



Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών



Ι.Τ.Ε  
Ινστιτούτο Πληροφορικής

## Ανάθεση Καναλιών σε Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο

Μεταπτυχιακή εργασία

Εμμανουήλ Ντελάκης

*Ηράκλειο*

*Φεβρουάριος 2008*



Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

**ΑΝΑΘΕΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ**

Εργασία που υποβλήθηκε στο  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

Συγγραφέας:

---

Εμμανουήλ Κ. Ντελάκης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εξεταστική Επιτροπή:

---

Βασίλειος Σύρης, Επίκ. Καθηγητής  
Επόπτης – Επιβλέπων  
Πρόεδρος

---

Απόστολος Τραγανίτης, Καθηγητής  
Μέλος

---

Ιωάννης Στυλιανού, Αναπλ. Καθηγητής  
Μέλος

Δεκτή:

---

Παναγιώτης Τραχανιάς, Καθηγητής  
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2008



*Στην οικογένεια μου...*



# Ανάθεση Καναλιών σε Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο

Εμμανουήλ Ντελάκης

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα σημαντικό πρόβλημα της ασύρματης μετάδοσης είναι η παρουσία παρεμβολών, που αποτελούν ένα βασικό παράγοντα περιορισμού της χωρητικότητας και μειωμένης απόδοσης των ασύρματων συστημάτων όπως είναι τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα ή τα Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα. Η διαδικασία της ανάθεσης καναλιών σε ένα ασύρματο δίκτυο πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τις παρεμβολές μεταξύ των ίδιων ή γειτονικών καναλιών που έχουν ανατεθεί σε συνδέσμους του ίδιου του δικτύου, αλλά και τις παρεμβολές από τα εξωτερικά δίκτυα. Στην εργασία αυτή προτείνουμε ένα μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών, βάσει γράφου τον οποίο ονομάζουμε “multi-point link conflict graph”. Ο γράφος προϋποθέτει γνωστή τοπολογία του αρχικού δικτύου όσον αφορά τις συνδέσεις μεταξύ ασύρματων διεπαφών, και αποτελείται από κορυφές που αντιστοιχούν σε ζεύξεις σημείου-προς-σημείο, σημείου-προς-πολλαπλά ή πολλαπλών-προς-πολλαπλά σημεία της αρχικής τοπολογίας. Κορυφές του γράφου συνδέονται μεταξύ τους με ακμές όταν οι ζεύξεις που αντιστοιχούν στις κορυφές αυτές παρεμβάλλονται. Στη συνέχεια προτείνουμε έναν αλγόριθμο ανάθεσης καναλιών που βασίζεται στο παραπάνω μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών, ενώ τα υπόλοιπα δύο βασικά τμήματα του είναι η σειρά επιλογής των ζεύξεων στις οποίες γίνεται η ανάθεση καναλιών και η μετρική επιλογής του καλύτερου καναλιού σε κάθε ζεύξη. Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε και αξιολογήθηκε σε ένα πραγματικό πειραματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο πλέγματος πολλαπλών διεπαφών με κατευθυντικές κεραιές. Το μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών συγκρίθηκε με μία άλλη μέθοδο προσέγγισης παρεμβολών που βασίζεται στη δημιουργία κίνησης στις ζεύξεις όπου έχει ήδη πραγματοποιηθεί ανάθεση καναλιών. Οι δύο αυτές μέθοδοι παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά τη μέση συνολική καθυστέρηση πακέτων και τον χρόνο απόκρισης. Επιπλέον, οι μετρικές επιλογής καναλιών και η σειρά ανάθεσης αυτών στις ζεύξεις δεν

επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου σύμφωνα με τα πειράματα στο συγκεκριμένο πειραματικό  
ασύρματο μητροπολιτικού δίκτυο με μικρό αριθμό συνδέσμων.



# **Channel Assignment in a Wireless Metropolitan Network**

**Emmanouil Delakis**

**M.Sc. Thesis  
Department of Computer Science  
University of Crete**

## **ABSTRACT**

A major issue concerning wireless transmission nowadays is the existence of interference. Interference constitutes a key factor for reduced capacity and performance of wireless systems, such as the Wireless Local Networks or the Wireless Metropolitan Networks. The procedure for assigning channels in a wireless network should account for the interference between the same or adjacent channels amongst the links of the network itself, as well as interference caused by external networks. In this thesis we first propose a new approach for modeling interference, based on the “multi-point link conflict graph”. The proposed conflict graph requires a priori knowledge of the wireless network topology, in terms of links between wireless interfaces. Each vertex in the conflict graph corresponds to a point-to-point, a point-to-multipoint, or a multipoint-to-multipoint link of the actual network. An edge between vertices in the conflict graph exists, when the links that correspond to the vertices can interfere. The second contribution of this thesis is to propose and evaluate a channel assignment algorithm based on the aforementioned multi-point link conflict graph. Two important parts of the algorithm are the order in which links are assigned a channel and the metric used to choose the best channel for a link. Implementation and evaluation of the channel assignment algorithm was performed in an experimental, wireless metropolitan multi-radio mesh network consisting of directed antennas and point-to-point connections. The proposed multi-point link conflict graph model was compared to another approach for capturing interference, based on creating traffic on links that have been assigned channels. Our experiments indicate that both methods tend to have the same performance, in terms of average packet delay and latency. Additionally, the experiments suggested that channel

selection metrics and the channel assignment order do not significantly affect the algorithm's performance, in the case of a wireless metropolitan network with a small number of links.

# *Ευχαριστίες*

Έχοντας ολοκληρώσει την διπλωματική μου Εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ινστιτούτο Πληροφορικής του ΙΤΕ καθώς και το Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών του για την υλικοτεχνική και οικονομική υποστήριξη τους, τους καθηγητές, τους συνεργάτες και τους φίλους, που με το δικό του τρόπο ο καθένας με βοήθησαν.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επόπτη μου, Καθηγητή κ. Βασίλειο Σύρη. Έδειξε πραγματικό ενδιαφέρον, υπομονή και προθυμία να με βοηθήσει και να με καθοδηγήσει όπου χρειάστηκε και όπου τα “χρειάστηκα”. Είχαμε ατελείωτες ώρες επικοινωνητικής συζήτησης και πάντα μου έδινε μια λύση και μια εξήγηση για οποιοδήποτε πρόβλημα και αν αντιμετώπιζα στην πορεία της εργασίας μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Καθηγητές κ. Απόστολο Τραγανίτη και κ. Ιωάννη Στυλιανού όπου παραβρέθηκαν με προθυμία στην παρουσίαση της εργασίας μου.

Από τους συνεργάτες μου θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κριαρά Λητώ (προγραμματιστικά tips), την Νικητάκη Σοφία (για τις πρόβες της παρουσίασης μου), τον Παπαδάκη Στέφανο (απλά guru των δικτύων), τον Σταματάκη Γιώργο (για την πολύτιμη στήριξη και βοήθεια), τον Αγγελάκη Βαγγέλη (ήταν με τις μέρες του αλλά διαθέσιμος για απορίες), τον Μελισσάρη Χαρίτων (για τα airtime που κάψαμε), τον Γενετζάκη Μανώλη (για τις φιλοσοφικές θεωρίες), τον Κοσσιφίδη Νίκο (ο γνωστός και ως kernel), την Φλουρή Ρόη (απλά στόλιζε το “κλουβί”), τον Πλουμίδη Εμμανουήλ (για το γέλιο στα παγκάκια), τον Διονυσίου Θεόδωρο (για την ευγένεια του) και τον Πετρουλάκη Νίκο (για τη βοήθεια του στις ταράτσες). Η συνεργασία και σε κάποιες περιπτώσεις η φιλία με όλα τα παιδιά του εργαστηρίου Δικτύων και Τηλεπικοινωνιών ήταν και είναι άψογη! Ιδιαίτερη αναφορά θα κάνω στον φίλο μου Μαθιουδάκη Κώστα γιατί απλά περάσαμε τα πάντα μαζί. Δυσκολίες, άγχη, χαρές ήταν σχεδόν πάντα κοινές. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καλούς φίλους που απέκτησα από το ΙΤΕ Καλαϊτζάκη Μάνο και Κονδυλάκη Χάρη. Επίσης ένα ευχαριστώ στον Μάνο, Λευτέρη, Αργυρώ και τον αδερφό μου Γιώργο! Ο καθένας τους ξέρει το γιατί..

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει δικαιοματικά στους γονείς μου όπου πάντα ήταν αρωγοί των αποφάσεων μου δείχνοντας μου απεριόριστη εμπιστοσύνη και στήριξη σε ότι και αν έχω κάνει μέχρι σήμερα. Οι συμβουλές ήταν πάντα απλές και ουσιαστικές. Η ανθρωπιά δεν πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογη με την μόρφωση...





# *Περιεχόμενα*

Κατάλογος Σχημάτων .....	xvi
Κατάλογος Πινάκων.....	xvi
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Παρουσίαση προβλήματος .....	2
1.2 Συνεισφορά και περίληψη εργασίας.....	3
1.3 Συσχέτιση με προηγούμενες εργασίες .....	8
1.4 Δομή εργασίας .....	9
Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο.....	11
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11.....	11
2.2 Αρχιτεκτονική του 802.11 .....	12
2.3 Το πρότυπο IEEE 802.11a.....	14
2.4 Ασύρματα δίκτυα πλέγματος.....	16
Κεφάλαιο 3 Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου .....	18
3.1 Τοπολογία δικτύου και χαρακτηριστικά κόμβων .....	18
3.2 Υλικό και λογισμικό κόμβων.....	22
3.3 Οδηγός ασύρματης διεπαφής Madwifi.....	23
3.4 Εμπειρίες.....	25
Κεφάλαιο 4 Μέθοδοι Αναπαράστασης Παρεμβολών .....	26
4.1 Μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών χρησιμοποιώντας το “multi-point link conflict graph” .....	26
4.2 Ορισμός του “multi-point link conflict graph” στο ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο Ηρακλείου .....	30
4.3 Μέθοδος αναπαράστασης παρεμβολών βασισμένη στη γέννηση κίνησης .....	31
4.4 Αξιολόγηση των δύο μεθόδων προσέγγισης των παρεμβολών .....	32

Κεφάλαιο 5 Αλγόριθμος Ανάθεσης Καναλιών .....	33
5.1 Σειρά επιλογής των κορυφών του γράφου ή των ζεύξεων του δικτύου.....	34
5.2 Μετρικές.....	34
5.3 Ψευδοκώδικας αλγορίθμου.....	36
Κεφάλαιο 6 Πειραματική Αξιολόγηση .....	38
6.1 Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών .....	39
6.2 Σύγκριση αλγορίθμου με μια μέθοδο όπου δεν λαμβάνει υπόψιν τις παρεμβολές και μια βέλτιστη περίπτωση.....	42
6.3 Σύγκριση μετρικών .....	43
6.4 Σύγκριση διαφορετικής σειράς ανάθεσης καναλιών .....	45
Κεφάλαιο 7 Προηγούμενες Εργασίες .....	47
Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία .....	52
Βιβλιογραφία.....	53

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: (α) Τοπολογία με σημείο-προς-σημείο και σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις (β) Αντίστοιχος multi-point link conflict graph .....	4
Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα Αλγορίθμου .....	4
Σχήμα 3: (α) Παράδειγμα όπου το SNR δεν καταδεικνύει την παρεμβολή μεταξύ ίδιων καναλιών .....	6
Σχήμα 4: (α) Το βασικότερο ασύρματο δίκτυο: σταθμοί σε τοπολογία ad-hoc (IBSS), (β) σταθμοί σε τοπολογία infrastructure mode (BSS), (γ) ένα ESS σχηματίζεται με τη διασύνδεση πολλαπλών infrastructure δικτύων (BSS) μέσω ενός συστήματος διανομής.....	14
Σχήμα 5: Σύγκριση απόστασης / θεωρητικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (Mbps) για τα πρότυπα 802.11a και 802.11b (δε παρουσιάζονται όλοι οι ρυθμοί απόδοσης) .....	15
Σχήμα 6: Χάρτης των πρώτων τεσσάρων κόμβων του Ασύρματου Μητροπολιτικού Δικτύου του Ηρακλείου.....	18
Σχήμα 7: Πληροφορίες διασύνδεσης των κόμβων .....	19
Σχήμα 8: Κόμβος Tsakalidis.....	20
Σχήμα 9: Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου .....	21
Σχήμα 10: Στοιχεία κόμβων.....	22
Σχήμα 11: Πραγματικός κόμβος.....	22
Σχήμα 12: (α) Τοπολογία κόμβων με σημείο-προς-σημείο ζεύξεις (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών.....	27
Σχήμα 13: (α) Τοπολογία κόμβων με σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών .....	28
Σχήμα 14: (α) Τοπολογία με σημείο-προς-σημείο και σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών .....	29
Σχήμα 15: (α) Τοπολογία με δύο νησίδες δικτύων και μια σημείο-προς-σημείο ζεύξη (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών .....	30
Σχήμα 16: (α) Τοπολογία πραγματικού δικτύου (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών .....	31
Σχήμα 17: (α) Παράδειγμα όπου το SNR δεν καταδεικνύει την παρεμβολή μεταξύ ίδιων καναλιών .....	35



Σχήμα 18: Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου .....	40
Σχήμα 19: Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών βάσει του μέσου συνολικού χρόνου απόκρισης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου.....	41
Σχήμα 20: Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών με μία μέθοδο που δεν λαμβάνει υπόψιν την παρεμβολή και μια βέλτιστη περίπτωση.....	43
Σχήμα 21: Σύγκριση μετρικών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου .....	44
Σχήμα 22: Σύγκριση μετρικών βάσει του μέσου συνολικού χρόνου απόκρισης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου.....	45
Σχήμα 23: Σύγκριση διαφορετικών σειρών ανάθεσης καναλιών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου .....	46
Σχήμα 24: Σύγκριση διαφορετικών σειρών ανάθεσης καναλιών βάσει του μέσου συνολικού χρόνου απόκρισης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου .....	46
Σχήμα 25: (α) Μια απλή τοπολογία δικτύου. (β) Conflict graph. (γ) Multi-radio conflict graph .....	48
Σχήμα 26: (α) Γράφος τοπολογίας (β) Γράφος καταγραφής παρεμβολής .....	49

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τα πρότυπα 802.11 και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους .....	12
Πίνακας 2: Σύγκριση ρυθμαπόδοσης (throughput) / απόσταση για τα πρότυπα 802.11a, 802.11b και 802.11g .....	16
Πίνακας 3: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας το μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών βάσει του γράφου του multi-point link conflict graph .....	36
Πίνακας 4: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με τη δημιουργία κίνησης.....	37
Πίνακας 5: Κανάλια που αποτέλεσαν ένα από τα τρία καλύτερα όσον αφορά την ανάθεση στη ζεύξη Lygerakis – Ekab χρησιμοποιώντας και τις δύο μεθόδους.....	41



# *Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή*

Σήμερα παρατηρείται μια εκθετική εξάπλωση [1] των ασύρματων δικτύων γενικότερα είτε πρόκειται για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είτε για τοπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless LANs). Υπάρχει μια τάση για απελευθέρωση από τα καλώδια και το λεγόμενο κινητό γραφείο (mobile office) κερδίζει όλο και περισσότερους οπαδούς. Σήμερα οι άνθρωποι χρησιμοποιούν διάφορες τηλεπικοινωνιακές συσκευές, τόσο για τις καθημερινές συνομιλίες και επαφές με άλλους ανθρώπους, όσο και για την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών από οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκονται. Στην νέα πραγματικότητα που διαφαίνεται ότι θα φέρουν, λόγω της γρήγορης εξάπλωσης τους, οι ασύρματες φορητές υπολογιστικές συσκευές, έρχεται η επιστήμη των υπολογιστών και συγκεκριμένα ο τομέας των ασύρματων δικτύων να αναπτύξει τα απαραίτητα πρωτόκολλα και συστήματα επικοινωνιών για να μπορέσει να ικανοποιήσει τις ανάγκες των χρηστών, για εύκολη και άνετη πρόσβαση σε κάθε είδους υπηρεσίες και πληροφορίες μέσω αυτών των τεχνολογιών.

Αυτό που παρατηρείται στις μέρες μας είναι μία έξαρση στην ανάπτυξη και δημιουργία τεχνολογιών λύσεων για να μπορέσουν να υποστηρίξουν την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων. Οι υπολογιστές αναπτύσσονται συνεχώς αποκτώντας όλο και περισσότερες δυνατότητες και παράλληλα το λογισμικό εξελίσσεται γοργά για να μπορέσει να υποστηρίξει τις νέες υπηρεσίες και τεχνολογίες. Στην παγκόσμια αγορά καθημερινά εμφανίζονται όλο και περισσότερα προϊόντα προς αυτή την κατεύθυνση από ότι στο παρελθόν. Σε αυτό έχει συμβάλει, τα τελευταία χρόνια, η μείωση του κόστους ασύρματων διεπαφών.

Η ασύρματη επικοινωνία έχει ως μέσο μετάδοσης την γήινη ατμόσφαιρα ή το διάστημα. Τα μειονεκτήματα των δικτύων αυτών είναι το κοινό μέσο (shared medium) πρόσβασης, τη μη ελεγχόμενη και δυναμικά μεταβαλλόμενη ποιότητα του μέσου και την επιρρέπεια σε λάθη. Αυτά συνεπάγονται τελικά τη διαμοίραση του εύρους ζώνης και την απουσία εξασφαλισμένης και σταθερής ταχύτητας πρόσβασης.

Τα Μητροπολιτικά δίκτυα τεχνολογίας WIFI, όπου βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11 έχουν αναπτυχθεί σε πολλές πόλεις του κόσμου έχοντας κύριο στόχο την διαμοίραση αρχείων και την διαμοίραση της πρόσβασης στο διαδίκτυο. Στην Ελλάδα τα πράγματα δείχνουν να κινούνται με αριετά έντονο ρυθμό, ειδικά έπειτα από την παροχή δωρεάν ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε διάφορες περιοχές της Αθήνας [2]. Το ενδιαφέρον αναμένεται να

συνεχίσει αμείωτο για την ασύρματη δικτύωση καθώς και τις πιθανές εμπορικές εφαρμογές της καθώς η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών του ΟΗΕ αναγνώρισε μια πιο νέα τεχνολογία, τα ασύρματα δίκτυα μεγάλης εμβέλειας WiMAX ως τμήμα του παγκόσμιου στάνταρτ για τις φορητές τηλεπικοινωνίες, σε μια απόφαση που πιθανότατα θα ενθαρρύνει τη διάδοση της τεχνολογίας.

## 1.1 Παρουσίαση προβλήματος

Το πρόβλημα που μελετάται στη παρούσα εργασία είναι η αυτοματοποιημένη επιλογή κατάλληλων καναλιών σε ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο τεχνολογίας IEEE 802.11, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση και η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ανάθεσης καναλιών και η αξιολόγηση αυτού σε ένα πραγματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο πλέγματος (wireless metropolitan mesh network). Δυστυχώς δεν υπάρχει επαρκής αριθμός διαθέσιμων καναλιών και πιο συγκεκριμένα, τα κανάλια τα οποία δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους είναι ελάχιστα. Ειδικότερα το πρότυπο που χρησιμοποιείται στο πραγματικό μας δίκτυο είναι το 802.11a το οποίο διαθέτει συνολικά 19 κανάλια.

Ένα σημαντικό πρόβλημα της ασύρματης διάδοσης είναι η παρουσία παρεμβολών (interference), που αποτελούν ένα βασικό παράγοντα περιορισμού της χωρητικότητας των ασύρματων συστημάτων [3] όπως είναι τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLANs) ή τα Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks - WMANs). Όταν υπάρχουν πολλοί πομποδέκτες σε κάποια περιοχή όπου επικοινωνούν μεταξύ τους και μερικοί από αυτούς χρησιμοποιούν διαύλους της ίδιας συχνότητας, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν διαύλους με παραπλήσιες συχνότητες, έχουμε ένα επικοινωνιακό περιβάλλον όπου ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την ποιότητα της ζεύξης είναι οι παρεμβολές [4, 5]. Δύο είδη παρεμβολών είναι τα εξής: οι παρεμβολές που δημιουργούνται όταν οι ζεύξεις χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι (Co-Channel Interference-CCI) και οι παρεμβολές που προκαλούνται όταν χρησιμοποιούνται επικαλυπτόμενα κανάλια (Adjacent Channel Interference). Όταν έχουμε ίδια κανάλια, το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) μοιράζεται στις συσκευές που ανταγωνίζονται για πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης και όσο ο αυξάνεται αριθμός των συσκευών που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι και η κυκλοφορία στο δίκτυο, τόσο μειώνεται η διαθέσιμη χωρητικότητα για κάθε σταθμό. Επίσης όσο πιο κοντινά είναι τα κανάλια τόσο μεγαλύτερη είναι η παρεμβολή με αποτέλεσμα να έχουμε πολλές επαναμεταδόσεις και μειωμένη απόδοση του

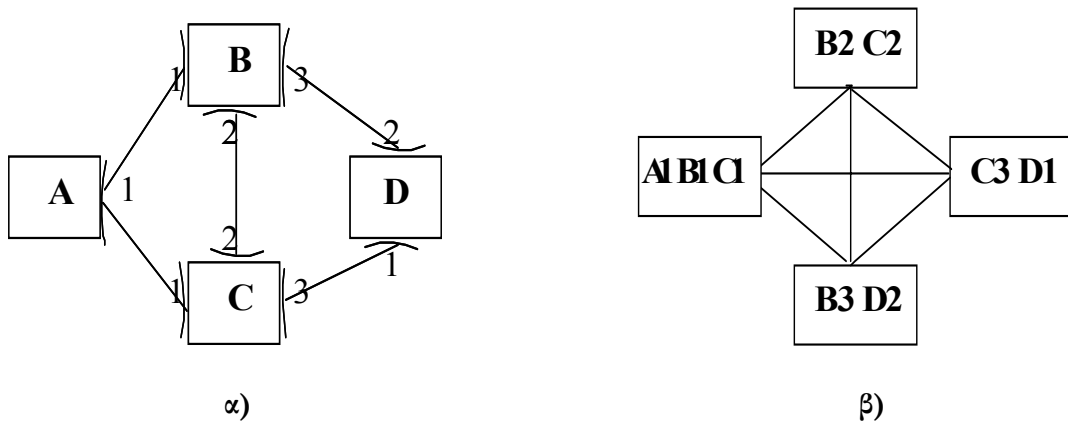
δικτύου. Επιπρόσθετα εκτός από τις παρεμβολές μεταξύ συνδέσμων του ίδιου του δικτύου, πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι παρεμβολές από εξωτερικά δίκτυα.

## 1.2 Συνεισφορά και περίληψη εργασίας

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε **α) ένα μοντέλο** που αναπαριστά τις παρεμβολές μεταξύ των ζεύξεων ενός δικτύου, **β) ένας αλγόριθμος** ανάθεσης καναλιών στους συνδέσμους ενός ασύρματου δικτύου πλέγματος και τέλος **γ) χρησιμοποιήθηκε ένα πραγματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο πλέγματος** για την εφαρμογή και αξιολόγηση των παραπάνω. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στο μοντέλο αναπαράστασης της παρεμβολής και έχει στόχο την ανάθεση καναλιών στις ζεύξεις με προκαθορισμένη σειρά, χρησιμοποιώντας μετρικές (metrics) για την επιλογή του καλύτερου καναλιού σε κάθε ζεύξη.

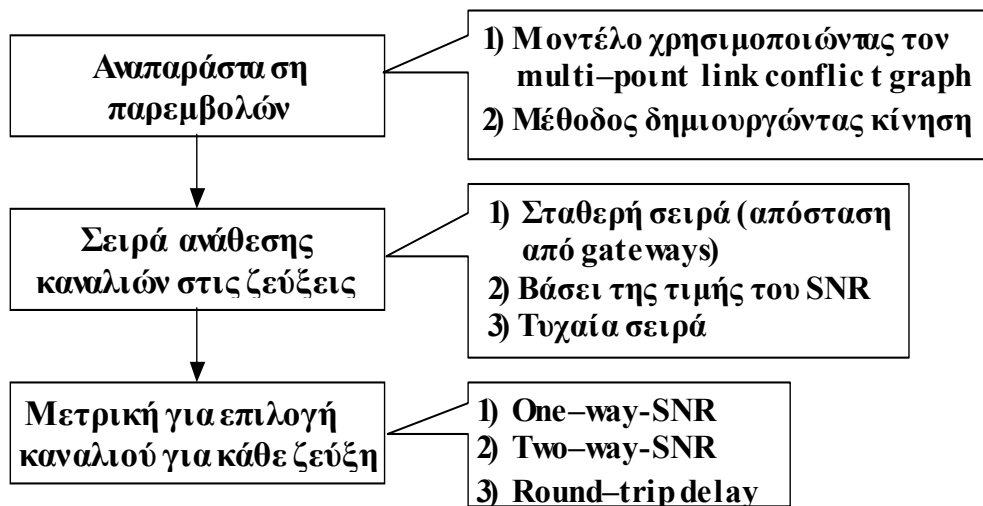
**Το μοντέλο αναπαράστασης της παρεμβολής** μεταξύ των ζεύξεων του εσωτερικού δικτύου αναπαριστάνεται με ένα γράφο τον οποίο ονομάζουμε “multi-point link conflict graph”. Ο γράφος αυτός αναπαράστασης παρεμβολών προϋποθέτει προκαθορισμένη τοπολογία του αρχικού δικτύου όσον αφορά τις συνδέσεις μεταξύ των ασύρματων διεπαφών. Αποτελείται από κορυφές όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε ζεύξεις σημείου-προς-σημείου (point-to-point), σημείου-προς-πολλαπλά (point-to-multipoint) ή πολλαπλών-προς-πολλαπλά (multipoint-to-multipoint) σημεία της αρχικής τοπολογίας. Η κάθε κορυφή δηλαδή του γράφου αντιστοιχεί σε μία ζεύξη δύο συνδεδεμένων κόμβων της αρχικής τοπολογίας, όταν χρησιμοποιούνται ζεύξεις σημείο-προς-σημείο, ή σε περισσότερες όταν χρησιμοποιούνται ζεύξεις σημείου-προς-πολλαπλά ή πολλαπλών-προς-πολλαπλά σημεία. Οι κορυφές του γράφου αυτού συνδέονται μεταξύ τους με ακμές όταν οι ζεύξεις που αντιστοιχούν στις κορυφές αυτές παρεμβάλλονται, όταν δηλαδή μία διεπαφή παρεμβάλλει την άλλη. Μια περίπτωση εμφάνισης παρεμβολών συμβαίνει όταν οι κορυφές περιέχουν διεπαφές ίδιων κόμβων του αρχικού δικτύου. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται μια τοπολογία όπου περιέχει ζεύξεις σημείο-προς-σημείο και σημείο προς πολλαπλά σημεία και ο αντίστοιχος “multi-point link conflict graph”. Ο γράφος αυτός περιέχει τέσσερις κορυφές όπου όλες συνδέονται μεταξύ τους με ακμές, οπότε και όλες είναι παρεμβαλλόμενες μεταξύ τους. Το μοντέλο αυτό που μόλις περιγράφηκε συγκρίθηκε με μία άλλη μέθοδο αναπαράστασης της παρεμβολής όπου βασίστηκε στη δημιουργία κίνησης (με τη χρήση του εργαλείου iperf). Στη μέθοδο αυτή δεν χρησιμοποιείται κάποιος γράφος αναπαράστασης της παρεμβολής αλλά γεννάται κίνηση στις ζεύξεις όπου έχει ήδη

πραγματοποιηθεί η ανάθεση καναλιών. Με το μοντέλο λοιπόν του “multi-point link conflict graph, λοιπόν, λαμβάνεται υπόψιν η παρεμβολή που δημιουργούν οι ζεύξεις σε σχέση με τις υπόλοιπες του εσωτερικού δικτύου.



Σχήμα 1: (α) Τοπολογία με σημείο-προς-σημείο και σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις (β) Αντίστοιχος multi-point link conflict graph

Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών στηρίζεται στα εξής στοιχεία: α) Στην αναπαράσταση των παρεμβολών (με τον multi-point link conflict graph ή με τη μέθοδος δημιουργώντας κίνηση), β) στην σειρά ανάθεσης καναλιών στις ζεύξεις (σταθερή, βάσει του SNR, τυχαία) και γ) στις μετρικές (one-way-SNR, two-way-SNR, round-trip-delay) όπου επιλέγονται για την ανάθεση του καλύτερου καναλιού για κάθε ζεύξη. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη δομή του αλγορίθμου.



Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα Αλγορίθμου

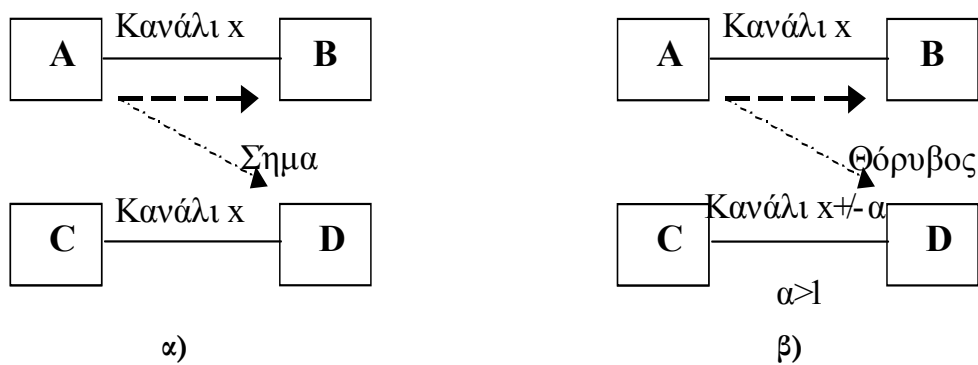
Όσον αφορά τον **αλγόριθμο** χρησιμοποιώντας τον multi-point link conflict graph η διαδικασία ανάθεσης καναλιών έχει ως εξής: Επιλέγεται η σειρά των κορυφών του γράφου όπου θα γίνει η ανάθεση καναλιών και μία μετρική βάσει της οποίας θα επιλεγεί το καλύτερο κανάλι. Όταν γίνεται ανάθεση σε κάποια κορυφή του γράφου δε λαμβάνονται υπόψιν τα ίδια και τα γειτονικά κανάλια των συνδεδεμένων σ' αυτόν κορυφών. Οπότε με τη μετρική που επιλέγεται, ανατίθεται το καλύτερο κανάλι μεταξύ αυτών που απομένουν. Η παραλλαγή του αλγορίθμου που αναπαριστά τις παρεμβολές με τη δημιουργία κίνησης ακολουθεί την εξής διαδικασία: Όπως και πριν, επιλέγεται η σειρά των ζεύξεων που θα γίνει η επιλογή των καναλιών και μια μετρική. Όταν ολοκληρωθεί η ανάθεση καναλιού σε μία ζεύξη αυτομάτως δημιουργείται κίνηση σ αυτήν. Ο αλγόριθμος στην περίπτωση αυτή εξετάζει όλα τα κανάλια που έχουμε στη διάθεση μας (19 στο σύνολο) για κάθε ζεύξη και αποκλείει τα κανάλια που δημιουργούν πραγματική παρεμβολή. Υπάρχει μια ποσοτικοποίηση της παρεμβολής και δεν αποκλείει εξ αρχής όλα τα πιθανά κανάλια που προκαλούν έστω και μικρή παρεμβολή όπως γίνεται στην περίπτωση του μοντέλου χρησιμοποιώντας τον γράφο.

Ένα βασικό στοιχείο του αλγορίθμου είναι οι **διαφορετικές επιλογές σειρών των ζεύξεων** στις οποίες γίνεται η ανάθεση καναλιών. Έτσι έχουμε τη σταθερή σειρά (fixed ordering) η οποία βασίζεται στην απόσταση των κόμβων από τις θύρες των σταθερών δικτύων (fixed network gateway). Οι κόμβοι που είναι κοντινότερα στις θύρες (gateways) αυτές προηγούνται σε σχέση με τους άλλους. Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος προτεραιότητας των ζεύξεων είναι αυτή όπου οι ζεύξεις με το μικρότερο SNR προηγούνται στη σειρά σε σχέση με τις άλλες. Τέλος εξετάζεται και η τυχαία σειρά επιλογής των ζεύξεων χωρίς κάποιες προϋποθέσεις.

Η ανάθεση του καλύτερου καναλιού, από τα διαθέσιμα που υπάρχουν, σε κάθε ζεύξη, βασίζεται σε κάποιες **μετρικές**. Η πρώτη μετρική που μελετήθηκε είναι το “one-way-SNR”, δηλαδή ο λόγος σήματος προς θόρυβο που μετριέται από τη μία διεπαφή εκ των δύο που ανήκουν σε μία απλή ζεύξη στη περίπτωση που έχουμε ζεύξεις σημείο-προς-σημείο. Όταν υπάρχουν ζεύξεις σημείου προς πολλαπλά σημεία το “one-way-SNR” καταγράφει το μέσο όρο του λόγου σήματος προς θόρυβο των πολλαπλών σημείων. Αν δύο κανάλια είναι εν μέρει επικαλυπτόμενα είναι γνωστό ότι υπάρχει εξασθένηση του σήματος, η οποία σχετίζεται άμεσα με τη μείωση του λόγου σήματος προς θόρυβο που λαμβάνουμε και μ' αυτόν τον τρόπο συνυπολογίζονται οι παρεμβολές από τα εξωτερικά δίκτυα. Έτσι λοιπόν η ανάθεση συχνότητας γίνεται στο κανάλι με το μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Η δεύτερη μετρική που μελετήθηκε είναι το “two-way-SNR” δηλαδή ο μέσος όρος των λόγων σήματος προς θόρυβο των δύο διεπαφών που ανήκουν σε μία σημείο προς σημείο ζεύξη ή όλων των διεπαφών που



ανήκουν σε μια σημείο προς πολλαπλά σημεία σύνδεση. Η τελευταία μετρική που μελετήθηκε είναι το “round-trip delay”, που βασίζεται στο μέσο όρο της καθυστέρηση ενός πακέτου ταξιδεύοντας και προς τις δύο κατευθύνσεις των συνδεδεμένων ζεύξεων. Η εκτίμηση αυτής της μετρικής βασίζεται στο εργαλείο ping. Οι μετρικές “one-way-SNR” και “two-way-SNR” καταδεικνύουν τις παρεμβολές που προκαλούν τα γειτονικά και όχι τα ίδια κανάλια των ζεύξεων εξωτερικά του δικτύου σε σχέση με τα κανάλια των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου. Έστω για παράδειγμα δύο ζεύξεις AB και CD που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι (σχήμα 3). Στην ζεύξη AB υπάρχει μεταφορά πακέτων από το A προς το B. Ο κόμβος D εφόσον είναι στο πεδίο ακτίνας του (range) A θα λάβει και αυτός ένα ποσοστό σήματος από την κίνηση αυτή. Το πακέτο βέβαια θα κοπεί από το MAC επίπεδο του αφού ο D δε είναι ο προορισμός του. Αυτό δεν θα επηρεάσει το SNR στην διεπαφή D. Στην περίπτωση βέβαια που ο A είναι αρκετά μακριά από τον D, ο τελευταίος ίσως λάβει κάποιο ελάχιστο θόρυβο. Όταν όμως οι δύο ζεύξεις έχουν γειτονικά κανάλια (σχήμα 4), τότε κατά τη μεταφορά πακέτων στη ζεύξη AB, ο κόμβος D θα λάβει την μετάδοση του A ως θόρυβο και όχι ως σήμα που μπορεί να αποκωδικοποιηθεί. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε μειωμένο SNR στην διεπαφή του D λόγω της παρεμβολής των γειτονικών καναλιών. Στην περίπτωση βέβαια που ο A στέλνει με μεγάλη ισχύ τότε ο D ίσως λάβει και κάποιο σήμα. Η μετρική round-trip-delay καταγράφει τις παρεμβολές που προκαλούν τα ίδια ή και τα γειτονικά κανάλια των ζεύξεων εξωτερικά του δικτύου σε σχέση με τα κανάλια των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου. Στο παρακάτω παράδειγμα η μετάδοση στη ζεύξη AB θα επηρεάσει την καθυστέρηση στην ζεύξη CD είτε χρησιμοποιούν ίδια είτε γειτονικά κανάλια.



**Σχήμα 3: (α) Παράδειγμα όπου το SNR δεν καταδεικνύει την παρεμβολή μεταξύ ίδιων καναλιών  
(β) Παράδειγμα όπου το SNR καταδεικνύει την παρεμβολή μεταξύ γειτονικών καναλιών**

Στην παρούσα εργασία συνυπολογίζονται οι παρεμβολές των ίδιων ή και των γειτονικών καναλιών που είναι ορισμένα είτε σε ζεύξεις εντός του δικτύου είτε σε εξωτερικά δίκτυα.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του multi-point link conflict graph λαμβάνουμε υπόψιν την παρεμβολή μεταξύ των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου που μελετάμε αφού όταν γίνεται ανάθεση σε κάποια κορυφή του γράφου δε λαμβάνονται υπόψιν τα ίδια και τα γειτονικά κανάλια των συνδεδεμένων σ' αυτόν κορυφών. Έτσι λοιπόν αποφεύγεται η παρεμβολή που προκαλούν τα ίδια ή και τα γειτονικά κανάλια των συνδέσμων εσωτερικά του δικτύου. Όσον αφορά την παρεμβολή από τα εξωτερικά δίκτυα αυτή προσεγγίζεται από τις μετρικές. Οι μετρικές “one-way-SNR” και “two-way-SNR” καταδεικνύουν τις παρεμβολές που προκαλούν τα γειτονικά κανάλια των ζεύξεων εξωτερικά του δικτύου σε σχέση με τα κανάλια των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου. Η μετρική round-trip-delay καταγράφει τις παρεμβολές που προκαλούν τα ίδια ή και τα γειτονικά κανάλια των ζεύξεων εξωτερικά του δικτύου σε σχέση με τα κανάλια των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου.

Η εφαρμογή και αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου βασίστηκε σε **πειράματα σε ένα πραγματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο** πλέγματος πολλαπλών διεπαφών με κατευθυντικές (directional) κεραίες και συνδέσεις σημείου προς σημείου. Καταρχάς συγκρίνεται το μοντέλο αναπαράστασης της παρεμβολής χρησιμοποιώντας το “multi-point link conflict graph” με μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με τη γέννηση κίνησης. Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας τις δύο αυτές μεθόδους αναπαράστασης των παρεμβολών συγκρίνεται με μία απλοϊκή μέθοδο επιλογής καναλιών (worst\_case) η οποία δε λαμβάνει υπόψιν τις παρεμβολές και απλά επιλέγει για κάθε ζεύξη το κανάλι με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Επιπρόσθετα ο προτεινόμενος αλγόριθμος της παρούσας εργασίας συγκρίνεται με ένα άνω φράγμα της βέλτιστης επιλογής καναλιών. Αυτό υπολογίζεται θεωρώντας ανά δύο τις ζεύξεις (η τελευταία ζεύξη επιλέγεται μόνη της μιας και έχουμε 5 συνολικά ζεύξεις), ενώ οι υπόλοιπες είναι εκτός λειτουργίας (down) και επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός καναλιών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης αυτών των δύο ζεύξεων. Τέλος συγκρίνονται οι μετρικές μεταξύ τους όπως και οι διαφορετικές σειρές επιλογής των ζεύξεων. Όλα τα παραπάνω πειράματα και συγκρίσεις στηρίζονται στην μέση συνολική καθυστέρηση (average delay) και στο μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης (latency) σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου μετά από το πέρας της διαδικασίας ανάθεσης καναλιών με τη βοήθεια των παραπάνω μεθόδων.

### 1.3 Συσχέτιση με προηγούμενες εργασίες

Προηγούμενες έρευνες όσον αφορά την ανάθεση καναλιών, βασίζονται σε πειράματα με τη βοήθεια εργαλείων προσομοίωσης (NS tool) [6, 7, 8], ή αξιολογούνται σε πραγματικά δίκτυα test-bed εσωτερικού χώρου [9, 10]. Το γεγονός αυτό κατέστησε πιο ελκυστική τη μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος με τη χρήση ενός πραγματικού ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου πλέγματος όπου παρέχει τη δυνατότητα να συναχθούν ρεαλιστικά συμπεράσματα που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του σε διάφορες συνθήκες (καιρικά φαινόμενα, διαφορετικές ώρες της ημέρας, μεγάλες και μικρές αποστάσεις μεταξύ κόμβων κ.τ.λ). Επίσης, έχουν δημιουργηθεί διάφορα μοντέλα μέτρησης της παρεμβολής, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν είτε μόνο τις παρεμβολές που δημιουργούνται εσωτερικά του δικτύου που μελετούν [6, 7, 8, 9]. Σημαντικό σημείο των προτεινόμενων μεθόδων αναπαράστασης των παρεμβολών της παρούσας εργασίας είναι ότι είναι ότι καταγράφονται τόσο οι εξωτερικές όσο και οι εσωτερικές παρεμβολές ενός δικτύου, στοιχείο που καταγράφεται και στο [10]. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο [10] μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφοροποιημένο και στο δικό μας τρόπο ανάθεσης καναλιών με τη διαφορά ότι οι συγγραφείς της συγκεκριμένης έρευνας θεωρούν προκαθορισμένη την αρχική τοπολογία όσον αφορά την διασύνδεση μεταξύ κόμβων σε σχέση με την δική μας εργασία όπου θεωρούμε προκαθορισμένη τοπολογία όσον αφορά την διασύνδεση μεταξύ των ασύρματων διεπαφών καθιστώντας το μοντέλο μας πιο απλό. Στην παρούσα εργασία η εσωτερική παρεμβολή καταγράφεται χρησιμοποιώντας τον “multi-point link conflict graph” ενώ η εξωτερική παρεμβολή καταγράφεται με τις μετρικές SNR και round-trip-delay. Οι μετρικές επιλογής του καλύτερου καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν σε ανάλογες εργασίες είναι οι εξής: ο συνδυασμός του αριθμού των παρεμβαλλόμενων διεπαφών (number of interfering radios) και της χρησιμότητας των καναλιών (channel utilization) των παρεμβαλλόμενων διεπαφών [10], η συνάρτηση (f) κόστους παρεμβολής η οποία είναι μια γραμμική συνάρτηση του διαστήματος καναλιού (channel separation) [8, 9], ο φόρτος καναλιού (channel load) όπου είναι ένας συνδυασμός από το συνολικό φόρτο κίνησης και τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούν ένα συγκεκριμένο κανάλι [7]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πειραματικό μας δίκτυο έχει σταθερή τοπολογία και αποτελείται από ζεύξεις σημείο-προς-σημείο με δυνατότητα εξέλιξης σε ζεύξεις σημείου με πολλαπλών σημείων. Οι κατευθυντικές κεραιές που χρησιμοποιούνται έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού παρεμβολής εν αντιθέσει με τις πολυκατευθυντικές (omnidirectional) που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αντίστοιχων μελετών [6, 7, 8, 9, 10]. Μία εργασία όπου ασχολείται με ανάθεση καναλιών

χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές είναι η [11]. Οι συγγραφείς στην [11] αποκλείουν τα κανάλια όπου χρησιμοποιούν οι κόμβοι που είναι στην ακτίνα παρεμβολής (interference range) και συγκεκριμένα στην κατεύθυνση (transmission cone) του κόμβου που γίνεται ανάθεση καναλιών. Έπειτα επιλέγουν ένα τυχαίο κανάλι από τα υπόλοιπα δίχως να χρησιμοποιούν κάποια μετρική και χωρίς να συνυπολογίζουν τις εξωτερικές παρεμβολές. Η σειρά των ζεύξεων με την οποία γίνεται η ανάθεση συχνοτήτων βασίζεται είτε στην απόσταση των κόμβων από τις θύρες των σταθερών δικτύων [7, 8, 10], δηλαδή οι κόμβοι που είναι κοντινότερα στις θύρες προηγούνται σε σχέση με τους άλλους, είτε γίνεται τυχαία [6, 9, 11]. Η προτεραιότητα που βασίζεται στην απόσταση των κόμβων από τις θύρες των σταθερών δικτύων λήφθηκε υπόψιν και σε όλα σχεδόν τα δικά μας πειράματα.

## 1.4 Δομή εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής: Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11, τις βασικές αρχιτεκτονικές αυτού, τις δύο τοπολογίες δικτύου που καθορίζονται από το συγκεκριμένο πρότυπο και τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος (wireless mesh networks). Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο πρότυπο IEEE 802.11a, πρότυπο που χρησιμοποιείται και στο ασύρματο πειραματικό μητροπολιτικό δίκτυο. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η τοπολογία του μητροπολιτικού δικτύου, ο εξοπλισμός (hardware) και το λογισμικό (software) δίνοντας έμφαση στον οδηγό ασύρματης διεπαφής - MadWiFi driver. Τέλος αναφέρονται οι εμπειρίες που αποκομίστηκαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του δικτύου όπως και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μέθοδος αναπαράστασης της παρεμβολής βάσει ενός γράφου τον οποίο ονομάσαμε “multi-point link conflict graph”. Η προσέγγιση αυτή της παρεμβολής, συγκρίνεται με μία άλλη μέθοδο αναπαράστασης της παρεμβολής η οποία βασίζεται στη δημιουργία κίνησης στις ζεύξεις όπου έχει γίνει ήδη ανάθεση καναλιού. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών όπου βασίζεται στις μεθόδους αναπαράστασης της παρεμβολής και χρησιμοποιεί ως βασικά στοιχεία την σειρά επιλογής των ζεύξεων στις οποίες γίνεται η ανάθεση καναλιών και τις μετρικές επιλογής του καλύτερου καναλιού σε κάθε ζεύξη. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο πραγματικό πειραματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο. Συγκρίνεται η μέθοδος αναπαράστασης της παρεμβολής βάσει του γράφου με την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με γέννηση κίνησης. Η διαδικασία

ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας τις δύο αυτές μεθόδους αναπαράστασης των παρεμβολών συγκρίνονται με μία απλοϊκή μέθοδο επιλογής καναλιών (worst\_case) και με ένα άνω φράγμα της βέλτιστης επιλογής καναλιών. Επίσης συγκρίνονται οι μετρικές όπως και οι διαφορετικές σειρές επιλογής των ζεύξεων στις οποίες γίνεται η επιλογή καναλιού. Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται η συνεισφορά των προηγούμενων εργασιών. Τέλος στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αποκομίστηκαν από την παρούσα εργασία και αναλύονται οι μελλοντικές μας σκέψεις για το πώς θα διευρυνθεί και θα απλοποιηθεί το μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών και ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών και για άλλες περιπτώσεις δικτύων.

## **Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11, και ιδιαίτερα του προτύπου 802.11a όπου και χρησιμοποιείται στο πειραματικό δίκτυο. Επίσης παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του 802.11, οι δύο τοπολογίες δικτύου που καθορίζονται απ' αυτό, αδόμητα δίκτυα (ad-hoc mode) και δίκτυα υποδομής (infrastructure mode) και τέλος περιγράφονται τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος.

### **2.1 Γενικά χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11**

Η ομάδα IEEE 802.11 συγκροτήθηκε με σκοπό την επέκταση του προτύπου 802.3 (Ethernet) στο ασύρματο μέσο. Μετά από αρκετά χρόνια μελέτης το πρώτο πρότυπο 802.11 [12, 13] εγκρίθηκε από την ομάδα 802 της IEEE στις 26 Ιουνίου του 1997 και θέτει το πλαίσιο για μια προτυποποιημένη ασύρματη δικτυακή επικοινωνία ευρείας ζώνης. Έγινε ευρύτερα γνωστό ως “Wi-Fi” (Wireless Fidelity) επειδή ο ανεξάρτητος οργανισμός Wi-Fi Alliance, παρέχει πιστοποίηση για τις συσκευές τύπου 802.11. Το πρότυπο αυτό περιγράφει αναλυτικά τον μηχανισμό λειτουργίας των ασυρμάτων δικτύων ως προς τις συσκευές, τον τρόπο επικοινωνίας τους, τα πρωτόκολλα και τους χρονισμούς τους. Επίσης, περιγράφει το φυσικό επίπεδο με τις συχνότητες, τις διαμορφώσεις και τις ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που υποστηρίζονται. Είναι σαφές λοιπόν ότι πρόκειται για ένα σύνολο προδιαγραφών που αναφέρεται κυρίως στα δύο πρώτα επίπεδα του OSI (φυσικό και ζεύξης δεδομένων) και ελάχιστα στο τρίτο (επίπεδο ζεύξης δικτύου).

Τα πρότυπα 802.11a [11, 12] και 802.11b [14] δημοσιεύτηκαν το 1999. Αργότερα το 2003 ολοκληρώθηκε το πρότυπο 802.11g [15], το οποίο είναι προς τα πίσω συμβατό με το 802.11b. Οι διαφοροποιήσεις τους εμφανιζόταν κυρίως στο φυσικό επίπεδο, στις υποστηριζόμενες διαμορφώσεις και κυρίως στους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ο πίνακας 1 εμφανίζει συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε προτύπου

πρότυπο	διαμόρφωση	φάσμα συχνοτήτων	ρυθμοί μετάδοσης
802.11	FH, DS	2400-2483.5 MHz	1, 2 Mbps
802.11a	OFDM	5150-5350 MHz 5725-5825MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
802.11b	DS	2400-2483.5 MHz	1, 2, 5.5, 11 Mbps
802.11g	OFDM, DS	2400-2483.5 MHz	1, 2, 5.5, 11, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps

Πίνακας 1: Τα πρότυπα 802.11 και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους

## 2.2 Αρχιτεκτονική του 802.11

Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν μια τοπολογία ασύρματου τοπικού δικτύου είναι τα εξής:

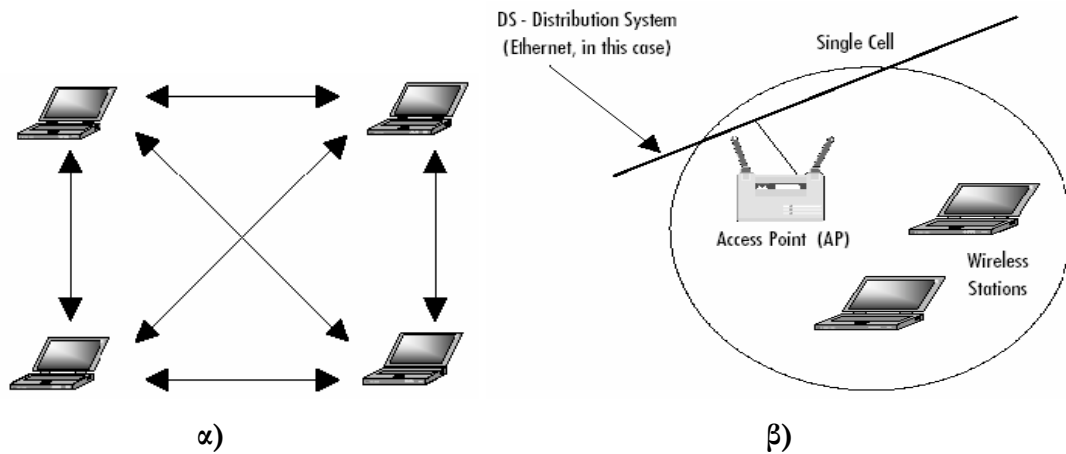
- Σταθμοί (stations): Μπορεί να είναι κινητοί ή σταθεροί υπολογιστές, υπολογιστές χειρός (personal digital assistants, PDAs), κινητά τηλέφωνα με δυνατότητες πλοήγησης στο διαδίκτυο και οποιαδήποτε άλλη συσκευή η οποία διαθέτει τις προδιαγραφές για ασύρματη πρόσβαση σε κάποιο σημείο πρόσβασης.
- Σημείο πρόσβασης (Access Point, AP): Τα σημεία πρόσβασης είναι μονάδες υλικού, οι οποίες εξασφαλίζουν τη διασύνδεση στην τοπολογία του δικτύου. Συνδέουν τους σταθμούς μεταξύ τους αλλά και με το δίκτυο κορμού, δρομολογούν την κίνηση και προσφέρουν υπηρεσίες αποθήκευσης πακέτων, διαχείρισης ενέργειας και συγχρονισμού. Επίσης συνδέουν μεταξύ τους διάφορα Βασικά Σύνολα Υπηρεσιών (Basic Service Sets, BSSs).
- BSS (Basic Service Set): Είναι το βασικό στοιχείο ενός ασύρματου τοπικού δικτύου. Αποτελείται από ένα AP και πολλούς σταθμούς. Αν ένας σταθμός μετακινηθεί έξω από το BSS στο οποίο ανήκει δε θα μπορεί πλέον να επικοινωνεί άμεσα με τα άλλα μέρη του συγκεκριμένου BSS.
- ESS (Extended Service Set): Όταν οι ανάγκες της διαδίκτυωσης ξεπερνούν τα όρια του BSS, το 802.11 καθορίζει τη δομή ενός πιο σύνθετου τοπικού δικτύου που ονομάζεται Διευρυμένο Σύνολο Υπηρεσιών (Extended Service Set, ESS) και στο οποίο είναι δυνατή η διασύνδεση και η επικοινωνία πολλών BSS μεταξύ τους. Το στοιχείο που χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση των BSS ονομάζεται Σύστημα Διανομής (Distribution System, DS). Η πρόσβαση στο DS γίνεται με τη βοήθεια των APs, τα οποία παρέχουν ουσιαστικά τη διασύνδεση των σταθμών που βρίσκονται σε διάφορα BSS στο DS. Το 802.11 κάνει διαχωρισμό μεταξύ του Ασύρματου Μέσου (Wireless Medium, WM) από το Μέσο του

Συστήματος Διανομής (Distribution System Medium, DSM), που είναι η διεπαφή που συνδέει δύο APs.

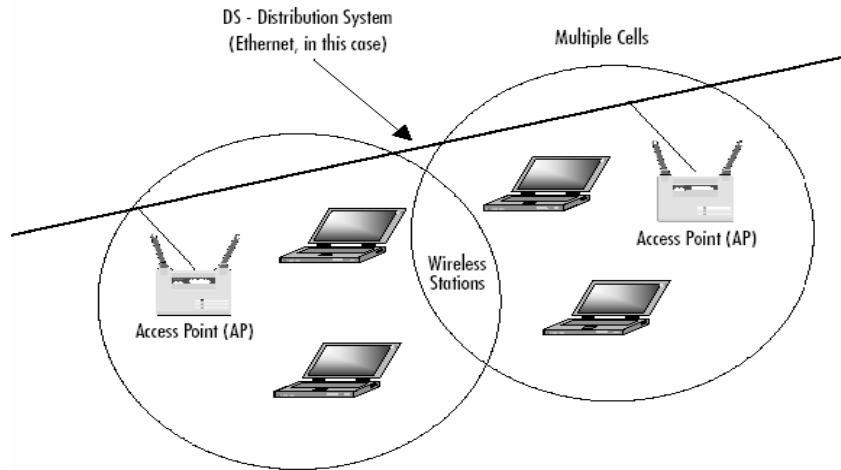
➤ Σύστημα διανομής (Distribution System, DS): Το Σύστημα Διανομής (DS) είναι ο τρόπος με τον οποίο ένα σημείο πρόσβασης επικοινωνεί με ένα άλλο σημείο πρόσβασης στα πλαίσια ανταλλαγής πακέτων από τους σταθμούς στο αντίστοιχο BSSs τους. Προωθεί πλαίσια που ακολουθούν τους κινητούς σταθμούς καθώς κινούνται από ένα BSS προς άλλο, και ανταλλάσσει πακέτα με ένα ενσύρματο δίκτυο. Το σύστημα διανομής, όπως περιγράφεται στο IEEE 802.11, δεν είναι απαραίτητα ένα δίκτυο, ούτε τίθενται οποιοδήποτε περιορισμοί στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα εφαρμόζεται, παρά μόνο στις υπηρεσίες που πρέπει να παρέχει. Κατά συνέπεια το σύστημα διανομής μπορεί να είναι ένα ενσύρματο δίκτυο όπως 803.2 ή ένα κιβώτιο ειδικού σκοπού που διασυνδέει τα σημεία πρόσβασης και παρέχει τις απαραίτητες υπηρεσίες διανομής.

➤ Ασύρματο Μέσο (Wireless Medium): Είναι η ασύρματη διεπαφή που συνδέει ένα σταθμό με το AP, μέσα σε ένα BSS. Προσφέρει επικοινωνία διαδίδοντας τα ραδιοκύματα που παράγονται από τους σταθμούς και τα APs και μεταφέρουν την πληροφορία.

Η προδιαγραφή 802.11 καθορίζει δύο τοπολογίες δικτύου: αδόμητα δίκτυα και δίκτυα υποδομής. Το βασικό σύνολο υπηρεσιών (basic service set-BSS) είναι μια ομάδα από σταθμούς που επικοινωνούν μεταξύ τους.







γ)

**Σχήμα 4: (α) Το βασικότερο ασύρματο δίκτυο: σταθμοί σε τοπολογία ad-hoc (IBSS), (β) σταθμοί σε τοπολογία infrastructure mode (BSS), (γ) ένα ESS σχηματίζεται με τη διασύνδεση πολλαπλών infrastructure δικτύων (BSS) μέσω ενός συστήματος διανομής**

Ένα WLAN λειτουργεί σε λειτουργία αδόμητου δικτύου όταν οι ασύρματοι τεμαχικοί σταθμοί επικοινωνούν απευθείας μεταξύ, είναι κινητοί και δεν υπάρχει διασύνδεση με το ενσύρματο δίκτυο. Τότε το σύνολο υπηρεσιών ονομάζεται ανεξάρτητο BSS (independent BSS - IBSS). Αντίθετα, σε λειτουργία δικτύου υποδομής, τα ασύρματα τεμαχικά συνδέονται με το ενσύρματο δίκτυο μέσω ενός AP. Οι ασύρματοι κόμβοι και το AP αποτελούν ένα BSS και η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων δεν γίνεται απευθείας αλλά μέσω του AP. Το AP παρέχει υπηρεσίες τοπικής αναμετάδοσης για το BSS, καθώς και τη δυνατότητα σύνδεσης σε ένα σύστημα διανομής. Το σύστημα διανομής μπορεί να είναι ένα ενσύρματο δίκτυο ή ένα άλλο ασύρματο δίκτυο, το οποίο διασυνδέει πολλαπλά AP διάφορων BSS, σχηματίζοντας έτσι ένα Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσίας (extended service set-ESS). Το σχήμα 3 απεικονίζει τις τοπολογίες των ασυρμάτων δικτύων.

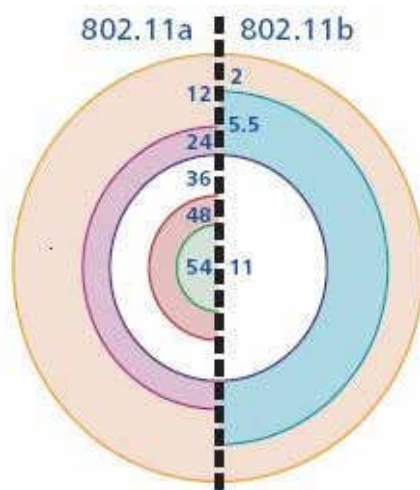
## 2.3 Το πρότυπο IEEE 802.11a

Καθώς όλη η εργασία στοχεύει στην εξαγωγή συμπερασμάτων από μετρήσεις σε ασύρματο δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί το πρότυπο 802.11a, θεωρήσαμε σημαντικό να αναφέρουμε τις κυριότερες λειτουργίες του συγκεκριμένου προτύπου.

Το 802.11a [12, 13] είναι μια τροποποίηση του αρχικού προτύπου 802.11 και επικυρώθηκε το 1999. Το πρότυπο 802.11a ακολουθεί την βασική μεθοδολογία του αρχικού προτύπου και λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz. Η ζώνη αυτή χωρίζεται σε τρεις διακριτές περιοχές των 100MHz, κάθε μια με ξεχωριστή επιτρεπόμενη

ισχύ. Συγκεκριμένα η χαμηλή ζώνη εκτείνεται στην περιοχή των 5.15 – 5.25 GHz, η μεσαία στην περιοχή των 5.25 – 5.35 GHz και τέλος η υψηλή στην περιοχή των 5.725 – 5.825GHz. Οι συσκευές που είναι ρυθμισμένες να εκπέμπουν στην υψηλή ζώνη συχνοτήτων πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε εξωτερικούς χώρους λόγω της μεγάλης εκπεμπόμενης ισχύος. Αντίθετα οι συσκευές που εκμεταλλεύονται τις δύο χαμηλότερες ζώνες είναι κατάλληλες για εσωτερική χρήση, με τη μόνη προϋπόθεση ότι οι πρώτες πρέπει να είναι υποχρεωτικά εξοπλισμένες με εσωτερικές κεραιές.

Το πρότυπο 802.11a παρέχει ρυθμούς 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ή 54 Mbps με τους ρυθμούς 6Mbps, 12 Mbps και 24Mbps να είναι υποχρεωτικοί για κάθε συσκευή που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο πρότυπο. Δεδομένου όμως ότι η ασύρματη συσκευή απομακρύνεται από το σημείο πρόσβασης ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 5: Σύγκριση απόστασης / θεωρητικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (Mbps) για τα πρότυπα 802.11a και 802.11b (δε παρουσιάζονται όλοι οι ρυθμοί απόδοσης)**

Η τεχνική μετάδοσης που χρησιμοποιείται είναι η ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). Με αυτή την τεχνική ένα σήμα πληροφορίας διαιρείται σε 52 ορθογώνια φέροντα υποσήματα μέσα σε ένα κανάλι εύρους 20 MHz. Για το ρυθμό μετάδοσης των 54Mbps, υιοθετείται η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) που χρησιμοποιεί διαφορετικά πλάτη της κεντρικής συχνότητας μετάδοσης για να αντιπροσωπεύσουν τα bits της πληροφορίας. Επίσης για την εξάλειψη της επαναμετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο διόρθωσης σφαλμάτων FEC (Forward Error Correction) όπου κατά την αποστολή δεδομένων στέλνεται και ένα δεύτερο αντίγραφο της πληροφορίας έτσι ώστε αν ένα μέρος του σήματος χαθεί, η πληροφορία να μπορεί να ανακατασκευαστεί.

Για τη μετάδοση δεδομένων υπάρχουν 23 διαφορετικά κανάλια στις τρεις ζώνες συχνοτήτων. Από αυτά έχουν οριστεί 12 κανάλια, εύρους ζώνης 20 MHz, σε απόσταση 20 MHz μεταξύ τους, τα οποία δεν επικαλύπτονται. Δίνεται λοιπόν η δυνατότητα ρύθμισης μέχρι 12 σημείων πρόσβασης, να λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια κάτω από τον ίδιο χώρο χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ των συσκευών και επιπλέον αυξάνεται η απόδοση του ασύρματου δικτύου στο συγκεκριμένο χώρο.

Επίσης η μέγιστη εμβέλεια μια συσκευής τύπου 802.11a είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος επέκτασης ενός δικτύου λόγω απαίτησης μεγαλύτερου αριθμού πρόσβασης. (Πίνακας 2)

<b>Απόσταση (Feet)</b>	<b>802.11b (Mbps)</b>	<b>802.11a (Mbps)</b>	<b>802.11g (Mbps)</b>
10	5.8	24.7	24.7
50	5.8	19.8	24.7
100	5.8	12.4	19.8
150	5.8	4.9	12.4
200	3.7	0	4.9
250	1.6	0	1.6
300	0.9	0	0.9

**Πίνακας 2: Σύγκριση ρυθμαπόδοσης (throughput) / απόσταση για τα πρότυπα 802.11a, 802.11b και 802.11g**

## 2.4 Ασύρματα δίκτυα πλέγματος

Κύρια χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας ασύρματων δικτύων αλλά και της επικείμενης αρχιτεκτονικής είναι η μεγάλη αξιοπιστία τους, αφού κάθε κόμβος του δικτύου είναι συνδεδεμένος ταυτόχρονα με πολλούς άλλους. Οι κόμβοι λειτουργούν ως αναμεταδότες, στέλνοντας δεδομένα σε γειτονικούς σε αυτούς κόμβους, και σε περίπτωση που κάποιος κόμβος αποτύχει -σταματήσει να λειτουργεί- οι γειτονικοί του κόμβοι βρίσκουν ένα εναλλακτικό τρόπο, δρομολόγιο, να μεταφέρουν τα δεδομένα στο τελικό τους προορισμό.

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν καθολική και αξιόπιστη ευρυζωνική πρόσβαση με χαμηλό κόστος σε αστικές και μη αστικές περιοχές τόσο σε σταθερούς, όσο και σε κινητούς χρήστες. Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος

αποτελούνται από σταθερούς κόμβους με πολλαπλές ραδιοεπαφές, σε τοπολογία που εξασφαλίζει την ύπαρξη εναλλακτικών μονοπατιών με πολλαπλά ασύρματα άλματα μεταξύ των κόμβων του δικτύου, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του δικτύου. Οι ταχύτητες πρόσβασης μέσω ασύρματων δικτύων πλέγματος μπορεί να ξεπεράσουν ειείνες της ενσύρματης πρόσβασης ADSL, στην οποία η ταχύτητα περιορίζεται από τη μέγιστη ταχύτητα της μοναδικής γραμμής πρόσβασης που διαθέτει ο συνδρομητής. Επιπλέον, το εύρος ζώνης του ενσύρματου καναλιού και η απόσταση του συνδρομητή από το κέντρο του παρόχου (για την τεχνολογία ADSL) ή το υψηλό κόστος εγκατάστασης (για την τεχνολογία οπτικών ινών), περιορίζει σημαντικά τη δυνατότητα αύξησης της ταχύτητας πρόσβασης μέσω ενσύρματων τεχνολογιών.

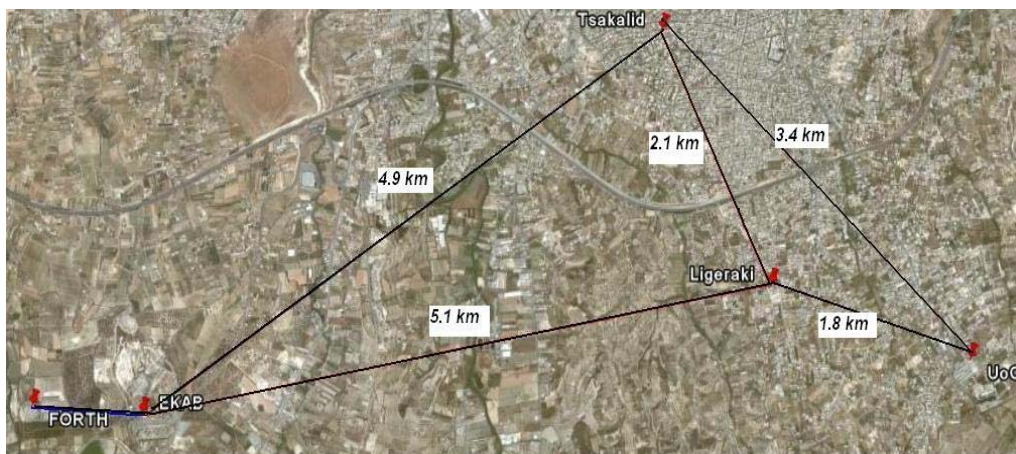
Από την άλλη, τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος με προηγμένες διαδικασίες διαχείρισης και δρομολόγησης μπορεί να συναθροίσουν τη διαθέσιμη χωρητικότητα πολλαπλών γραμμών ADSL καθώς και πιο γρήγορων γραμμών πρόσβασης μέσω οπτικών ινών, δημιουργώντας μια δεξαμενή χωρητικότητας στην οποία έχουν από κοινού πρόσβαση τόσο σταθεροί όσο και κινητοί χρήστες. Με τον τρόπο αυτό σπάνε το φράγμα της μιας γραμμής πρόσβασης, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνουν αποδοτική χρήση τόσο του ασύρματου φάσματος, όσο και των ενσύρματων γραμμών πρόσβασης. Πλεονέκτημα των ασύρματων δικτύων πλέγματος για τους παρόχους είναι η διάθεση καθολικής ευρυζωνικής πρόσβασης σε σταθερούς και σε κινητούς χρήστες με χαμηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και διαχείρισης που δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων πολυμεσικών εφαρμογών, εφαρμογών πραγματικού χρόνου, εφαρμογών δημόσιας ασφάλειας καθώς και μελλοντικών καινοτόμων εφαρμογών που απαιτούν διάχυτη ευρυζωνική πρόσβαση. Σε αστικές περιοχές, τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος επιτρέπουν σε παρόχους να επεκταθούν στην παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης με υψηλό ποσοστό αστικής κάλυψης, αξιοποιώντας την υπάρχουσα ενσύρματη υποδομή τους, ενώ σε μη αστικές περιοχές όπου η χαμηλή ζήτηση καθιστά μη αποδοτική την ανάπτυξη ενσύρματων ευρυζωνικών υποδομών, η χρήση των ασύρματων δικτύων πλέγματος είναι η μόνη οικονομικά βιώσιμη λύση.

# Κεφάλαιο 3 Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο [16] όπου αναπτύχθηκε και στο οποίο εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν οι αλγόριθμοι ανάθεσης καναλιών. Περιγράφεται η τοπολογία του δικτύου, τα χαρακτηριστικά των κόμβων, το υλικό και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, ο οδηγός ασύρματης διεπαφής MadWiFi όπως και οι εμπειρίες που αποκομίστηκαν κατά την ανάπτυξη αυτού. Το έργο αυτό της ανάπτυξης του μητροπολιτικού δικτύου έγινε στα πλαίσια του project 05-AKMON-80.

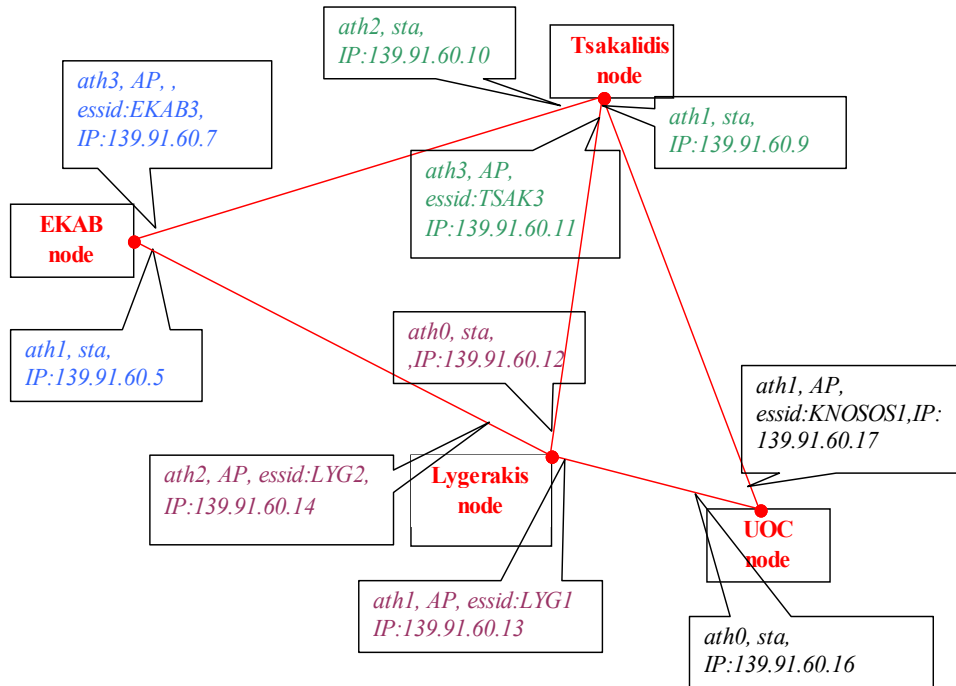
## 3.1 Τοπολογία δικτύου και χαρακτηριστικά κόμβων

Το ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο που αναπτύξαμε αποτελείται από 4 κόμβους, όπου ο καθένας έχει μέχρι τέσσερις 802.11a ασύρματες ραδιοεπαφές καθώς και μία ασύρματη για απομακρυσμένο έλεγχο και διαχείριση. Καλύπτει μια περιοχή 60χλμ<sup>2</sup> στην πόλη του Ηρακλείου, οι ζεύξεις είναι σημείο-προς σημείο και οι κεραιές κατευθυντικές. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων ποικίλει από 1.6km μέχρι 5km και το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει δύο θύρες (gateways) με τις οποίες συνδέεται σε σταθερό δίκτυο. Οι κόμβοι του δικτύου είναι: Ekab, Tsakalidis, Lygerakis και Uoc. Οι ζεύξεις όπως και οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι: Ekab – Tsakalidis 4.9χλμ, Ekab – Lygerakis 5.1χλμ, Tsakalidis – Lygerakis 2.1χλμ, Tsakalidis – Uoc 3.4χλμ και Lygerakis – Uoc 1.8 χλμ. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι αποστάσεις των κόμβων με τη βοήθεια του Google Earth.



Σχήμα 6: Χάρτης των πρώτων τεσσάρων κόμβων του Ασύρματου Μητροπολιτικού Δικτύου του Ηρακλείου

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται αναλυτικά όλη η διασύνδεση των κόμβων, ο αριθμός των ραδιοεπαφών που βρίσκονται σε κάθε κόμβο, οι τρόποι λειτουργίας (mode) αυτών, τα αναγνωριστικά δικτύων (essid) των σημείων πρόσβασης, καθώς και οι IP διευθύνσεις της κάθε διεπαφής.



Σχήμα 7: Πληροφορίες διασύνδεσης των κόμβων

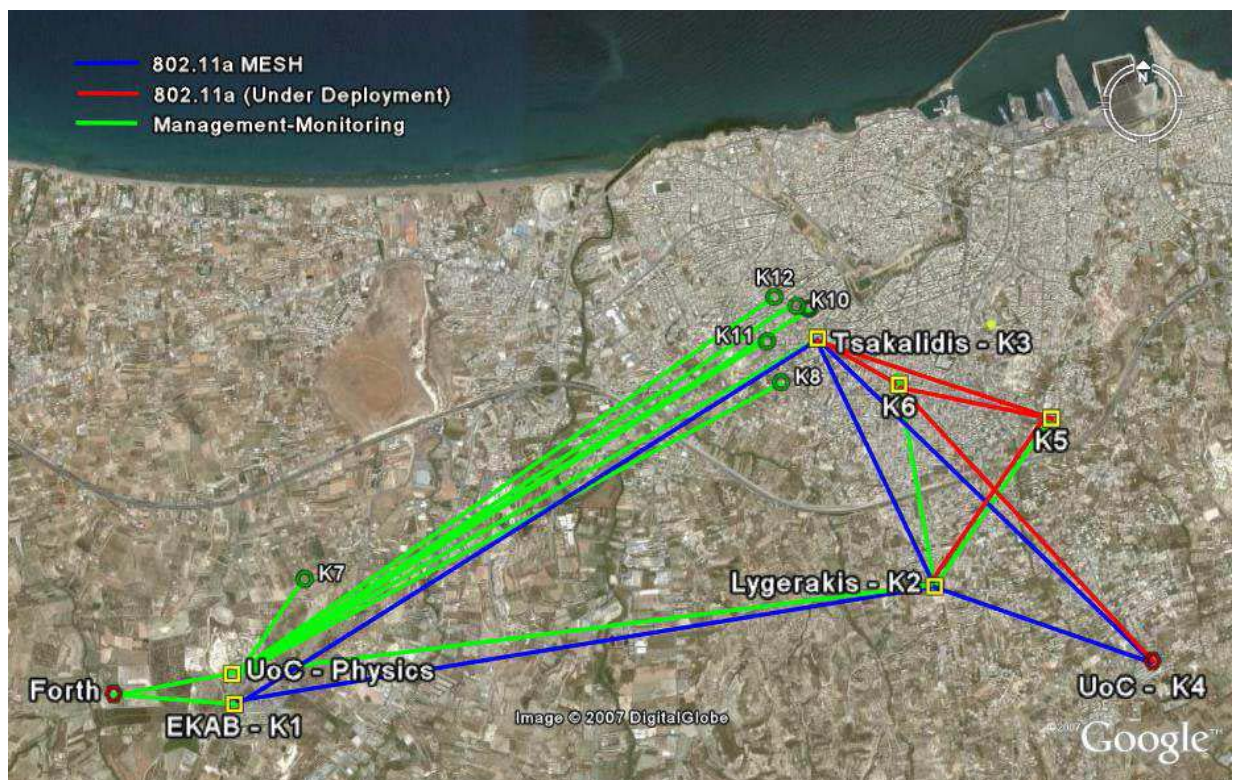
Ο κόμβος Ekab αποτελείται από δύο 29 dBi grid και μία 21 dBi patch panel κεραίες. Η patch panel κεραία, κάθετης πόλωσης, είναι συνδεδεμένη με το airlive του κόμβου και στοχεύει το ΙΤΕ για την ασύρματη πρόσβαση και διαχείριση του συγκεκριμένου κόμβου από απόσταση. Οι δύο grid κεραίες έχουν κατεύθυνση προς τον κόμβο Lygerakis και τον κόμβο Tsakalidis αντίστοιχα. Ο κόμβος Lygerakis αποτελείται από τρεις patch panel κεραίες των 21-dbi. Η μία κεραία, κάθετης πόλωσης στοχεύει τον κόμβο Ekab, η δεύτερη κεραία, κάθετης πόλωσης, έχει κατεύθυνση τον κόμβο Uoc και η τελευταία κεραία οριζόντιας πόλωσης, στοχεύει τον κόμβο Tsakalidis. Η ασύρματη πρόσβαση και διαχείριση του κόμβου αυτού γίνεται με ένα ήδη υπάρχον ασύρματο δίκτυο (backbone) οπότε και δε χρειάστηκε να τοποθετηθεί airlive. Υπάρχει δηλαδή μια patch panel κεραία των 22-dbi μαζί με ένα AP Cisco 1240 σε bridge mode όπου στοχεύει τον κόμβο του Φυσικού. Ο κόμβος Uoc αποτελείται από δύο patch panel κεραίες των 21-dbi. Η πρώτη κεραία, κάθετης πόλωσης έχει κατεύθυνση τον κόμβο Lygerakis και η δεύτερη κεραία, οριζόντιας πόλωσης στοχεύει τον κόμβο Tsakalidis. Στον συγκεκριμένο κόμβο δεν υπάρχει airlive και η πρόσβαση μας στον κόμβο γίνεται μέσω σταθερού δικτύου καθώς μας δόθηκε μια IP από το Πανεπιστήμιο Κρήτης. Ο κόμβος Tsakalidis αποτελείται από τρεις patch panel κεραίες

των 19-dbi και δύο patch panel κεραιές των 21-dbi Η πρώτη κεραιά των 19-dbi έχει οριζόντια πόλωση και στοχεύει τον κόμβο Lygerakis, η δεύτερη κεραιά με τα ίδια χαρακτηριστικά έχει κατεύθυνση τον κόμβο Uoc και η τρίτη με τα ίδια και αυτή χαρακτηριστικά στοχεύει το κόμβο του Φυσικού για την απομακρυσμένη πρόσβαση μας στον συγκεκριμένο κόμβο Η τελευταία κεραιά των 21-dbi με κάθετη πόλωση στοχεύει τον κόμβο Ekab. Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται ο κόμβος του Tsakalidis μαζί με τις κεραιές.



**Σχήμα 8: Κόμβος  
Tsakalidis**

Το backbone δίκτυο, εκτός από τους τέσσερις κόμβους, στηρίζεται σε άλλους πέντε ήδη προϋπάρχον κόμβους- εξυπηρέτες (node-clients) μαζί με ένα κόμβο στο κτίριο του ΙΤΕ και ένα στο Πανεπιστήμιο του Φυσικού. Στο κτίριο του Ι.Τ.Ε. έχει τοποθετηθεί ένα airlive σε κατάσταση λειτουργίας-γέφυρα (bridge mode) και μια κατευθυντική patch panel κεραία των 21-dbi με κάθετη πόλωση η οποία έχει κατεύθυνση τον κόμβο Ekab για την ασύρματη πρόσβαση μας στον τελευταίο. Το Ethernet καλώδιο του airlive καταλήγει στο VLAN 139.91.61.xx του ΙΤΕ. Στο κτίριο του Πανεπιστημίου του Φυσικού έχει τοποθετηθεί ένα Access Point Cisco 1240 με μια patch panel κεραία 21-dbi σε οριζόντια πόλωση. Η σύνδεση αυτού του κόμβου με το ΙΤΕ γίνεται μέσω οπτικής ίνας. Οι πέντε εξυπηρέτες που απαρτίζουν το backbone δίκτυο είναι οι εξής: vsiris, stefrap, angelak, tragan, spanakis. Περιλαμβάνουν ένα airlive σε bridge mode και από μια patch panel κεραία των 19-dbi εκτός του κόμβου vsiris που συνδέεται με μια patch panel κεραία των 21-dbi. Όλοι αυτοί οι κόμβοι έχουν κατεύθυνση τον κόμβο του Φυσικού χρησιμοποιώντας το πρότυπο 802.11a. Στην παρακάτω εικόνα διαφαίνεται συνολικά το μητροπολιτικό δίκτυο του Ηρακλείου μαζί με το backbone δίκτυο.



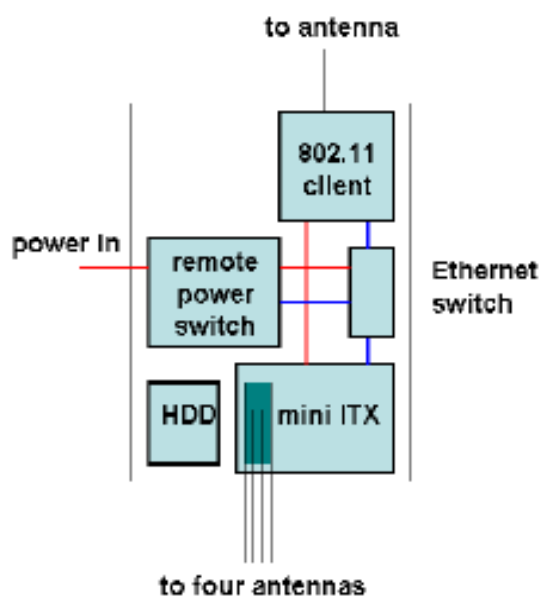
Σχήμα 9: Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου



### 3.2 Υλικό και λογισμικό κόμβων

Ο κάθε κόμβος πολλαπλών διεπαφών είναι ένας μικρός υπολογιστής ο οποίος περιλαμβάνει μια mini-ITX μητρική (EPIA SP 13000) με επεξεργαστή στα 1.3GHz, μνήμη 512 MB στα 200MHz (DDR400) και σκληρό δίσκο 40 GB 2.5" HDD. Μία κάρτα slot mini PCI to PCI adapter MikroTik RouterBOARD 14 διαθέτει τέσσερις διεπαφές High Power Super A/G dual Band 802.11a/b/g NL-5354 MP PLUS Aries 2, βασισμένες στη τεχνολογία Atheros. Οι διεπαφές αυτές συνδέονται μέσω pigetails με εξωτερικές κεραιές.

Το ITX τρέχει Gentoo 2006 i686 Linux (2.6.18 kernel) [ 17] με MadWiFi driver version 0.9.2. [18]. Τέλος στους κόμβους τρέχει OLSR daemon version το οποίο υλοποιεί το Optimized Link State Routing (OLSR) protocol [19].



Σχήμα 10: Στοιχεία κόμβων



Σχήμα 11: Πραγματικός κόμβος

Για τον απομακρυσμένο έλεγχο των κόμβων και τυχόν επανεκκίνηση (reboot) αυτών σε περίπτωση προβλήματος, ενσωματώσαμε την συσκευή IBOOT (Web Enabled Power Switch). Η συσκευή αυτή διαθέτει ιστοσελίδα διεπαφής (web interface) μέσω της οποίας μπορούμε να κάνουμε επανέναρξη στον κάθε κόμβο μεμονωμένα κόβοντας στιγμιαία το ρεύμα. Το IBOOT συνδέεται με καλώδιο Ethernet με ένα switch που υπάρχει σε κάθε κόμβο, ενώ διαθέτει και δική του IP διεύθυνση. Σκοπός αυτής της έξυπνης συσκευής είναι να κάνει ring ανά τακτά χρονικά διαστήματα (χρόνο που ορίζουμε εμείς μέσω του web interface) σε ένα σταθερό δρομολογητή και όταν διαπιστώσει συνεχόμενα σφάλματα στην επικοινωνία να κόβει στιγμιαία το ρεύμα ώστε ο κόμβος να κάνει επανεκκίνηση.

Για το backbone δίκτυο χρησιμοποιούμε Airlive Access Point IEEE 802.11a/g. Οι συσκευές αυτές έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε κατάσταση λειτουργίας σημείου πρόσβασης (AP mode), πελάτη (client mode) ή γέφυρας (bridge mode). Στο backbone δίκτυο έχουμε χρησιμοποιήσει και τα τρία είδη λειτουργίας και στόχος αυτού είναι να μας παρέχει ένα αξιόπιστο δίκτυο πρόσβασης στους τέσσερις κόμβους του μητροπολιτικού δικτύου

### 3.3 Οδηγός ασύρματης διεπαφής Madwifi

Ο MadWifi [17] είναι η συντόμευση του “Multiband Atheros Driver for Wireless Fidelity”. Είναι ένας οδηγός (driver) χρήσης του πυρήνα του λειτουργικού συστήματος Linux, για συσκευές (διεπαφές) ασυρμάτων δικτύων βασισμένες στην Atheros. Ο οδηγός λειτουργεί έτσι ώστε η WLAN κάρτα να εμφανίζεται σαν μια απλή διεπαφή δικτύου, στο σύστημα (κόμβος, υπολογιστής). Επιπλέον, παρέχεται η υποστήριξη των ασύρματων επεκτάσεων (Wireless Extensions). Αυτό επιτρέπει στην ασύρματη κάρτα να διαμορφώνεται σε όλες τις δυνατές πτυχές της χρησιμοποιώντας τα ασύρματα εργαλεία (wireless tools, όπως ifconfig, iwconfig, iwlist, wlanconfig κ.τ.λ.). Ουσιαστικά υλοποιεί και εφαρμόζει τις προδιαγραφές των πρωτοκόλλων 802.11 με πληθώρα δυνατοτήτων στις ασύρματες συσκευές Atheros. Κάποιες χρήσιμες παράμετροι του Madawifi είναι:

- outdoor (0=ανενεργό, 1=ενεργό). *Ενεργοποίηση/Απενεργοποίηση της εξωτερικής χρήσης.* Ορίζει εάν η κάρτα θα είναι για εξωτερική χρήση ενεργοποιώντας τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα κανάλια για τη χρήση αυτή.
- xchanmode (0=ανενεργό, 1=ενεργό) - *Ενεργοποίηση/Απενεργοποίηση του τρόπου λειτουργίας εκτεταμένων καναλιών.* Ορίζει αν θα πρέπει να ενεργοποιηθούν τα εκτεταμένα κανάλια.
- countrycode (ακέραιος αριθμός). Ορίζει το Country Code που θα χρησιμοποιείται, ώστε να “ανοίξουν” τα αντιστοίχως επιτρεπόμενα κανάλια για τον κωδικό χώρας. Με countrycode=196 “ανοίγουν” τα νόμιμα κανάλια στην Ελλάδα για εξωτερική και εσωτερική χρήση.

Οι κάρτες με το chipset atheros διαθέτουν 2 εξόδους για να συνδέσουμε κεραία. Θεωρητικά δεν έχει σημασία ποια θα επιλέξουμε γιατί ο driver αναγνωρίζει από τα errors ποια κεραία πρέπει να χρησιμοποιηθεί και την επιλέγει αυτόματα. Παρόλα αυτά για να είμαστε σίγουροι ότι η κεραία μας είναι η σωστή χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω εντολές.

- `sysctl -w dev.ath0.diversity=0` :απενεργοποιεί την λειτουργία diversity στη λήψη
- `sysctl -w dev.ath0.rxantenna=1` :επιλέγει την main κεραία για την λήψη (αυτή που είναι κοντά στη γωνία της κάρτας)
- `sysctl -w dev.ath0.txantenna=1` :επιλέγει την main κεραία για την εκπομπή

Επίσης κάποιες άλλες χρήσιμες εντολές που χρησιμοποιήσαμε είναι:

- `athctrl (athctrl -i <athX> -d <distance>)`. Με την εντολή αυτή ορίζουμε την απόσταση της ζεύξης, έτσι ώστε ο driver να ρυθμίζει τα ack/cts timeouts.
- `iwpriv ath0 mode X`. Αλλάζουμε τη λειτουργία σε 802.11a, 802.11b ή 802.11g
- `wlanconfig ath0 create wlandev wifi0 wlanmode ap`. Ρυθμίζει τη διεπαφή σε λειτουργία σημείου πρόσβασης (ap mode)
- `wlanconfig ath0 create wlandev wifi0 wlanmode adhoc`. Ρυθμίζει τη διεπαφή σε λειτουργία τυχαίου δικτύου. (adhoc mode)
- `iwlist ath0 chan`. Μας δείχνει τα διαθέσιμα κανάλια και το κανάλι που είναι συνδεδεμένη η συγκεκριμένη διεπαφή. Τα κανάλια που διαθέτουμε για τις ανάγκες του δικού μας ασύρματου είναι τα παρακάτω. Παρατηρούμε ότι τα κανάλια για το 802.11a όπου και χρησιμοποιούμε είναι 19 με συχνότητες από 5.18GHz μέχρι 5.7GHz με διάστημα 20MHz

```
$ iwlist ath0 chan
Channel 01 : 2.412 GHz
Channel 02 : 2.417 GHz
Channel 03 : 2.422 GHz
Channel 04 : 2.427 GHz
Channel 05 : 2.432 GHz
Channel 06 : 2.437 GHz
Channel 07 : 2.442 GHz
Channel 08 : 2.447 GHz
Channel 09 : 2.452 GHz
Channel 10 : 2.457 GHz
Channel 11 : 2.462 GHz
Channel 12 : 2.467 GHz
Channel 13 : 2.472 GHz
Channel 36 : 5.18 GHz
Channel 40 : 5.2 GHz
Channel 44 : 5.22 GHz
Channel 48 : 5.24 GHz
Channel 52 : 5.26 GHz
Channel 56 : 5.28 GHz
Channel 60 : 5.3 GHz
Channel 64 : 5.32 GHz
Channel 100 : 5.5 GHz
Channel 104 : 5.52 GHz
Channel 108 : 5.54 GHz
Channel 112 : 5.56 GHz
Channel 116 : 5.58 GHz
Channel 120 : 5.6 GHz
Channel 124 : 5.62 GHz
Channel 128 : 5.64 GHz
Channel 132 : 5.66 GHz
Channel 136 : 5.68 GHz
Channel 140 : 5.7 GHz
Current Frequency:5.18GHz (channel 36)
```

Ο οδηγός ασύρματης διεπαφής madwifi αποτελείται από πολλά διαφορετικά τμήματα κώδικα που είναι όλα γραμμένα στην γλώσσα προγραμματισμού C. Μερικά από αυτά είναι ανοικτού κώδικα (open source), δηλαδή μπορεί ένας χρήστης να επέμβει αλλάζοντας τμήματα του κώδικα και άλλα είναι διαδικής μορφής, απομονωμένα επομένως από τους χρήστες. Είναι ένας από τους πιο προηγμένους και διαδεδομένους οδηγούς για WLAN συσκευές, που είναι διαθέσιμοι για συστήματα LINUX.

### 3.4 Εμπειρίες

Η ανάπτυξη του πειραματικού ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου, μας απειόμισε αρκετές εμπειρίες. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι ότι η κεραία είναι το σημαντικότερο στοιχείο για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς ραδιοσύνδεσης. Λόγω των μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιήθηκαν κατευθυντικές κεραίες με μικρό άνοιγμα στο οριζόντο επίπεδο και με αποτέλεσμα να υπάρχει αρκετή δυσκολία στη στόχευση αυτών. Μια όχι και τόσο καλή στόχευση μείωνε την απόδοση των ζεύξεων ή ακόμα καθιστούσε και μη εφικτή την σύνδεση. Το θετικό βέβαια μ' αυτές τις κεραίες είναι ότι λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας, υπάρχει μικρότερη εκπομπή σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις, μικρότερη εκπεμπόμενη ισχύς για να φτάσουν σε μεγαλύτερη απόσταση και κατά συνέπεια μειωμένο θόρυβο στην περιοχή.

Αξίζει επίσης να τονιστεί, η ευαισθησία των σκληρών δίσκων που παρόλο που υπήρξε ένα ανεμιστηράκι και μία τρύπα σε κάθε κόμβο για την έξοδο του θερμού αέρα δεν αποφεύχθηκαν τα προβλήματα. Υπήρξαν αρκετοί δίσκοι που επανατοποθετήθηκαν έπειτα από τη μη σωστή λειτουργία τους ή ακόμα και την καταστροφή τους λόγω υγρασίας, ζέστης, σκόνης κ.τ.λ. Λιγότερα ευαίσθητα αποδείχθηκαν οι διεπαφές, τα καλώδια (pigtailes) και ο PCI adapter με τον τελευταίο σε σπάνιες περιπτώσεις να φεύγει από την υποδοχή του με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα στις συνδέσεις.

Ένα τελευταίο θέμα που αξίζει να σημειωθεί είναι τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν σχετικά με το λογισμικό και συγκεκριμένα με τον MadWiFi driver. Όσο αφορά την ανάθεση καναλιών υπήρχε μια αρκετά μεγάλη χρονική καθυστέρηση ωσότου κάποια διεπαφή να δεχτεί το κανάλι και να συνδεθεί με κάποια άλλη. Αυτό κατέστησε ακόμα πιο χρονοβόρα την διαδικασία ανάθεσης των καναλιών σύμφωνα με τον αλγόριθμο που αναπτύξαμε. Τέλος υπήρξαν αρκετά προβλήματα με τον συγκεκριμένο οδηγό ασύρματης διεπαφής όταν μετατρέπαμε το δίκτυο σε κατάσταση λειτουργίας τυχαίου ασύρματου (mode ad hoc) γι αυτό και προτιμήθηκε η κατάσταση λειτουργίας δομημένου δικτύου (mode infrastructure).

## ***Κεφάλαιο 4 Μέθοδοι Αναπαράστασης***

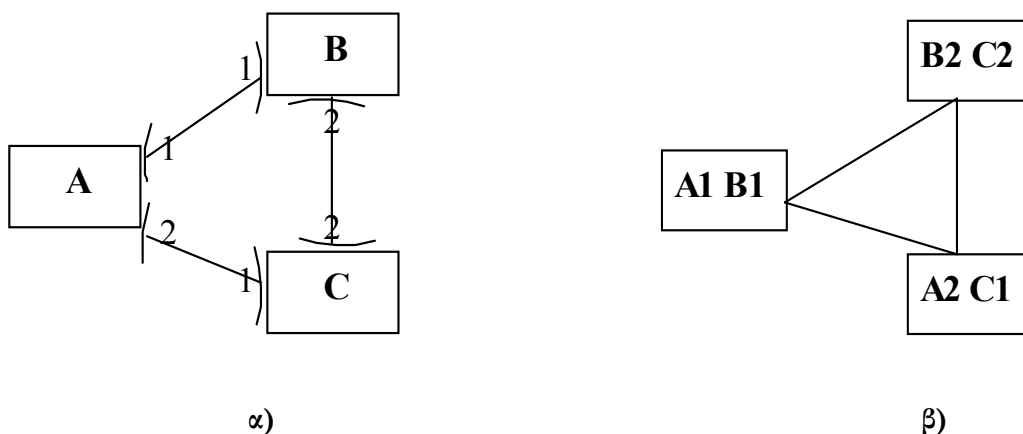
### ***Παρεμβολών***

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται δύο μέθοδοι αναπαράστασης της παρεμβολής μεταξύ των ζεύξεων ενός δικτύου. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην δημιουργία ενός γράφου, που ονομάζεται “multi-point link conflict graph”, όπου οι κορυφές του αναπαριστούν τις ζεύξεις του δικτύου και οι ακμές συνδέουν τις ζεύξεις που εμφανίζουν μεταξύ τους παρεμβολές. Ο γράφος αυτός προϋποθέτει προκαθορισμένη τοπολογία του αρχικού δικτύου όσον αφορά τις συνδέσεις μεταξύ διεπαφών. Η δεύτερη μέθοδος, δε χρησιμοποιεί κάποιο γράφο αναπαράστασης της παρεμβολής αλλά στηρίζεται στην δημιουργία κίνησης στις ζεύξεις όπου έχει ολοκληρωθεί η ανάθεση κάποιου καναλιού. Μ’ αυτό τον τρόπο, λοιπόν, λαμβάνεται υπόψη η παρεμβολή που δημιουργούν οι ζεύξεις αυτές σε σχέση με τις υπόλοιπες του εσωτερικού δικτύου.

#### **4.1 Μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών χρησιμοποιώντας το “multi-point link conflict graph”**

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα μοντέλο αναπαράστασης της παρεμβολής μεταξύ των ζεύξεων ενός δικτύου χρησιμοποιώντας ένα γράφο ο οποίος ονομάζεται “multi-point link conflict graph”. Ο γράφος αυτός προϋποθέτει προκαθορισμένη τοπολογία του αρχικού δικτύου όσον αφορά τις συνδέσεις μεταξύ διεπαφών. Αποτελείται από κορυφές όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε μία ή περισσότερες ζεύξεις της αρχικής τοπολογίας. Η κάθε κορυφή δηλαδή του γράφου αντιστοιχεί σε μία ζεύξη δύο συνδεδεμένων κόμβων της αρχικής τοπολογίας, όταν χρησιμοποιούνται ζεύξεις σημείο-προς σημείο ή από περισσότερες όταν χρησιμοποιούνται ζεύξεις σημείου προς πολλαπλών σημείων. Οι κορυφές του γράφου αυτού συνδέονται μεταξύ τους με ακμές όταν οι ζεύξεις που αντιστοιχούν στις κορυφές αυτές παρεμβάλλονται. Μια περίπτωση εμφάνισης παρεμβολών συμβαίνει όταν οι κορυφές περιέχουν διεπαφές ίδιων κόμβων του αρχικού δικτύου. Οι συνδεδεμένες κορυφές του γράφου αυτού, όπου υποδηλώνουν και τις παρεμβαλλόμενες ζεύξεις δεν μπορούν να πάρουν ίδια ή γειτονικά κανάλια μεταξύ τους, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

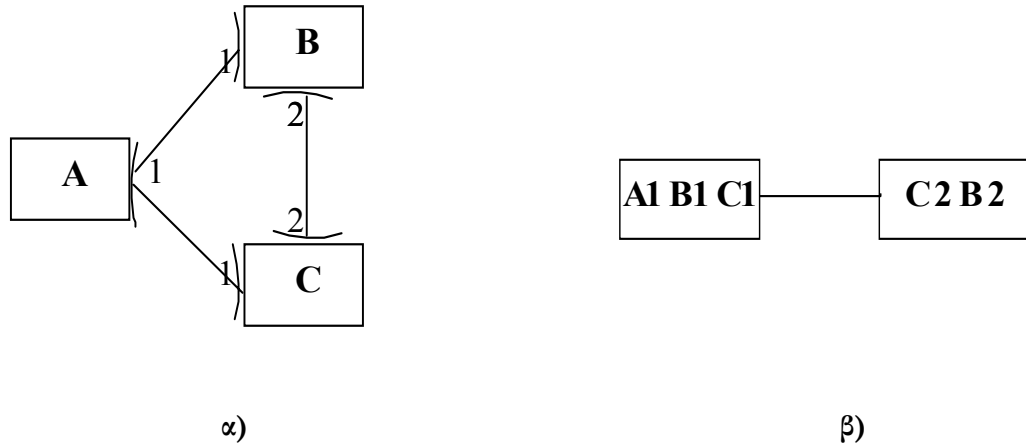
Ένα παράδειγμα αναπαράστασης ενός απλού δικτύου με τρεις κόμβους και σημείο προς σημείο ζεύξεις όπως και ο αντίστοιχος γράφος καταγραφής της παρεμβολής αναπαριστάται στο επόμενο σχήμα. Στο σχήμα 12α φαίνεται η διασύνδεση των κόμβων με τον καθένα από αυτούς να έχει δύο διεπαφές και με ζεύξεις σημείο-προς-σημείο. Σε ένα πραγματικό δίκτυο αυτής της τοπολογίας αν οι δύο κεραιές του ίδιου κόμβου βρίσκονται σε κοντινά σημεία (π.χ στον ίδιο ιστό) τότε πιθανόν να υπάρχει παρεμβολή μεταξύ τους αν ορίζουμε ίδια ή γειτονικά κανάλια. Οι κορυφές στο γράφο του σχήματος 12β αντιστοιχούν στις ζεύξεις του σχήματος 12α. Οι κορυφές του γράφου αναπαριστούν τις ζεύξεις του δικτύου και οι ακμές συνδέουν τις ζεύξεις που εμφανίζουν μεταξύ τους παρεμβολές. Μ' αυτόν τον τρόπο γνωρίζουμε τις παρεμβαλλόμενες ζεύξεις. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο γράφος αποτελείται από τρεις κορυφές με την καθεμιά να αντιστοιχεί σε μία από τις τρεις σημείο-προς-σημείο συνδέσεις της αρχικής τοπολογίας. Όλες οι κορυφές συνδέονται μεταξύ τους με ακμές επειδή περιέχουν διεπαφές ίδιων κόμβων του αρχικού δικτύου.



Σχήμα 12: (α) Τοπολογία κόμβων με σημείο-προς-σημείο ζεύξεις (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών

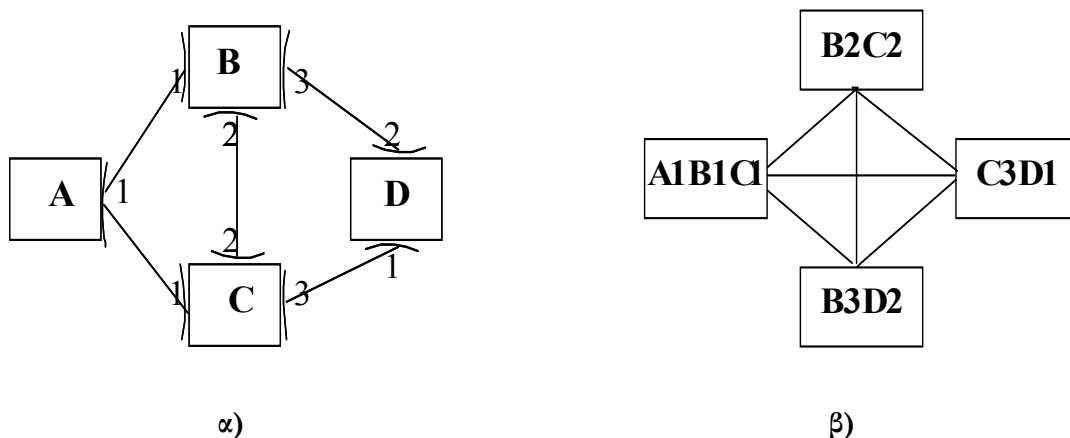
Στην περίπτωση που έχουμε σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις ο γράφος αυτός διαφοροποιείται. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 13. Ο κόμβος A στην περίπτωση αυτή συνδέεται με τους κόμβους B, C, μέσω μιας διεπαφής ενώ ο B με τον C είναι μία σύνδεση σημείου προς σημείο. Ο αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης των παρεμβολών περιλαμβάνει δύο κορυφές: η πρώτη αντιστοιχεί στις ζεύξεις AB και AC και η άλλη αντιστοιχεί στην ζεύξη BC. Αυτές οι δύο κορυφές συνδέονται μεταξύ τους με

μια ακμή επειδή οι ζεύξεις που αντιστοιχούν στις δύο διεπαφές περιλαμβάνουν διεπαφές που ανήκουν στον ίδιο κόμβο.



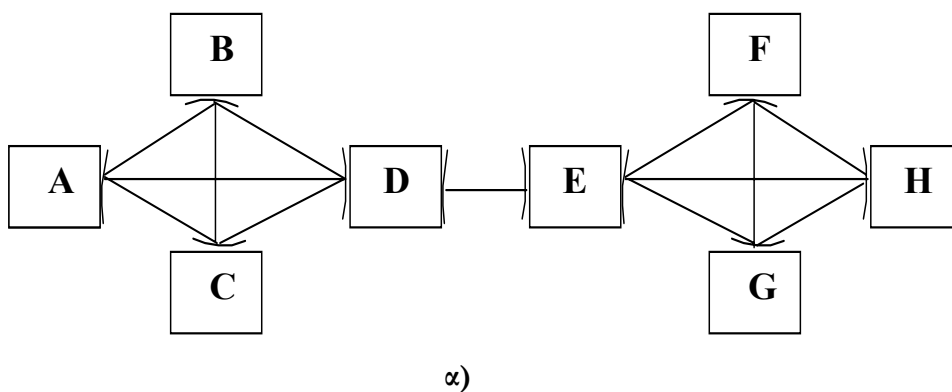
Σχήμα 13: (α) Τοπολογία κόμβων με σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών

Στην περίπτωση που έχουμε ένα δίκτυο όπου υπάρχουν και τα δύο είδη ζεύξεων τα οποία αναφέραμε παραπάνω, ο multi-point link conflict graph γίνεται λίγο πιο πολύπλοκος. Το σχήμα (14α) που ακολουθεί παρουσιάζει ένα τέτοιο παράδειγμα όπου ο κόμβος A περιέχει μία μόνο ραδιοεπαφή η οποία συνδέεται ταυτόχρονα με τον B και C. Οι υπόλοιπες ζεύξεις BC, BD και CD είναι σημείο-προς-σημείο. Ο γράφος αναπαράστασης των παρεμβολών (σχήμα 14β) αποτελείται από τέσσερις κορυφές. Η πρώτη περιέχει την σημείο (κόμβος A) προς πολλαπλά σημεία (B, C) ζεύξη και οι υπόλοιπες τις σημείο-προς-σημείο BC, BD και CD ζεύξεις. Η κορυφή A1B1C1 του γράφου αυτού συνδέεται με την B2C2, C3D1 και B3D2 λόγω της μεταξύ τους παρεμβολής αφού και οι τρεις τελευταίες περιέχουν διεπαφές κόμβων που συμπεριλαμβάνονται στους κόμβους των διεπαφών της πρώτης κορυφής. Για τον ίδιο λόγο όλες οι κορυφές του γράφου του συγκεκριμένου παραδειγματος ενώνονται μεταξύ τους με ακμές.

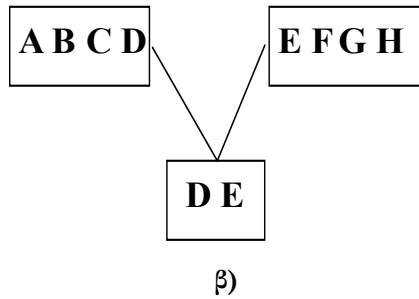


Σχήμα 14: (α) Τοπολογία με σημείο-προς-σημείο και σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών

Τέλος, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μιας λίγο πιο πολύπλοκης τοπολογίας όπως διαφαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η τοπολογία αυτή (σχήμα 15α) αποτελείται από δύο νησίδες δικτύων ABCD και EFGH συνδεόμενες με μια σημείο-προς-σημείο ζεύξη DE. Όλοι κόμβοι έχουν από μια πολυκατευθυντική κεραιά ενώ οι κόμβοι D και E περιέχουν και μια κατευθυντική κεραιά για την μεταξύ τους σημείο-προς-σημείο σύνδεση. Ο γράφος αναπαράστασης των παρεμβολών (σχήμα 14β) αποτελείται από τρεις κορυφές. Οι δύο απ' αυτές αντιστοιχούν στις ζεύξεις των νησίδων ενώ η τρίτη κορυφή αντιστοιχεί στην σημείο-προς-σημείο DE ζεύξη. Παρατηρούμε ότι η κορυφή ABCD δεν συνδέεται με την κορυφή EFGH αφού θεωρούμε ότι η απόσταση των νησίδων ABCD και EFGH είναι μεγάλη οπότε και δεν παρεμβάλλονται. Άλλωστε οι δύο αυτές κορυφές δεν περιέχουν διεπαφές ίδιων κόμβων του αρχικού δικτύου





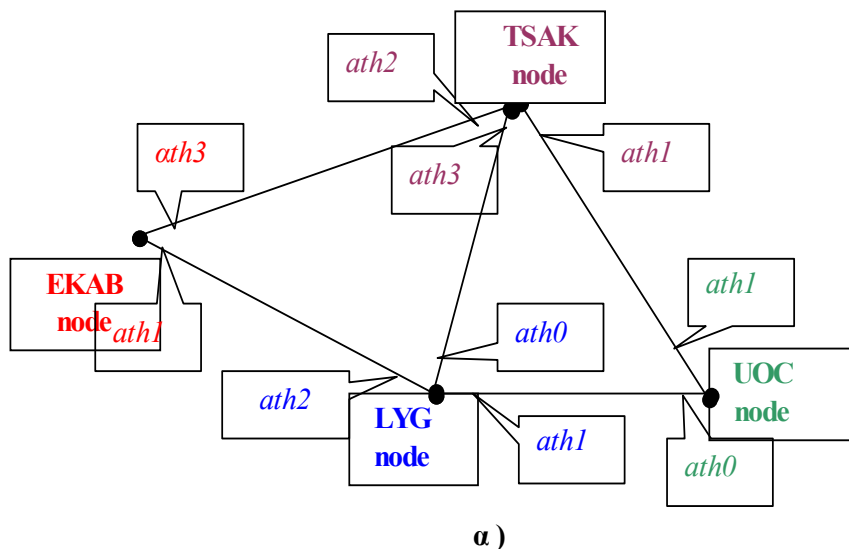


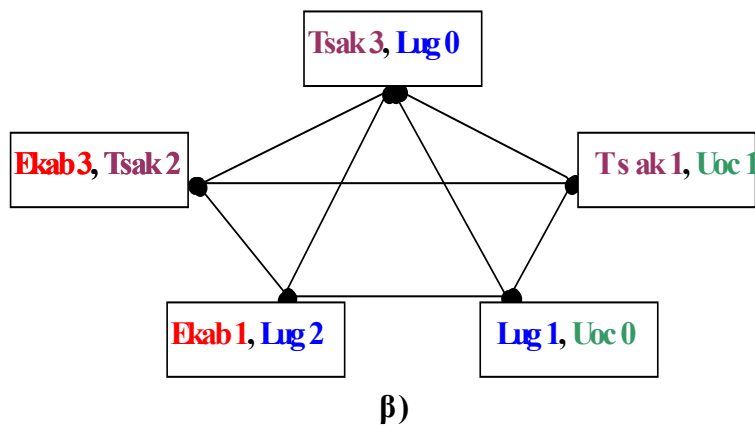
Σχήμα 15: (α) Τοπολογία με δύο νησίδες δικτύων και μια σημείο-προς-σημείο ζεύξη (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών

Έτσι λοιπόν παρατηρούμε ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα είτε με σημείο-προς-σημείο ζεύξεις είτε με σημείο προς πολλαπλά σημεία ζεύξεις χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νησίδες δικτύων όπου όλοι οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας πολυκατευθυντικές κεραίες.

## 4.2 Ορισμός του “multi-point link conflict graph” στο ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο Ηρακλείου

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπαράστασης της παρεμβολής εφαρμόστηκε στο πειραματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο Ηρακλείου. Το ασύρματο αυτό δίκτυο περιέχει κατευθυντικές κεραίες με σημείο-προς-σημείο ζεύξεις οπότε και το μοντέλο που αναπτύξαμε αποκτά τη πιο απλή μορφή του. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη τοπολογία του δικτύου αυτού όπως και τον αντίστοιχο γράφο αναπαράστασης των παρεμβολών.





Σχήμα 16: (α) Τοπολογία πραγματικού δικτύου (β) Αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης παρεμβολών

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο multi-point link conflict graph αποτελείται από πέντε κορυφές όσες και οι σημείο-προς-σημείο ζεύξεις του αρχικού μας δικτύου. Η κορυφή  $Ekab3 - Tsak2$ , για παράδειγμα συνδέεται με τις κορυφές του γράφου που περιέχουν είτε  $EkabX$  είτε  $TsakX$ . Μ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούμε τις ακμές του γράφου αυτού, υποδηλώνοντας τις παρεμβαλλόμενες ζεύξεις.

### 4.3 Μέθοδος αναπαράστασης παρεμβολών βασισμένη στη γέννηση κίνησης

Το μοντέλο αναπαράστασης των παρεμβολών χρησιμοποιώντας τον multi-point link conflict graph συγκρίνεται με μία άλλη μέθοδο προσέγγισης των παρεμβολών που στηρίζεται στη δημιουργία κίνησης στο δίκτυο. Σε κάθε ζεύξη του αρχικού δικτύου, μετά την ολοκλήρωση της ανάθεσης κάποιου καναλιού, γεννάται κίνηση με τη βοήθεια του εργαλείου iperf [19]. Για την γέννηση της κίνησης χρησιμοποιείται iperf και όχι ring γιατί όπως αποδείχτηκε έπειτα από πειράματα το δεύτερο εργαλείο δεν δημιουργεί επαρκή κίνηση ώστε να ληφθεί υπόψιν η παρεμβολή. Με την δημιουργία λοιπόν κίνησης σε κάθε ζεύξη σταδιακά, λαμβάνεται υπόψιν η παρεμβολή που δημιουργεί η συγκεκριμένη ζεύξη σε σχέση με τις υπόλοιπες του εσωτερικού δικτύου. Μόλις λοιπόν σε μία ζεύξη οριστεί κάποιο κανάλι, γεννάμε κίνηση σ' αυτήν και προχωράμε στην επόμενη. Αν αυτές οι δύο ζεύξεις παρεμβάλλονται, το κανάλι που έχει οριστεί στην πρώτη ζεύξη καθώς και τα γειτονικά του θα έχουν άμεση επίπτωση-μείωση των τιμών των

μετρικών της δεύτερης, στην οποία πρόκειται να γίνει ανάθεση καναλιού. Η αναμενόμενη λοιπόν αυτή μείωση των τιμών των μετρικών αποτρέπει να οριστούν κανάλια που παρεμβάλλουν. Γενικότερα η μέθοδος αυτή που βασίζεται στην δημιουργία κίνησης ποσοτικοποιεί το βαθμό της παρεμβολής και δεν αποκλείονται εξ αρχής όλα τα πιθανά κανάλια που προκαλούν έστω και λίγο παρεμβολή όπως γίνεται στην περίπτωση του μοντέλου βάσει του γράφου.

#### **4.4 Αξιολόγηση των δύο μεθόδων προσέγγισης των παρεμβολών**

Η μέθοδος που στηρίζεται στη δημιουργία κίνησης διαδοχικά σε κάθε ζεύξη του δικτύου δεν είναι μια απλή διαδικασία. Υπάρχει ένας ιδιαίτερος φόρτος στις CPU των πελατών καθώς δημιουργούνται συνεχώς πακέτα, χρησιμοποιώντας το εργαλείο iperf. Το θετικό βέβαια της μεθόδου αυτής είναι ότι αποκλείονται τα κανάλια που δημιουργούν πραγματικά παρεμβολή και όχι αυτά που δεν επηρεάζουν και τόσο. Υπάρχει δηλαδή μια ποσοτικοποίηση του βαθμού της παρεμβολής εσωτερικά του δικτύου και αυτό έχει άμεση επίπτωση-μείωση στις τιμές των μετρικών. Αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο αρκετά ακριβή σε σχέση με το μοντέλο του γράφου, όπου εξ αρχής αποκλείονται όλα τα ίδια ή και τα γειτονικά κανάλια όλων των συνδεδεμένων κορυφών. Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται αν υπάρχει ή όχι παρεμβολή (αν υπάρχει είναι: 1 - αν δεν υπάρχει είναι: 0). Αν υπάρχει λοιπόν έστω και λίγο παρεμβολή (τιμή: 1) τότε αποκλείονται τα κανάλια που την προκαλούν. Η μέθοδος της γέννησης κίνησης ελέγχει βέβαια όλα τα διαθέσιμα κανάλια κάθε φορά σε κάθε ζεύξη του δικτύου ώστε να επιλεγεί το καλύτερο, γεγονός που καθιστά την διαδικασία ανάθεσης καναλιών αρκετά χρονοβόρα. Αντίθετα η ανάθεση καναλιών χρησιμοποιώντας το μοντέλο με τον multi-point link conflict graph είναι αρκετά πιο γρήγορη αφού δεν ελέγχονται όλα τα κανάλια κάθε φορά. Στην περίπτωση αυτή όμως υπάρχει το πρόβλημα της διαθεσιμότητας καναλιών αφού σε κάθε κορυφή ελέγχονται κάθε φορά τα κανάλια που δεν έχουν αποκλειστεί πράγμα που δε συμβαίνει στην περίπτωση της μεθόδου με τη δημιουργία κίνησης.

## *Κεφάλαιο 5 Αλγόριθμος Ανάθεσης Καναλιών*

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιού σε κάθε ζεύξη. Αναφέρονται οι διαφορετικές σειρές επιλογής των ζεύξεων όπου γίνεται η ανάθεση των καναλιών όταν αναφερόμαστε στη μέθοδο δημιουργίας κίνησης ή των κορυφών όταν αναφερόμαστε στον multi-point link conflict graph. Επίσης παρουσιάζονται οι μετρικές που χρησιμοποιούνται για την επιλογή του καλύτερου καναλιού.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο χρησιμοποιώντας τον multi-point link conflict graph η διαδικασία ανάθεσης καναλιών έχει ως εξής: Καταρχάς επιλέγεται η σειρά των κορυφών του γράφου και η μετρική που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάθεση του καλύτερου καναλιού. Έπειτα ρίχνονται (down) όλες οι διεπαφές που αντιστοιχούν στις κορυφές του γράφου και σηκώνονται (up) κάθε φορά οι διεπαφές της κορυφής που γίνεται η ανάθεση χωρίς να ξαναρίχνονται όταν γίνει η επιλογή του καναλιού. Όταν γίνεται ανάθεση σε κάποια κορυφή του γράφου δε λαμβάνονται υπόψη τα ίδια και τα γειτονικά κανάλια των συνδεδεμένων σ' αυτόν κορυφών. Το καλύτερο κανάλι επιλέγεται βάσει της μετρικής που έχει οριστεί.

Ο αλγόριθμος που βασίζεται στη δημιουργία κίνησης ακολουθεί την εξής διαδικασία: Εξαρχής επιλέγεται και πάλι η σειρά των ζεύξεων του δικτύου και μια μετρική. Όλες οι διεπαφές είναι σε λειτουργία (up) και καθώς ολοκληρώνεται η ανάθεση καναλιού σε μία ζεύξη ξεκινά η κίνηση σ αυτήν. Ο αλγόριθμος αυτός επιλογής καναλιού λαμβάνει υπόψη όλα τα κανάλια που έχουμε στη διάθεση μας (19 στο σύνολο) για κάθε ζεύξη. Το καλύτερο κανάλι επιλέγεται βάσει της μετρικής που έχει οριστεί.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το μοντέλο του multi-point link conflict graph ή τη μέθοδο δημιουργίας κίνησης λαμβάνουμε υπόψη την παρεμβολή μεταξύ των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου που μελετάμε. Όσον αφορά το γράφο, όταν γίνεται ανάθεση σε κάποια κορυφή του γράφου δε λαμβάνονται υπόψη τα ίδια και τα γειτονικά κανάλια των συνδεδεμένων σ' αυτόν κορυφών. Έτσι λοιπόν αποφεύγεται η παρεμβολή που προοικαλούν τα ίδια ή και τα γειτονικά κανάλια των συνδέσμων εσωτερικά του δικτύου. Όσον αφορά τη μέθοδο γέννησης κίνησης, ποσοτικοποιείται ο βαθμός παρεμβολής των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου και έτσι αποκλείονται τα κανάλια που δημιουργούν πραγματικά παρεμβολή.

## 5.1 Σειρά επιλογής των κορυφών του γράφου ή των ζεύξεων του δικτύου

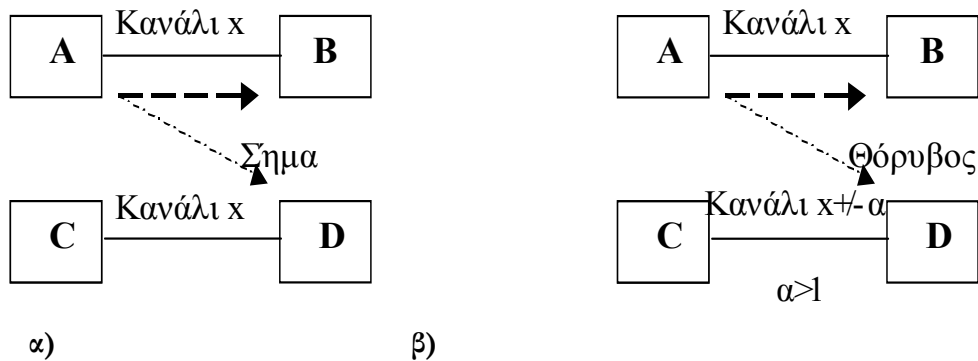
Ένα θέμα που εξετάστηκε σε σχέση με το πρόβλημα της ανάθεσης καναλιών είναι οι διαφορετικές σειρές επιλογής των ζεύξεων όταν αναφερόμαστε στη μέθοδο δημιουργίας κίνησης ή των κορυφών όταν αναφερόμαστε στον multi-point link conflict graph, στις οποίες γίνεται αυτή η ανάθεση. Η πρώτη επιλογή σειράς είναι η “σταθερή” (fixed) και βασίζεται στην απόσταση των κόμβων του δικτύου από τις θύρες των σταθερών δικτύων (fixed networks gateways). Οι κόμβοι που είναι κοντινότερα στις θύρες (gateways) αυτές προηγούνται σε σχέση με τους άλλους. Στο συγκεκριμένο δίκτυο όπου πειραματιζόμαστε, έχουμε δύο θύρες (gateways) προς σταθερά δίκτυα, το Ekab και το Uoc. Έτσι η σειρά που πήραμε τις ζεύξεις, βάσει αυτής της λογικής είναι η εξής. 1) Ekab3 - Tsak2, 2) Ekab1 – Lug2, 3) Uoc1 – Tsak1, 4) Uoc2 – Lug1, 5) Tsak3 – Lug0. Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος προτεραιότητας των ζεύξεων όπου και πειραματιστήκαμε είναι αυτή όπου οι συνδέσεις με το μικρότερο SNR προηγούνται στη σειρά σε σχέση με τις άλλες. Τέλος εφαρμόστηκε και η τυχαία σειρά επιλογής των ζεύξεων χωρίς κάποιες προϋποθέσεις.

## 5.2 Μετρικές

Η ανάθεση του καλύτερου καναλιού, από τα διαθέσιμα που υπάρχουν, σε κάθε ζεύξη, βασίστηκε σε κάποιες μετρικές που επιλέχθηκαν. Η πρώτη μετρική που χρησιμοποιήθηκε είναι το “one-way-SNR”, δηλαδή ο λόγος σήματος προς θόρυβο που μετριέται από τη μία διεπαφή εκ των δύο που ανήκουν σε μία απλή ζεύξη στη περίπτωση που έχουμε ζεύξεις σημείο-προς-σημείο. Όταν υπάρχουν ζεύξεις σημείου προς πολλαπλά σημεία το “one-way-SNR” καταγράφει το μέσο όρο του λόγου σήματος προς θόρυβο των πολλαπλών σημείων. Ο θόρυβος είναι κάθε ανεπιθύμητη ηλεκτρική ή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που παρεμβάλλεται στο σήμα που διαδίδεται σε ένα μέσο, με αποτέλεσμα να αλλοιώνει την ποιότητά του και να προκαλεί την παραμόρφωσή του. Το SNR υπολογίζεται από το λόγο της ισχύος του σήματος  $S$  προς το άθροισμα της ισχύος του θορύβου  $N$  με την παρεμβολή  $I$  και εκφράζεται σε dB. Αν δύο κανάλια είναι εν μέρει επικαλυπτόμενα είναι γνωστό ότι υπάρχει εξασθένηση του σήματος, η οποία σχετίζεται άμεσα με τη μείωση του λόγου σήματος προς θόρυβο που λαμβάνουμε και μ’ αυτόν τον τρόπο συνυπολογίζονται οι παρεμβολές από τα εξωτερικά δίκτυα. Έτσι λοιπόν σε κάθε ζεύξη συγκρίνονται οι λόγοι σήματος προς θόρυβο ξεχωριστά για όλα τα διαθέσιμα κανάλια και

επιλέγεται αυτό με το μεγαλύτερο λόγο. Η δεύτερη μετρική που χρησιμοποιήθηκε είναι το “two-way-SNR” δηλαδή ο μέσος όρος των λόγων σήματος προς θόρυβο των δύο διεπαφών που ανήκουν σε μία σημείο προς σημείο ζεύξη ή όλων των διεπαφών που ανήκουν σε μια σημείο προς πολλαπλά σημεία σύνδεση. Η τελευταία μετρική που επιλέχθηκε είναι το “round-trip delay” όπου βασίζεται στο μέσο όρο της καθυστέρηση ενός πακέτου ταξιδεύοντας και προς τις δύο κατευθύνσεις των συνδεόμενων ζεύξεων. Η εκτίμηση αυτής της μετρικής βασίζεται στο εργαλείο ping .

Οι μετρικές “one-way-SNR” και “two-way-SNR” καταδεικνύουν τις παρεμβολές που προκαλούν τα γειτονικά και όχι τα ίδια κανάλια των ζεύξεων εξωτερικά του δικτύου σε σχέση με τα κανάλια των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου. Έστω για παράδειγμα δύο ζεύξεις AB και CD που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι (σχήμα 17). Στην ζεύξη AB υπάρχει μεταφορά πακέτων από το A προς το B. Ο κόμβος D εφόσον είναι στο πεδίο ακτίνας του (range) A θα λάβει και αυτός ένα ποσοστό σήματος από την κίνηση αυτή. Το πακέτο βέβαια θα κοπεί από το MAC επίπεδο του αφού ο D δε είναι ο προορισμός του. Αυτό δεν θα επηρεάσει το SNR στην ασύρματη διεπαφή D. Στην περίπτωση βέβαια που ο A είναι αρκετά μακριά από τον D, ο τελευταίος θα λάβει κάποιο ελάχιστο θόρυβο. Όταν όμως οι δύο ζεύξεις έχουν γειτονικά κανάλια (σχήμα 4), τότε κατά τη μεταφορά πακέτων στη ζεύξη AB, ο κόμβος D θα εκλάβει την μετάδοση του A ως θόρυβο και όχι ως σήμα που μπορεί να αποκωδικοποιηθεί. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε μειωμένο SNR στην διεπαφή του D λόγω της παρεμβολής των γειτονικών καναλιών. Στην περίπτωση βέβαια που ο A στέλνει με μεγάλη ισχύ τότε ο D ίσως λάβει και κάποιο σήμα. Η μετρική round-trip-delay καταγράφει τις παρεμβολές που προκαλούν τα ίδια ή και τα γειτονικά κανάλια των ζεύξεων εξωτερικά του δικτύου σε σχέση με τα κανάλια των ζεύξεων εσωτερικά του δικτύου. Στο παρακάτω παράδειγμα η μετάδοση στη ζεύξη AB θα επηρεάσει την καθυστέρηση στην ζεύξη CD είτε χρησιμοποιούν ίδια είτε γειτονικά κανάλια.



Σχήμα 17: (α) Παράδειγμα όπου το SNR δεν καταδεικνύει την παρεμβολή μεταξύ ίδιων καναλιών  
 (β) Παράδειγμα όπου το SNR καταδεικνύει την παρεμβολή μεταξύ γειτονικών καναλιών

### 5.3 Ψευδοκώδικας αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας το μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών βάσει του γράφου multi-point link conflict graph συνοψίζεται στα εξής βήματα (Πίνακας 3): Στην γραμμή 1 ο αλγόριθμος ξεκινάει τοποθετώντας όλες τις κορυφές του γράφου multi-point link conflict graph σε μία λίστα  $V$ . Στην γραμμή 2 ταξινομούνται οι κορυφές βάσει της σειράς επιλογής που έχει οριστεί (π.χ fixed ordering). Στην γραμμή 3 ρίχνονται (down) όλες οι διεπαφές των ζεύξεων που αντιστοιχούν στις κορυφές του γράφου. Στην γραμμή 5 σηκώνονται οι διεπαφές των ζεύξεων της κορυφής που είναι έτοιμη για ανάθεση καναλιού ενώ στην γραμμή 6 αποκλείονται τα ίδια και τα γειτονικά κανάλια των συνδεδεμένων σ' αυτήν κορυφών. Τέλος στη γραμμή 7 επιλέγεται το καλύτερο κανάλι από τα διαθέσιμα που υπάρχουν, χρησιμοποιώντας τις μετρικές.

1. Let  $Q = \{u \mid u \in \text{multi-point link conflict graph}\}$
2. sort( $Q$ ) according to fixed ordering
3. close all the interfaces of the links of sort( $Q$ ).
4. for each  $V = \text{removehead}(Q)$
5. turn on (up) the interfaces of the links of  $V$
6.  $C = C_{\text{total}} - \{c: c \text{ or } c \pm 1 \text{ assigned to vertex } u \in \text{multi-point link conflict graph and there exists edge between } V \text{ and } u \}$
7. assign  $c \in C$  that gives largest value of metric to link  $V$
8. end for

**Πίνακας 3: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας το μοντέλο αναπαράστασης παρεμβολών βάσει του γράφου του multi-point link conflict graph**

Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με τη δημιουργία κίνησης συνοψίζεται στα εξής βήματα (πίνακας 4): Στην γραμμή 1 ο αλγόριθμος ξεκινάει τοποθετώντας όλες τις ζεύξεις του δικτύου  $V$ . Στην γραμμή 2 ταξινομούνται οι ζεύξεις βάσει της σειράς επιλογής που έχει οριστεί (π.χ fixed ordering). Στη γραμμή 4 ορίζονται όλα τα κανάλια για έλεγχο. Στη γραμμή 5 επιλέγεται το καλύτερο κανάλι χρησιμοποιώντας τις μετρικές. Στην γραμμή 6 μόλις ολοκληρωθεί η ανάθεση καναλιού σε μία ζεύξη δημιουργούμε κίνηση σ' αυτήν.

1. Let  $Q = \{u \mid u \in \text{links of network}\}$
2. sort( $Q$ ) according to fixed ordering
3. for each  $V = \text{removehead}(Q)$
4.  $C = C_{\text{total}}$
5. assign  $c \in C$  that gives largest value of metric to link  $V$
6. create traffic on the link
7. end for
- 8.

**Πίνακας 4: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με τη δημιουργία κίνησης**



## *Κεφάλαιο 6 Πειραματική Αξιολόγηση*

Η εφαρμογή και αξιοποίηση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε βασίστηκε σε πειράματα σε ένα πραγματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο πλέγματος πολλαπλών ραδιοδιεπαφών με κατευθυντικές κεραιές και συνδέσεις σημείου προς σημείο. Καταρχάς συγκρίνεται το μοντέλο αναπαράστασης της παρεμβολής βάσει του γράφου “multi-point link conflict graph” με την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με τη δημιουργία κίνησης. Ο αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών χρησιμοποιώντας τις δύο αυτές μεθόδους αναπαράστασης των παρεμβολών συγκρίνεται με μία απλοϊκή μέθοδο επιλογής καναλιών (worst\_case) η οποία δε λαμβάνει υπόψιν τις παρεμβολές και απλά επιλέγει για κάθε ζεύξη το κανάλι με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Επιπρόσθετα ο προτεινόμενος αλγόριθμος της παρούσας εργασίας συγκρίνεται με ένα άνω φράγμα της βέλτιστης επιλογής καναλιών. Αυτό υπολογίζεται θεωρώντας ανά δύο τις ζεύξεις (η τελευταία ζεύξη επιλέγεται μόνη της μιας και έχουμε 5 συνολικά ζεύξεις), ενώ οι υπόλοιπες είναι εκτός λειτουργίας (down). Επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός καναλιών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης αυτών των δύο ζεύξεων. Τέλος συγκρίνονται οι μετρικές μεταξύ τους όπως και οι διαφορετικές σειρές επιλογής των ζεύξεων όπου θα γίνει ανάθεση καναλιών. Κάθε φορά που ολοκληρώνεται η ανάθεση των καναλιών σε όλο το δίκτυο, για οποιοδήποτε πείραμα, αυτά που αξιολογούνται είναι τα εξής: Το κανάλι που ανατέθηκε κάθε φορά στη κάθε ζεύξη, η μέση συνολική καθυστέρηση (average delay) και ο μέσος συνολικός χρόνος απόκρισης (latency) σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου καθώς και το 95% confidence interval των δύο τελευταίων.

Η μέση συνολική καθυστέρηση υπολογίζεται ως εξής: Μόλις ολοκληρωθεί η επιλογή όλων των καναλιών στο δίκτυο μας, με οποιαδήποτε μέθοδο και αν γίνει αυτή, μετράμε τη καθυστέρηση σε όλες τις ζεύξεις ταυτόχρονα και έπειτα παίρνουμε το μέσο όρο αυτών για να υπολογίσουμε τη μέση συνολική καθυστέρηση όλου του δικτύου. Η εκτίμηση της καθυστέρησης για κάθε ζεύξη ξεχωριστά βασίζεται στο εργαλείο ping (default μέγεθος του πακέτου χρησιμοποιώντας το ping είναι 56 byte) όπου και χρησιμοποιείται για 2 λεπτά κάθε φορά και για 10 επαναλήψεις (συνολικά 20 λεπτά) παίρνοντας το μέσο όρο αυτών. Αυτό γίνεται συγχρόνως και στις 5 ζεύξεις του δικτύου παίρνοντας τον μέσο όρο αυτών. Η τιμή αυτή αποτελεί την μέση συνολική καθυστέρηση σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου. Τα αποτελέσματα

που παρουσιάζονται παρακάτω δείχνουν τον μέσο όρο 10 επαναλήψεων-τιμών όπως και το 95% confidence interval αυτών.

Όσον αφορά τον μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης για ροή δεδομένων-σελίδας (web traffic) ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Εγκαταστάθηκε ένας Apache web server [21] σε κάθε κόμβο που είναι θύρα σταθερού δικτύου (gateway) - (Uoc, Ekab) και άλλος ένας στον κόμβο Tsakalidis. Στο κάθε εξυπηρέτη εγκαταστάθηκε αρχείο μεγέθους 700 Kbytes έτοιμο για μεταφόρτωση (download) από τους αντίστοιχους πελάτες εκτελώντας HTTP αιτήσεις με τη χρήση της διαδικασίας wget (). Το μοντέλο της κίνησης ενός δικτύου δημιουργήθηκε από το HTTP πρωτόκολλο και βασίστηκε στο [22]. Ο χρόνος που απαιτείται για μια νέα αίτηση μετά την άφιξη του προηγούμενου πακέτου είναι μια τιμή από 0 έως 20 δευτερόλεπτα. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για 20 HTTP αιτήσεις του πελάτη προς τον αντίστοιχο εξυπηρέτη, για μεταφόρτωση του αρχείου 700kb (20 φορές), παίρνοντας το μέσο όρο του χρόνου που χρειάστηκε για την ανάκτηση αυτού του αρχείου. Οι αιτήσεις αυτές γίνονταν ταυτόχρονα από όλους τους πελάτες προς τους αντίστοιχους εξυπηρέτες τους παίρνοντας τον μέσο όρο του χρόνου που χρειάστηκε ώστε να μεταφορτώσουν όλοι οι πελάτες το συγκεκριμένο αρχείο. Η τιμή αυτή αποτελεί τον μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης (latency) σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω δείχνουν τον μέσο όρο 10 επαναλήψεων-τιμών όπως και το 95% confidence interval αυτών.

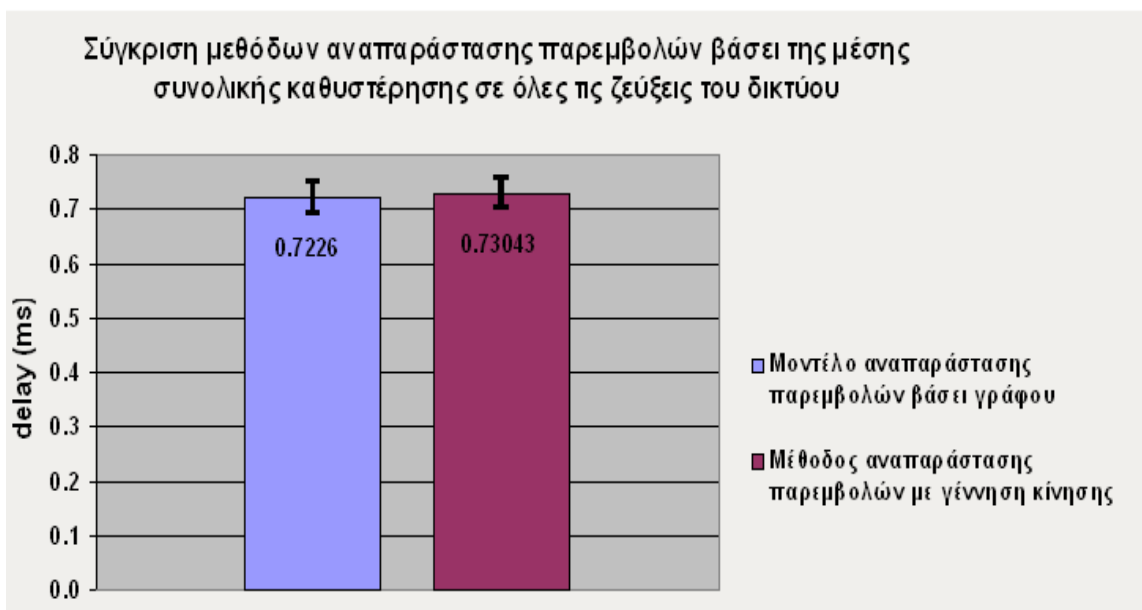
Τα ζευγάρια εξυπηρέτες – πελάτες (servers –clients) που δημιουργήθηκαν στο δίκτυο είναι τα εξής: 1) Uoc (εξυπηρέτης) - Lygerakis (πελάτης) 2) Uoc (εξυπηρέτης) – Tsakalidis(πελάτης) 3) Ekab (εξυπηρέτης) – Tsakalidis(πελάτης) 4) Ekab (εξυπηρέτης) – Lygerakis (πελάτης) 5) Tsakalidis (εξυπηρέτης) – Lygerakis (πελάτης).

## 6.1 Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών

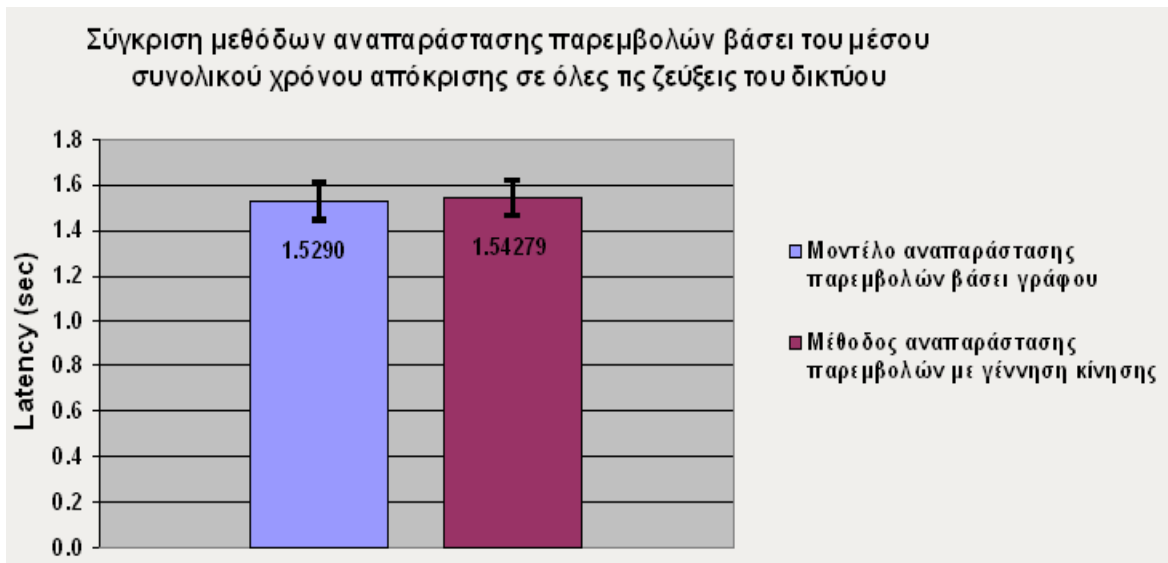
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του μοντέλου αναπαράστασης παρεμβολών χρησιμοποιώντας τον multi-point link conflict graph και της μεθόδου αναπαράστασης παρεμβολών με γέννηση κίνησης. Τα πειράματα έγιναν σε διαφορετικές ώρες της ημέρας και σε διάφορες ημερομηνίες. Πρώτα γίνεται η ανάθεση των καναλιών σε όλο το δίκτυο χρησιμοποιώντας την μια εκ τις δύο μεθόδους, μία μετρική και έχοντας προκαθορίσει τη σειρά των ζεύξεων που θα γίνει αυτή η ανάθεση. Έπειτα υπολογίζουμε την μέση συνολική καθυστέρηση και το μέσο χρόνο απόκρισης σε όλο το δίκτυο με τον τρόπο

που προαναφέραμε. Μετά απ' αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούμε τη δεύτερη μέθοδο για την ανάθεση καναλιών με την ίδια μετρική και σειρά και υπολογίζουμε και πάλι τα ίδια στοιχεία. Έτσι λοιπόν η διαδικασία γίνεται εναλλάξ σε σχέση με τις δύο μεθόδους, με τα τελευταία να εφαρμόζονται στην ίδια ζώνη της ημέρας.

Το σχήμα 18 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της **σύγκρισης των δύο αυτών μεθόδων** σε σχέση με τη μέση συνολική καθυστέρηση χρησιμοποιώντας **σταθερή σειρά** και τη **μετρική "two-way-SNR"**. Το σχήμα 19 παρουσιάζει αντίστοιχα τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο αυτών μεθόδων σε σχέση με το μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης χρησιμοποιώντας ίδια σειρά και μετρική με το παραπάνω. Παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων συνολικής καθυστέρησης και χρόνου απόκρισης για 10 πειράματα μαζί με το confidence interval είναι ο ίδιος αντίστοιχα και για τις δύο μεθόδους, Το 95% confidence interval της μεθόδου αναπαράστασης παρεμβολών με τη γέννηση κίνησης και της μεθόδου βάσει γράφου όσον αφορά τη μέση συνολική καθυστέρηση για 10 τιμές αυτής είναι +/- 0.0276 και +/-0.0285 αντίστοιχα. Το 95% confidence interval της μεθόδου αναπαράστασης παρεμβολών με τη γέννηση κίνησης και της μεθόδου βάσει γράφου όσον αφορά τον μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης είναι +/-0.08020 και +/- 0.08240 αντίστοιχα.



Σχήμα 18: Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου



Σχήμα 19: Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών βάσει του μέσου συνολικού χρόνου απόκρισης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου

Μια άλλη σειρά πειραμάτων μας απέδειξε ότι όποια μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών και να χρησιμοποιήσουμε οι ζεύξεις επέλεγον σχεδόν πάντα 4 με 5 συγκεκριμένα κανάλια ενώ κατά 75% περίπου έχουν ίδια και τα πρώτα τρία καλύτερα. Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την ζεύξη Lygerakis – Ekab έπειτα από 10 επαναλήψεις για κάθε μοντέλο με τον αλγόριθμο ανάθεσης καναλιών να χρησιμοποιεί σταθερή σειρά και μετρική “two-way-SNR” και στις δύο περιπτώσεις.

Κανάλια με τη μέθοδο βασισμένη στη κίνηση	Πόσες φορές έχει πέσει το συγκεκριμένο κανάλι στα τρία καλύτερα	Κανάλια με το μοντέλο βασισμένο στον γράφο	Πόσες φορές έχει πέσει το συγκεκριμένο κανάλι στα τρία καλύτερα
108	4	108	4
112	8	112	9
116	9	116	8
120	6	120	5
124	3	124	4

Πίνακας 5: Κανάλια που αποτέλεσαν ένα από τα τρία καλύτερα όσον αφορά την ανάθεση στη ζεύξη Lygerakis – Ekab χρησιμοποιώντας και τις δύο μεθόδους

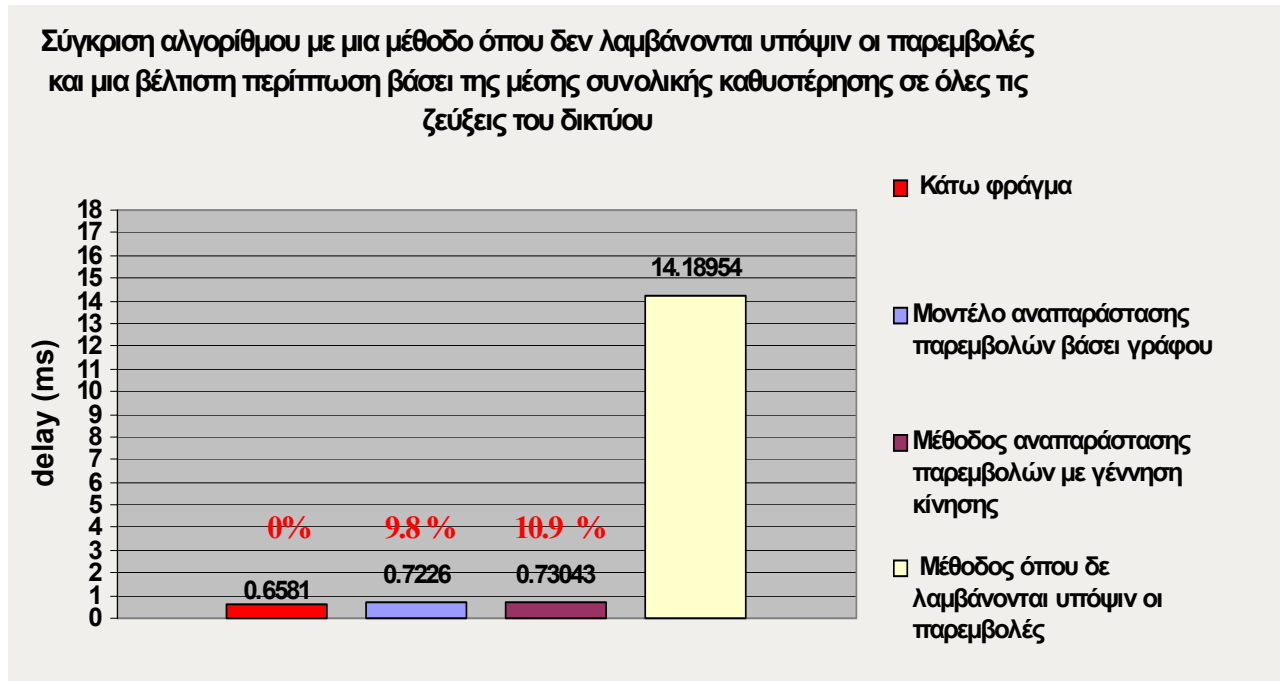
## 6.2 Σύγκριση αλγορίθμου με μια μέθοδο όπου δεν λαμβάνει υπόψιν τις παρεμβολές και μια βέλτιστη περίπτωση

Η αμέσως πιο απλοϊκή μέθοδο επιλογής καναλιών (worst\_case) απ' αυτήν που μελετήθηκε στη παρούσα εργασία είναι αυτή που δε λαμβάνει υπόψιν καθόλου τις παρεμβολές και απλά επιλέγει για κάθε ζεύξη το κανάλι με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Έτσι λοιπόν δεν δημιουργείται κίνηση μετά την ολοκλήρωση της ανάθεσης καναλιού σε κάποια ζεύξη, ελέγχονται και τα 19 κανάλια σε κάθε ζεύξη κάθε φορά και επιλέγεται αυτό που έχει τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν μ' αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιήθηκε σταθερή σειρά και η μετρική “two-way-SNR”.

Ένα άνω φράγμα της βέλτιστης επιλογής καναλιών υπολογίζεται ως εξής: Θεωρούνται ανά δύο οι ζεύξεις (η τελευταία ζεύξη επιλέγεται μόνη της μιας και είχαμε 5 συνολικά ζεύξεις), ενώ οι υπόλοιπες είναι εκτός λειτουργίας (down). Επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός καναλιών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης αυτών των δύο ζεύξεων. Το πρώτο ζευγάρι που επιλέγεται είναι το Tsakalidis – Lygerakis και Uoc - Lygerakis και ελέγχονται όλοι οι συνδυασμοί των καναλιών (19<sup>2</sup> επιλογές). Σε κάθε συνδυασμό καναλιών χρησιμοποιείται ταυτόχρονα ring και στις δύο ζεύξεις για 2 λεπτά. Ο καλύτερος συνδυασμός καναλιών προκύπτει από τη καλύτερη μέση καθυστέρηση των δύο αυτών ζεύξεων. Έπειτα ρίχνονται (down) οι δύο αυτές ζεύξεις και προχωράμε στο επόμενο ζευγάρι Ekab – Tsakalidis και Uoc - Tsakalidis όπου και βρίσκεται ο καλύτερος συνδυασμός καναλιών με τον ίδιο τρόπο. Τέλος, και αφού όλες οι προηγούμενες συνδέσεις είναι εκτός λειτουργίας ελέγχεται η τελευταία ζεύξη Ekab – Lygerakis και επιλέγεται το καλύτερο κανάλι βάσει της μετρικής του “round-trip-delay”.

Τα πειράματα έδειξαν ότι υπάρχει πολύ μεγαλύτερη μέση συνολική καθυστέρηση σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου χρησιμοποιώντας την απλοϊκή μέθοδο σε σχέση με αυτήν που καταγράφηκε χρησιμοποιώντας τις μεθόδους αναπαράστασης του προτεινόμενου αλγόριθμου. Χρησιμοποιώντας το άνω φράγμα της βέλτιστης επιλογής καναλιών, η μέση συνολική καθυστέρηση σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου είναι μειωμένη κατά 9.8% σε σχέση με τη μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών βάσει γράφου και 10.9% σε σχέση με τη μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με γέννηση κίνησης. Τα συμπεράσματα αυτά καθιστούν τον προτεινόμενο αλγόριθμο ανάθεσης καναλιών αρκετά αξιόπιστο. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη σύγκριση του αλγορίθμου με τις δύο μεθόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η βέλτιστη περίπτωση αποτελεί ένα κάτω φράγμα όσον αφορά τη μέση συνολική καθυστέρηση του δικτύου,

σε σχέση με το προτεινόμενο αλγόριθμο χρησιμοποιώντας τις μεθόδους αναπαράστασης παρεμβολών.



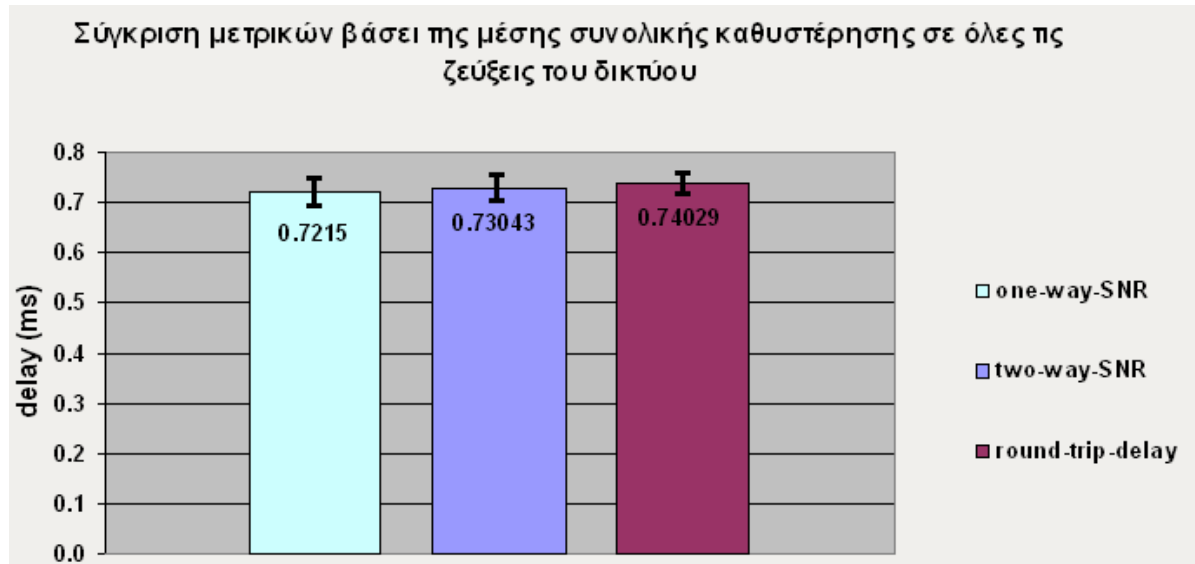
Σχήμα 20: Σύγκριση μεθόδων αναπαράστασης παρεμβολών με μία μέθοδο που δεν λαμβάνει υπόψιν την παρεμβολή και μια βέλτιστη περίπτωση

### 6.3 Σύγκριση μετริกών

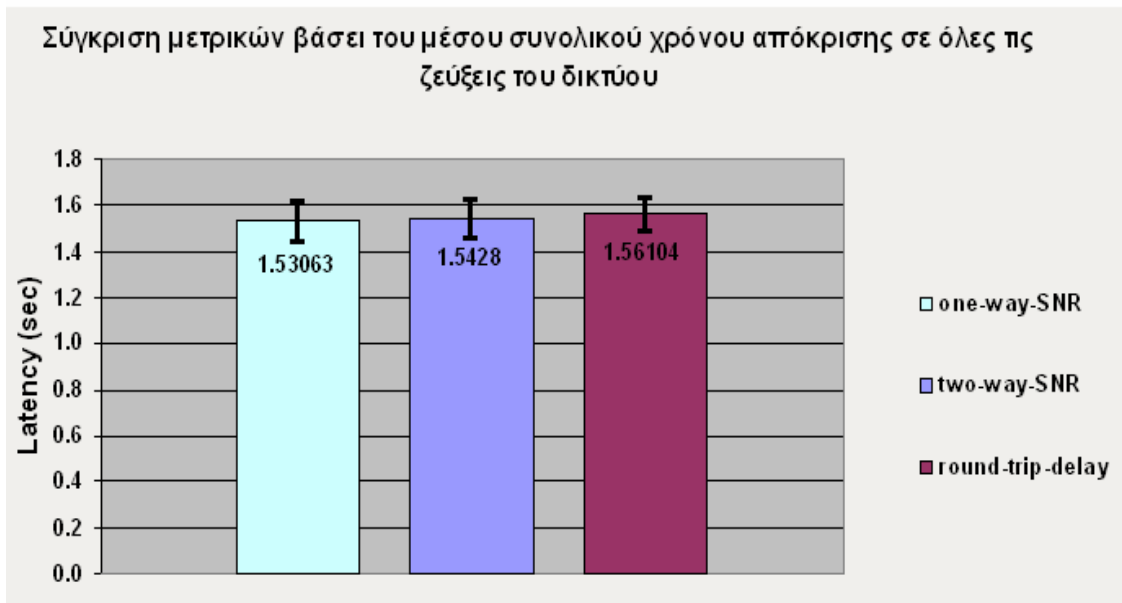
Οι μετริกές που χρησιμοποιήθηκαν, όπως και προαναφέραμε είναι οι: “one-way-SNR”, “two-way-SNR” και “round-trip-delay”. Τρέχοντας 10 πειράματα για κάθε μετρική χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο με την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών με τη γέννηση κίνησης και με σταθερή σειρά των ζεύξεων παρατηρήσαμε ότι το 83% των περιπτώσεων οι μετริกές “one-way-SNR” και “two-way-SNR” παίρνουν τα ίδια τρία καλύτερα κανάλια. Έτσι λοιπόν παρόλο που υπάρχει ασυμμετρία στις δύο κατευθύνσεις μιας ζεύξης από το παραπάνω συμπεράνουμε ότι ο λόγος σήματος προς θόρυβο συσχετίζεται και για τις δύο κατευθύνσεις. Επιπρόσθετα αυτό που παρατηρήθηκε όσον αφορά την μετρική “two-way-SNR” είναι ότι 80% των περιπτώσεων, η διαφορά του λόγου σήματος προς θόρυβο μεταξύ του καλύτερου καναλιού και του δεύτερου αντίστοιχου είναι μικρότερη από 1.5 dB. Επίσης για την ίδια μετρική, το 55%

των περιπτώσεων η διαφορά του λόγου σήματος προς θόρυβο μεταξύ του καναλιού που ορίστηκε και του τρίτου στη σειρά καλύτερου είναι επίσης μικρότερη από 1.5 dB.

Στην συνέχεια συγκρίνουμε τις τρεις αυτές μετริกές ως προς τη μέση συνολική καθυστέρηση και το χρόνο απόκρισης όλων των ζεύξεων του δικτύου χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο με την μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών βάσει γράφου (και οι δύο μέθοδοι αναπαράστασης παρεμβολών συμπεριφέρονται παρόμοια οπότε επιλέγουμε μία από τις δυο για τη σύγκριση των μετρικών) και σταθερή σειρά. Έτσι λοιπόν πραγματοποιούμε 10 πειράματα για κάθε μετρική και τα αποτελέσματα αυτών φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Παρατηρούμε ότι οι τιμές όσον αφορά την μέση συνολική καθυστέρηση και το μέσο χρόνο απόκρισης σε όλο το δίκτυο μαζί με το confidence interval είναι ίδιες για όλες τις μετρικές, οπότε και συμπεραίνουμε για άλλη μια φορά την συσχέτιση μεταξύ τους. Το 95% confidence interval των μετρικών “one-way-SNR”, “two-way-SNR” και “round-trip-delay” όσον αφορά τη μέση συνολική καθυστέρηση για 10 τιμές αυτής είναι +/- 0.0287, +/- 0.0276 και +/- 0.0211 αντίστοιχα. Το 95% confidence interval των μετρικών “one-way-SNR”, “two-way-SNR” και “round-trip-delay” όσον αφορά το μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης για 10 τιμές αυτού είναι +/- 0.0851, +/- 0.0802 και +/- 0.0718 αντίστοιχα.



Σχήμα 21: Σύγκριση μετρικών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου



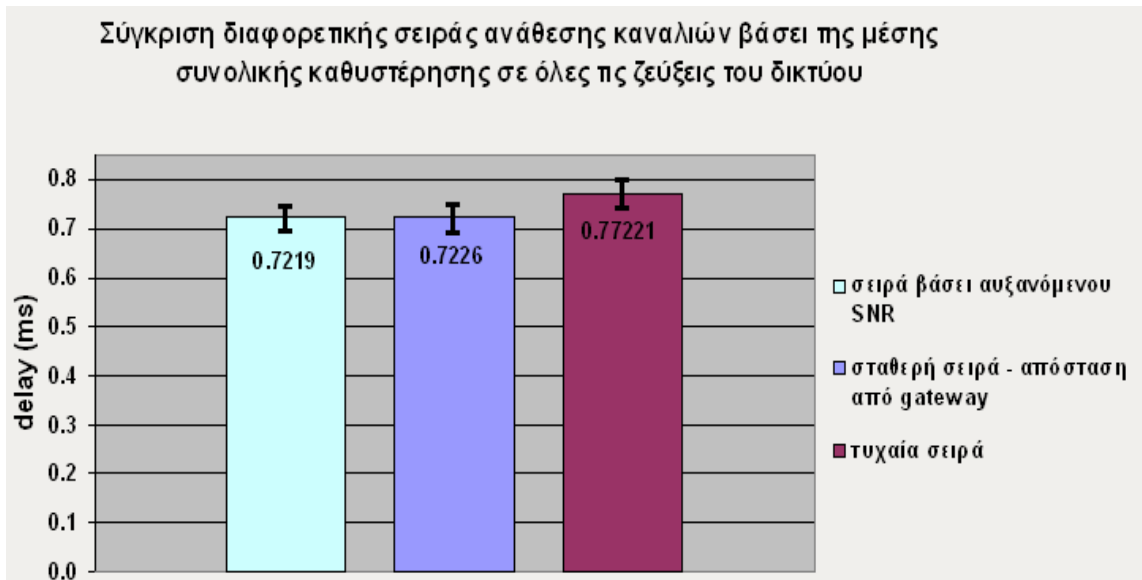
Σχήμα 22: Σύγκριση μετρικών βάσει του μέσου συνολικού χρόνου απόκρισης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου

## 6.4 Σύγκριση διαφορετικής σειράς ανάθεσης καναλιών

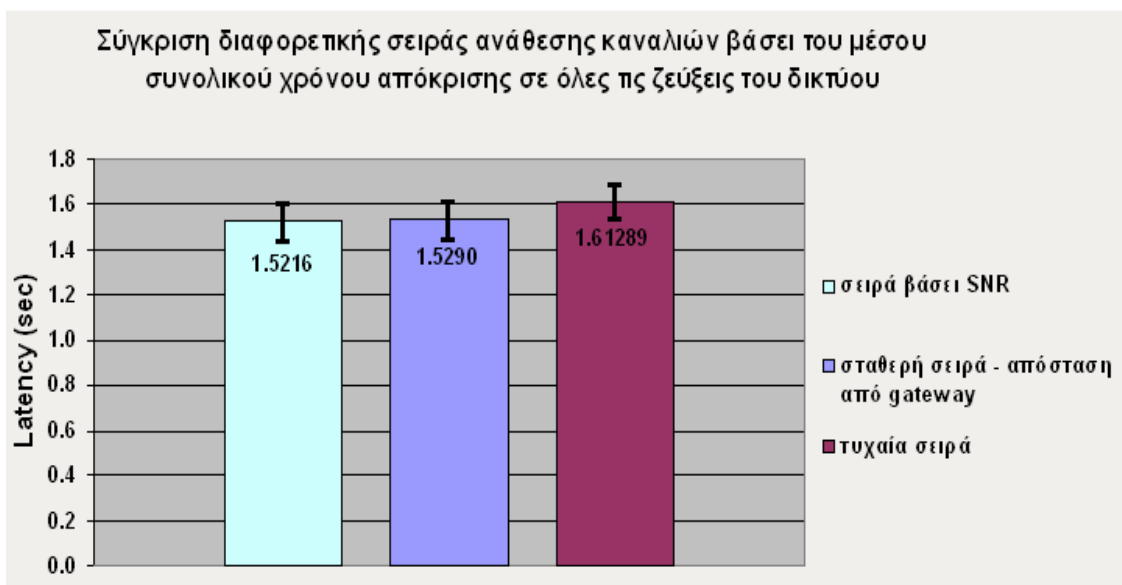
Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι **διαφορετικές σειρές ανάθεσης καναλιών**. Όπως προαναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε τρεις επιλογές όσον αφορά την προτεραιότητα των ζεύξεων. Έχουμε τη “σταθερή” (fixed), την περίπτωση όπου οι συνδέσεις με το μικρότερο SNR προηγούνται στη σειρά σε σχέση με τις άλλες και την τυχαία επιλογή. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο με τη μέθοδο αναπαράστασης παρεμβολών δημιουργώντας κίνηση και την μετρική “one-way-SNR” υπολογίζεται η μέση συνολική καθυστέρηση και ο χρόνος απόκρισης όλων των ζεύξεων του δικτύου και για τις τρεις περιπτώσεις. Όπως φαίνεται και από τα παρακάτω αποτελέσματα δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ της σταθερής σειράς και αυτής βάσει αυξανόμενου SNR όσον αφορά τη μέση συνολική καθυστέρηση και το χρόνο απόκρισης όλων των ζεύξεων του δικτύου. Μια μικρή αύξηση της τιμής της μέσης συνολικής καθυστέρησης και του χρόνου απόκρισης υπάρχει όταν η σειρά επιλογής των ζεύξεων γίνεται τυχαία. Το 95% confidence interval των σειρών “σταθερή”, “βάσει αυξανόμενου SNR” και “τυχαία” όσον αφορά τη μέση συνολική καθυστέρηση για 10 τιμές αυτής είναι +/- 0.0285, +/- 0.0248 και +/- 0.0294 αντίστοιχα. Το 95% confidence interval των σειρών “σταθερή”, “βάσει



αυξανόμενου SNR” και “τυχαία” όσον αφορά το μέσο συνολικό χρόνο απόκρισης για 10 τιμές αυτού είναι +/- 0.0824, +/- 0.0802 και +/- 0.0809 αντίστοιχα.



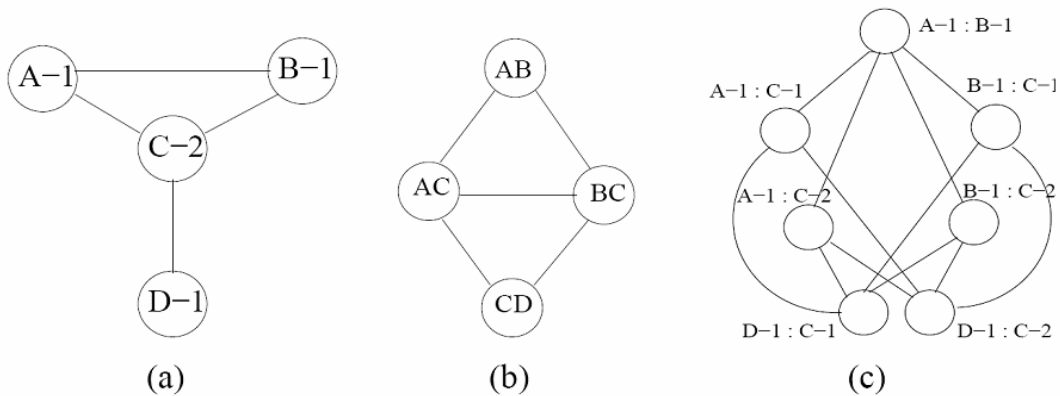
Σχήμα 23: Σύγκριση διαφορετικών σειρών ανάθεσης καναλιών βάσει της μέσης συνολικής καθυστέρησης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου



Σχήμα 24: Σύγκριση διαφορετικών σειρών ανάθεσης καναλιών βάσει του μέσου συνολικού χρόνου απόκρισης σε όλες τις ζεύξεις του δικτύου

## *Κεφάλαιο 7 Προηγούμενες Εργασίες*

Η επιλογή καναλιού σε ασύρματα δίκτυα έχει απασχολήσει πολλές έρευνες. Οι συγγραφείς στο [10] πραγματοποιούν τα πειράματα τους χρησιμοποιώντας ένα πραγματικό test-bed δίκτυο. Χρησιμοποιούν ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος πολλαπλών μονοπατιών (multi – hop) που αποτελείται από θύρες για πρόσβαση στο διαδίκτυο (Internet gateways), πελάτες και δρομολογητές (mesh clients and routers) με τους τελευταίους να είναι σταθεροί-στατικοί, έχοντας πολλαπλές διεπαφές αλλά και μία προεπιλεγμένη (default radio). Στόχος τους είναι η δυναμική ανάθεση κατάλληλων καναλιών ώστε να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή μεταξύ του ίδιου του δικτύου πλέγματος που μελετάνε και μεταξύ αυτού και άλλων εξωτερικών ασυρμάτων. Όταν αναφέρονται σε δυναμική ανάθεση καναλιών εννοούν ότι η τοπολογία μπορεί να αλλάξει μετά την διαδικασία ανάθεσης όσον αφορά τις διεπαφές των κόμβων που θα συνδέονται μεταξύ τους. Η σύνδεση όμως των κόμβων είναι προκαθορισμένη. Η μετρική που χρησιμοποιούν είναι ο συνδυασμός του αριθμού των παρεμβαλλόμενων διεπαφών (number of interfering radios) και της χρησιμότητας των καναλιών (channel utilization) των παρεμβαλλόμενων διεπαφών. Με τον τρόπο αυτό προσεγγίζουν την παρεμβολή από τα εξωτερικά δίκτυα. Ο μέσος όρος των παραπάνω δύο τιμών (rank) στέλνεται σε ένα εξυπηρετή (server) που βρίσκεται σε μια θύρα (gateway) εξωτερικά του δικτύου. Η μοντελοποίηση της παρεμβολής γίνεται με τη βοήθεια ενός γράφου που τον αποκαλούν Multi-radio conflict graph (MCG) (σχήμα 25). Στον conflict graph οι κορυφές αναπαριστούν τις ζεύξεις μεταξύ των κόμβων. Οι ακμές δείχνουν τις ζεύξεις που παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Στον Multi-radio conflict graph οι κορυφές αναπαριστούν τις ζεύξεις μεταξύ των ραδιοεπαφών. Οι ακμές δείχνουν τις ζεύξεις που παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι προκαθορισμένη η τοπολογία όσον αφορά την διασύνδεση μεταξύ κόμβων και όχι την διασύνδεση μεταξύ ραδιοεπαφών που συμβαίνει στη δική μας εργασία. Στη συγκεκριμένη εργασία, αυτό που ενδιαφέρει τους συγγραφείς είναι να υπάρχει διασύνδεση μεταξύ των κόμβων χωρίς να νοιάζονται ποιες διεπαφές θα συνδεθούν με ποιες. Αυτό βέβαια δεν καθιστά την συγκεκριμένη έρευνα πιο ακριβής ή πιο απλή από την δική μας, γιατί και εδώ πρέπει να γνωρίζουμε ποιοι κόμβοι πρέπει να είναι συνδεδεμένοι με ποιους.



Σχήμα 25: (α) Μια απλή τοπολογία δικτύου. (β) Conflict graph. (γ) Multi-radio conflict graph

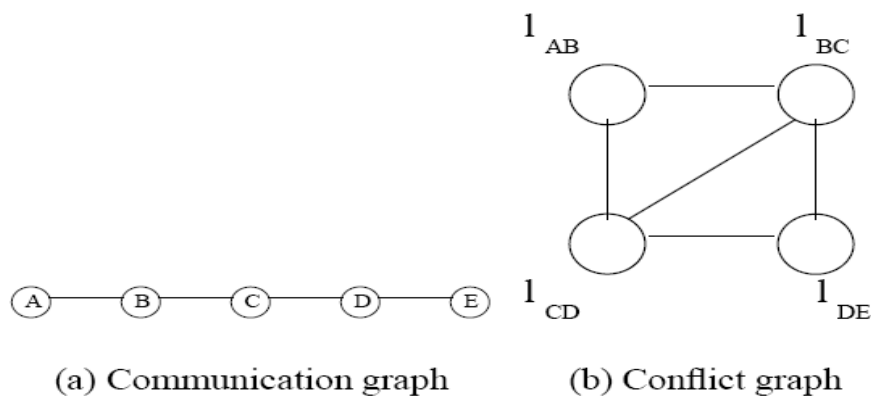
Ο εξυπηρετητής προεπιλέγει ένα κανάλι για κάθε προεπιλεγμένη διεπαφή των δρομολογητών χρησιμοποιώντας τα ranks. Για κάθε κανάλι  $x$  τα ranks υπολογίζονται από το παρακάτω τύπο όπου  $R_c$  είναι το άθροισμα των ranks για το κανάλι  $x$  για όλους τους δρομολογητές προς τον αριθμό των δρομολογητών. Το κανάλι με το μικρότερο  $R_c$  είναι που προεπιλέγεται.

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n Rank_c^i}{n}$$

Μετά λοιπόν που θα επιλεγεί αυτό το κανάλι δημιουργείται ο MCG για τις μη προεπιλεγμένες διεπαφές και χρησιμοποιούν ένα αλγόριθμο για να επιλέξουν κανάλια και σ' αυτές. Σύμφωνα με αυτόν τον αλγόριθμο σε κάθε κορυφή του MCG ξεκινώντας από αυτούς που βρίσκονται κοντά σε gateway, ορίζεται το υψηλότερο "ranked" κανάλι  $x$  που δεν επηρεάζει τους γείτονους. Όταν ένα κανάλι οριστεί σε μία κορυφή όλες οι κορυφές που περιέχουν μια διεπαφή από την μόλις ορισμένη κορυφή τοποθετούνται σε μία λίστα και τους ορίζεται το ίδιο κανάλι. Η διαδικασία συνεχίζεται για όλες τις κορυφές εκτός λίστας. Έπειτα στις κορυφές που βρίσκονται στη λίστα ορίζεται τυχαία ένα από τα κανάλια που έχουν ήδη προκαθοριστεί σ' αυτές. Είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, χρονοβόρα μια και ο εξυπηρετητής πρέπει να συλλέγει συνεχώς πληροφορίες για την παρεμβολή. Επίσης τα πειράματα στηρίχτηκαν σε ένα test-bed δίκτυο και όχι μητροπολιτικό όπως το δικό μας. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο που αναπτύξανε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δικό μας τρόπο ανάθεσης καναλιών για αυτό και έγινε εκτενής αναφορά στην συγκεκριμένη εργασία.

Στο [6] οι συγγραφείς διερευνούν το πρόβλημα ανάθεσης καναλιών στις ζεύξεις ενός δικτύου έχοντας ως περιορισμό ότι ο αριθμός των διαφορετικών καναλιών που μπορούν να οριστούν στις ζεύξεις που προσπίπτουν σε ένα κόμβο, είναι το πολύ ίσος με τον αριθμό των ραδιοεπαφών

στο συγκεκριμένο κόμβο. Για την αναπαράσταση του ασύρματου δικτύου πλέγματος με σταθερούς ασύρματους δρομολογητές που χρησιμοποιούν, ορίζουν ένα γράφο που ονομάζουν communication graph. Έπειτα για την αναπαράσταση της παρεμβολής χρησιμοποιούν ένα άλλο γράφο όπου τον ονομάζουν conflict graph και οι κορυφές αυτού αναπαριστούν τις ζεύξεις του αρχικού δικτύου. Στο παρακάτω παράδειγμα (σχήμα 26) θεωρούν ότι οι ζεύξεις του communication graph που απέχουν μέχρι δύο βήματα (hops) παρεμβάλλονται μεταξύ τους, οπότε και στο conflict graph υπάρχουν οι ανάλογες ακμές. Γενικότερα πάντως ο conflict graph σχηματίζεται έπειτα από τη δημιουργία κίνησης σε όλες τις ζεύξεις του αρχικού δικτύου, διαπιστώνοντας τα ζευγάρια των ζεύξεων τα οποία παρεμβάλλουν μεταξύ τους.



Σχήμα 26: (α) Γράφος τοπολογίας (β) Γράφος καταγραφής παρεμβολής

Έπειτα, χρησιμοποιώντας ένα greedy αλγόριθμο με στόχο να μειωθεί η συνολική παρεμβολή, γίνεται η ανάθεση καναλιών χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η σειρά των ζεύξεων που θα γίνει αυτή η ανάθεση. Τα πειράματα τους βασίζονται σε εργαλεία προσομοίωσης (NS) και όχι σε πραγματικό δίκτυο. Επίσης η εργασία αυτή δεν λαμβάνει υπόψιν την παρεμβολή από εξωτερικά δίκτυα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δική μας μελέτη από το γεγονός και μόνο ότι έχουν ως περιορισμό ότι ο αριθμός των διαφορετικών καναλιών που μπορούν να οριστούν στις ζεύξεις που προσπίπτουν σε ένα κόμβο να είναι το πολύ ίσος με τον αριθμό των ραδιοπεφών στο συγκεκριμένο κόμβο

Στο [7] προτείνεται ένας κατανεμημένος (distributed) αλγόριθμος ανάθεσης καναλιών για 802.11 δίκτυο πλέγματος πολλαπλών διεπαφών και παρουσιάζονται διάφορες πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας το εργαλείο προσομοίωσης NS-2. Η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι σχεδιασμένη για δίκτυα πλέγματος που χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα για ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο και είναι βασισμένη σε ένα κινητό αδόμητο δίκτυο (mobile ad hoc network). Το δίκτυο που χρησιμοποιούν είναι μια πολύπλοκη αρχιτεκτονική με πλήθος

συσκευών και εξοπλισμού και αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των χρηστών και ενός backbone δικτύου. Οι κόμβοι και οι gateways δημιουργούν ένα δέντρο. Οι διεπαφές (NICS) ενός κόμβου χωρίζονται σε UP NICS για συνδέσεις με κατεύθυνση τον gateway (ρίζα δέντρου) και τις DOWN NICS για συνδέσεις με κατεύθυνση τα φύλλα του δέντρου. Σε μία ζεύξη ορίζεται το κανάλι με το με το λιγότερο φόρτο καναλιού (channel load), όπου ο φόρτος καναλιού είναι ένας συνδυασμός από το συνολικό φόρτο κίνησης και τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούν το κανάλι αυτό. Στην εργασία αυτή δε δημιουργείται κάποιος γράφος αναπαράστασης της παρεμβολής ενώ αυτό που λαμβάνεται υπόψιν για την ανάθεση καναλιού είναι ο προβλεπόμενος φόρτος κίνησης σε κάθε ζεύξη και τα μονοπάτια που χρησιμοποιεί ένας κόμβος για να φτάσει στον gateway. Έτσι εμμέσως λαμβάνεται υπόψιν η εσωτερική παρεμβολή του δικτύου και όχι η παρεμβολή από εξωτερικά δίκτυα. Η συγκεκριμένη τεχνική πλησιάζει πολύ στη μελέτη [8] όπου ο Raníwala προτείνει ένα συγκεντρωτικό (centralized) load-aware αλγόριθμο ανάθεσης καναλιών όπου απαιτείται εκ των προτέρων η γνώση της απαιτούμενης κίνησης και των μονοπατιών που θα ακολουθήσει ένας κόμβος.

Οι συγγραφείς του [9] παρουσιάζουν μια πειραματική μελέτη του προβλήματος ανάθεσης καναλιών σε ένα πραγματικό test-bed δίκτυο. Θεωρούν έναν κατανεμημένο αλγόριθμο όπου η κάθε διεπαφή επιλέγει ένα κανάλι με το μικρότερο συνολικό κόστος παρεμβολής (interference cost) για όλες τις διεπαφές που βρίσκονται στην ακτίνα τους. Η συνάρτηση ( $f$ ) του κόστους παρεμβολής είναι μια γραμμική συνάρτηση του διαστήματος καναλιού (channel separation). Η συνάρτηση αυτή  $f$  της παρεμβολής έχει την τιμή 0 όταν δύο κανάλια μεταξύ τους δεν παρεμβάλλονται ενώ αυτή μειώνεται όταν η απόσταση των καναλιών μεγαλώνει. Στην αρχή ορίζουν ένα default κανάλι για να πετύχουν την διασύνδεση όλων των κόμβων. Έπειτα σε κάθε κόμβο θεωρούν ένα σύνολο από παρεμβαλλόμενους σ' αυτόν κόμβους (interference set). Αυτό το σύνολο αποτελείται από τους κόμβους που απέχουν έως και τρία βήματα (hops) απ' αυτόν. Έτσι λοιπόν, ξεκινώντας την διαδικασία ανάθεσης καναλιών, ελέγχουν σε κάθε κόμβο όλα τα διαθέσιμα κανάλια και επιλέγουν αυτό με το μικρότερο άθροισμα του συνολικού κόστους παρεμβολής ( $f$ ) όλων των παρεμβαλλόμενων σ' αυτόν κόμβων. Η εργασία αυτή δεν υπολογίζει την παρεμβολή από τα εξωτερικά δίκτυα ενώ ο αλγόριθμος ανάθεσης των καναλιών είναι αρκετά χρονοβόρος μια και πρέπει κάθε φορά να ελέγχονται όλα τα διαθέσιμα κανάλια καθώς και το συνολικό κόστος παρεμβολής όλων των παρεμβαλλόμενων σ' αυτόν κόμβων.

Μία εργασία όπου ασχολείται με ανάθεση καναλιών χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές είναι η [11]. Οι συγγραφείς στην [11] αποκλείουν τα κανάλια όπου χρησιμοποιούν οι κόμβοι που είναι στην ακτίνα παρεμβολής (interference range) και συγκεκριμένα στην

κατεύθυνση (transmission cone) του κόμβου που γίνεται ανάθεση καναλιών. Υπολογίζονται οι γωνίες και τα ανοίγματα των κεραιών ώστε να εντοπίσουν αν ένας κόμβος είναι στο πεδίο μεταφοράς του άλλου. Έπειτα επιλέγουν ένα τυχαίο κανάλι από τα υπόλοιπα δίχως να χρησιμοποιούν κάποια μετρική και χωρίς να συνυπολογίζουν τις εξωτερικές παρεμβολές. Αν δεν υπάρχει κάποιο ελεύθερο κανάλι τότε επαναχρησιμοποιούν αυτό που υπάρχει σε λιγότερους κόμβους.

Τέλος αξίζει να σημειώσουμε κάποιες εργασίες όπου υλοποιήθηκαν πραγματικά μητροπολιτικά δίκτυα. Στις ημέρες μας υπάρχουν αρκετά τέτοιου είδους δίκτυα σε όλο τον κόσμο [23] με αρκετά από αυτά να έχουν υλοποιηθεί αποκλειστικά για πειραματικές μελέτες. Ένα από αυτά είναι το Digital Gangetic Plains πειραματικό (test-bed) δίκτυο, το οποίο αποτελείται από κόμβους με 802.11b διεπαφές, εκτείνεται σε μια αγροτική περιοχή και αποτελείται από 8 ζεύξεις από 1 έως 37χλμ [24]. Επίσης κάποια άλλα τέτοια δίκτυα είναι το WiLDNet (WiFi-based Long Distance) με ζεύξεις 50 έως 100χλμ [25], το Roofnet το οποίο αποτελείται από κόμβους με μία μόνο διεπαφή 802.11b ο καθένας και εκτείνεται σε μια απόσταση 4χλμ<sup>2</sup> [26] και το QUAIL Ridge του οποίου οι κόμβοι αποτελούνται από περισσότερες από μία διεπαφές (multi-radio) [27].

## ***Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα και Μελλοντική***

### ***Εργασία***

Στην εργασία αυτή αναλύθηκε το πρόβλημα της ανάθεσης καναλιών σε ένα ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο. Διερευνήθηκαν μέθοδοι αναπαράστασης των παρεμβολών οι οποίες βασίστηκαν είτε στον multi-point link conflict graph όπου αναπαριστά τις παρεμβαλλόμενες ζεύξεις βάσει γράφου είτε στη μέθοδο όπου γεννάται κίνηση στις ζεύξεις όπου έχει ολοκληρωθεί η ανάθεση καναλιού. Εκτός από τις παρεμβολές μεταξύ συνδέσμων του ίδιου του δικτύου λήφθηκαν υπόψιν και οι παρεμβολές από εξωτερικά δίκτυα. Βάσει αυτών των μεθόδων αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για την επιλογή καναλιών, του οποίου βασικά στοιχεία, αποτελούν οι μετρικές και οι διαφορετικές σειρές ανάθεσης καναλιών. Η εφαρμογή και αξιολόγηση του αλγόριθμου αυτού βασίστηκε σε πειράματα σε ένα πραγματικό ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο πλέγματος πολλαπλών διεπαφών με κατευθυντικές κεραιές και ζεύξεις σημείο-προς-σημείο. Οι δύο μέθοδοι προσέγγισης της παρεμβολής που αναπτύχθηκαν όπως και οι μετρικές που επιλέξαμε δεν διαφέρουν ως προς την μέση συνολική καθυστέρηση και το χρόνο απόκρισης όλων των ζεύξεων του δικτύου. Επίσης ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιώντας τις μεθόδους αναπαράστασης παρεμβολών συγκρίθηκε με μια μέθοδο όπου δεν λαμβάνει υπόψιν τις παρεμβολές και ένα άνω φράγμα της βέλτιστης επιλογής καναλιών. Επίσης οι σειρές ανάθεσης των καναλιών που βασίζονται στην σταθερή σειρά και στο αυξανόμενο SNR παρουσιάζουν εξίσου ίδια αποτελέσματα ως προς την μέση συνολική καθυστέρηση και το χρόνο απόκρισης. Μια μικρή αύξηση των τιμών αυτών παρατηρείται όταν η σειρά των ζεύξεων είναι τυχαία.

Μελλοντικές σκέψεις όσον αφορά την επιμέρους μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η διερεύνηση της σειράς ανάθεσης καναλιών σε ζεύξεις που θα λαμβάνει υπόψιν το φόρτο των ζεύξεων και τη μέση καθυστέρηση αυτών. Στόχος μας είναι η επέκταση του μοντέλου αναπαράστασης παρεμβολών βάσει του multi-point link conflict graph ώστε ο γράφος αυτός να συμπεριλαμβάνει βάρη που θα αναπαριστούν το μέγεθος των παρεμβολών. Το μοντέλο αυτό γενικότερα μπορεί να αποτελέσει τη βάση ώστε να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες τοπολογίες δικτύων με διάφορα είδη κεραιών (π.χ πολυκατευθυντικές). Τέλος, πραγματικές μετρήσεις παρεμβολών θα βοηθήσουν το μοντέλο αυτό να γίνει ακόμα πιο ακριβές και αξιόπιστο.

## Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.cellular.co.za/stats-main.htm>
- [2] <http://www/awmn.net>
- [3] Κανάτας Α., Κωνσταντίνου Φ., Συστήματα Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών”, ΕΜΠ, Μάρτιος 2001
- [4] K.Chebrolu, B. Raman, and S. Sen, “Long-Distance 802.11b Links: Performance Measurements and Experience,” in Proc. of ACM MOBICOM, 2006.
- [5] C.-M. Cheng, P.-H. Hsiao, H. T. Kung, and D. Vlah, “Adjacent Channel Interference in Dual-Radio 802.11a Nodes and Its Impact on Multi-hop Networking,” in Proc. of IEEE Globecom, 2006.
- [6] A. P. Subramanian, H. Gupta, and S. R. Das, “Minimum-Interference Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks,” in *Proc. of IEEE SECON*, 2007
- [7] A. Raniwala and T. Chiuch, “Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network,” in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2005.
- [8] Ashish Raniwala, Kartik Gopalan, and Tzi cker Chiueh. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. *Mobile Computing and Communication Review*, 8(2):50–65, 2004
- [9] B. Ko, V. Misra, J. Padhye, and D. Rubenstein, “Distributed Channel Assignment in Multi-Radio 802.11 Mesh Networks,” in *Proc. of IEEE WCNC*, 2007.
- [10] K. N. Ramachandran, E. M. Belding, K. C. Almeroth, and M. M. Buddhikot, “Interference-Aware Channel Assignment in Wulti Radio Wireless Mesh Networks,” in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2006
- [11] Saumitra Das, Himabindu Pucha, Dimitrios Koutsonikolas, Y. Charlie Hu, and Dimitrios Peroulis. DMesh: Incorporating Practical Directional Antennas in Multi-Channel Wireless Mesh Networks. In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, 2006.
- [12] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications “High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band”, IEEE Std.802.11, 1999 Edition
- [13] Διονυσίου Θεόδωρος., Ασύρματα πρωτόκολλα IEEE 802.11. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2007



- [14] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications “Higher-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band”, IEEE Std.802.11, 1999 Edition
- [15] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications “Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band”, IEEE Std.802.11, 1999 Edition
- [16] Manos Delakis, Kostas Mathioudakis, Nikolaos Petroulakis, Vasilios A. Siris. Experiences and Investigations with Heraklion MESH: An Experimental Metropolitan Multi-Radio Mesh Network, in Proc of TRIDENTCOM 2008
- [17] <http://www.gentoo.org/>
- [18] <http://madwifi.org/>
- [19] <http://olsr.org/>
- [20] <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>
- [21] <http://www.apache.org/>
- [22] B. Mah, An empirical model of http network traffic," IEEE, 1997
- [23] Mad City Broadband in Wisconsin - [www.madcitybroadband.com](http://www.madcitybroadband.com) ,Berlin RoofNet - <http://sarwiki.informatik.hu-berlin.de/BerlinRoofNet>
- [24] K.Chebrolu, B. Raman, and S. Sen, “Long-Distance 802.11b Links: Performance Measurements and Experience,” in *Proc. of ACM MOBICOM*, 2006
- [25] R. Patra, S. Nedeveschi, S. Surama, A. Sheth, L. Subramanian, and E. Brewer. WiLDNet: Design and Implementation of High Performance WiFi Based Long Distance Networks. In *Proc. Of USENIX NSDI*, 2006.
- [26] J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network. In *Proc. of ACM MOBICOM*, 2005.
- [27] D. Wu, D. Gupta, and P. Mohapatra. Quail Ridge Reserve Wireless Mesh Network: Experiences, Challenges and Findings. In *Proc. of TRIDENTCOM*, 2007.

