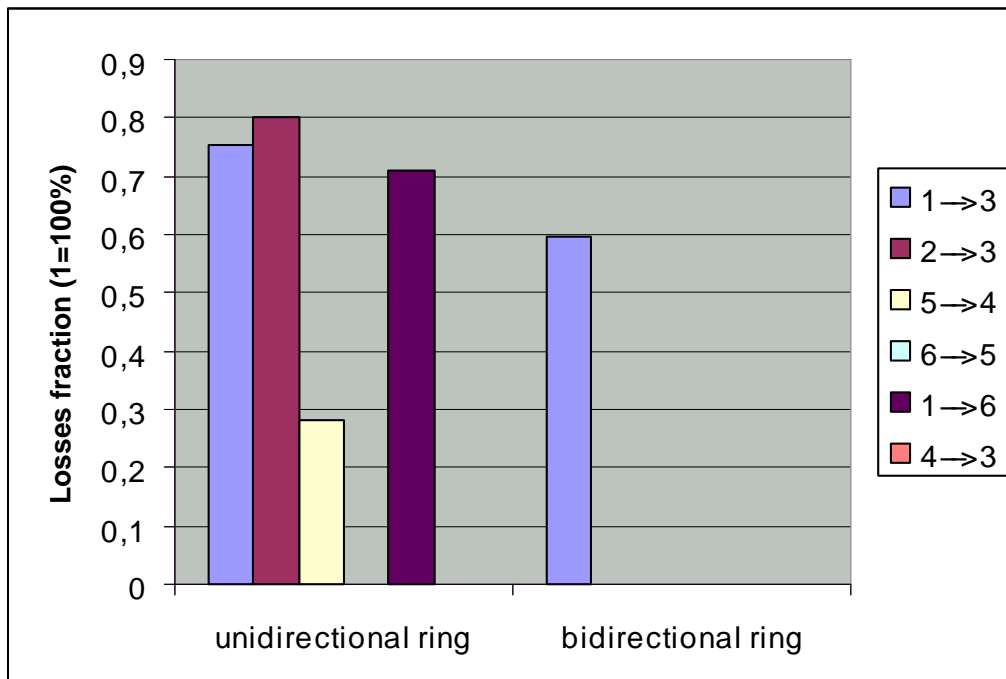
Όπως αναμενόταν, εξαιτίας της ήδη μεγάλης διαφοράς, ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων επιτυγχάνει ξανά υψηλότερο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης. Αυτό που δεν ήταν αναμενόμενο είναι η αύξηση στο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης στο δακτύλιο μιας κατεύθυνσης. Η αύξηση παρά τον κορεσμό της τοπολογίας οφείλεται στο ότι από τη φυσική σύνδεση μεταξύ των συσκευών #6 και #5 στο προηγούμενο σενάριο περνούσαν τα πακέτα των συνδέσεων 1→3 και 2→3 με ρυθμό που έτσι και αλλιώς δε θα μπορούσε να υποστηριχθεί από όλες τις φυσικές συνδέσεις μέχρι τη συσκευή #3, εξαιτίας της παρουσίας αργότερα των 5→4 και 4→3. Η παρουσία της 6→5 έχει σαν αποτέλεσμα το μέρος των πακέτων που έτσι και αλλιώς θα χάνονταν αργότερα στις συσκευές #5 και #4 να χάνεται νωρίτερα και αντί αυτού να ταξιδεύουν τα πακέτα της τα οποία όμως παραλαμβάνονται επιτυχώς από την #5.

Η μικρή μόνο αύξηση στο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης για το δακτύλιο δύο κατευθύνσεων δείχνει πως ο κορεσμός επέρχεται σιγά-σιγά και σε αυτή την τοπολογία. Το γεγονός όμως πως χρειάζεται αναλογικά μια σύνδεση για κάθε συσκευή για να συμβεί αυτό είναι πολύ θετικό. Οι Lin et al. στο [30] αναφέρουν πως για το δακτύλιο τους με 20 συσκευές, ο κορεσμός επέρχεται ήδη από τις 10 συνδέσεις². Συγκρίνοντας τους μέσους ρυθμούς μετάδοσης για κάθε σύνδεση χωριστά, βλέπουμε πως ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων υπολείπεται μόνο στο ρυθμό μετάδοσης για τη σύνδεση 4→3.

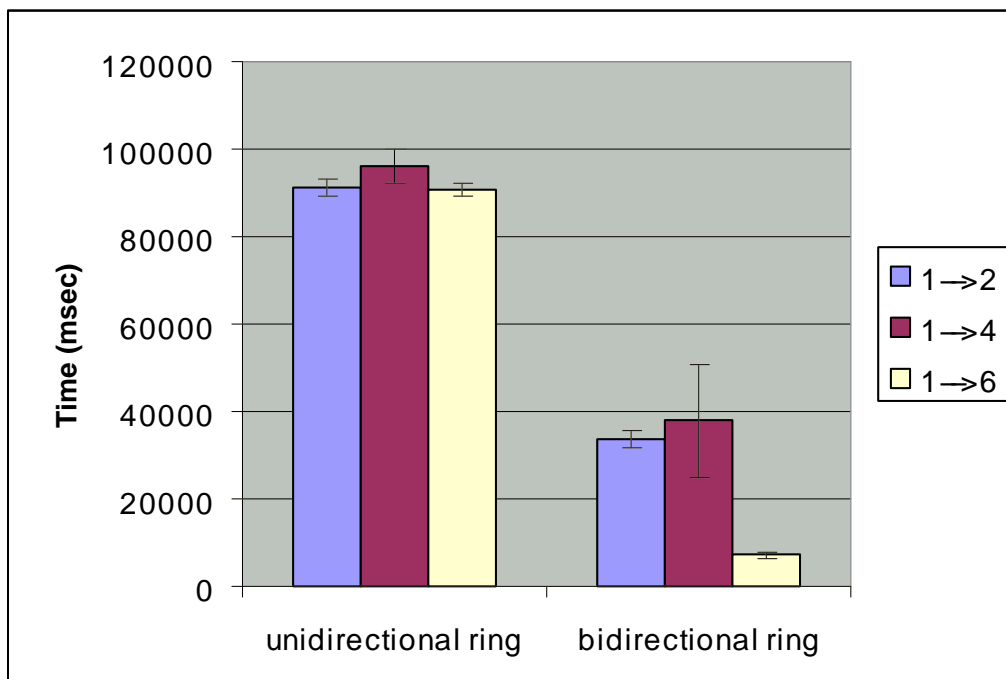
Στο σχήμα 5.30 φαίνονται οι απώλειες για πακέτων για το σενάριο 6. Ξανά οι απώλειες στο δακτύλιο δύο κατευθύνσεων εμφανίζονται μόνο για τη σύνδεση 1→3. Στο δακτύλιο μιας κατεύθυνσης οι απώλειες αυξάνονται, φτάνοντας και το 80%, αποτέλεσμα των πολύ μικρών ρυθμών μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχθούν.

Τέλος στο σχήμα 5.27 φαίνονται οι χρόνοι roundtrip υπό το φόρτο του σεναρίου 5. Πλέον φαίνεται πως και ολόκληρος ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων έχει φορτωθεί, με αποτέλεσμα οι χρόνοι roundtrip να προσεγγίζουν τα 40sec. Οι χρόνοι roundtrip για το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης αυξάνουν ξανά.

²Ο δακτύλιος στον οποίο αναφέρονται διαφέρει από το δακτύλιο μιας κατεύθυνσης που εξετάζουμε γιατί περιέχει παραπάνω από 3 συσκευές ανά μικροδίκτυο



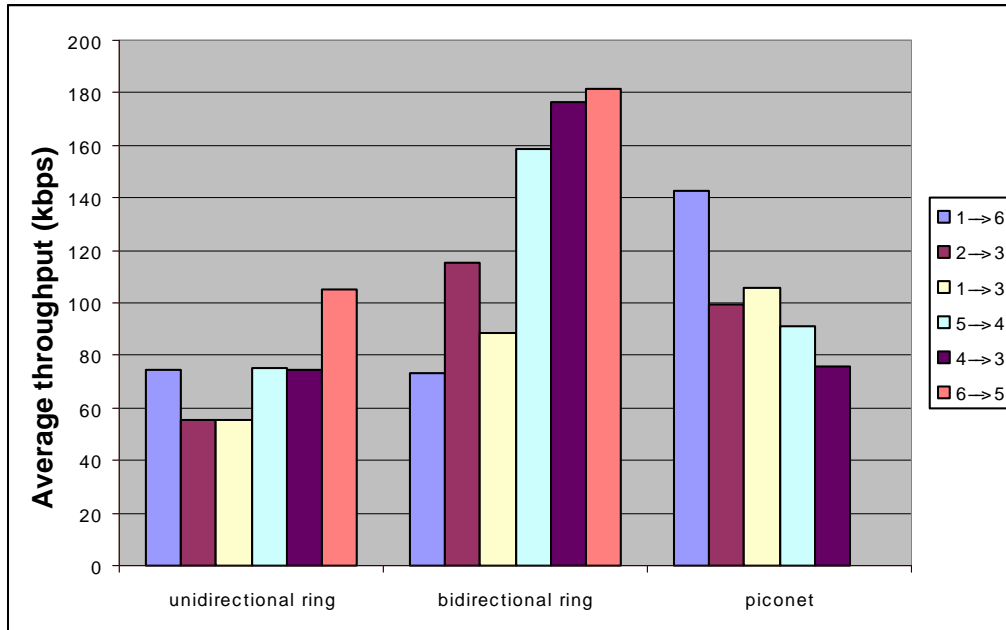
Σχήμα 5.30: Απώλειες πακέτων για 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις



Σχήμα 5.31: Χρόνοι roundtrip για 4 τοπικές και 2 εξωτερικές συνδέσεις

5.2.8 Συνολική σύγκριση επιδόσεων τοπολογιών

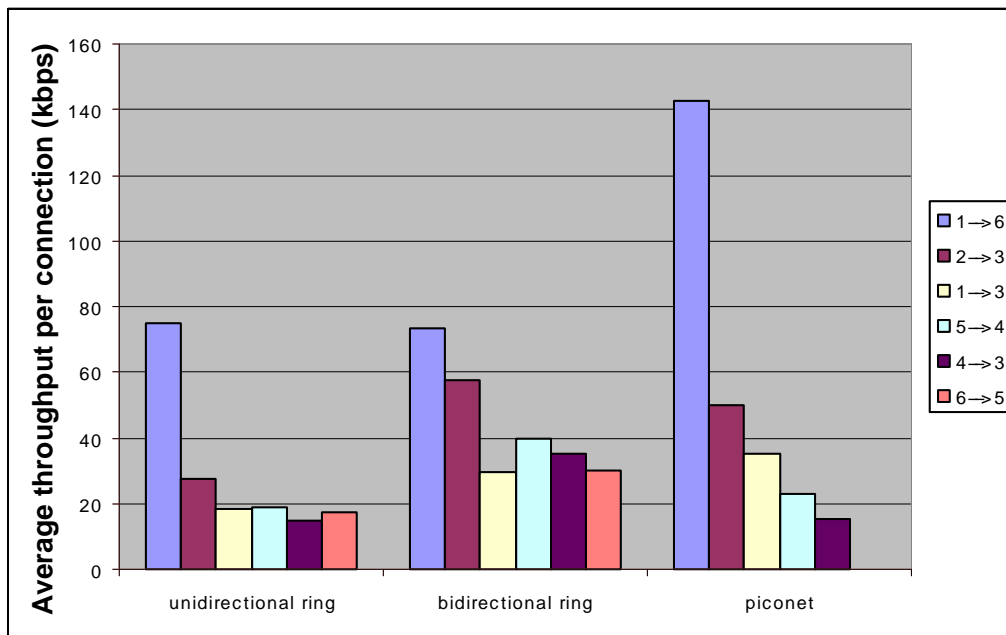
Στο σχήμα 5.32 φαίνονται συγκεντρωτικά οι συνολικοί μέσοι ρυθμοί μετάδοσης για όλα τα σενάρια. Στη λεζάντα του σχήματος αναγράφεται η επιπλέον σύνδεση που προστίθεται σε κάθε σενάριο.



Σχήμα 5.32: Συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης για τα 6 σενάρια

Για το μικροδίκτυο βλέπουμε πως για κάθε σύνδεση που δεν περιλαμβάνει τη συσκευή #1 (κύριος) ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης πέφτει. Κάθε τέτοια σύνδεση λοιπόν σπαταλάει επιπλέον πόρους της τοπολογίας. Αντίθετα στις τοπολογίες δακτυλίου ο συνολικός μέσος ρυθμός μετάδοσης αυξάνει καθώς προσθέτουμε συνδέσεις. Η αύξηση αυτή στο δακτύλιο δύο κατευθύνσεων είναι μεγαλύτερη, πράγμα που σημαίνει πως εκμεταλεύεται καλύτερα τους πόρους που έχει. Η καλύτερη εκμετάλευση οφείλεται στις προτάσεις που κάναμε στο κεφάλαιο 4. Παρατηρούμε πως με εξαίρεση το τελευταίο σενάριο όπου το μικροδίκτυο δεν μπόρεσε να λειτουργήσει, ο δακτύλιος μιας κατεύθυνσης έχει το πολύ ίσες επιδόσεις με αυτό ενώ ταυτόχρονα στερείται της απλότητας του μικροδικτύου. Αντίθετα, ο δακτύλιος δύο κατευθύνσεων υπερέχει σημαντικά του μικροδικτύου καθώς ο αριθμός των συνδέσεων αυξάνει.

Στο σχήμα 5.33 έπειτα, φαίνεται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά σύνδεση για όλα τα σενάρια. Ξανά στη λεζάντα του σχήματος αναγράφεται η επιπλέον σύνδεση που προστίθεται σε κάθε σενάριο.



Σχήμα 5.33: Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά σύνδεση για τα 6 σενάρια

Παρατηρούμε ξανά πως στο μικροδίκτυο ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά σύνδεση πέφτει συνεχώς καθώς προσθέτουμε συνδέσεις. Αντίθετα στους δακτύλιους μετά από την αρχική πτώση, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά σύνδεση μένει περίπου σταθερός.

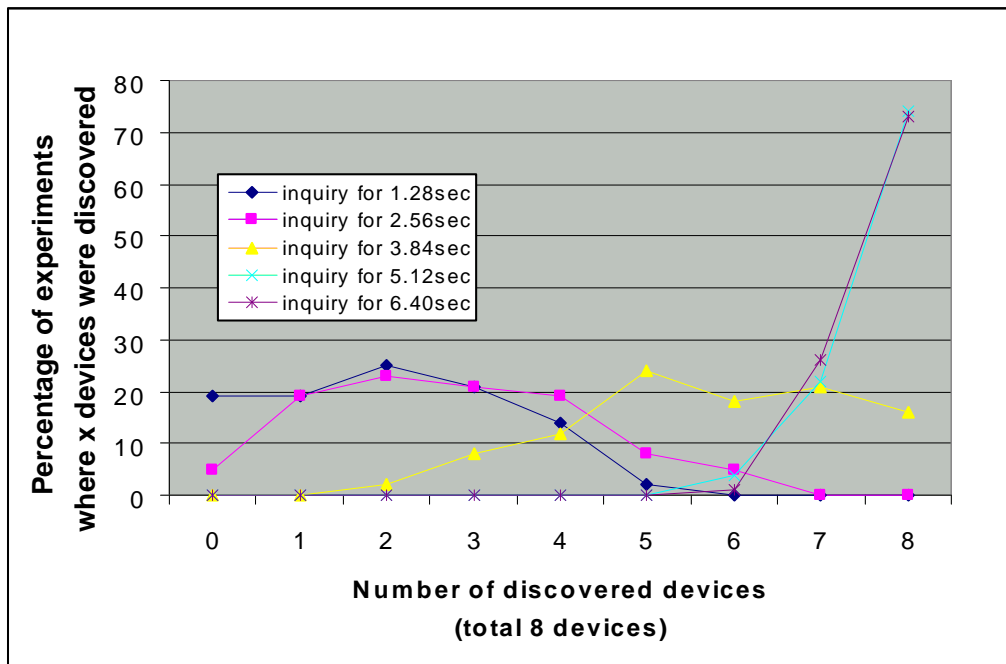
5.3 Βελτιωμένη διαδικασία ίασης

Η διαδικασία ίασης που περιγράφουν οι Lin et al. στην εργασία [30] βασίζεται στη χρήση της διαδικασίας αναζήτησης. Όταν μια συσκευή αντιληφθεί βλάβη ανάλογα σε ποια από τις δύο συνδέσεις που διατηρεί συνέδη η βλάβη εκτελεί τη διαδικασία αναζήτησης ή ανίχνευσης αναζήτησης. Η δεύτερη συσκευή που αντιλήφθηκε την ύπαρξη βλάβης θα εκτελέσει τη συμμετρική της διαδικασία που εκτέλεσε η πρώτη. Έτσι η μια συσκευή θα εντοπίσει την άλλη και θα μπορέσουν να αποκαταστήσουν τη λειτουργία του δακτυλίου. Παρόμοιες διαδικασίες ίασης προτείνονται και για άλλες τοπολογίες όπως για παράδειγμα για τη δενδροειδή τοπολογία που εξετάζει ο Tan στην εργασία [46].

Η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής είναι δύσκολη με τη χρήση των συσκευών που διαθέτουμε. Η μη υποστήριξη scatternet από τις παλιότερες συσκευές δεν επιτρέπει την ίαση της τοπολογίας αν η συσκευή στην οποία συμβεί η “βλάβη” είναι συσκευή που λειτουργεί σαν υποτελής σε δύο μικροδίκτυα (δηλαδή μια από τις #2, #4, #6 στο δακτύλιο με τις 6 συσκευές που χρησιμοποιήσαμε στην ενότητα 5.2). Έτσι προτιμήσαμε να μετρήσουμε τα διάφορα

κομμάτια της διαδικασίας ίασης χωριστά χωρίς να υφίσταται ο δακτύλιος και έπειτα να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

Η διαδικασία αναζήτησης είναι γενικά χρονοβόρα και η διάρκεια της μετρείται σε πολλαπλάσια των 1.28sec [44]. Για να βρούμε πόσα διαστήματα των 1.28sec φέρνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα εκτελέσαμε τη διαδικασία αναζήτησης από μια συσκευή χρησιμοποιώντας διαστήματα των $i \times 1.28\text{sec}$: $i = 1..5$, ενώ 8 συσκευές υπήρχαν στον περιβάλλοντα χώρο. Επαναλαμβάνοντας το πείραμα πήραμε τα ιστογράμματα του σχήματος 5.34.



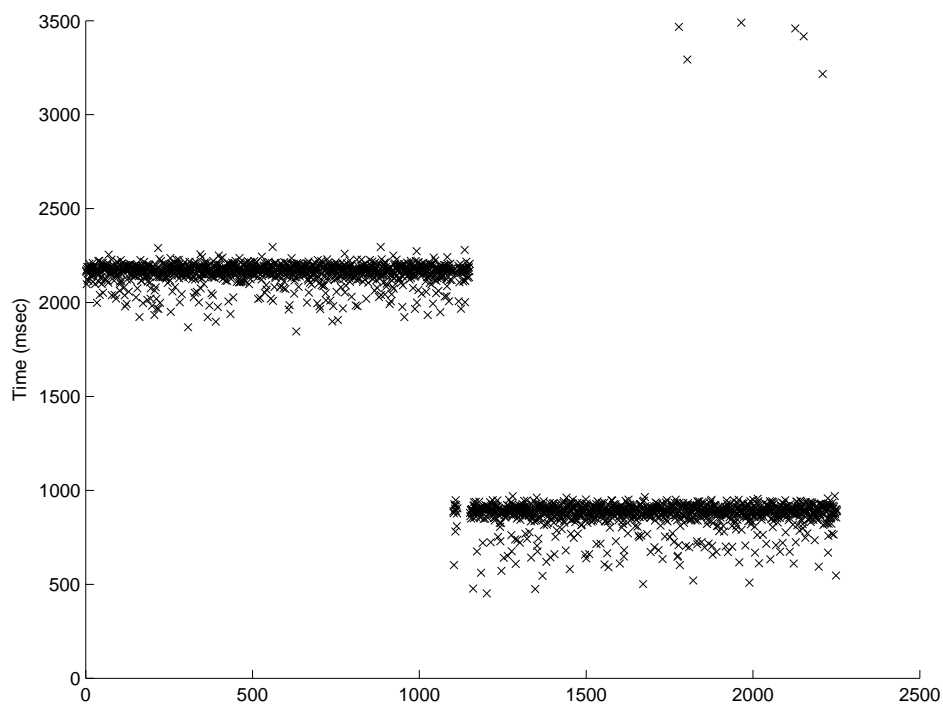
Σχήμα 5.34: Ιστογράμματα αριθμού συσκευών που ανακαλύφθηκαν για διαφορετικές διάρκειες αναζήτησης

Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι συσκευές δεν ήταν συνδεδεμένες. Παρατηρούμε πως χρειάζεται διάστημα τουλάχιστο 5.12sec για να έχει η αναζήτηση ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αν χρησιμοποιήσουμε λιγότερο από 5.12sec είναι πολύ πιθανό να χρειαστεί να επαναλάβουμε την αναζήτηση επειδή δε θα έχουμε βρει τη συσκευή την οποία ζητάμε, οπότε σε πολλές περιπτώσεις δε θα έχουμε κέρδος. Σημειώνουμε πως οι συνθήκες του πειράματος είναι ευνοϊκές για την αναζήτηση και γι αυτό χρόνος των 5.12sec κρίνεται επαρκής και δε χρειάζεται ο χρόνος των 10.24sec που αναφέραμε στην ενότητα 2.3.4.2.

Κατά τη διαδικασία αναζήτησης εκτός από την ανακάλυψη της ύπαρξης μιας συσκευής, η συσκευή που εκτελεί την αναζήτηση μαθαίνει και την τιμή του ρολογιού της συσκευής αυτής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να πραγματοποιηθεί μετέπειτα η σύν-

δεση μεταξύ των συσκευών γρηγορότερα, καθώς η συσκευή που κάνει την αίτηση σύνδεσης μπορεί να υπολογίσει σε ποιες συχνότητες περίπου ακούει η άλλη συσκευή για αιτήσεις σύνδεσης τη συγκεκριμένη στιγμή.

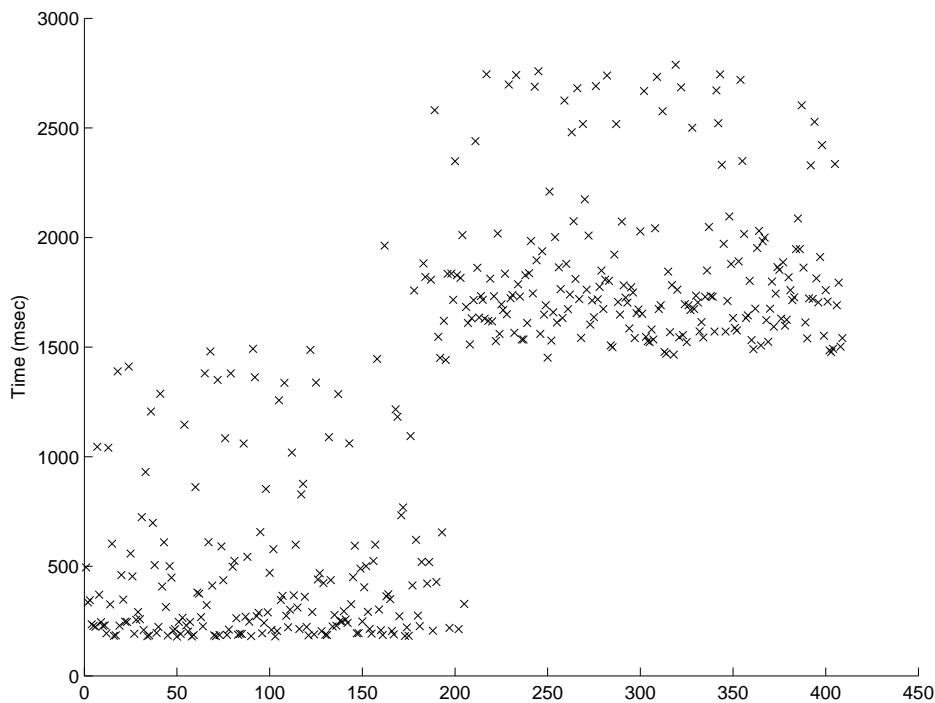
Μετρήσαμε χωριστά τους χρόνους σύνδεσης που επιτυγχάνονται αν είναι ή όχι γνωστή η τιμή του ρολογιού της συσκευής που περιμένει για σύνδεση. Η συσκευή που έκανε την αναζήτηση και ξεκινούσε τη διαδικασία σύνδεσης ήταν Gigabyte GN-BTD01³, ενώ η συσκευή την οποία αναζητούσε και στην οποία συνδεόταν ήταν Anycom USB-100. Οι μετρήσεις που έγιναν σε χρονική σειρά απεικονίζονται στα σχήματα 5.36 και 5.35 αντίστοιχα. Σημειώνουμε πως στο σχήμα 5.36 δε συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος των 5.12sec που διαρκεί η αναζήτηση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάστημα αρκετών ωρών. Παρατηρούμε πως υπάρχει ένα “σκαλοπάτι” ύψους περίπου 1.28sec στα δύο σχήματα. Έστω A η συσκευή που κάνει την αίτηση σύνδεσης και B η συσκευή που εκτελεί ανίχνευση αιτήσεων σύνδεσης.



Σχήμα 5.35: Χρόνοι σύνδεσης χωρίς πρωτότερη αναζήτηση.

Το “σκαλοπάτι” στην περίπτωση της σύνδεσης χωρίς προηγούμενη αναζήτηση μπορεί να εξηγηθεί αν υποθέσουμε πως η συσκευή A αντί να χρησιμοποιήσει μια πραγματικά

³ Αρχικά είχαμε επιλέξει συσκευή Anycom USB-100 η οποία καταστράφηκε κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Οι συσκευές Anycom δεν είναι διαθέσιμες στην Ελλάδα και έτσι προτιμήσαμε να ξανακάνουμε τις μετρήσεις με τη συσκευή Gigabyte παρά να ρισκάρουμε την απώλεια και δεύτερης συσκευής Anycom.



Σχήμα 5.36: Χρόνοι σύνδεσης ενώ έχει προηγηθεί αναζήτηση. Ο χρόνος της αναζήτησης δε συμπεριλαμβάνεται.

τυχαία τιμή για το ρολόι της B για να αποφασίσει από ποια συχνότητα να ξεκινήσει τη διαδικασία, χρησιμοποιεί μια τιμή που εξαρτάται από το δικό της ρολόι. Η επιλογή αυτή ήταν αρχικά λάθος, με αποτέλεσμα να μην ακούει η B σε κάποια συχνότητα από την πρώτη ομάδα συχνοτήτων που ψάχνει η A (βλέπε ενότητα 2.3.4.4). Ξοδεύονται λοιπόν 1.28sec ψάχνοντας την B σε λάθος συχνότητες. Δεδομένου πως η διαφορά των ρολογιών των δύο συσκευών αλλάζει αργά με το χρόνο (clock drift), κάποια στιγμή η τιμή του ρολογιού της A ξεκινάει να δίνει μια πιο σωστή συχνότητα εκκίνησης της διαδικασίας και η B βρίσκεται σε μια από τις συχνότητες της πρώτης ομάδας που ψάχνει η A. Έτσι δεν ξοδεύονται τα πρώτα 1.28sec ψάχνοντας σε λάθος συχνότητες. Οι μετρήσεις αυτές έρχονται σε συμφωνία με τα αναλυτικά αποτελέσματα που αναφέρει η Maric στην εργασία της [31].

Όσον αφορά την περίπτωση της σύνδεσης έπειτα από αναζήτηση το “σκαλοπάτι” δε θα έπρεπε να υπάρχει, καθώς η τιμή του ρολογιού της B είναι γνωστή. Το γεγονός πως υπάρχει σημαίνει πως η συσκευή που χρησιμοποιούμε μάλλον δεν υπολογίζει πάντα σωστά τη συχνότητα όπου ξεκινάει τη διαδικασία σύνδεσης, πρόκειται δηλαδή για λάθος στην υλοποίηση της. Παρατηρούμε στην περίπτωση αυτή πως εξαιρουμένων των 5.12sec της αναζήτησης, οι χρόνοι σύνδεσης έχουν μικρύνει σε σχέση με το όταν δεν είχε προηγηθεί αναζήτηση καθώς επίσης και πως οι χρόνοι δεν είναι τόσο κοντά συγκεντρωμένοι.

Στα σχήματα 5.38 και 5.37 φαίνονται τα ιστογράμματα των μετρήσεων. Στο ιστογράμμα που αφορά το χρόνο σύνδεσης έπειτα από αναζήτηση έχουμε τώρα προσθέσει και τα 5.12sec που διαρκεί αυτή. Παρατηρούμε πως τα δύο ιστογράμματα δεν επικαλύπτονται στο χρόνο. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στην παρουσία των 5.12sec της αναζήτησης. Είναι φανερό πως ακόμα και αν η αναζήτηση μπορεί να μειώσει το χρόνο σύνδεσης, τελικά η μείωση που επιφέρει δεν αντισταθμίζει σε καμία περίπτωση το κόστος της αναζήτησης. Θα είναι ωφέλιμο λοιπόν όποτε είναι δυνατό να αποφύγουμε να κάνουμε τη διαδικασία αναζήτησης.

Η μέθοδος που προτείνουμε αποτελείται από τα βήματα:

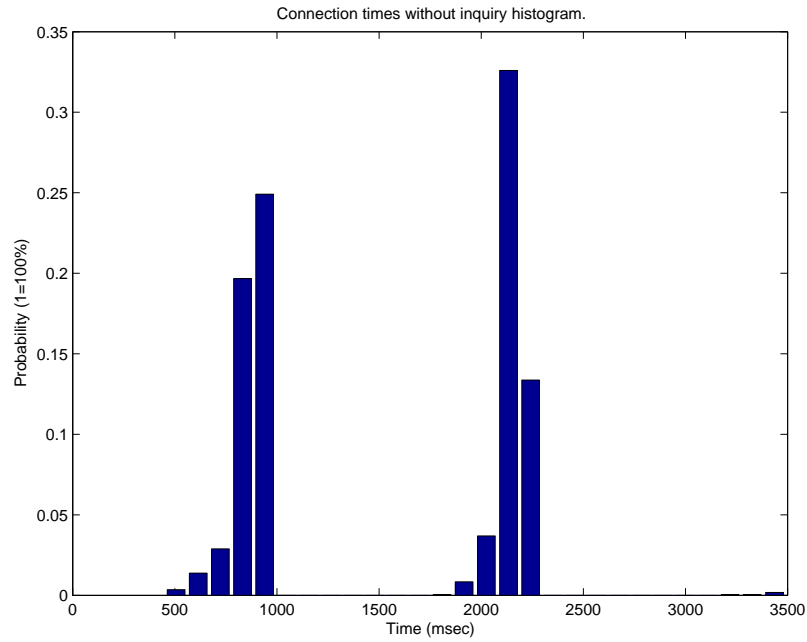
- Η συσκευή δοκιμάζει να συνδεθεί απευθείας στη συσκευή που γνωρίζει.
- Αν η σύνδεση αποτύχει έπειτα από χρόνο C_{Fail} τότε εκτελεί τη διαδικασία αναζήτησης.
- Αφού βρει τη συσκευή με την οποία θα πρέπει να συνδεθεί, ξεκινά τη διαδικασία σύνδεσης.

Αν η πιθανότητα να πετύχει η αποκατάσταση του δακτυλίου από το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι e , T_{inqC} ο μέσος χρόνος που παίρνει η διαδικασία αναζήτησης και μετέπειτα σύνδεσης και T_C ο μέσος χρόνος για σύνδεση χωρίς προηγούμενη αναζήτηση, τότε ο μέσος χρόνος T_{CinqC} για τη διαδικασία που προτείνουμε θα είναι:

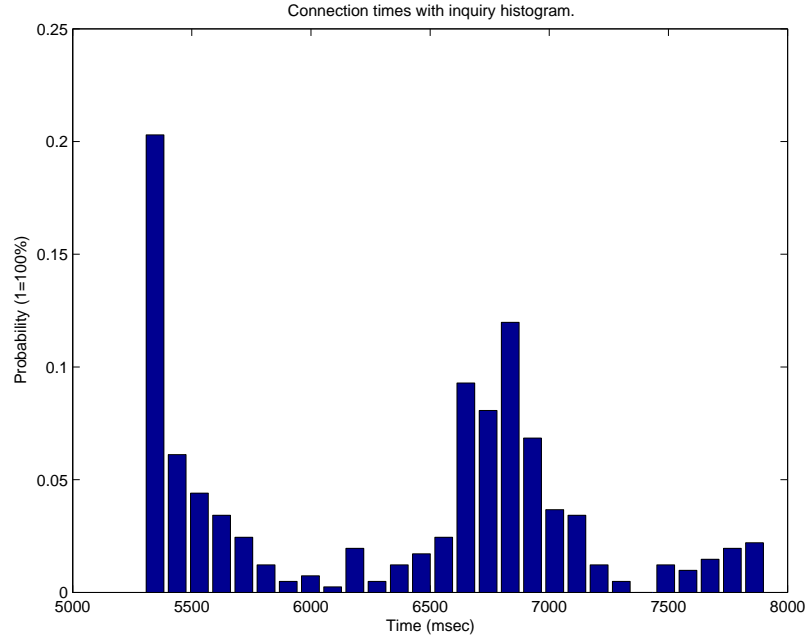
$$T_{CinqC} = (1 - e) \cdot (T_{inqC} + C_{Fail}) + e \cdot T_C \quad (5.1)$$

Οι χρόνοι T_{inqC} και T_C μπορούν να υπολογιστούν από τις μετρήσεις που παρουσιάσαμε προηγουμένως. Ο χρόνος C_{Fail} είναι σταθερός και μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση μιας εντολής HCI προς τη συσκευή. Τέλος η πιθανότητα e αντιστοιχεί όπως είπαμε και στην ενότητα 4.2.3 στην πιθανότητα η βλάβη που ανιχνεύθηκε να αφορά μόνο μια συσκευή ή να αφορά την απομάκρυνση ενός ολόκληρου ΔΠΠ. Σε περιβάλλοντα ΔΠΠ αναμένουμε η πιθανότητα e να είναι μεγάλη. Όμως δεδομένου πως τα ΔΠΠ είναι ακόμα αντικείμενο έρευνας και δεν μπορεί να βρεθεί η τιμή της e παρατηρώντας την λειτουργία κάποιου ΔΠΠ, θα πρέπει να της δώσουμε διάφορες τιμές και να δούμε το χρόνο T_{CinqC} σε σύγκριση με το χρόνο T_{inqC} της μεθόδου των Lin et al.

Ο χρόνος T_{CinqC} συναρτήσει της e για τρεις διαφορετικούς χρόνους C_{Fail} φαίνεται στο σχήμα 5.39. Στο ίδιο διάγραμμα με τις οριζόντιες γραμμές σημειώνονται οι χρόνοι T_{inqC} και T_{CinqC} . Παρατηρούμε πως για $C_{Fail}=5\text{sec}$ αρκεί μόνο το 50% των βλαβών να αντιστοιχούν

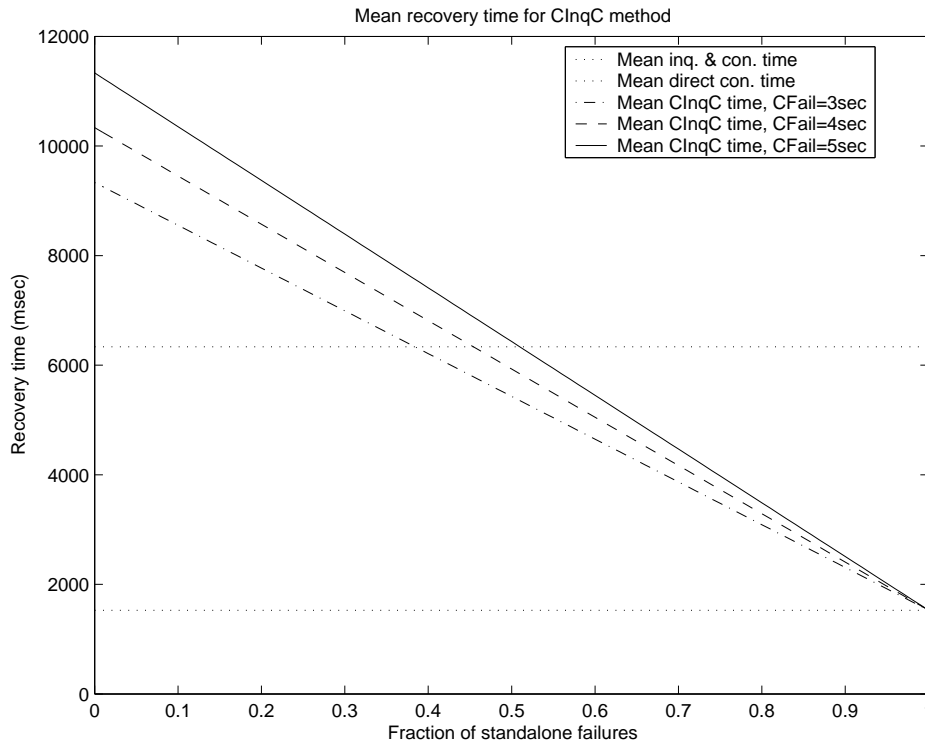


Σχήμα 5.37: Ιστόγραμμα χρόνων σύνδεσης χωρίς πρωτύτερη αναζήτηση



Σχήμα 5.38: Ιστόγραμμα χρόνων σύνδεσης ενώ έχει προηγηθεί αναζήτηση

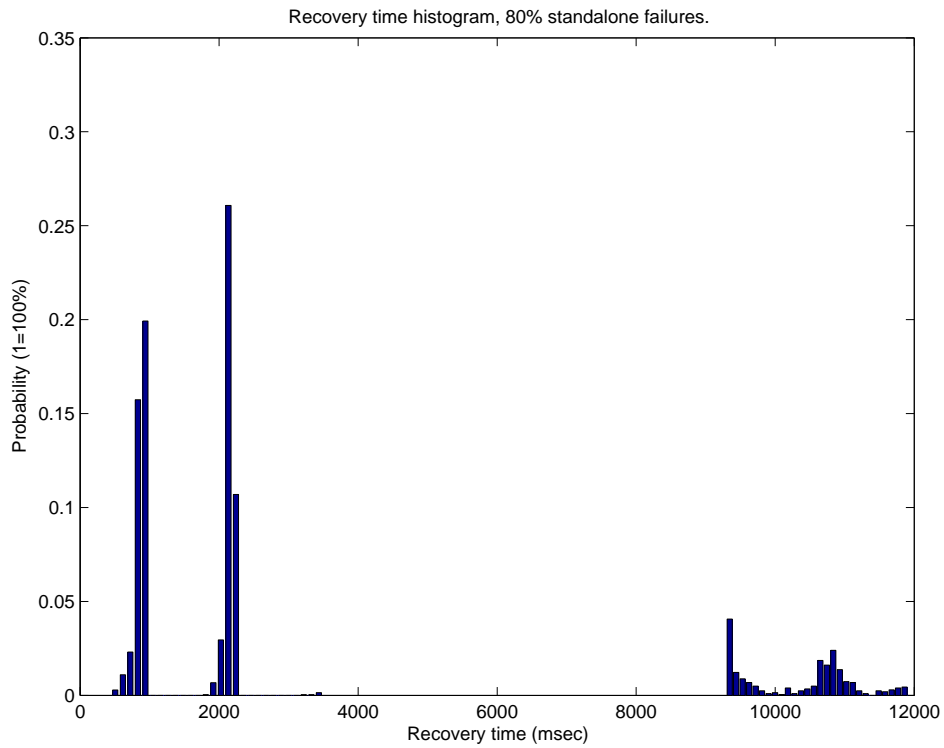
σε βλάβη μιας μόνο συσκευής ή απομάκρυνση ενός ολόκληρου ΔΠΠ για να είναι ο μέσος χρόνος ίασης της μεθόδου που προτείνουμε μικρότερος του T_{inqC} . Καθώς πιστεύουμε πως τελικά η πιθανότητα e σε πραγματικά ΔΠΠ θα είναι πολύ μεγαλύτερη από 0.5 (50%), το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται σαν πολύ ικανοποιητικό.



Σχήμα 5.39: Μέσος χρόνος ίασης δακτυλίου σε συνάρτηση με την πιθανότητα e να επιτύχει η βελτιωμένη διαδικασία ίασης

Για να δείξουμε ποιο είναι ποιοτικά το αποτέλεσμα της μεθόδου που προτείνουμε, κατασκευάσαμε το ιστόγραμμα των χρόνων σύνδεσης για $e = 0.8$ και $C_{Fail} = 5sec$. Το ιστόγραμμα απεικονίζεται στο σχήμα 5.40.

Βλέπουμε πως η μέθοδος που προτείνουμε συγκριτικά μεγεθύνει το ιστόγραμμα των χρόνων απευθείας σύνδεσης και σμικρύνει και μετακινεί δεξιά κατά C_{Fail} το ιστόγραμμα των χρόνων σύνδεσης έπειτα από αναζήτηση. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως περισσότερες φορές δε θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε τη διαδικασία αναζήτησης και θα έχουμε γρήγορη ίαση της τοπολογίας. Ταυτόχρονα όμως, τις λίγες φορές που θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε τη διαδικασία αναζήτησης, θα πρέπει να “πληρώσουμε” επιπλέον κόστος C_{Fail} . Καθώς ο χρόνος που χρειάζεται για την αναζήτηση είναι εξ’ αρχής μεγάλος και θα γίνει τελικά ενοχλητικός στο χρήστη του ΔΠΠ, το επιπλέον κόστος είναι αποδεκτό.



Σχήμα 5.40: Ιστόγραμμα χρόνων βελτιωμένης διαδικασίας ίασης για $e = 0.8$ και $C_{Fail} = 5sec$

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα & μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας μελετήσαμε πως καθορίζοντας ένα πλαίσιο λειτουργίας για τα δίκτυα προσωπικής περιοχής μπορούμε να οδηγηθούμε σε καλύτερες αρχιτεκτονικές για την υλοποίησή τους. Αφού καθορίσαμε κάποια χαρακτηριστικά λειτουργίας των δικτύων προσωπικής περιοχής, τα χρησιμοποιήσαμε για να προτείνουμε βελτιώσεις για την τοπολογία δακτυλίου που έχει προταθεί στο [30]. Οι βελτιώσεις αφορούσαν τον τρόπο δρομολόγησης πάνω στο δακτύλιο και τη διαδικασία ίασης του δακτυλίου σε περίπτωση βλάβης.

Μετρήσαμε με πραγματικές συσκευές τις επιδόσεις του βελτιωμένου δακτυλίου και τις συγκρίναμε με τις επιδόσεις του αρχικού δακτυλίου καθώς και τις επιδόσεις ενός μικροδικτύου. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε κίνηση που αντικατοπτρίζει την κίνηση που θα υπάρχει στα δίκτυα προσωπικής περιοχής όταν αυτά γίνουν απτή πραγματικότητα. Οι μετρήσεις έδειξαν πως στις περισσότερες περιπτώσεις ο βελτιωμένος δακτύλιος επιτυγχάνει διπλάσιο συνολικό μέσο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τον αρχικό δακτύλιο. Επίσης φάνηκε πως ο βελτιωμένος δακτύλιος υπερέχει και του μικροδικτύου έχοντας ταυτόχρονα το επιπλέον πλεονέκτημα πως μπορεί να συμπεριλάβει μεγαλύτερο αριθμό συσκευών. Το γενικότερο συμπέρασμα από τις μετρήσεις αυτές είναι πως γνωρίζοντας χονδρικά τη μορφή της κίνησης σε ένα δίκτυο προσωπικής περιοχής, μπορούμε να βελτιώσουμε την αρχιτεκτονική πάνω στην οποία υλοποιείται.

Έπειτα προτείναμε μια βελτιωμένη μέθοδο ίασης της τοπολογίας δακτυλίου. Η μέθοδος μας με μικρό κόστος σε μνήμη προσπαθεί να επιτύχει γρηγορότερη ίαση της τοπολογίας του δακτυλίου. Χωρίζοντας τη διαδικασία ίασης σε κομμάτια και μετρώντας πόσο χρόνο

χρειάζεται κάθε κομμάτι, δείξαμε πως η απλή βελτίωση που προτείνουμε μπορεί να δώσει μικρότερους μέσους χρόνους ίασης για την τοπολογία. Για να γίνει αυτό αρκεί περισσότερο από το 50% των βλαβών να αντιπροσωπεύει τις βλάβες που θεωρούμε πως θα είναι κοινές στα δίκτυα προσωπικής περιοχής. Γνωρίζοντας λοιπόν τις κοινές περιπτώσεις βλάβης σε ένα δίκτυο προσωπικής περιοχής μπορούμε να επιταχύνουμε την ίαση κάνοντας τους μηχανισμούς ίασης πιο έξυπνους.

Γενικότερα είδαμε πως η λειτουργία των Bluetooth scatternets δεν είναι για την ώρα τόσο ιδανική όσο παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία. Τα scatternets δίνουν λύση σε προβλήματα συνδεσιμότητας και παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό αρχιτεκτονικών δικτύων προσωπικής περιοχής σε σχέση με τους περιορισμούς που έχουν τα μικροδίκτυα. Αφού όμως η ευελιξία αυτή έχει κόστος στις επιδόσεις, θα πρέπει τα scatternets να χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη προσοχή μέχρι να βελτιωθεί η υποστήριξη τους από τις συσκευές.

6.2 Μελλοντική εργασία

Ξεκινώντας από τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούμε να προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε ένα αναλυτικό μοντέλο για την απόδοση του δακτυλίου που προτείνουμε. Επίσης οι 6 συσκευές που χρησιμοποιήσαμε είναι σχετικά λίγες θα είχε ενδιαφέρον να μελετήσουμε πως συμπεριφέρεται ο δακτύλιος που προτείνουμε με περισσότερες συσκευές και να επιβεβαιώσουμε έτσι και το αναλυτικό μοντέλο που φτιάξαμε.

Κυρίως εξαιτίας της έλλειψης ικανού αριθμού συσκευών που υποστηρίζουν λειτουργία scatternet, δεν εξετάσαμε τη λειτουργία δακτυλίων που έχουν τη μορφή που προτείνουν οι Foo & Chua στο [11] και φαίνονται στο πρώτο μέρος του σχήματος 3.1. Η μελέτη των συγκεκριμένων δακτυλίων θα δώσει εκτός άλλων και μια πιο πλήρη εικόνα για τις επιδόσεις που έχουν οι σημερινές συσκευές όταν δουλεύουν σε scatternet.

Καθώς οι συνδέσεις που χρησιμοποιήσαμε έστειλαν πακέτα όσο πιο γρήγορα ήταν δυνατό τελικά είδαμε τη συμπεριφορά του δακτυλίου σε μεγάλο φόρτο. Ενδιαφέρον θα είχε να μετρήσουμε τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις του δακτυλίου που προτείνουμε χρησιμοποιώντας φόρτο πιο αντιπροσωπευτικό εφαρμογών που θα τρέχουν τελικά πάνω στα δίκτυα προσωπικής περιοχής.

Ακόμη θα ήταν ενδιαφέρουσα η μελέτη των χρόνων για τις διαδικασίες αναζήτησης και σύνδεσης ενώ οι συσκευές που τις πραγματοποιούν επικοινωνούν ταυτόχρονα με άλλες. Αναμένεται και οι δύο χρόνοι να αυξηθούν σε αυτήν την περίπτωση, δεν ξέρουμε όμως πως θα σχετίζονται οι τιμές τους.

Τέλος με βάση το πλαίσιο λειτουργίας των δικτύων προσωπικής περιοχής που ορίσαμε

θα πρέπει να δοκιμάσουμε να βελτιώσουμε και άλλες αρχιτεκτονικές για δίκτυα προσωπικής περιοχής και έπειτα να τις συγκρίνουμε με το δακτύλιο που εξετάσαμε εδώ. Μια καλή αρχιτεκτονική για να γίνουν βελτιώσεις φαίνεται να είναι η δενδροειδής αρχιτεκτονική του Tan [46]. Φυσικά για να υλοποιήσουμε ένα δενδροειδές ΔΠΠ που να απέχει αρκετά από το απλό μικροδίκτυο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε περισσότερες από τις 8 συσκευές που είχαμε στη διάθεση μας.

Παράρτημα **A**

Λεξικό τεχνικών όρων & ακρονύμων

A

ACL	Asynchronous ConnectionLess
AM_ADDRESS	Active Member Address - Διεύθυνση Ενεργού Μέλους
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
ARQ	Automatic Retransmission Query

B

BNEP	Bluetooth Network Encapsulation Protocol
------	--

C

CRC	Cyclic Redundancy Check
-----	-------------------------

D

DSDV	Dynamic Destination - Sequenced Distance - Vector
DSR	Dynamic Distance Routing
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum

F

FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum

G

GFSK

Gaussian Frequency Shift Keying

H

HCI

Host Controller Interface

I

IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineers

IrDA

Infrared Data Association

L

L2CAP

Logical Link Control and Adaptation Protocol

O

OBEX

OBject EXchange

P

PAN

Personal Area Network

R

RF

Radio Frequency

RVM

Routing Vector Method

S

SDP

Service Discovery Protocol

T

TDD

Time Division Duplexing

U

UART

Universal Asynchronous Receiver & Transmitter

W

WiFi	Wireless Fidelity
------	-------------------

A

αθροιστικό εύρος ζώνης	aggregate bandwidth
ακολουθία	sequence
αναδραστικός	reactive
ασύρματο τοπικό δίκτυο	wireless LAN
αυξητικός	incremental
αυτόνομο μήνυμα	datagram

Δ

Δίκτυο Προσωπικής Περιοχής - ΔΠΠ	Personal Area Network - PAN
δακτύλιος	ring
διαβατικό τμήμα	hop
Διεύθυνση Ενεργού Μέλους	Active Member Address - AM_ADDRESS
ΔΠΠ	Δίκτυο Προσωπικής Περιοχής

E

εύρος ζώνης	bandwidth
εναλλαγή ρόλων	role switch
ενεργή κατάσταση	active mode
Επίπεδο Ελέγχου Μέσου	Medium Access Control - MAC
επίπεδο διεπαφής ελέγχου	Host Controller Interface - HCI
επίπεδο ελέγχου ζεύξης	LM (Link Manager)
επίπεδο λογικών καναλιών	Logical Link Control and Adaptation Protocol - L2CAP

Z

ζεύξη	link
-------	------

K

κώδικας διόρθωσης λαθών	Forward Error Correction code - FEC code
κατάσταση αίτησης σύνδεσης	page mode

κατάσταση ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης	page scan mode
κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων	inquiry scan mode
κατάσταση αναμονής	standby mode
κατάσταση σύνδεσης	connection mode
κατάσταση σύνδεσης περιορισμένων ευθυνών	sniff mode
κατάσταση σύνδεσης σε αναστολή	hold mode
κατάσταση σύνδεσης σε στάση	park mode
κατάσταση χειραψίας κυρίου/υποτελή	master/slave response
κωδικός πρόσβασης	access code - AC
Λ	
λογισμικό ΗΥ	software
Μ	
μέγιστη μονάδα μετάδοσης	Maximum Transmission Unit - MTU
μικροδίκτυο	piconet
Ν	
νήμα εκτέλεσης	execution thread
Ο	
ομάδα	train
ομάδα ειδικού ενδιαφέροντος	Special Interest Group - SIG
Π	
περιοχή ραδιοσυχνοτήτων για βιομηχανική, επιστημονική & ιατρική χρήση	Industrial Scientific Medical Band - ISM Band
ποιότητα υπηρεσιών	Quality of Service - QoS
πολυπλέκτης εφαρμογών και πρωτοκόλλων	Protocol and Service Multiplexor - PSM
προληπτικός	proactive
Προσωπικός Ψηφιακός Βοηθός	Personal Digital Assistant - PDA

πρωτόκολλο ανακάλυψης υπηρεσιών	Service Discovery Protocol - SDP
πρωτόκολλο επιπέδου ελέγχου ζεύξης	Link Manager Protocol - LMP
P	
ραδιοσυχνότητα	Radio Frequency - RF
ρητά	explicitly
ροή δεδομένων	data stream
ρυθμός	rate
Σ	
σημείο πρόσβασης σε δίκτυο	network access point
σημείο προς σημείο	point to point
σημείο συνάντησης	rendezvous points
συσκευή κύριος	master device
συσκευή υποτελής	slave device
T	
τυχαία οπισθοχώρηση	random backoff
Υ	
υλικό ΗΥ	hardware
Φ	
φορτίο	payload
X	
χειραψία	handshake
χρήσιμη πληροφορία που μεταδίδεται στη μονάδα του χρόνου	goodput
χρονοθυρίδα	timeslot
χωρίς σύνδεση	connectionless

Βιβλιογραφία

- [1] Project 2WEAR (IST-2000-25286). <http://2wear.ics.forth.gr>.
- [2] S. Baatz, M. Frank, C. Kuehl, P. Martini, and C. Scholz. Adaptive Scatternet Support for Bluetooth using Sniff Mode. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 2001.
- [3] S. Baatz, M. Frank, C. Kuehl, P. Martini, and C. Scholz. Bluetooth Scatternets: An Enhanced Adaptive Scheduling Scheme. In *Proceedings of 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, 2002.
- [4] P. Bhagwat and A. Segall. A routing vector method (RVM) for routing in Bluetooth scatternets. In *Proceedings of 6th IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)*, San Diego, CA, USA, 1999.
- [5] BlueZ: Official Bluetooth protocol stack for Linux. <http://bluez.sourceforge.net/>.
- [6] Bluetooth SIG web site. <http://www.bluetooth.com>.
- [7] C.S. Choi and C.W. Choi. DSR Based Bluetooth Scatternet. In *Proceedings of 2002 International Conference on Circuits/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC)*, Phuket, Thailand, 2002.
- [8] C. M. Cordeiro, S. Abhyankar, and D. P. Agrawal. A Dynamic Slot Assignment Scheme for Slave-to-Slave and Multicast-like Communication in Bluetooth Personal Area Networks. In *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2003*, San Francisco, CA, USA, December 2003. To appear.
- [9] Cambridge Silicon Radio Corporation. Overview of Scatternet Support from CSR. <http://www.csrsupport.com/document.php?did=284&path=5>, August 2002.

- [10] Cambridge Silicon Radio Corporation. Scatternet Support in HCIStack1.1v16x Firmware. <http://www.csrsupport.com/document.php?did=470&path=5>, November 2002.
- [11] C.C. Foo and K.C. Chua. BlueRings - Bluetooth Scatternets with Ring Structures. In *Proceedings of the 3rd IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications (WOC)*, Banff, Alberta, Canada, July 2002.
- [12] Inc. Free Software Foundation. GNU General Public License. <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>.
- [13] Roch Guerin, Enyoung Kim, and Saswati Sarkar. Bluetooth Technology Key Challenges and Initial Research. In *Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference (CNDS), Invited Paper*, 2002.
- [14] Jaap Haartsen. Bluetooth - The Universal Radio Interface For Ad Hoc Wireless Connectivity. *Ericsson Review*, (3), 1998.
- [15] L. Har-Shai, R. Kofman, G. Zusman, and A. Segall. Inter-Piconet Scheduling in Bluetooth Scatternets. In *Proceedings of the OPNETWORK 2002 Conference*, Washington DC, USA, August 2002.
- [16] Gilbert Held. *Understanding Data Communications*. Addison Wesley Professional, 7th edition, February 2002.
- [17] IEEE 802.15 Working Group Web Site. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/>.
- [18] N. Johansson, F. Alriksson, and U. Jonsson. JUMP Mode - A Dynamic Window-based Scheduling Framework for Bluetooth Scatternets. In *Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, Long Beach, CA, USA, October 2001.
- [19] Per Johansson, Rohit Kapoor, and Mario Gerla. Personal Area Networks: Bluetooth or IEEE 802.11? Technical report, UCLA, 2001.
- [20] Per Johansson, Manthos Kazantzidis, Rohit Kapoor, and Mario Gerla. Bluetooth: An Enabler of Personal Area Networking. *IEEE Network, Special Issue in Personal Area Networks*, September/October 2001.
- [21] Per Johansson, Tony Larsson, Nicklas Hedman, Bartosz Mielczarek, and Mikael Degermark. Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile

- Ad-hoc Networks. In *Proceedings of 5th International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pages 195–206, Seattle, WA, USA, 1999.
- [22] D. Johnson and D. Maltz. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In Imielinski and Korth, editors, *Mobile Computing*, volume 353. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [23] D. Johnson, D. Maltz, and J. Broch. DSR The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks. In Charles E. Perkins, editor, *Ad Hoc Networking*, chapter 5, pages 139–172. Addison-Wesley, 2001.
- [24] Manish Kalia, Sumit Garg, and Rajeev Shorey. Scatternet Structure and Inter-Piconet Communication in the Bluetooth System. In *Proceedings of IEEE National Conference on Communications*, New Delhi, India, 2000.
- [25] Dmitry Kasatkin. Affix in a Nutshell. <http://affix.sourceforge.net/affix-doc/affix-doc.pdf>.
- [26] Ching Law, Amar K. Mehta, and Kai-Yeung Siu. Performance of a new Bluetooth Scatternet Formation Protocol. In *Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, Long Beach, CA, USA, October 2001.
- [27] Ching Law and Kai-Yeung Siu. A Bluetooth scatternet formation algorithm. In *Proceedings of the IEEE Symposium on AdHoc Wireless Networks (SAWN)*, November 2001.
- [28] Martin Leopold. Evaluation of Bluetooth communication: Simulation and experiments. Technical Report 02/03, Department of Computer Science, University of Copenhagen, 2002.
- [29] Bil Lewis and Daniel Berg. *Multithreaded Programming With PThreads*. Prentice Hall PTR, 1st edition, December 1997.
- [30] T.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, K.-M. Chang, and C.-L. Tu. Formation, Routing, and Maintenance Protocols for the BlueRing Scatternet of Bluetooths. In *Proceedings of 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 2003.
- [31] Ivana Maric. Connection Establishment in the Bluetooth System. Msc thesis, State University of New Jersey, Graduate School - New Brunswick Rutgers, October 2000.
- [32] Earl McCune. DSSS vs. FHSS narrowband interference performance issues. *RF Design Magazine*, pages 90–104, September 2000.

- [33] D. Miorandi and A. Zanella. On the Optimal Topologies of Bluetooth Piconets: Roles Swapping Algorithms. In *Proceedings of the 1st Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-hoc-Net)*, Chia, Sardegna, Italy, September 2002.
- [34] AXIS OpenBT Stack. <http://sf.net/projects/openbt/>.
- [35] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. In *ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications (SIGCOMM)*, pages 234–244, 1994.
- [36] Charles E. Perkins and Elizabeth M. Royer. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, pages 90–100, New Orleans, LA, USA, February 1999.
- [37] Balakrishna J. Prabhu and A. Chockalingam. A Routing Protocol and Energy Efficient Techniques in Bluetooth Scatternets. In *Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, New York, NY, USA, April-May 2002.
- [38] John G. Proakis. *Digital Communications*, chapter 13: “Spread Spectrum Signals for Digital Communications”. McGraw-Hill, 4th edition, August 2000.
- [39] R. Rao, O. Baux, and G. Kesidis. Demand-based Bluetooth scheduling. In *Proceedings of the 3rd IEEE Wireless LAN (WLAN) Conference*, Boston, MA, USA, September 2001.
- [40] Theodoros Salonidis, Pravin Bhagwat, and Leandros Tassiulas. Proximity awareness and fast connection establishment in Bluetooth. In *Proceedings of the 1st ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, 2000.
- [41] Theodoros Salonidis, Pravin Bhagwat, Leandros Tassiulas, and Richard LeMaire. Distributed Topology Construction of Bluetooth Personal Area Networks. In *Proceedings of 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, 2001.
- [42] Bluetooth SIG. *Bluetooth Network Encapsulation (BNEP) Profile*. June 2001.
- [43] Bluetooth SIG. *Personal Area Networking Profile*. June 2001.
- [44] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system: Core, version 1.1*. February 2001.
- [45] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system: Profiles, version 1.1*. February 2001.

- [46] Godfrey Tan. Self-Organizing Bluetooth Scatternets. Msc thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, January 2002.
- [47] Godfrey Tan, Allen Miu, John Guttag, and Hari Balakrishnan. Forming Scatternets from Bluetooth Personal Area Networks. Technical Report MIT-LCS-TR-826, Massachusetts Institute of Technology, October 2001.
- [48] Godfrey Tan, Allen Miu, John Guttag, and Hari Balakrishnan. An Efficient Scatternet Formation Algorithm for Dynamic Environments. In *Proceedings of the IASTED International Conference on Communications and Computer Networks (CCN)*, Cambridge, MA, USA, November 2002.
- [49] WiFi Alliance Web Site. <http://www.weca.net/>.
- [50] G.V. Zaruba, S. Basagni, and I. Chlamtac. Bluetrees - scatternet formation to enable Bluetooth-based ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 273–277, 2001.
- [51] T. G. Zimmerman. Personal Area Networks (PAN): Near-Field Intra-Body Communication. *IBM Systems Journal*, 35(3&4):609–617, 1996.
- [52] T. G. Zimmerman. Wireless networked digital devices: A new paradigm for computing and communication. *IBM Systems Journal*, 38(4):566–574, 1999.