



Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών



I.T.E.  
Ινστιτούτο Πληροφορικής

## Σύστημα παρακολούθησης και μέτρηση της απόδοσης Ασύρματου Μητροπολιτικού Δικτύου

Μεταπτυχιακή εργασία

**Κωνσταντίνος Μαθιουδάκης**

*Ηράκλειο*

*Φεβρουάριος 2008*



Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ  
ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

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

Συγγραφέας::

---

Κωνσταντίνος Ι. Μαθιουδάκης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εξεταστική Επιτροπή:

---

Βασίλειος Σύρης, Επίκ. Καθηγητής  
Επόπτης – Επιβλέπων  
Πρόεδρος

---

Απόστολος Τραγανίτης, Καθηγητής  
Μέλος

---

Αθανάσιος Μουχτάρης, Επίκ. Καθηγητής  
Μέλος

Δεκτή:

---

Παναγιώτης Τραχανιάς, Καθηγητής  
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2008



*Στην οικογένεια μου...*



# Σύστημα παρακολούθησης και μέτρηση της απόδοσης Ασύρματου Μητροπολιτικού Δικτύου

Μαθιουδάκης Κωνσταντίνος

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος πολλαπλών διεπαφών και καναλιών, όπως το πειραματικό Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου, είναι ευρέως διαδεδομένα στις μέρες μας και δύναται να παρέχουν υψηλής ταχύτητας ευρυζωνική πρόσβαση σε κινητούς και ακίνητους χρήστες με χαμηλό κόστος λειτουργίας και διαχείρισης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκαν δύο συστήματα για συνεχή και κατά απαίτηση παρακολούθηση των ραδιοζεύξεων ενός ασυρμάτου δικτύου πλέγματος, που μας επιτρέπουν γρήγορα και εύκολα να αναγνωρίζουμε και να καταλαβαίνουμε τυχών ανωμαλίες στη συμπεριφορά των συνδέσμων του δικτύου. Η ασυμμετρία των συνδέσμων, η διαφοροποίηση της ποιότητας του συνδέσμου όπως και του ρυθμού μετάδοσης κατά την διάρκεια της ημέρας και η διαφορά της διακύμανσης της ποιότητας του συνδέσμου σε κάθε σύνδεσμο είναι μερικές βασικές παρατηρήσεις που εξάγονται από τα συστήματα παρακολούθησης. Στην συνέχεια, μελετήθηκε η αλληλεπίδραση ασυρμάτων διεπαφών του ίδιου κόμβου, τόσο σε τοπικό όσο και σε μητροπολιτικό περιβάλλον, η οποία δίνει χρήσιμα και σημαντικά συμπεράσματα για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το υλικό των κόμβων μπορεί να υποστηρίξει την ταυτόχρονη λειτουργία και των τεσσάρων διεπαφών ενός κόμβου. Παρεμβολές στις διεπαφές συμβαίνουν όταν αυτές λειτουργούν στα ίδια ή σε γειτονικά κανάλια, και είναι εντονότερες όσο μικρότερη είναι η απόσταση των αντίστοιχων κεραιών. Τέλος, μελετήθηκε η απόδοση των ασυρμάτων συνδέσμων ως προς τον ρυθμό διεκπεραίωσης, τις απώλειες πακέτων και τον χρόνο απόκρισης, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης και της εκπεμπόμενης ισχύος της διεπαφής, που δείχνει ότι σε κάθε σύνδεσμο υπάρχει ένας συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης που βελτιστοποιεί την απόδοση του συνδέσμου. Σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η απόδοση και ως προς τις τρεις μετρικές είναι πολύ καλύτερη όταν ορίζεται κατάλληλα ο ρυθμός μετάδοσης, παρά όταν λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης.





# Monitoring System and performance measurement of Wireless Metropolitan Area Network

**Mathioudakis Konstantinos**

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

## **ABSTRACT**

Wireless multi-radio multi-channel mesh networks, such as the experimental wireless metropolitan multi-radio mesh network in Heraklion, have the potential to provide ubiquitous and ultra high-speed broadband access in urban and rural areas, to both fixed and mobile users with low operation and management costs. In this thesis we first present the implementation of a continuous and an on-demand monitoring system for wireless metropolitan links, which allow us to quickly and easily identify and help understand anomalous link behavior. Some of the observations using the monitoring systems include the asymmetry in the performance of a link in its two directions, and the variations of link quality and transmission rate throughout the day, which is different for different links.

Second, in this thesis we study the interaction of wireless interfaces on the same node, in both an indoor and metropolitan environment. Our results confirm that the mesh nodes' hardware is able to support the simultaneously running of the four wireless cards. Interference among interfaces takes place when they operate on the same channel or on neighboring channels. Moreover, interference is higher when the distance of the respective antennas is smaller. Finally, in this thesis we investigate the performance of wireless links in terms of throughput, packet loss, and http latency as function of transmission rate and transmission power, which shows that for every link in the metropolitan network there is a specific transmission rate that optimizes the link's performance. An important conclusion is that the performance for all three metrics is higher, when the link transmission rate is fixed to an appropriate value, compared to when the autorate algorithm operates.



## ***Ευχαριστίες***

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επόπτη της μεταπτυχιακής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή Βασίλειο Σύρη για όλη την βοήθεια και καθοδήγηση που μου έδωσε. Επιπλέον, ευχαριστώ τον Καθηγητή Απόστολο Τραγανίτη και τον Επίκουρο Καθηγητή Αθανάσιο Μουχτάρη για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης και το Ινστιτούτο Πληροφορικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΠ-ΙΤΕ) για την υλικοτεχνική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Μανόλη Γενετζάκη, Νίκο Πετρουλάκη, Θεόδωρο Διονυσίου, Βαγγέλη Αγγελάκη, Στέφανο Παπαδάκη, Χάρη Μελισσάρη, Νίκο Κοτσιφίδη όπως και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του ΙΠ-ΙΤΕ για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια τους. Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον φίλο και συνεργάτη μου Μανόλη Ντελάκη για την άριστη συνεργασία μας τα τελευταία 7-8 χρόνια τόσο κατά την διάρκεια των προπτυχιακών όσο και των μεταπτυχιακών σπουδών μας. Τέλος, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στην Σοφία που χωρίς τα αμέτρητα ξενύχτια, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τις σημαντικές διορθώσεις της δεν θα ήταν δυνατή η συγγραφή του παρόντος κειμένου.

Πάνω από όλους όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γιάννη και Κλειώ που με στηρίζαν, με στηρίζουν, και θα συνεχίσουν να με στηρίζουν σε κάθε βήμα της ζωής μου.



## *Περιεχόμενα*

Περιεχόμενα .....	xiii
Κατάλογος Εικόνων.....	xv
Κατάλογος Πινάκων .....	xvi
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	xvii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Στόχος .....	3
1.2 Περίληψη εργασίας.....	4
1.3 Σύγκριση με προηγούμενες εργασίες .....	6
1.4 Δομή της εργασίας.....	7
Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο .....	9
2.1 Τεχνολογίες Ασύρματων Τοπικών Δικτύων.....	9
2.2 Γενικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 802.11 .....	10
2.3 Αρχιτεκτονική στο 802.11 .....	11
2.4 Τύποι και δομές πλαισίων.....	12
2.5 Ανίχνευση σφαλμάτων .....	13
2.6 Μέθοδος πρόσβασης στο μέσο (802.11 MAC layer) .....	14
2.7 IEEE 802.11a .....	17
2.8 Ασύρματα δίκτυα πλέγματος.....	18
Κεφάλαιο 3 Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου (HMESH) .....	21
3.1 Περιγραφή δικτύου .....	22
3.2 Περιγραφή κόμβου (υλικό, λογισμικό).....	23
3.3 Λειτουργία και διαχείριση .....	25
3.4 Περιγραφή madwifi .....	25
3.5 Εμπειρίες.....	26
Κεφάλαιο 4 Συστήματα Παρακολούθησης Μητροπολιτικού Δικτύου.....	29
4.1 Σύστημα συνεχούς παρακολούθησης .....	29

4.2 Σύστημα μέτρησης απόδοσης κατά απαίτηση.....	31
<b>Κεφάλαιο 5 Παρεμβολή γειτονικών καναλιών στο 802.11a .....</b>	<b>35</b>
5.1 Παρεμβολή ασυρμάτων διεπαφών σε τοπικό δίκτυο .....	35
5.1.1 Εξέταση αλληλεπίδρασης υλικού των διεπαφών.....	35
5.1.2 Παρεμβολή γειτονικών καναλιών.....	37
5.2 Παρεμβολή μεταξύ συνδέσμων στο μητροπολιτικό περιβάλλον .....	41
5.2.1 Κεραίες αποστολής/λήψης (Tx/Rx) στον ίδιο κόμβο .....	42
5.2.2 Δύο κεραίες λήψης (Rx/Rx) στον ίδιο κόμβο.....	44
5.2.3 Δύο κεραίες αποστολής (Tx/Tx) στον ίδιο κόμβο.....	45
5.3 Συμπεράσματα .....	45
<b>Κεφάλαιο 6 Μετρήσεις απόδοσης του Μητροπολιτικού Δικτύου.....</b>	<b>47</b>
6.1 Πραγματική ισχύς εκπομπής της διεπαφής.....	47
6.2 Ανάλυση του ρυθμού απωλειών των πακέτων .....	48
6.2.1 Εξάρτηση του ρυθμού απωλειών από την ισχύ εκπομπής.....	48
6.2.2 Εξάρτηση του ρυθμού απωλειών από τον ρυθμό μετάδοσης.....	51
6.3 Ανάλυση του ρυθμού διεκπεραίωσης.....	52
6.3.1 Εξάρτηση του ρυθμού διεκπεραίωσης από την ισχύ εκπομπής .....	52
6.3.2 Εξάρτηση του ρυθμού διεκπεραίωσης από τον ρυθμό μετάδοσης.....	54
6.4 Ανάλυση του χρόνου απόκρισης (Latency).....	57
6.4.1 Εξάρτηση του χρόνου απόκρισης από την ισχύ εκπομπής.....	57
6.4.2 Εξάρτηση του χρόνου απόκρισης από τον ρυθμό μετάδοσης .....	59
6.5 Χρονική συσχέτιση της απώλειας πακέτων.....	61
6.6 Συμπεριφορά απωλειών κατά την διάρκεια της ημέρας.....	62
6.7 Συμπεράσματα .....	63
<b>Κεφάλαιο 7 Προηγούμενες εργασίες.....</b>	<b>65</b>
<b>Κεφάλαιο 8 Σύνοψη (συμπεράσματα).....</b>	<b>69</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>71</b>

## *Κατάλογος Εικόνων*

Εικόνα 1: Περιβάλλον χρήσης ασυρμάτων τοπικών δικτύων (WLANs).....	1
Εικόνα 2: 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.....	12
Εικόνα 3: Πλαίσιο 802.11 .....	13
Εικόνα 4: PPDU IEEE 802.11 frame format .....	13
Εικόνα 5: Μέθοδος PCF στο 802.11b MAC.....	16
Εικόνα 6: Μέθοδος DCF στο 802.11b MAC.....	16
Εικόνα 7: Απλουστευμένος αλγόριθμος εκπομπής.....	17
Εικόνα 8: Ασύρματο Μητροπολιτικό δίκτυο Ηρακλείου .....	21
Εικόνα 9: Πληροφορίες διασύνδεσης των κόμβων .....	23
Εικόνα 10: α) Επιμέρους στοιχεία κόμβου, β) Πραγματικός κόμβος.....	24
Εικόνα 11: Κόμβος Lygerakis .....	24
Εικόνα 12: Ιστοσελίδα συστήματος παρακολούθησης.....	30
Εικόνα 13: Ιστοσελίδα κατά απαίτηση συστήματος .....	32
Εικόνα 14: Ιστοσελίδα αποτελεσμάτων του κατά απαίτηση συστήματος.....	33
Εικόνα 15: Δημιουργία συνδέσμων με χρήση pigtails και attenuators .....	36
Εικόνα 16: Τοπολογία πειραμάτων με τέσσερις ασύρματες συνδέσεις ενός κόμβου .....	38
Εικόνα 17: Ζεύγη ασύρματων συνδέσμων του μητροπολιτικού δικτύου όπου εξετάζεται η παρεμβολή .....	42

## *Κατάλογος Πινάκων*

Πίνακας I: Τα πρότυπα 802.11 και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους .....	10
Πίνακας II: Απόσταση συνδέσμων και κεραιές .....	25
Πίνακας III: Τυπικές τιμές SNR και ρυθμού μετάδοσης των συνδέσμων .....	31
Πίνακας IV: Ρυθμός διεκπεραίωσης συνδέσμων .....	37
Πίνακας V: Μετρήσεις ρυθμού διεκπεραίωσης (Mbps) μίας ροής (ενός και δύο συνδέσμων).....	38
Πίνακας VI: Αποτελέσματα μετρήσεων ρυθμού διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ταυτόχρονων ροών (κεραίες κοντά).....	39
Πίνακας VII: Αποτελέσματα μετρήσεων ρυθμού διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ταυτόχρονων ροών (κεραίες μακριά) .....	40
Πίνακας VIII: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν ο παραλήπτης και ο αποστολέας είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές στον ίδιο ιστό σε απόσταση περίπου 0.75 μέτρα .....	43
Πίνακας IX: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν ο παραλήπτης και ο αποστολέας είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές σε διαφορετικό ιστό σε απόσταση περίπου 2.5 μέτρα.....	44
Πίνακας X: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν δύο παραλήπτες είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές στον ίδιο ιστό σε απόσταση περίπου 0.75 μέτρα.....	44
Πίνακας XI: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν δύο αποστολείς είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές στον ίδιο ιστό σε απόσταση περίπου 0.75 μέτρα.....	45
Πίνακας XII: Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης των τριών συνδέσμων ώστε το ποσοστό απωλειών να είναι μικρότερο του 10 %.....	50
Πίνακας XIII: Ποσοστό απωλειών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στον σύνδεσμο Tsakalidis ↔ UoC (ρυθμός μετάδοσης 18 Mbps και ισχύς 15 dBm) .....	62



## *Κατάλογος Διαγραμμάτων*

Διάγραμμα 1: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Uplink – Downlink) συναρτήσει του αριθμού των ενεργών διεπαφών.....	36
Διάγραμμα 2: Ρυθμός διεκπεραίωσης συναρτήσει της απόστασης των καναλιών (κεραίες κοντά) ...	39
Διάγραμμα 3: Ρυθμός διεκπεραίωσης συναρτήσει της απόστασης των καναλιών (κεραίες μακριά) .	41
Διάγραμμα 4: Πραγματική ισχύ εκπομπής της διεπαφής .....	47
Διάγραμμα 5: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ Lygerakis.....	49
Διάγραμμα 6: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ UoC.....	49
Διάγραμμα 7: Ποσοστό απωλειών Lygerakis ↔ Ekab.....	49
Διάγραμμα 8: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ UoC με ενεργοποιημένες τις επαναμεταδόσεις του επιπέδου MAC.....	51
Διάγραμμα 9: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ Lygerakis συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης ....	52
Διάγραμμα 10: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → Lygerakis, συναρτήσει της ισχύος εκπομπής.....	53
Διάγραμμα 11: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → Lygerakis, συναρτήσει της ισχύος εκπομπής (χωρίς επαναμεταδόσεις χαμένων πακέτων) .....	54
Διάγραμμα 12: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → Lygerakis, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης.....	55
Διάγραμμα 13: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → UoC, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης .....	56
Διάγραμμα 14: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Lygerakis → Ekab, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης .....	56
Διάγραμμα 15: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος .....	58
Διάγραμμα 16: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις) .....	58
Διάγραμμα 17: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις) .....	59
Διάγραμμα 18: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Tsakalidis ← UoC, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις).....	60

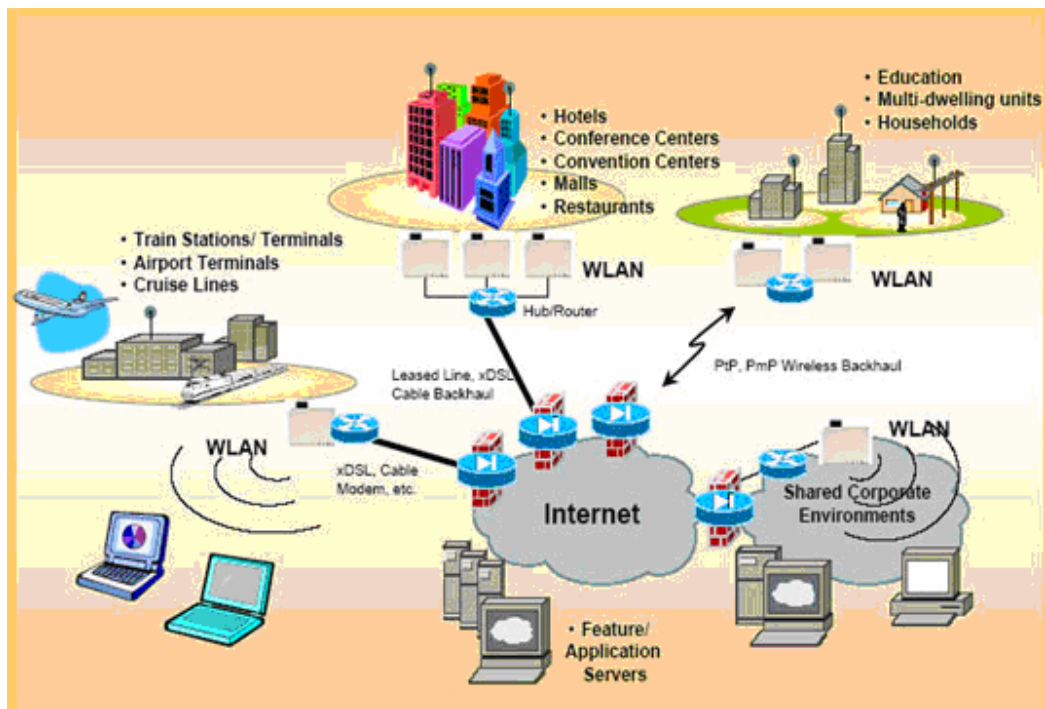
Διάγραμμα 19: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Ekab, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις).....	60
Διάγραμμα 20: Χρονική συσχέτιση χαμένων πακέτων του συνδέσμου Tsakalidis ↔ UoC (ρυθμός μετάδοσης 18 Mbps και ισχύς 15 dBm).....	61
Διάγραμμα 21: Ποσοστό απωλειών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στον σύνδεσμο Tsakalidis ↔ UoC (ρυθμός μετάδοσης 18 Mbps και ισχύς 15 dBm) .....	63
Διάγραμμα 22: Ρυθμός απωλειών συναρτήσει του SNR στο [4] .....	65
Διάγραμμα 23: Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων συναρτήσει του αριθμού των συνδέσμων για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης στο [5] .....	66
Διάγραμμα 24: Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων συναρτήσει του αριθμού των συνδέσμων για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης (802.11 b/g) στο [6] .....	67
Διάγραμμα 25: Μείωση του ρυθμού διεκπεραίωσης λόγω της προσθήκης διεπαφών στο [8] .....	68





## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η κοινωνία της πληροφορίας είναι πλέον πραγματικότητα και η κύρια πηγή άντλησης δεδομένων είναι το διαδίκτυο. Αυτή και μόνο η δυνατότητα, της πρόσβασης στο διαδίκτυο, αποτελεί πρωτογενή ανάγκη κάθε εργαζόμενου, φοιτητή, επιστήμονα, ερευνητή. Η δυνατότητα για πρόσβαση σε πληροφορίες από οπουδήποτε και οποτεδήποτε φαίνεται ότι θα χαρακτηρίσει τη πληροφορική και τη κοινωνία του 21ου αιώνα. Εδώ και χρόνια η δικτύωση με συμβατικές ενσύρματες τεχνολογίες, έχει πραγματικά εισέλθει σε όλα τα περιβάλλοντα στα οποία διαδραματίζεται κάθε είδους παραγωγική, πολιτισμική, ερευνητική, ενημερωτική, ψυχαγωγική, τηλεπικοινωνιακή δραστηριότητα δίνοντας λύσεις που αφορούν πάρα πολλούς τομείς, καθιστώντας τη υπόθεση ρουτίνας μεν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας δε.



Εικόνα 1: Περιβάλλον χρήσης ασυρμάτων τοπικών δικτύων (WLANs)

Ωστόσο, η παρουσία την τελευταία πενταετία των ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ τεχνολογιών δικτύωσης, έρχεται να συμπληρώσει πολλά κενά στην μέχρι τώρα παρούσα δικτυακή υποδομή, απογειώνοντας τη πραγματικά. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν δραματικά την κοινωνία

καθώς επιτρέπουν στον άνθρωπο να αποδεσμευτεί από τη «με βάση τη γεωγραφική θέση επικοινωνία» και να έχει πρόσβαση σε πηγές πληροφορίας ώστε να κινείται ελεύθερα παγκοσμίως χωρίς να μειώνεται η αποτελεσματικότητά του. Στόχος τους επίσης αποτελεί το να καταστήσουν τη δικτύωση ακόμα περισσότερο προσιτή και άμεση απλοποιώντας πολύπλοκες δομές και διαδικασίες σε «Εξυπνες» πρακτικές συσκευές που η χρήση τους θα απαιτεί ολοένα και λιγότερη εξειδικευμένη γνώση. Τελευταία, η παγκόσμια βιομηχανία τηλεπικοινωνιών και υπολογιστών γενικότερα έχει κάνει τεράστιες επενδύσεις (και όχι τυχαία) στον συγκεκριμένο τομέα, κατακλύζοντας κυριολεκτικά την αγορά από πληθώρα τέτοιων ασύρματων συσκευών.

Πλεονεκτήματα των ασυρμάτων τεχνολογιών και ειδικότερα των ασυρμάτων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Networks - WLANs) είναι:

### **Κινητικότητα (mobility)**

Τα WLANs δίνουν τη δυνατότητα σε χρήστες οι οποίοι είναι εν κινήσει (σε μεταφορικά μέσα, αεροδρόμια, συσκέψεις, εξυπηρέτηση πελατών), να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες όταν και όπου τις χρειάζονται. Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα που δεν παρέχουν αυτή τη κινητικότητα.

### **Ταχύτητα και ευελιξία εγκατάστασης**

Η εγκατάσταση ενός WLAN εξαλείφει την ανάγκη της χρήσης των καλωδίων η οποία απαιτεί συνήθως μελέτη, χρόνο και αρκετό κόστος λόγω των απαιτούμενων τροποποιήσεων των κτιριακών εγκαταστάσεων, όπου δεν έχει προβλεφθεί. Η ασύρματη τεχνολογία επιτρέπει την υλοποίηση δικτύων η οποία υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αδύνατη.

### **Επεκτασιμότητα**

Η ενσύρματη επέκταση των LANs, είναι μια διαδικασία ιδιαίτερα δύσκολη και όχι πάντα εφικτή, αφού συχνά προϋποθέτει αλλαγές της κτιριακής υποδομής και επεμβάσεις εντός του χώρου εργασίας. Τα ασύρματα μέσα προσπερνούν τα παραπάνω προβλήματα, δίνοντας μια ευέλικτη λύση.

### **Διασύνδεση**

Μια άλλη συνιστώσα της επεκτασιμότητας, είναι και η διασύνδεση δυο ή παραπάνω αυτόνομων τοπικών δικτύων που βρίσκονται σε διαφορετικούς χώρους. Συμφέρει να χρησιμοποιήσουμε ασύρματες μεθόδους, δεδομένου ότι το ασύρματο μέσο μπορεί να φθάσει σε θέσεις που το καλώδιο δεν μπορεί.

### **Συμβατότητα –Προσαρμοστικότητα -Ευελιξία**

Τα WLANs μπορούν να υλοποιηθούν, σε μια ποικιλία από τύπους για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες συγκεκριμένων εγκαταστάσεων και εφαρμογών. Λόγω της ευρείας ανταπόκρισης τους στην

αγορά, οι κατασκευαστές ενσωματώνουν ασύρματη επικοινωνία σε ολοένα και περισσότερες συσκευές (Κινητά τηλέφωνα, PDA, Laptops κλπ).

### **Μειωμένο κόστος**

Ενώ η αρχική επένδυση που απαιτείται για τον εξοπλισμό και την εγκατάσταση ενός WLAN μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να είναι υψηλότερη από το αντίστοιχο κόστος για μια ασύρματη δικτύωση, το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα αποτελούν και τα χαρακτηριστικά των ασυρμάτων δικτύων πολλαπλών αλμάτων (δίκτυα πλέγματος – mesh networks). 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. Κύρια χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας ασυρμάτων δικτύων 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.

## **1.1 Στόχος**

Με στόχο την παρακολούθηση της απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων 802.11a αναπτύξαμε συστήματα συνεχούς και κατά απαίτηση παρακολούθησης. Επίσης, σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε μια σειρά πειραμάτων που σκοπό είχαν την μελέτη της απόδοσης μεμονωμένων κόμβων και συνδέσμων ενός Μητροπολιτικού δικτύου. Η υλοποίηση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με τον κατάλληλο εξοπλισμό (υλικό και λογισμικό) του εργαστηρίου (ICS - TNL). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό (indoor) περιβάλλον και στο πειραματικό Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο του Ηρακλείου (Heraklion MESH - HMESH), το οποίο προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες χρήσης ενός ασύρματου mesh δικτύου.

Κύριοι στόχοι της εργασίας είναι:

- η ανάπτυξη συστημάτων για συνεχή και κατά απαίτηση παρακολούθηση του μητροπολιτικού δικτύου,

- η εξέταση της αλληλεπίδρασης των ασυρμάτων διεπαφών στον ίδιο κόμβο, τόσο σε τοπικό όσο και σε μητροπολιτικό περιβάλλον,
- η μελέτη της απόδοσης των ασυρμάτων συνδέσμων (links), όσον αφορά τα: ρυθμό διεκπεραίωσης (throughput), απώλειες πακέτων (packet losses) και χρόνο απόκρισης (latency), συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης (transmission rate) και της εκπεμπόμενης ισχύος της διεπαφής (transmit power - txpower).

## 1.2 Περίληψη εργασίας

Η εμπειρία μας έχει δείξει ότι είναι σημαντικό να παρακολουθούμε συνεχώς τους ασύρματους συνδέσμους ενός mesh δικτύου, καθώς αυτό μας επιτρέπει γρήγορα και εύκολα να αναγνωρίζουμε και να καταλαβαίνουμε τυχών ανωμαλίες στην συμπεριφορά των συνδέσμων του δικτύου. Αυτός είναι και ο λόγος που αναπτύξαμε ένα αυτόνομο web interface σύστημα μέτρησης και παρακολούθησης της απόδοσης διαφόρων σημαντικών μετρικών (όπως ποιότητας συνδέσμου, ρυθμό μετάδοσης, καθυστέρηση διάδοσης, ρυθμό διεκπεραίωσης, λάθη μετάδοσης) του πειραματικού Ασύρματου Μητροπολιτικού Δικτύου. Παρακολουθώντας την συμπεριφορά του δικτύου από το σύστημά μας διαπιστώνουμε:

- ασυμμετρία των συνδέσμων,
- διαφοροποίηση κατά την διάρκεια της ημέρας της ποιότητας του συνδέσμου (link quality) και του ρυθμού μετάδοσης,
- διαφορά της διακύμανσης της ποιότητας του συνδέσμου σε κάθε σύνδεσμο.

Παράλληλα με το σύστημα παρακολούθησης, αναπτύξαμε και ένα κατά απαίτηση (on demand) σύστημα μέτρησης της απόδοσης. Σε αυτό, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον σύνδεσμο, τη μέτρηση (καθυστέρηση διάδοσης, ρυθμό διεκπεραίωσης) και τις παραμέτρους (αριθμό πειραμάτων, διάρκεια πειραμάτων) που επιθυμεί καθώς όλα βρίσκονται στη διάθεση του. Βασική λειτουργία του κατά απαίτηση συστήματος είναι η δυνατότητα που μας παρέχει για μετρήσεις ροών πολλαπλών αλμάτων (multi-hop flows). Η παραπάνω λειτουργία αποτελεί και τη διαφορά του από το προηγούμενο σύστημα.

Χρησιμοποιώντας έναν κόμβο πολλαπλών ραδιοεπαφών διαπιστώσαμε ότι ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός των διεπαφών (υλικό) δεν επηρεάζει την απόδοση λειτουργίας των καρτών. Δηλαδή, δεν υπάρχουν ηλεκτρικές παρεμβολές λόγω του υλικού στις διεπαφές. Αυτό διαπιστώθηκε καθώς



περιορίσαμε τις παρεμβολές και τις απώλειες του μέσου μετάδοσης, συνδέοντας τις εξόδους των διεπαφών ενός κόμβου μέσω καλωδίων μεταφοράς σήματος (pigtails) και εξασθενητών (attenuators) με τις εισόδους των διεπαφών άλλων κόμβων. Το υλικό (hardware) των κόμβων συνεπώς, μπορεί να υποστηρίξει χωρίς πρόβλημα (μέγιστο θεωρητικό ρυθμό διεκπεραίωσης) την ταυτόχρονη λειτουργία και των τεσσάρων ασυρμάτων διεπαφών ενός κόμβου. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας πραγματικές κεραιές, αν οι διεπαφές του κόμβου λειτουργούν ταυτόχρονα, επηρεάζονται μεταξύ τους όταν:

- η απόσταση των αντίστοιχων κεραιών είναι μικρή,
- η απόσταση των καναλιών λειτουργίας των διεπαφών είναι μικρή.

Καθώς αυξάνεται η απόσταση των κεραιών ή των καναλιών μειώνεται η επίδραση στο ρυθμό διεκπεραίωσης των αντίστοιχων συνδέσμων. Αυτό συμβαίνει ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης της ροής των δεδομένων των συνδέσμων σε τοπικό περιβάλλον. Στο Μητροπολιτικό δίκτυο από την άλλη, στην περίπτωση αντίθετης κατεύθυνσης δύο ροών δεδομένων (δηλαδή μία διεπαφή δέκτης και μία πομπός), σε δύο συνδέσμους του ίδιου κόμβου, περισσότερο επηρεάζεται ο σύνδεσμος που λαμβάνει (διεπαφή δέκτη), όταν και οι δύο (σύνδεσμοι) λειτουργούν στα ίδια ή σε γειτονικά κανάλια. Αυτό συμβαίνει γιατί η εξασθενημένη ισχύς του σήματος λόγω της απόστασης (δέκτης), σε σχέση με την ισχυρή ισχύ εκπομπής (πομπός) της άλλης διεπαφής, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία παρεμβολής όταν τα κανάλια λειτουργίας (ζώνη συχνοτήτων) των δύο διεπαφών επικαλύπτονται. Όμως, σε περίπτωση που οι δύο διεπαφές του κόμβου στέλνουν και οι δύο ταυτόχρονα, ή λαμβάνουν ταυτόχρονα, η επίδραση στους αντίστοιχους συνδέσμους είναι αμελητέα ανεξαρτήτως της απόστασης των καναλιών.

Τέλος, στα πλαίσια της εργασίας μελετήσαμε την συμπεριφορά συνδέσμων, διαφορετικού μήκους, του Μητροπολιτικού δικτύου. Ειδικότερα, ερευνήσαμε την συμπεριφορά:

- της απώλειας πακέτων (packet losses),
- του ρυθμού διεκπεραίωσης και
- του χρόνου απόκρισης (TCP Latency),

συναρτήσεως της ισχύος εκπομπής και του ρυθμού μετάδοσης. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με και χωρίς αναμεταδόσεις του επιπέδου MAC. Οι απώλειες αυξάνονται καθώς μειώνεται η ισχύς εκπομπής. Επίσης, αυξάνονται όσο αυξάνουμε τον ρυθμό μετάδοσης. Ο ρυθμός διεκπεραίωσης και ο χρόνος απόκρισης παρουσιάζουν βέλτιστη τιμή σε συγκεκριμένο για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης. Διαπιστώθηκε και στις τρεις μετρίκες ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα όταν

ορίζεται κατάλληλα ο ρυθμός μετάδοσης (fixed rate) παρά όταν λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης (autorate algorithm).

Χρονική συσχέτιση των απωλειών υφίσταται στους συνδέσμους του Ασύρματου Μητροπολιτικού δικτύου. Η διακύμανση της απώλειας πακέτων ανά μονάδα χρόνου μειώνεται όταν οι μετρήσεις είναι σε μεγάλα χρονικά διαστήματα (λεπτά). Ουσιαστικά, η διακύμανση ομαλοποιείται όταν υπολογίζεται η μέση τιμή (averaging) όλο και μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων (από δευτερόλεπτα σε λεπτά). Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου παρατηρείται αποσύνδεση του πελάτη (client) από το σημείο πρόσβασης (Access Point - AP), εξαιτίας του χαμηλού λόγου του σήματος προς το θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) παρουσιάζεται έκρηξη λαθών (100% packet loss), η οποία διαρκεί όσο χρειάζεται για να συνδεθούν ξανά ασύρματα οι δύο κόμβοι. Τέλος, η συμπεριφορά των απωλειών δεν είναι ίδια καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, καθώς υπάρχουν παρεμβολές από άλλα γειτονικά ασύρματα δίκτυα.

### 1.3 Σύγκριση με προηγούμενες εργασίες

Τελευταία, υπάρχουν πολλά ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα σε όλο τον κόσμο με αρκετά από αυτά να έχουν υλοποιηθεί αποκλειστικά για πειραματικές μελέτες. Ένα από αυτά είναι το Digital Gangetic Plains πειραματικό (test-bed) ασύρματο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από κόμβους με 802.11b διεπαφές εκτείνεται σε μια αγροτική περιοχή και αποτελείται από 8 ζεύξεις από 1 έως 37 Km [4]. Επίσης, άλλα τέτοια δίκτυα είναι: το Roofnet το οποίο αποτελείται από κόμβους με μία μόνο διεπαφή 802.11b ο καθένας και εκτείνεται σε μια απόσταση 4 Km<sup>2</sup> [5], το WiLDNet (WiFi-based Long Distance) με ζεύξεις 50 έως 100 Km [9], και το Quail Ridge του οποίου οι κόμβοι είναι κατανεμημένοι σε μια έκταση 2000 acres [10]. Βασική διαφορά των προαναφερθέντων δικτύων από το πειραματικό Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου είναι ότι σε κανένα δεν εφαρμόζεται το πρότυπο 802.11a.

Παρόμοιες με εμάς μελέτες για την εξάρτηση της απόδοσης των πολλαπλών διεπαφών ενός κόμβου από τις ηλεκτρικές παρεμβολές που προκαλεί το υλικό του κόμβου και των διεπαφών έχουν γίνει στο [8], με αντίθετα όμως από εμάς συμπεράσματα. Η επίδραση της απόδοσης των συνδέσμων από την παρεμβολή ίδιων ή επιαλυπτόμενων καναλιών εξετάζεται στα [4], [5], [7], [8] και [12], με διαφορετικό τρόπο από εμάς, αλλά με παρόμοια συμπεράσματα.

Προηγούμενες έρευνες όσον αφορά την μελέτη τις εξάρτησης του ρυθμού απωλειών των πακέτων από τον ρυθμό μετάδοσης έχουν γίνει στα [4], [5] και [6]. Η διαφορά τους με εμάς είναι ότι εξετάζουν 802.11b συνδέσμους (ενώ εμείς 802.11a). Επιπλέον, σε κανένα από αυτά τα άρθρα δεν γίνεται μελέτη για την εξάρτηση του ρυθμού απωλειών των πακέτων από τον ρυθμό μετάδοσης έχοντας ενεργοποιήσει κάποιον αλγόριθμο αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης (autorate algorithm). Επιπροσθέτως, στα [4], [5], [6] εξετάζεται η εξάρτηση του ρυθμού απωλειών των πακέτων από το SNR, αντί συναρτήσει της ισχύος εκπομπής των διεπαφών που εξετάζουμε εμείς. Η χρονική συσχέτιση των απωλειών ερευνάται στα [4], [5] με διαφορετικό από εμάς τρόπο αλλά με αποτελέσματα παρόμοια με τα δικά μας.

## 1.4 Δομή της εργασίας

Στην παρούσα εργασία, αρχικά στο δεύτερο Κεφάλαιο, περιγράφεται η βασική λειτουργία των πρωτόκολλων ασυρμάτων δικτύων IEEE 802.11 και 802.11a, με ιδιαίτερη έμφαση στο επίπεδο MAC.

Το τρίτο Κεφάλαιο αναφέρεται στο Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο του Ηρακλείου. Δίνεται η περιγραφή των κόμβων και των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται. Περιγράφεται το δίκτυο ελέγχου και οι τρόποι ανάκαμψης του κόμβου σε περίπτωση προβλήματος. Παράθετονται εμπειρίες από την ανάπτυξη του δικτύου και συμβουλές για επίλυση συχνών προβλημάτων. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στα χαρακτηριστικά του madwifi driver που υλοποιεί και εφαρμόζει τα πρωτοκολλά 802.11 πάνω στους κόμβους των ασυρμάτων δικτύων μας.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα παρακολούθησης του ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου. Αναφέρεται ο λόγος που έγιναν και το πώς μας βοήθησαν στον έλεγχο και στην διαχείριση του δικτύου.

Το πέμπτο Κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται στην παρεμβολή ανάμεσα στις ασύρματες διεπαφές του ίδιου κόμβου. Παρουσιάζεται η εξάρτηση της απόδοσης τους από υλικό των διεπαφών (ηλεκτρικές παρεμβολές) και η επίδραση των γειτονικών καναλιών στην απόδοση των συνδέσμων. Δίνεται η περιγραφή των πειραμάτων και των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, σε τοπικό αλλά και σε μητροπολιτικό περιβάλλον.

Η μελέτη της απόδοσης των συνδέσμων του μητροπολιτικού δικτύου παρουσιάζεται στο έκτο Κεφάλαιο. Αναφέρονται οι αλλαγές στον κώδικα του madwifi driver. Δίνεται αναλυτική περιγραφή των πειραμάτων που έγιναν για τις διάφορες μετρικές και προβάλλονται τα αποτελέσματα της

απόδοσης σε γραφικές παραστάσεις. Τέλος, αναφέρεται η μελέτη για την συσχέτιση των απωλειών των πακέτων.

Το έβδομο Κεφάλαιο αναφέρεται σε προηγούμενες εργασίες και έρευνες σχετικές με την δικιά μας και τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που αποκομίσαμε από την εργασία.

## *Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο*

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφουμε την βασική λειτουργία των πρωτόκολλων ασυρμάτων δικτύων IEEE 802.11 και 802.11a, με ιδιαίτερη έμφαση στο επίπεδο MAC.

### **2.1 Τεχνολογίες Ασυρμάτων Τοπικών Δικτύων**

Ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network - WLAN) είναι ένα σύστημα επικοινωνίας δια μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ σταθερών ή κινητών χρηστών και επιτρέπει τη μεταξύ τους διασύνδεση και μεταφορά δεδομένων. Τα ασύρματα δίκτυα και γενικότερα οι ασύρματες συνδέσεις αποτελούν μία ιδιαίτερα ευέλικτη λύση, ως επέκταση των ενσύρματων δικτύων ή ακόμα ως εναλλακτική λύση για υλοποίηση ολοκληρωμένων δικτύων.

Πρωτόκολλο επικοινωνίας, είναι ένα σύνολο κανόνων οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο διασύνδεσης των συστημάτων που επικοινωνούν, καθώς και τον τρόπο πρόσβασης των κόμβων στο μέσο μετάδοσης.

Ασύρματα δίκτυα υπάρχουν εδώ και αρκετά χρόνια από διάφορους κατασκευαστές, αλλά η ταχύτητα που προσέφεραν (<1,5 Mbps) ήταν μικρή και δεν υπήρχε συμβατότητα μεταξύ τους. Την τελευταία δεκαετία πολλά είναι τα πρότυπα που διεκδικούν ένα κομμάτι της αγοράς. Bluetooth στα 2.4 GHz, HiperLAN (High Performance Radio LAN) στα 5 GHz, HomeRF στα 2.4 GHz, WiFi 802.11a, 802.11b, 802.11g, LMDS (Local Multipoint Distribution Service) στα 25-31GHz, MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service) στα 2.5-2.7 GHz. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που βοήθησε στο γεγονός της συνεχόμενης ανάπτυξης της ασύρματης δικτύωσης, ήταν η συνεχής βελτίωση στα πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκληρωσης ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα γνωστά VLSI (Very Large Scale Integration), τα οποία οδήγησαν σε μείωση του μεγέθους, της κατανάλωσης ισχύος και του κόστους των κυκλωμάτων υψηλών συχνοτήτων (RF-Radio Frequency). Επίσης, οι νέες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων (DSP), οι βελτιωμένες κεραιές (smart antennas) και οι αλγόριθμοι κωδικοποίησης για διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης, συνέβαλαν επίσης στην ασύρματη «επανάσταση».

Όσον αφορά την τυποποίηση της μετάδοσης στα ασύρματα τοπικά δίκτυα 802.11, το πρώτο διεθνές πρότυπο δημοσιεύτηκε το 1997 από το Institute of Electronics and Electrical Engineering

(IEEE). Καθόριζε δύο βασικούς ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps. Αργότερα, με τα 802.11b και 802.11a οι ρυθμοί μετάδοσης αυξήθηκαν φθάνοντας τα 11 και τα 54 Mbps αντίστοιχα.

## 2.2 Γενικά χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE 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 [1] 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 [1] και 802.11b [2] δημοσιεύτηκαν το 1999. Αργότερα το 2003 ολοκληρώθηκε το πρότυπο 802.11g [3], 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 I 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 I: Τα πρότυπα 802.11 και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους

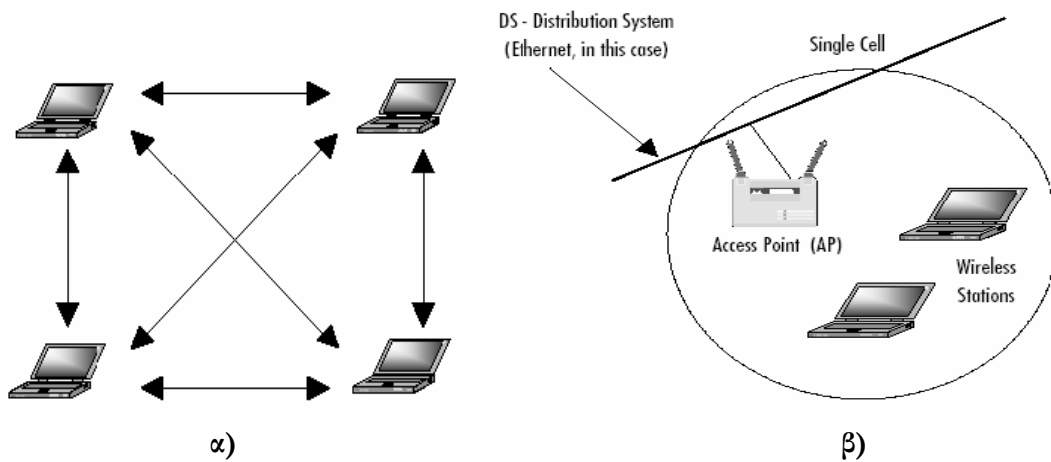
## 2.3 Αρχιτεκτονική στο 802.11

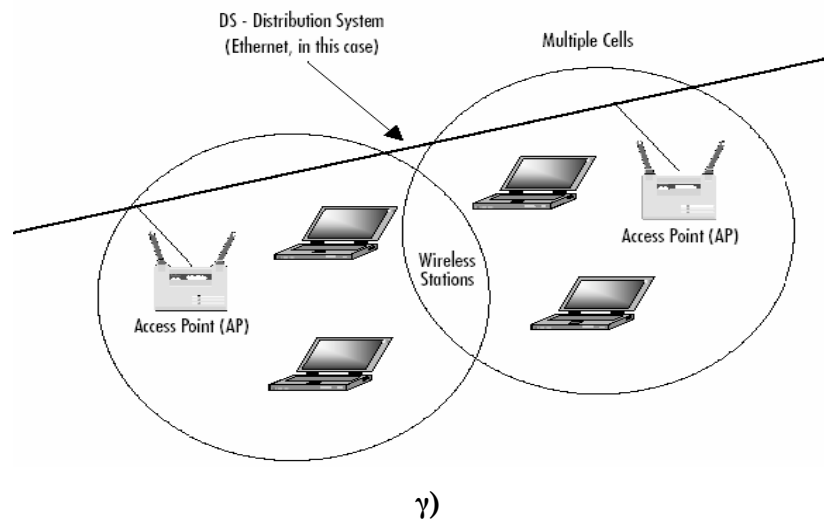
### Σταθμοί WLANs

Το βασικότερο στοιχείο ενός ασύρματου δικτύου ο είναι σταθμός (station - STA). Είναι οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει την λειτουργικότητα του προτύπου 802.11, ως προς τα επίπεδα MAC και PHY. Σχεδόν πάντα οι λειτουργίες του 802.11 υλοποιούνται με υλικό και λογισμικό πάνω σε μία κάρτα διεπαφής δικτύου (network interface card - NIC). Ο σταθμός μπορεί να είναι ένας φορητός υπολογιστής, μία συσκευή χειρός ή ένα Access Point (AP) και να είναι κινούμενος, ή στατικός.

### Τοπολογίες του IEEE 802.11

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





**Εικόνα 2: 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 ad-hoc mode όταν οι ασύρματοι τερματικοί σταθμοί επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, είναι κινητοί και δεν υπάρχει διασύνδεση με το ενσύρματο δίκτυο. Τότε το σύνολο υπηρεσιών ονομάζεται ανεξάρτητο BSS (independent BSS - IBSS). Αντίθετα, σε infrastructure mode, τα ασύρματα τερματικά συνδέονται με το ενσύρματο δίκτυο διά μέσου 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). Η Εικόνα 2 απεικονίζει τις τοπολογίες των ασυρμάτων δικτύων.

## 2.4 Τύποι και δομές πλαισίων

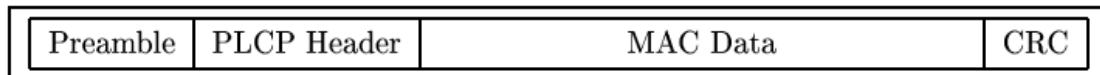
Στο 802.11 υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι πλαισίων (frames):

- **Πλαίσιο δεδομένων (Data Frame):** χρησιμοποιείται για μεταφορά δεδομένων,
- **Πλαίσιο ελέγχου (Control Frame):** χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο,



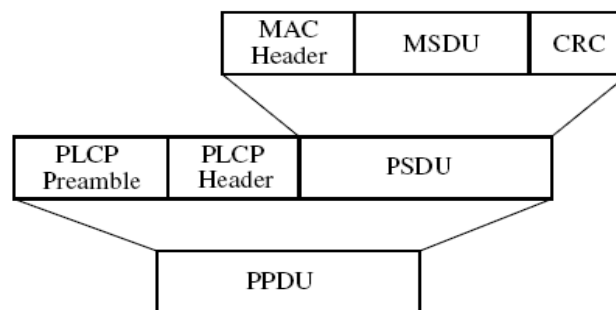
- **Πλαίσιο διαχείρισης (Management Frame):** χρησιμοποιείται όπως το πλαίσιο δεδομένων για την ανταλλαγή όμως διαχειριστικής πληροφορίας, αλλά δεν προωθείται στα παραπάνω επίπεδα.

Η Εικόνα 3 δείχνει τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα πλαίσιο του 802.11.



**Εικόνα 3: Πλαίσιο 802.11**

Η μορφή ενός data frame (PHY Protocol Data Unit - PPDU) απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Η μορφή αυτή είναι κοινή στο κάθε 802.11a/b/g PHY πρότυπο. Ένα PPDU πλαίσιο αποτελείται από μία PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) εισαγωγή (preamble), μία PLCP επικεφαλίδα και ένα PSDU (Physical Layer Data Unit). Κάθε PSDU αποτελείται από την επικεφαλίδα MAC, το κυρίως σώμα του πλαισίου (MSDU) και από τα 32 bits που συνθέτουν το CRC (Cyclic Redundancy Check). Επιπλέον bits (Tail/Pad bits), τα οποία δεν εμφανίζονται στο σχήμα προσαρτώνται μετά το CRC, όταν το σχήμα διαμόρφωσης είναι το OFDM (802.11a/g).



**Εικόνα 4: PPDU IEEE 802.11 frame format**

## 2.5 Ανίχνευση σφαλμάτων

Το PLCP preamble σχεδιάστηκε προσεχτικά ώστε να ενεργοποιεί τον συγχρονισμό. Αποτυχία στην ανίχνευση του πλαισίου ή και στον συγχρονισμό έχει σαν αποτέλεσμα ένα σφάλμα του φυσικού επιπέδου (PHY error).

Η επικεφαλίδα PLCP μεταφέρει την απαραίτητη πληροφορία που χρειάζεται στον παραλήπτη ώστε να μπορέσει σωστά να αποκωδικοποιήσει τα υπόλοιπα περιεχόμενα του πλαισίου. Περιέχει το μέγεθος του πλαισίου όπως επίσης τον ρυθμό (διαμόρφωση/σχήμα κωδικοποίησης) με τον οποίο το PSDU μεταδόθηκε (1, 2, 5.5 και 11 Mbps για 802.11b PHY, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, και 54 για OFDM 802.11a/g PHY). Πρέπει να σημειωθεί ότι η PLCP επικεφαλίδα σε κάθε περίπτωση μεταδίδεται σύμφωνα με μία δεδομένη (fixed) διαμόρφωση/σχήμα κωδικοποίησης (basic rate). Μη ικανότητα σωστής αποκωδικοποίησης της PLCP επικεφαλίδας έχει σαν αποτέλεσμα ξανά τη δημιουργία ενός PHY error.

Ο έλεγχος MAC CRC πραγματοποιείται μόνο αν το πλαίσιο έχει συγχρονιστεί σωστά και η PLCP επικεφαλίδα έχει ληφθεί χωρίς λάθη. Πρέπει να τονιστεί ότι η ύπαρξη ειδοποίησης ενός CRC error σε ένα πλαίσιο που μόλις έχει ληφθεί, έμμεσα μας λέει ότι δεν έχει συμβεί PHY error στο PLCP. Πρέπει να τονίσουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αναλογία των CRC errors. Όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης σε ένα συγκεκριμένο SNR, τόσο υψηλότερη είναι η πιθανότητα ύπαρξης CRC error.

## 2.6 Μέθοδος πρόσβασης στο μέσο (802.11 MAC layer)

Στο MAC επίπεδο του 802.11, υπάρχουν αρκετές λειτουργίες που διαχειρίζονται και συντηρούν την επικοινωνία μεταξύ των ασυρμάτων σταθμών του 802.11. Η αρχική λειτουργία του MAC layer είναι να ελέγχει και να συντονίζει την πρόσβαση στο διαμοιραζόμενο ασύρματο φυσικό κανάλι, όπως επίσης να υποστηρίζει την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων πάνω από το ασύρματο φυσικό μέσο. Επιπλέον, είναι αρμόδιο και για άλλες λειτουργίες. Αυτές περιλαμβάνουν το fragmentation, encryption, power management, synchronization (τεμαχισμό, κρυπτογράφηση, διαχείριση ισχύος και συγχρονισμό). Επιπρόσθετα, το MAC layer είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία περιαγωγής όπου υπάρχουν περισσότερα από ένα AP.

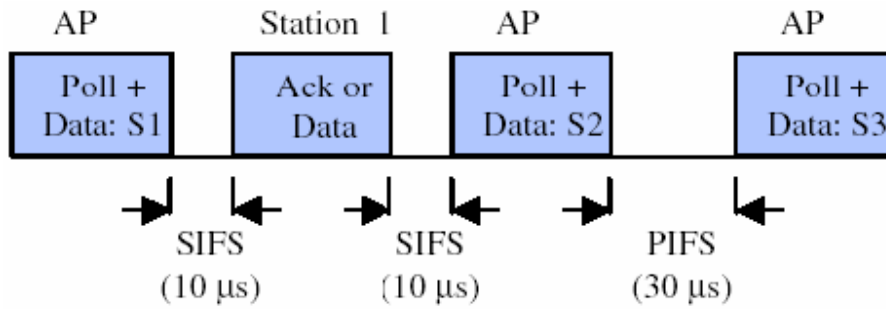
Η μέθοδος που υποστηρίζεται από το 802.11 πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο φυσικό μέσο, είναι το PCF (Point Coordination Function) και DCF (Distributed Coordination Function) με Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) σε αναλογία με το Ethernet που υλοποιεί το CSMA/CD (Collision Detection). Το CSMA στο Ethernet λειτουργεί ως ακολούθως: όταν κάποιος επιθυμεί να στείλει δεδομένα, ελέγχει αν το κανάλι είναι κατειλημμένο από μια άλλη μεταφορά δεδομένων. Αν είναι, τότε περιμένει ένα τυχαίο χρονικό περιθώριο (μικρό) σύμφωνα με

τον αλγόριθμο exponential random backoff. Ο τρόπος πρόσβασης αυτός δεν μπορεί να είναι αποδοτικός στο 802.11 για δύο λόγους:

- η υλοποίηση αυτής της μεθόδου θα απαιτούσε ραδιοφωνικούς πομπούς που θα είχαν την δυνατότητα Full – Duplex επικοινωνίας (αποστολή και λήψη ταυτόχρονα), κάτι το οποίο θα αύξανε το κόστος,
- σε ένα ασύρματο περιβάλλον δεν μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι όλοι οι σταθμοί θα μπορούν να ακούν ο ένας τον άλλον. Ένας σταθμός που ελέγχει το μέσο και το βρίσκει ελεύθερο, δεν σημαίνει και ότι είναι ελεύθερο στην περιοχή του λήπτη.

Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά από τι αποτελείται ο μηχανισμός. Το 802.11 ορίζει πέντε διαφορετικά χρονικά διαστήματα για συγχρονισμό στο MAC επίπεδο, το Short Interframe Space (SIFS), το slot time, το Priority Interframe Space (PIFS), το Distributed Interframe Space (DIFS), και το Extended Interframe Space (EIFS). Τα δύο από αυτά θεωρούνται βασικά και καθορίζονται από το MAC: το χρονικό διάστημα SIFS και το slot time. Τα υπόλοιπα διαστήματα καθορίζονται βάσει των παραπάνω διαστημάτων. Το SIFS είναι το μικρότερο όλων των χρονικών αυτών διαστημάτων, ακολουθούμενο από το slot time, το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί σαν η μονάδα χρόνου για το MAC του 802.11, παρόλο που το πρωτόκολλο δεν βασίζεται σε αρχιτεκτονική με χρονικές «θυρίδες» (time slots). Ειδικά στο 802.11b, οι χρόνοι SIFS και slot είναι 20μs, χρόνος που επιλέχθηκε έτσι ώστε να δώσει ένα λογικό σε διάρκεια διάστημα για τις καθυστερήσεις διάδοσης και επεξεργασίας από τις συσκευές. Ο χρόνος PIFS ισούται με τον χρόνο SIFS επαυξημένο κατά ένα slot και ο DIFS κατά δύο slots. Ο χρόνος EIFS είναι μεγαλύτερος και από τους τέσσερις προηγούμενους, και χρησιμοποιείται για την επανεικπομπή πακέτων που ελήφθησαν λανθασμένα.

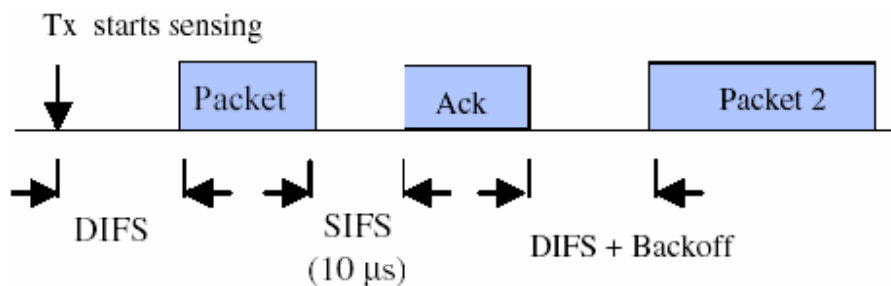
Το 802.11 υποστηρίζει δύο τρόπους λειτουργίας: τον PCF και τον DCF. Με την πρώτη μέθοδο λειτουργίας, το κεντρικό AP ενός BSS στέλνει μηνύματα στους σταθμούς πελάτες, κάνοντας Polling σε κάθε ένα από αυτούς, ρωτώντας στην ουσία για το αν έχει δεδομένα για αποστολή ή όχι. Αν ο σταθμός απαντήσει, μπορεί να στείλει την θετική του απάντηση (ACK) στο ίδιο πακέτο με τα δεδομένα προς αποστολή. Αν δεν απαντήσει εντός του χρονικού ορίου SIFS, τότε το Access Point προχωρά στον επόμενο σταθμό.



Εικόνα 5: Μέθοδος PCF στο 802.11b MAC

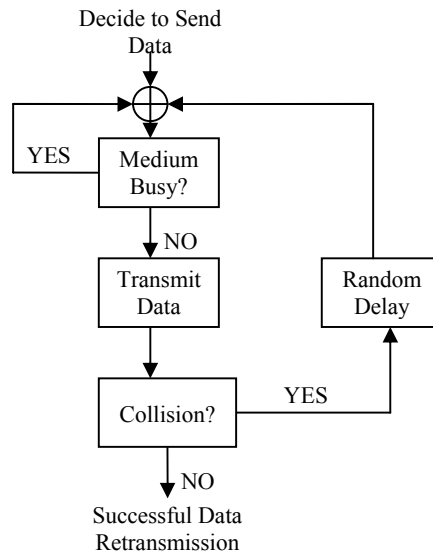
Τα δεδομένα που είναι ευαίσθητα στο χρόνο όπως η μετάδοση φωνής και video σε πραγματικό χρόνο, υποστηρίζονται από το επίπεδο του MAC του προτύπου 802.11 με την λειτουργία συντονισμού σημείου *PCF*.

Στην μέθοδο λειτουργίας DCF, το 802.11 χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό Αποφυγής Συγκρούσεων μαζί με αναγνώριση βεβαίωσης λήψης των πακέτων που στέλνονται. Αν ο πομπός, κατά την έναρξη διαδικασία αποστολής, δει ότι το μέσο είναι ελεύθερο (κανείς δεν χρησιμοποιεί το κανάλι) για χρόνο ίσο με DIFS, τότε αρχίζει την εκπομπή. Σε αντίθετη περίπτωση, συνεχίζει να ελέγχει το κανάλι για να δει αν βρίσκεται σε κατάσταση busy ή idle. Εφόσον βρει το κανάλι ελεύθερο για χρόνο DIFS, τότε ξεκινά να μετράει τον χρόνο χρήσης του καναλιού σε μονάδες slot time, παράγει τυχαία χρονικά διαστήματα αναμονής σε μονάδες slot time, σύμφωνα με κατάλληλο αλγόριθμο, και συνεχίζει τον έλεγχο της κατάστασης του καναλιού. Κατά το τελευταίο βήμα, για κάθε time slot που ο πομπός βρίσκει ελεύθερο το κανάλι, ο τυχαίος χρόνος αναμονής μειώνεται κατά ένα time slot. Όταν ο χρόνος αυτός μηδενιστεί, τότε και μόνο ο πομπός μπορεί να εκινήσει την διαδικασία μετάδοσης. Με αυτή τη μέθοδο αποφεύγονται οι συγκρούσεις πακέτων διαφορετικών εκπομπών, αλλά και αποκλείεται η μονοπώληση του καναλιού από έναν και μόνο σταθμό που θα ίσως να προσπαθούσε συνεχείς εκπομπές.



Εικόνα 6: Μέθοδος DCF στο 802.11b MAC

Ο δέκτης θα ελέγξει την «υπογραφή» CRC του πακέτου που πήρε, και αν την βρει έγκυρη, τότε στέλνει ένα πακέτο ACK στον αποστολέα. Αν ο αρχικός αποστολέας δεν πάρει ACK πακέτο, τότε συνεχίζει να επανεκπέμπει την πληροφορία ως που να λάβει ένα ACK ή να σταματήσει να προσπαθεί και να απορρίψει το αρχικό πακέτο.



Εικόνα 7: Απλουστευμένος αλγόριθμος εκπομπής

## 2.7 IEEE 802.11a

Καθώς όλη η εργασία στοχεύει στην εξαγωγή συμπερασμάτων από μετρήσεις σε ασύρματα δίκτυα της γενιάς 802.11a, θεωρήσαμε σημαντικό να αναφέρουμε τις κυριότερες λειτουργίες του συγκεκριμένου προτύπου.

Το 802.11a [1] 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. Χρησιμοποιεί την ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) για μετάδοση. 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.

Η ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz χωρίζεται σε δύο περιοχές με ξεχωριστή επιτρεπόμενη μέγιστη ισχύ η κάθε μία. Συγκεκριμένα η χαμηλή ζώνη εκτείνεται στην περιοχή των 5.18 - 5.32 GHz και η υψηλή στην περιοχή των 5.5 - 5.825GHz. Η χαμηλή ζώνη πρέπει να χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους και η υψηλή σε εξωτερικούς. Σε κάθε χώρα όμως είναι διαθέσιμο ένα τμήμα της υψηλής ζώνης. Στην Ελλάδα είναι διαθέσιμη η ζώνη 5.5 – 5.7 GHz.

Αφού η ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz χρησιμοποιείται τόσο πολύ, η χρήση της ζώνης των 5 GHz δίνει στο 802.11a ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Παρόλα αυτά αυτή η υψηλή συχνότητα φέροντος φέρει επίσης ένα μικρό μειονέκτημα. Το ωφέλιμο φάσμα του 802.11a είναι μικρότερο από αυτό των 802.11b/g, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι τοίχοι και άλλα στερεά αντικείμενα απορροφούν τις μεγάλες συχνότητες πιο εύκολα. Από την άλλη πλευρά, το OFDM έχει θεμελιώδη πλεονεκτήματα διάδοσης σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath). Τέλος, οι υψηλότερες συχνότητες απαιτούν μικρότερες κεραίες, δίνοντας ακόμα ένα πλεονέκτημα στο 802.11a.

## 2.8 Ασύρματα δίκτυα πλέγματος

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος αποτελούνται από ομότιμους κόμβους πλέγματος (Mesh Nodes) που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ασύρματων ζευξων τεχνολογίας WiFi. Οι κόμβοι πλέγματος διαθέτουν πολλαπλές ασύρματες διεπαφές που επιτρέπουν τη διασύνδεση ενός κόμβου με πολλούς άλλους. Κάποιοι από τους κόμβους διαθέτουν ασύρματες διεπαφές για διασύνδεση τερματικών συσκευών (όπως φορητούς υπολογιστές ή υπολογιστές χειρός - PDAs), ενώ κάποιοι άλλοι διαθέτουν συνδέσεις με το διαδίκτυο. Θα μπορούσε κάποιος απλοϊκά να φανταστεί ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος σαν το διαδίκτυο, ένα πολύπλοκο δίκτυο πολλαπλών μονοπατιών και πολλαπλών συνδέσεων, μόνο που στην περίπτωσή μας οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων είναι ασύρματες.

Κύρια χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας ασύρματων δικτύων 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 (μονοπάτι) να μεταφέρουν τα δεδομένα στο τελικό τους προορισμό.

Σε αντίθεση με τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν ιεραρχική δομή που περιλαμβάνει συσκευές με διαφορετική λειτουργία και πολυπλοκότητα. Μια κινητή

συσκευή συνδέεται με έναν σταθμό βάσης (Base Station). Ένας ή περισσότεροι σταθμοί βάσης συνδέονται μέσω σταθερών ενσύρματων ή ασύρματων συνδέσεων με έναν ελεγκτή σταθμών βάσης (Base Station Controller). Οι ελεγκτές σταθμών βάσης συνδέονται με κέντρα μεταγωγής (Mobile Switching Centers), τα οποία ελέγχουν κεντρικά όλες τις λειτουργίες του δικτύου. Αντίθετα, στα ασύρματα δίκτυα πλέγματος δεν υπάρχει ιεραρχικός διαχωρισμός και οντότητες σε υψηλότερο επίπεδο που να ελέγχουν τις υπόλοιπες. Όλες οι οντότητες είναι ομότιμες και μετέχουν με καταναμημένο τρόπο στις λειτουργίες του δικτύου, όπως είναι η δρομολόγηση των δεδομένων, η ασφάλεια του δικτύου, κτλ. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι μια τέτοια αρχιτεκτονική είναι πιο σύνθετη, προσδίδει όμως νέες δυνατότητες όπως τη δυναμική επιλογή διαδρομής ανάμεσα σε πολλά διαθέσιμα μονοπάτια μεταξύ κόμβων (δυνατότητα που καθιστά τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος λιγότερο ευάλωτα σε προβλήματα λειτουργίας καθώς και σε κακόβουλες επιθέσεις).

Με βάση τα παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων πλέγματος καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων. Ενδεικτικά:

- Ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο: Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος μπορούν να παρέχουν ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, αξιοποιώντας αθροιστικά τις διασυνδέσεις ενός αριθμού κόμβων του με το ενσύρματο δίκτυο. Μάλιστα, τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος μπορεί να υποστηρίξουν ταχύτητες που ξεπερνούν εκείνες της τεχνολογίας ADSL, όπου η ταχύτητα περιορίζεται από το εύρος ζώνης του ενσύρματου καναλιού και την απόσταση του συνδρομητή από το τηλεφωνικό κέντρο, ενώ έχουν σημαντικά μικρότερο κόστος σε σχέση με την τεχνολογία οπτικών ινών.
- Υποστήριξη δημόσιας ασφάλειας: Η καταναμημένη αρχιτεκτονική και λειτουργία τους βοηθάει τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος να είναι ανθεκτικά τόσο σε εξωγενή προβλήματα όσο και σε κακόβουλες επιθέσεις. Έτσι, σε περιπτώσεις φυσικής καταστροφής ή έκτακτων αναγκών, όπου συχνά παρατηρούνται προβλήματα επικοινωνίας με τα κλασικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα δίκτυα κορμού αποτελούν ιδανική εναλλακτική λύση καθώς αφενός δεν πρόκειται να τεθούν εξ ολοκλήρου εκτός λειτουργίας και αφετέρου έχουν τη δυνατότητα αυτόματα και καταναμημένα να επανέλθουν στο βέλτιστο, για τα δεδομένα της κατάστασης, επίπεδο λειτουργίας τους.





## *Κεφάλαιο 3 Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Ηρακλείου (HMESH)*

Τα ασύρματα δίκτυα πολλαπλών καναλιών (συχνοτήτων) έχουν το δυναμικό να παρέχουν μία ευρέως διαδεδομένη και υψηλής ταχύτητας ευρυζωνική πρόσβαση σε αστικές και αγροτικές περιοχές, τόσο στους ακίνητους (fixed) χρήστες, όσο κυρίως σε αυτούς που βρίσκονται σε κίνηση (mobile users). Η βασική καινοτομία είναι το χαμηλό κόστος λειτουργίας και διαχείρισης.



**Εικόνα 8: Ασύρματο Μητροπολιτικό δίκτυο Ηρακλείου**

Με βασικό στόχο την εξέταση θεμάτων που σχετίζονται με την διαχείριση και την απόδοση ενός ασύρματου mesh δικτύου σε ένα πραγματικό μητροπολιτικό περιβάλλον, έχουμε αναπτύξει ένα πειραματικό Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο στην πόλη του Ηρακλείου Κρήτης (Εικόνα 8). Το δίκτυο υποστηρίζεται και χρηματοδοτείται από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, (ΓΓΕΤ) μέσω του ερευνητικού προγράμματος 05-AKMON-80, «Παροχή Ολοκληρωμένων

Υπηρεσιών Σχεδίασης, Διαχείρισης και Ασφάλειας Ασύρματων Δικτύων με Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας».

Αντικειμενικός σκοπός μας είναι η χρήση του δικτύου σαν ένα μητροπολιτικής κλίμακας test-bed, υλοποιημένο με ευρέως κοινό και οικονομικό εξοπλισμό, που περιέχει αστικούς ασύρματους συνδέσμους διαφόρων αποστάσεων εύρους από 1.6 έως 5 Km. Ερευνητικός στόχος είναι να αποτιμήσουμε διάφορες διαδικασίες όπως: βέλτιστη επιλογή καναλιών για αποδοτική χρήση όλου του διαθέσιμου (επιτρεπτού) φάσματος συχνοτήτων, βέλτιστες μετริกές για πρωτοκόλλα δρομολόγησης, εξερεύνησης μηχανισμών στο επίπεδο MAC για εγγύηση της απόδοσης του ασύρματου δικτύου, μέτρηση και παρακολούθηση της απόδοσης του δικτύου σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και η συμπεριφορά του μεταβάλλοντας κάποιες βασικές παραμέτρους (π.χ. εκπεμπόμενη ισχύ). Οι δύο τελευταίες διαδικασίες αποτελούν το περιεχόμενο των κεφαλαίων που ακολουθούν.

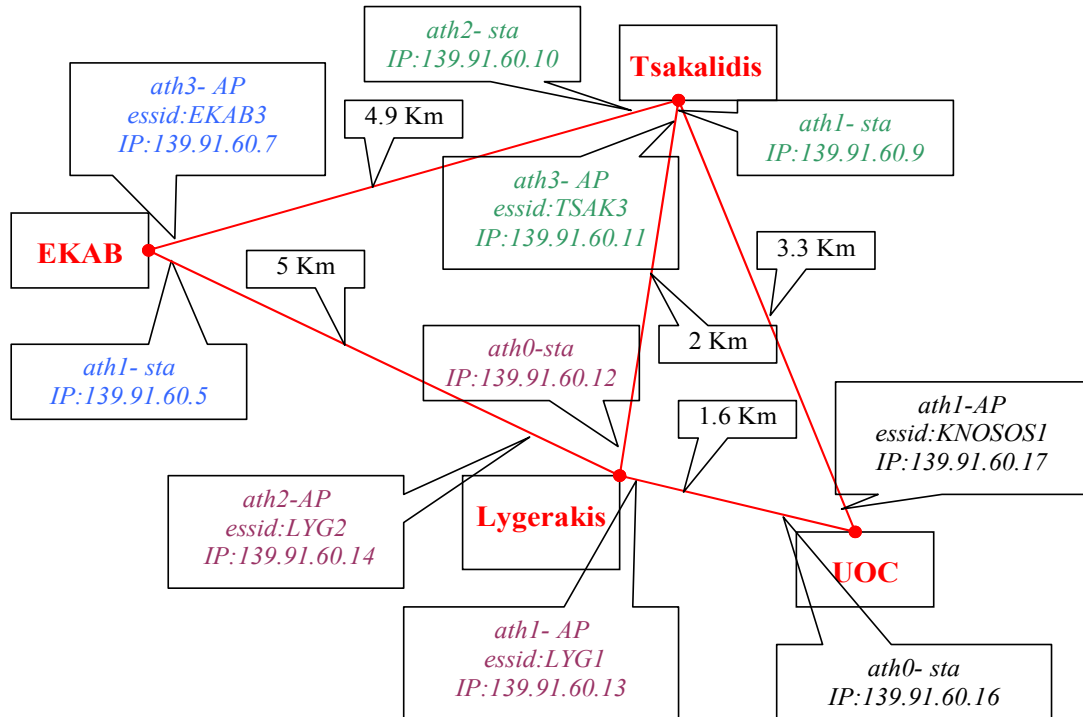
### 3.1 Περιγραφή δικτύου

Το ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο καλύπτει μια ευρεία περιοχή της πόλης του Ηρακλείου περίπου 60 Km<sup>2</sup> και προς το παρόν περιέχει 14 κόμβους. Έξι από αυτούς τους κόμβους είναι core mesh nodes (4 σε πλήρη λειτουργία και 2 υπό κατασκευή). Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των κόμβων είναι η υποστήριξη πολλαπλών ασύρματων διεπαφών, που παρέχει την δυνατότητα σύνδεσης με περισσότερους από ένα κόμβους, χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές. Πλήρης περιγραφή του εξοπλισμού και της εγκατάστασης (hardware and software) των mesh κόμβων ακολουθεί στην επόμενη ενότητα (3.2).

Άλλα 802.11 mesh δίκτυα και δίκτυα μεγάλης απόστασης συμπεριλαμβανομένων όσων βασίζονται σε 802.11b είναι: Digital Gangetic Plains με 1 - 23 Km links [4] (δίκτυο αγροτικής περιοχής), το δίκτυο WiLDNet με 50 – 100 Km links [9], το δίκτυο Roofnet [5], το ασύρματο mesh δίκτυο Quail Ridge [10].

Η Εικόνα 9 που ακολουθεί δίνει την γενική εικόνα του ήδη υπάρχοντος πειραματικού δικτύου. Οι ονομασίες των κόμβων προέκυψαν από τα κτήρια (EKAB - UOC) ή από τα ονόματα των ιδιοκτητών των πολυκατοικιών (Tsakalidis – Lygerakis) που έχουν τοποθετηθεί. Στο σχήμα φαίνονται τα ονόματα των διεπαφών (athx) και η λειτουργία τους (AP ή client - sta). Επίσης, διακρίνεται το αναγνωριστικό (ssid) των δικτύων καθώς και οι διευθύνσεις IP όλων των διεπαφών. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν τέσσερις συγκεκριμένες IP διευθύνσεις (139.91.60.x), όσες και οι

ασύρματες διεπαφές που μπορεί να υποστηρίξει. Τέλος στις ακμές που ενώνουν τους κόμβους αναγράφεται η χιλιομετρική απόσταση μεταξύ δύο κόμβων.



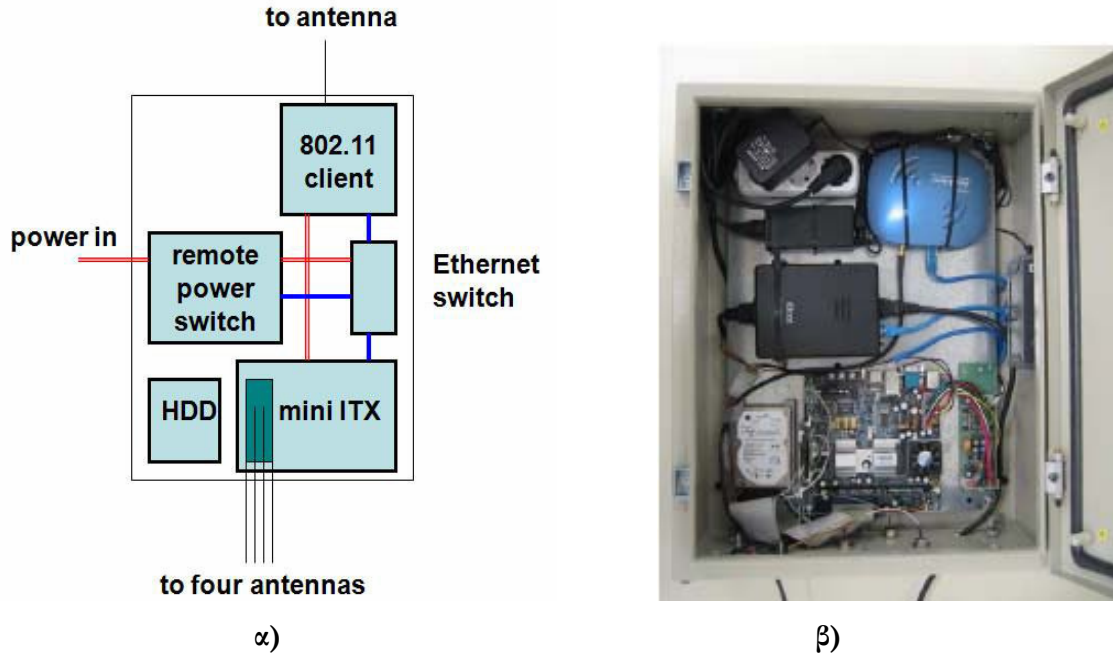
Εικόνα 9: Πληροφορίες διασύνδεσης των κόμβων

### 3.2 Περιγραφή κόμβου (υλικό, λογισμικό)

Κάθε κόμβος είναι ένας μικρός ηλεκτρονικός υπολογιστής, τοποθετημένος μέσα σε ένα μεταλλικό ηλεκτρολογικό κουτί για προστασία από τις καιρικές συνθήκες. Αποτελείται από ένα mini-ITX board (EPIA SP 13000, 1.3 GHz C3 CPU, 512 MB DDR400 memory) και με ένα 40 GB 2.5” HDD. Ένα προσαρμογέα (adapter) PCI σε PCI (Μικρο Tik RouterBOARD 14) ο οποίος φέρει τέσσερις 802.11a/b/g mini PCI adapters (NL-5354 MP PLUS Aries 2, Atheros Based High Power Super A/G dual Band 802.11a/b/g). Οι ασύρματες αυτές κάρτες συνδέονται μέσω pigtaills με τις κεραίες οι οποίες είναι Grid 29 dBi, Panel 21 και 19 dBi ή Sector 18 dBi.

Στο σύστημα αυτό είναι εγκατεστημένη μία διανομή του (open source) λειτουργικού συστήματος Gentoo 2006 [21] i686 (2.6.18-gentoo-r4 kernel). Η λειτουργία των ασυρμάτων κερτών πραγματοποιείται μέσω του madwifi driver [22] (version 0.9.3.3). Τέλος, όλοι οι κόμβοι τρέχουν

τον OLSR daemon [23] (version 0.4.10), ο οποίος υλοποιεί το Optimized Link State Routing (OLSR) πρωτόκολλο, ώστε να γίνεται η δρομολόγηση του ασύρματου δικτύου.



Εικόνα 10: α) Επιμέρους στοιχεία κόμβου, β) Πραγματικός κόμβος



Εικόνα 11: Κόμβος Lygerakis

Στις παραπάνω Εικόνες (10: α, β) φαίνονται τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας κόμβος, όπως επίσης, ένας εγκατεστημένος κόμβος και οι κεραίες του στην Εικόνα 11. Οι κεραίες που είναι

τοποθετημένες σε κάθε κόμβο, και η αποστάσεις των ραδιοσυνδέσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στον επόμενο Πίνακα II.

σύνδεσμος	απόσταση (Km)	κεραία
Ekab-Lygerakis	5.0	29 dBi grid – 21 dBi panel
Ekab-Tsakalidis	4.9	29 dBi grid – 21 dBi panel
Lygerakis-Tsakalidis	2.0	21 dBi – 19 dBi panel
UoC-Lygerakis	1.6	21 dBi – 21 dBi panel
UoC-Tsakalidis	3.3	21 dBi – 19 dBi panel

Πίνακας II: Απόσταση συνδέσμων και κεραιές

### 3.3 Λειτουργία και διαχείριση

Μία από τις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού του δικτύου ήταν να παρέχουμε με ευκολία την δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης ελέγχου και ανάκαμψης του mesh node ακόμα και σε περιπτώσεις που το mini-ITX «ακολουσέ» ή όταν οι ασύρματες διεπαφές του ήταν σε αδρανοποίηση. Για την επίλυση της συγκεκριμένης απαίτησης προσθέσαμε σε κάθε κόμβο ένα AirLive Access Point IEEE 802.11a/g (Εικόνα 10), το οποίο συνδέεται στο ασύρματο δίκτυο διαχείρισης και ελέγχου που λειτουργεί παράλληλα με το πειραματικό mesh δίκτυο.

Επιπρόσθετα, για τον απομακρυσμένο έλεγχο των κόμβων σε περίπτωση προβλήματος, ενσωματώσαμε ένα έξυπνο power switch (Dataprobe iBoot, Εικόνα 10). Η συσκευή αυτή διαθέτει web interface μέσω του οποίου μπορούμε να κάνουμε επανεκκίνηση (reboot) στον κόμβο κόβοντας στιγμιαία το ρεύμα. Το iBoot συνδέεται με καλώδιο Ethernet με το switch, ενώ διαθέτει και δική του IP διεύθυνση. Η λειτουργία του είναι να επικοινωνεί ανά τακτά χρονικά διαστήματα με την Ethernet κάρτα του κόμβου (με ping) και όταν διαπιστώσει συνεχόμενα σφάλματα στην επικοινωνία να κόβει στιγμιαία το ρεύμα ώστε ο κόμβος να κάνει επανεκκίνηση.

### 3.4 Περιγραφή madwifi

MadWifi [22] είναι η συντόμευση του “*Multiband Atheros Driver for Wireless Fidelity*”. Πιο απλά, είναι ένας οδηγός χρήσης (driver) του πυρήνα του λειτουργικού συστήματος Linux, για συσκευές

(κάρτες) 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 μας επιτρέπει να διαμορφώνουμε σε όλες τις δυνατές πτυχές την κάρτα μας χρησιμοποιώντας, τα κοινά πλέον, ασύρματα εργαλεία (wireless tools, όπως ifconfig, iwconfig, wlanconfig, iwlist, iwpriv κ.τ.λ.). Ουσιαστικά υλοποιεί και εφαρμόζει τις προδιαγραφές των πρωτοκόλλων 802.11 με πληθώρα δυνατοτήτων στις ασύρματες συσκευές Atheros.

Ο madwifi driver 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 δυαδικής μορφής, απομονωμένα επομένως από τους χρήστες.

Είναι ένας από τους πιο προηγμένους και διαδεδομένους drivers που είναι διαθέσιμοι για συστήματα LINUX, για την λειτουργία WLAN συσκευών.

### SampleRate

Ένας από τους διαθέσιμους αλγορίθμους αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης του madwifi είναι ο SampleRate [22], τον οποίο χρησιμοποιούμε στο δίκτυο μας. Ένα χαρακτηριστικό του είναι ότι προσπαθεί επιθετικά να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Περιοδικά στέλνει πακέτα ελέγχου (probe packets) στους υπόλοιπους ρυθμούς μετάδοσης εκτός του τρέχοντος ρυθμού, με σκοπό να εκτιμήσει αν η κατάσταση του ασύρματου καναλιού είναι ικανή να υποστηρίξει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης. Ξεκινάει από τον μεγαλύτερο δυνατό ρυθμό μετάδοσης και μειώνει τον ρυθμό κατά βήματα μέχρι να βρει τον κατάλληλο για μετάδοση [14].

## 3.5 Εμπειρίες

Η δημιουργία του πειραματικού ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου μας αποκόμισε αρκετές εμπειρίες. Αυτό που διαπιστώσαμε είναι ότι η κεραία είναι το σημαντικότερο στοιχείο για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς ραδιοσύνδεσης. Λόγω των μεγάλων αποστάσεων και των πολλαπλών διεπαφών χρησιμοποιήσαμε κατευθυντικές κεραίες με μικρό άνοιγμα στο οριζόντιο επίπεδο, με αποτέλεσμα να υπάρχει αρκετή δυσκολία στη στόχευση αυτών. Μια όχι και τόσο καλή στόχευση μείωνε την απόδοση των ζεύξεων ή ακόμα χειρότερα έκανε μη εφικτή την σύνδεση.

Αξίζει επίσης να τονιστεί, η ευαισθησία των 2.5” σκληρών δίσκων στην θερμοότητα και στη υγρασία. Ενώ υπήρχε ένα ανεμιστηράκι και μία τρύπα στο κάτω μέρος κάθε κόμβου για την έξοδο του θερμού αέρα δεν αποφύγαμε 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 (pigtailed) και ο PCI προσαρμογέας. Ο τελευταίος σε σπάνιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε να φεύγει από την υποδοχή του με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα στις συνδέσεις.

Τέλος, σημαντική βοήθεια λάβαμε από την συσκευή iBoot (power switch). Αρκετές φορές που το λειτουργικό σύστημα του κόμβου κολλούσε, πραγματοποιούσαμε εύκολα επανεκκίνηση του συστήματος, μέσω του iBoot, από το εργαστήριο χωρίς την ανάγκη μετάβασης στον χώρο του κόμβου, που συνήθως είναι τοποθετημένος σε κάποια ταράτσα πολυκατοικίας.





## *Κεφάλαιο 4 Συστήματα Παρακολούθησης Μητροπολιτικού Δικτύου*

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφουμε τα δύο συστήματα παρακολούθησης που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την διαρκή και κατά απαίτηση παρακολούθηση του πειραματικού Ασύρματου Μητροπολιτικού Δικτύου Ηρακλείου.

### **4.1 Σύστημα συνεχούς παρακολούθησης**

Η εμπειρία μας έχει δείξει ότι είναι σημαντικό να παρακολουθούμε τους ασύρματους συνδέσμους ενός mesh δικτύου, αφού μας επιτρέπει εύκολα και γρήγορα να αναγνωρίζουμε ανωμαλίες στην συμπεριφορά των συνδέσμων. Αυτό μας οδήγησε στην ανάπτυξη ενός συστήματος συνεχούς παρακολούθησης όλων των συνδέσμων του μητροπολιτικού δικτύου του Ηρακλείου.

Οι μετρίκες που επιλέχτηκαν για παρακολούθηση (monitoring) είναι:

- ποιότητα συνδέσμων (λόγος του σήματος προς τον θόρυβο - SNR),
- ρυθμός μετάδοσης δεδομένων(ρυθμός που επιλέγει ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής),
- λάθη του επιπέδου MAC (CRC errors),
- λάθη στο φυσικό επίπεδο (PHY errors),
- καθυστέρηση διάδοσης δύο διαδρομών(two-way delay) και
- ρυθμός διεκπεραίωσης.

Οι μετρίκες αυτές καταγράφονται και από τους δύο κόμβους κάθε συνδέσμου.

### **Σχεδίαση**

Το σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο perl και shell προγραμμάτων (scripts), τα οποία εκτελούνται κάθε πέντε λεπτά, εκτός από εκείνα που μετράνε τον ρυθμό διεκπεραίωσης. Τα τελευταία εκτελούνται κάθε 30 λεπτά, λόγω της μεγάλης διάρκειας εκτέλεσής τους. Η λειτουργία των προγραμμάτων είναι να συνδέονται απομακρυσμένα με τους κόμβους του μητροπολιτικού δικτύου, με χρήση του πρωτοκόλλου ssh (secure shell) και να εκτελούν (στους κόμβους) τις αντίστοιχες εντολές για την ανάκτηση της τιμής κάθε μετρίκης (π.χ. iwconfig για SNR). Τα αποτελέσματα των εντολών αποθηκεύονται σε μία RRD βάση δεδομένων. Χρησιμοποιήσαμε το

RRDTool [25] για να δημιουργήσουμε τα διαγράμματα (γράφους) για κάθε μετρική, με τις τιμές που ανακτώνται από την βάση. Τα διαγράμματα δείχνουν τις τιμές των μετρισών για χρονικό διάστημα της τελευταίας: μέρας (24 ώρες), εβδομάδας, μήνα και χρόνου.

Για να έχουμε την εικόνα του δικτύου όχι μόνο από το εργαστήριο αλλά και από όπου βρισκόμαστε δημιουργήσαμε μία ιστοσελίδα που περιέχει τα διαγράμματα<sup>1</sup>. Παρακάτω (Εικόνα 12) εμφανίζονται ενδεικτικά κάποια διαγράμματα όπως φαίνονται στην ιστοσελίδα. Για παράδειγμα, στον πρώτο γράφο της εικόνας φαίνονται τα λαμβανόμενα SNR των δύο αντίστοιχων κόμβων του συνδέσμου Lygerakis ↔ Tsakalidis (πράσινη, μπλε γραμμή) κατά την διάρκεια της ημέρας. Επίσης, στον δεύτερο γράφο εμφανίζεται ο ρυθμός μετάδοσης που επιλέγει ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής, αντίστοιχα πάλι στους τους δύο κόμβους, ενώ στον τρίτο φαίνονται ξεχωριστά οι τιμές του σήματος και του θορύβου (πράσινη, κόκκινη γραμμή αντίστοιχα) στον κόμβο Lygerakis.



Εικόνα 12: Ιστοσελίδα συστήματος παρακολούθησης

<sup>1</sup> <http://www.ics.forth.gr/HMESH>

Παρακολουθώντας τις τιμές των μετρικών των συνδέσμων διαπιστώνουμε ότι οι σύνδεσμοι είναι ασύμμετροι μεταξύ τους. Ο Πίνακας III δείχνει τις τυπικές τιμές των συνδέσμων για τις μετρικές ποιότητα συνδέσμου και ρυθμό μετάδοσης, που έχουμε παρατηρήσει από το σύστημα, για χρονικό διάστημα 24 ωρών. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την ασυμμετρία των συνδέσμων και δείχνουν ότι οι τιμές των δύο μετρικών ποικίλουν κατά την διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, η διακύμανση της ποιότητας συνδέσμου διαφέρει σε κάθε σύνδεσμο.

σύνδεσμος	SNR min,max,avg (dB)	Rate min,max,avg (Mbps)
Ekab → Lygerakis	18, 21, 19	6, 36, 26
Lygerakis → Ekab	20, 23, 21	6, 36, 24
Ekab → Tsakalidis	16, 20, 18	6, 54, 23
Tsakalidis → Ekab	16, 23, 17	6, 48, 16
Lygerakis → Tsakalidis	25, 35, 31	18, 54, 40
Tsakalidis → Lygerakis	27, 40, 32	18, 54, 40
Lygerakis → UoC	18, 23, 20	12, 36, 22
UoC → Lygerakis	10, 22, 19	12, 48, 23
Tsakalidis → UoC	13, 32, 22	6, 48, 21
UoC → Tsakalidis	18, 22, 20	12, 36, 23

Πίνακας III: Τυπικές τιμές SNR και ρυθμού μετάδοσης των συνδέσμων

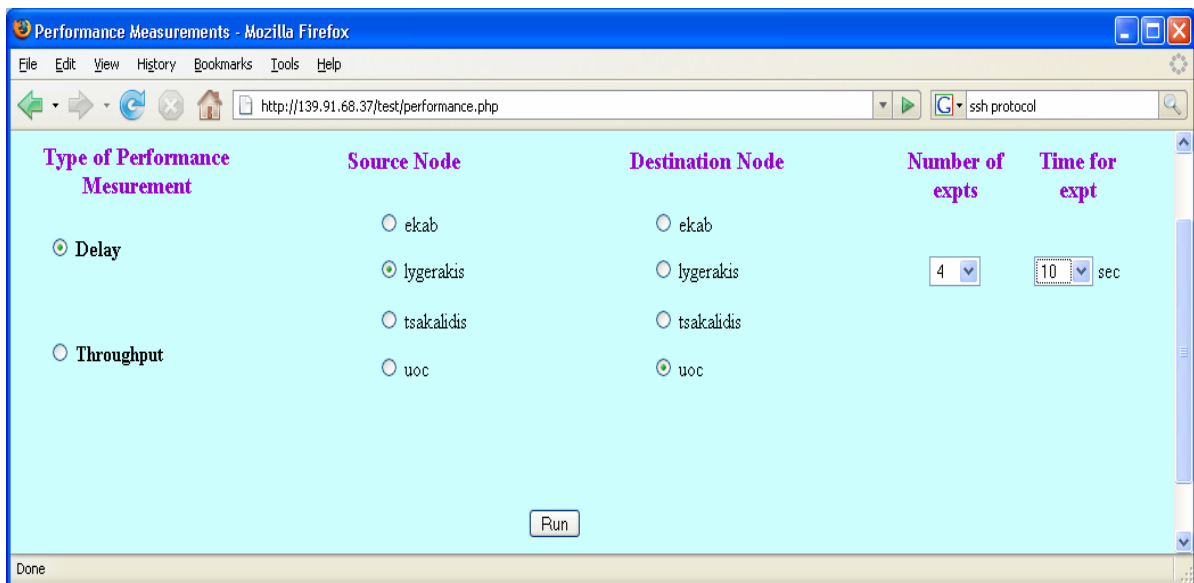
## 4.2 Σύστημα μέτρησης απόδοσης κατά απαίτηση

Παράλληλα με το σύστημα παρακολούθησης αναπτύξαμε και ένα κατά απαίτηση (on demand) σύστημα μέτρησης της απόδοσης. Σε αυτό, ο χρήστης μπορεί την χρονική στιγμή που επιθυμεί (π.χ. όταν ανιχνεύεται ανωμαλία σε κάποιο σύνδεσμο) να πραγματοποιήσει έναν γρήγορο έλεγχο της απόδοσης κάποιου συγκεκριμένου ασύρματου συνδέσμου. Επιπλέον, βασική λειτουργία του κατά απαίτηση συστήματος είναι η δυνατότητα που μας παρέχει για μετρήσεις ροών πολλαπλών αλμάτων. Η λειτουργία αυτή αποτελεί και τη διαφορά του από τον σύστημα συνεχούς παρακολούθησης.

Στην διάθεση του χρήστη βρίσκονται οι μετρικές: α) καθυστέρηση διάδοσης και β) ρυθμός διεκπεραίωσης. Επιπρόσθετα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον αριθμό των επαναλήψεων της μέτρησης, ώστε να έχει μια πιο σαφή εικόνα της μετρικής (υπολογίζονται η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το διάστημα εμπιστοσύνης - confidence interval - των τιμών), όπως επίσης και την διάρκεια της μέτρησης.

## Σχεδίαση

Όπως και κατά την ανάπτυξη του προηγούμενου συστήματος όμοια και εδώ βασιστήκαμε σε ένα σύνολο shell προγραμμάτων, που υπολογίζουν τις τιμές των μετρητών. Οι διάφορες παράμετροι που εισάγει ο χρήστης στην ιστοσελίδα (Εικόνα 13), διοχετεύονται στα shell προγράμματα που τις εκτελούν. Η ιστοσελίδα υλοποιήθηκε κυρίως σε php.



Εικόνα 13: Ιστοσελίδα κατά απαίτηση συστήματος

Μαζί με τα αποτελέσματα της μετρικής, εμφανίζονται στον χρήστη (Εικόνα 14) και οι τιμές της ποιότητας του συνδέσμου και του ρυθμού μετάδοσης των δύο αντίστοιχων κόμβων κατά την ώρα εκτέλεσης της μέτρησης. Επίσης, εμφανίζονται πληροφορίες για τους κόμβους όπως το όνομα της διεπαφής και η αντίστοιχη IP διεύθυνση της.

The screenshot shows a web browser window titled 'Akwmn measurements Results - Mozilla Firefox'. The address bar shows the URL 'http://139.91.68.37/test/results.php'. The page content is as follows:

Type	Source	IP	ATH
Delay	lygerakis	139.91.60.13	ath1
	uoc	139.91.60.16	ath0

	lygerakis	uoc
SNR	24 dB	20 dB
SIGNAL	-72 dBm	-67 dBm
NOISE	-96 dBm	-87 dBm
RATE	48M bits/sec	18M bits/sec

Delay				
min	max	avg	std	95%conf. interval
1.682	2.296	2.0308	.2624	1.7051 - 2.3565

Εικόνα 14: Ιστοσελίδα αποτελεσμάτων του κατά απαίτηση συστήματος



## ***Κεφάλαιο 5 Παρεμβολή γειτονικών καναλιών στο 802.11a***

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρεται στην αλληλεπίδραση των ασυρμάτων διεπαφών του ίδιου κόμβου, καθώς και στην μελέτη της παρεμβολής των γειτονικών καναλιών. Περιγράφονται τα πειράματα που έγιναν τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον (τοπικό δίκτυο) όσο και στο περιβάλλον του μητροπολιτικού δικτύου.

Για την μέτρηση του ρυθμού διεκπεραίωσης χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια κίνησης (traffic generator) iperf [24], ενώ ο μηχανισμός RTS/CTS του επιπέδου MAC ήταν απενεργοποιημένος.

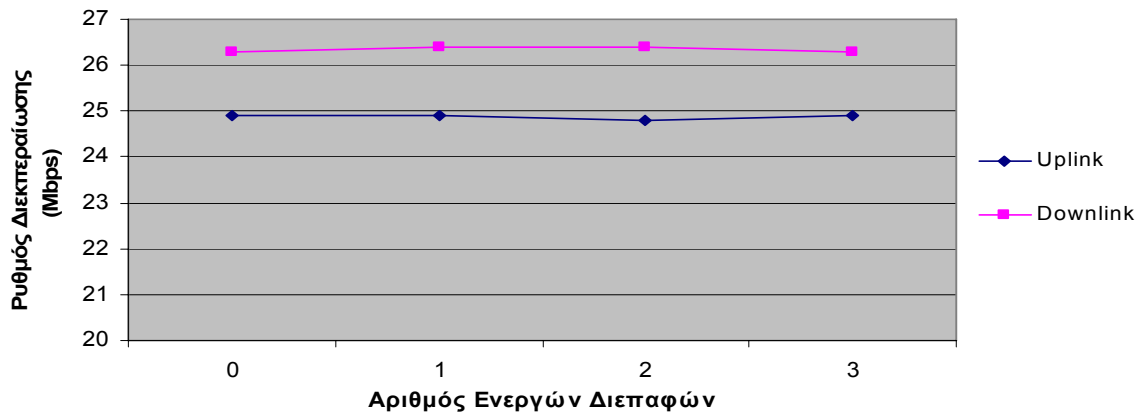
### **5.1 Παρεμβολή ασυρμάτων διεπαφών σε τοπικό δίκτυο**

Αρχικά, ερευνήσαμε σε εργαστηριακό περιβάλλον την παρεμβολή μεταξύ ασυρμάτων διεπαφών 802.11a και την ύπαρξη επίδρασης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού των τεσσάρων διεπαφών σε έναν κόμβο. Τα πειράματα που περιγράφονται παρακάτω έγιναν στον χώρο του εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Ινστιτούτου Πληροφορικής του ΙΤΕ (TNL – ICS). Ο χώρος του εργαστηρίου είναι περίπου 60 m<sup>2</sup>. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τις απογευματινές και κυρίως βραδινές ώρες, όπου δεν υπήρχε κίνηση ανθρώπων η οποία επηρεάζει τα αποτελέσματα.

#### **5.1.1 Εξέταση αλληλεπίδρασης υλικού των διεπαφών**

- **Πείραμα 1**

Για να διαπιστώσουμε την επίδραση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο ρυθμό διεκπεραίωσης ενεργήσαμε ως εξής: θεωρήσαμε το πείραμα όπου μία διεπαφή (συνδεδεμένη ασύρματα με ένα laptop) μεταδίδει στον μέγιστο δυνατό ρυθμό διεκπεραίωσης. Στην πρώτη περίπτωση όλες οι υπόλοιπες διεπαφές του κόμβου είναι απενεργοποιημένες. Σταδιακά ενεργοποιούνται όλες οι διεπαφές (μία κάθε 60 sec). Η ροή δεδομένων του συνδέσμου είναι UDP (UDP flow) με μέγεθος πακέτου (packet size) 1000 B.

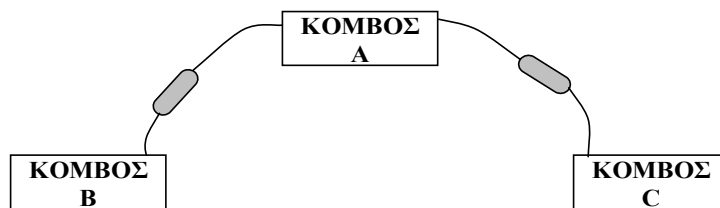


**Διάγραμμα 1: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Uplink – Downlink) συναρτήσει του αριθμού των ενεργών διεπαφών**

Όπως παρατηρούμε από το Διάγραμμα 1 ο ρυθμός διεκπεραίωσης δεν επηρεάζεται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η διαφορά που εμφανίζεται ανάμεσα στις ροές uplink και downlink οφείλεται στον διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης (6Mbps-downlink, 24Mbps-uplink) των πλαισίων ελέγχου (control frames).

### • Πείραμα 2

Με χρήση εξασθενητών (attenuators), για αποφυγή καταστροφής της διεπαφής, και καλωδίων μεταφοράς σήματος (pigtailed) συνδέσαμε τις εξόδους των διεπαφών τριών κόμβων όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.



**Εικόνα 15: Δημιουργία συνδέσεων με χρήση pigtailed και attenuators**

Προκειμένου να μηδενιστούν οι παρεμβολές μεταξύ των συνδέσεων και των απωλειών του μέσου μετάδοσης υλοποιήθηκε η παραπάνω τοπολογία (Εικόνα 15). Απώτερος στόχος του πειράματος ήταν η μελέτη της επίδρασης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού στον μέγιστο ρυθμό διεκπεραίωσης δύο ταυτόχρονων ροών του ίδιου κόμβου και η σύγκριση του με τον μέγιστο θεωρητικό ρυθμό διεκπεραίωσης [13].



Εφαρμόστηκε, ξανά UDP ροή δεδομένων με μέγεθος πακέτου 1000 B. Τα πειράματα είχαν διάρκεια 100 sec και υπολογίστηκε η μέση τιμή (avg) και το διάστημα εμπιστοσύνης (95% confidence interval) 10 πειραμάτων.

σύνδεσμος	min	max	avg	std	95% conf. interval
B→A	25.7	26	25.88	0.0916	25.8146 - 25.9454
A→C	25.7	25.9	25.79	0.0871	25.7278 - 25.8522
B→A→C	25.6	25.9	25.78	0.0916	25.7056 - 25.8544

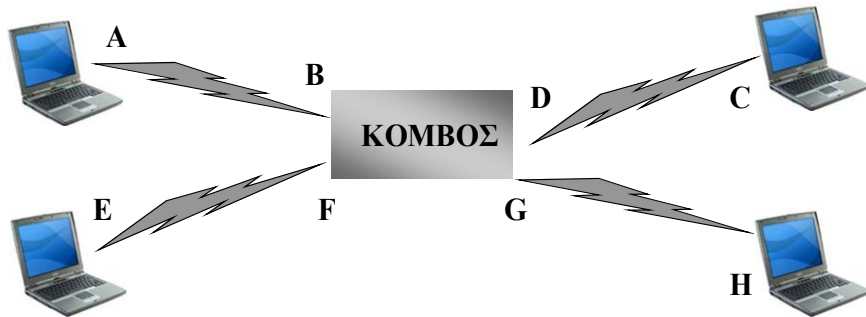
**Πίνακας IV: Ρυθμός διεκπεραίωσης συνδέσμων**

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα IV συμπεραίνουμε ότι καμία επίδραση στο ρυθμό διεκπεραίωσης δεν οφείλεται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό των διεπαφών του κόμβου. Αυτό αντιτίθεται στα συμπεράσματα του [8]. Στο [8] επισημαίνεται ότι ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός δημιουργεί παρεμβολές στις διεπαφές, όταν λειτουργούν ταυτόχρονα περισσότερες από δύο. Ωστόσο στο τελευταίο χρησιμοποιούνται διαφορετικού τύπου διεπαφές (Prism 2.5). Επίσης, αναιρεί τον ισχυρισμό του [4] ότι η απόσταση μεταξύ των διεπαφών προκαλεί παρεμβολές, καθώς οι ασύρματες διεπαφές στους κόμβους μας είναι τοποθετημένες πάνω στον ίδιο προσαρμογέα PCI to PCI. Αυτό αποδίδεται στις ιδιότητες του προηγμένου εξοπλισμού που χρησιμοποιούμε.

### 5.1.2 Παρεμβολή γειτονικών καναλιών

- **Χωρίς απόσταση κεραιών**

Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει δύο εισερχόμενες ροές σε δύο ασύρματες διεπαφές ενός κόμβου και δύο εξερχόμενες ροές από τις άλλες δύο διεπαφές. Όλες οι ασύρματες διεπαφές του κόμβου είναι συνδεδεμένες με μη κατευθυντικές (omnidirectional) κεραιές. Η απόσταση των κεραιών είναι μικρή (<0.4 μέτρα), ενώ τα τέσσερα laptops που συμμετέχουν στο πείραμα έχουν τοποθετηθεί περιμετρικά του κόμβου σε απόσταση περίπου 1.5 μέτρο από αυτόν. Η τοπολογία του σεναρίου απεικονίζεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Τοπολογία πειραμάτων με τέσσερις ασύρματες συνδέσεις ενός κόμβου

Αρχικά, μετρήσαμε τον ρυθμό διεκπεραίωσης σε κάθε σύνδεσμο μεμονωμένα, ώστε να αποκτήσουμε μια βάση σύγκρισης με τις επόμενες μετρήσεις. Ακολούθως, καταγράψαμε το ρυθμό διεκπεραίωσης κάθε ροής (δύο σύνδεσμοι π.χ.  $A \rightarrow BD \rightarrow C$ ) σε κάθε ζεύγος καναλιών που είχαμε θέσει. Η κάθε μέτρηση προέκυψε από 10 επαναλήψεις του πειράματος, διάρκειας 100 δευτερολέπτων (μέγεθος πακέτου 1000 Bytes).

σύνδεσμος	κανάλι	min	max	avg	Std	95% conf.interval
A→B	36	25.7	26	25.88	0.0916	25.8146-25.9454
D→C	36	25.6	26	25.8	0.1153	25.7063-25.8937
E→F	40	25.5	25.8	25.69	0.0989	25.6097-25.7703
G→H	40	25.6	25.9	25.78	0.0916	25.7056-25.8544
A→BD→C	36-36	11.7	13.3	12.59	0.5216	12.217-12.963
A→BD→C	36-40	8.82	13.4	12.552	1.3472	11.5884-13.5156
A→BD→C	36-44	23.1	25.7	24.86	0.6801	24.3071-25.4129
A→BD→C	36-48	24.7	26.5	25.86	0.6327	25.4075-26.3125

Πίνακας V: Μετρήσεις ρυθμού διεκπεραίωσης (Mbps) μίας ροής (ενός και δύο συνδέσμων)

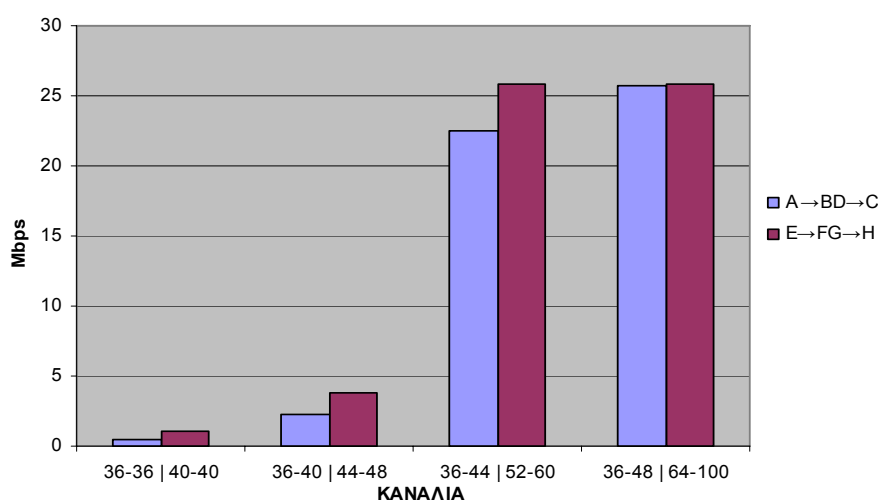
Μελετώντας τον Πίνακα V παρατηρούμε το μεγάλο ποσοστό παρεμβολής στο ίδιο και στο άμεσα γειτονικό κανάλι. Καθώς αυξάνεται η απόσταση των καναλιών γειτονικών συνδέσμων, αυξάνεται και ο μέγιστος ρυθμός διεκπεραίωσης. Παρεμβολή προκαλείται όταν οι ραδιοζεύξεις χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος ζώνης (bandwidth, Co-Channel Interference – CCI) και όταν χρησιμοποιούν επικαλυπτόμενα κανάλια (Adjacent Channel Interference ACI) [12]. Όπως είναι γνωστό όταν οι

ραδιοζεύξεις χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι οι αντίστοιχες συσκευές ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο κοινό μέσο μετάδοσης.

Έχοντας σαν βάση τις μετρήσεις του προηγούμενου πίνακα ξεκινήσαμε τα πειράματα με δύο ροές που μεταδίδουν ταυτόχρονα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση του ρυθμού διεκπεραίωσης είναι ακόμα εντονότερη καθώς τέσσερις πλέον σύνδεσμοι λειτουργούν σε γειτονικά κανάλια. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται στον Πίνακα VI και στο Διάγραμμα 2.

σύνδεσμος	κανάλι	min	max	avg	std	95% conf.interval	απόσταση καναλιών
A→BD→C	36-36	0.3	0.832	0.4263	0.1514	0.3179-0.5346	0
E→FG→H	40-40	0.856	2.37	1.1098	0.4475	0.7898-1.4298	
A→BD→C	36-40	1.83	2.66	2.228	0.2711	2.0341-2.4219	1
E→FG→H	44-48	2.98	4.77	3.8	0.5376	3.4155-4.1845	
A→BD→C	36-44	20.9	23	22.46	0.7026	21.9575-22.9625	2
E→FG→H	52-60	24.7	26.5	25.86	0.6327	25.4075-26.3125	
A→BD→C	36-48	25.5	25.8	25.68	0.1131	25.5881-257719	3
E→FG→H	64-100	25.7	26.4	25.88	0.1987	25.7185-26.0415	

**Πίνακας VI: Αποτελέσματα μετρήσεων ρυθμού διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ταυτόχρονων ροών (κεραίες κοντά)**



**Διάγραμμα 2: Ρυθμός διεκπεραίωσης συναρτήσει της απόστασης των καναλιών (κεραίες κοντά)**

- **Με απόσταση κεραιών**

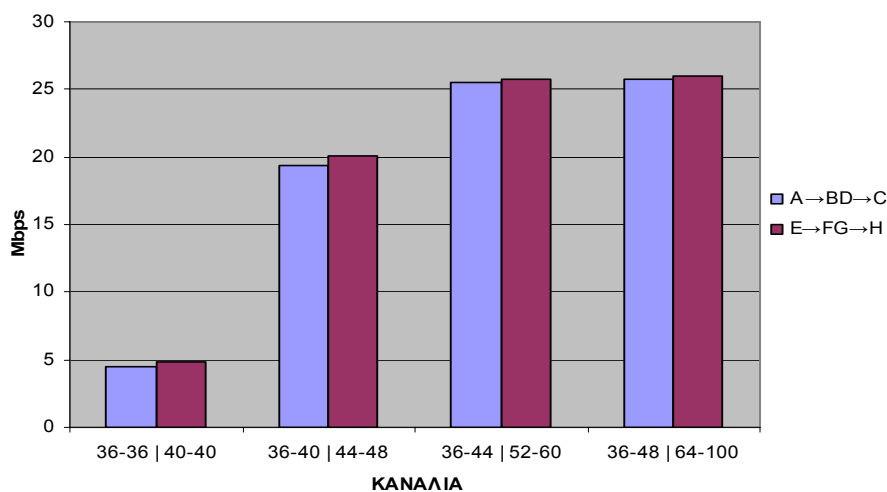
Στην ίδια τοπολογία του προηγούμενου πειράματος αλλάξαμε τα rigtails τοποθετώντας μεγαλύτερα ώστε να μεγαλώσει η απόσταση των κεραιών του κόμβου (> 2 μέτρα). Επαναλάβουμε όλη την σειρά των προηγούμενων πειραμάτων για να εξετάσουμε την επιρροή της απόστασης, των κεραιών στον ρυθμό διεκπεραίωσης.

Η επίπτωση της παρεμβολής στο ρυθμό διεκπεραίωσης των συνδέσεων είναι τώρα εμφανώς μικρότερη από πριν, τόσο στο ίδιο κανάλι λειτουργίας (ενδοκαναλική παρεμβολή), όσο και στα γειτονικά. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι σε απόσταση δύο καναλιών (δηλ. ένα ανενεργό κανάλι ανάμεσα τους) οι σύνδεσμοι φτάνουν το μέγιστο δυνατό ρυθμό διεκπεραίωσης. Αντιθέτως, στην προηγούμενη περίπτωση (κεραίες κοντά), για να συμβεί αυτό και στους δύο συνδέσμους πρέπει να υπάρχει απόσταση τριών καναλιών.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ρυθμού διεκπεραίωσης με απομακρυσμένες κεραιές εμφανίζονται στον Πίνακα VII και στο Διάγραμμα 3.

σύνδεσμος	κανάλι	min	max	avg	std	95% conf.interval	απόσταση καναλιών
A-->BD-->C	36-36	3.1	5.6	4.51	0.8646	3.8071-5.2129	0
E-->FG-->H	40-40	3.7	5.9	4.82	0.6196	4.3163-5.3237	
A-->BD-->C	36-40	18.4	20.1	19.37	0.5944	18.9449-19.7951	1
E-->FG-->H	44-48	19.8	20.6	20.11	0.2641	19.9212-20.2988	
A-->BD-->C	36-44	24.9	25.9	25.53	0.3367	25.2563-25.8037	2
E-->FG-->H	52-60	25.1	26.3	25.79	0.3034	25.5434-26.0366	
A-->BD-->C	36-48	25.6	25.8	25.69	0.0565	25.6496-25.7304	3
E-->FG-->H	64-100	25.6	26.3	25.95	0.2066	25.7821-26.1179	

**Πίνακας VII: Αποτελέσματα μετρήσεων ρυθμού διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ταυτόχρονων ροών (κεραίες μακριά)**

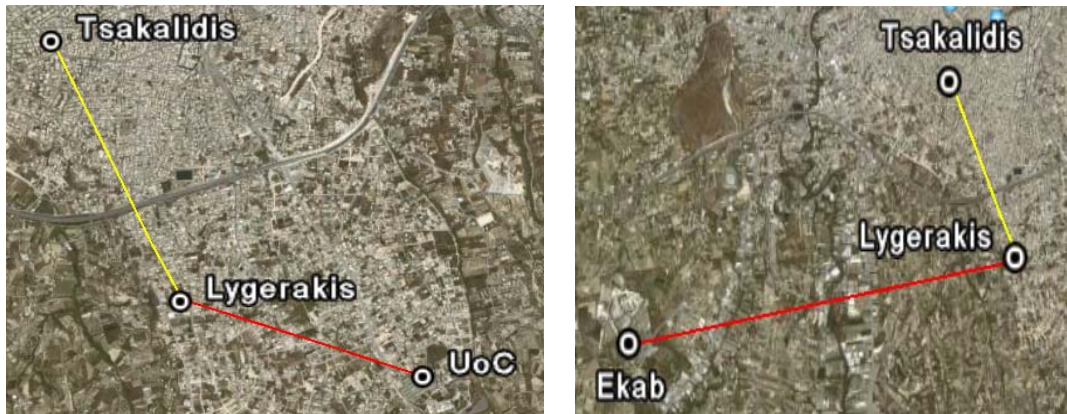


Διάγραμμα 3: Ρυθμός διεκπεραίωσης συναρτήσει της απόστασης των καναλιών (κεραίες μακριά)

## 5.2 Παρεμβολή μεταξύ συνδέσμων στο μητροπολιτικό περιβάλλον

Στην συνέχεια, ερευνήσαμε την παρεμβολή μεταξύ γειτονικών συνδέσμων του μητροπολιτικού δικτύου της πόλης του Ηρακλείου. Μία από τις δύο ασύρματες διεπαφές του κάθε υπό εξέταση συνδέσμου βρίσκεται στον ίδιο κόμβο. Συγκεκριμένα, θεωρήσαμε τον κόμβο Lygerakis και το ζεύγος συνδέσμων Lygerakis ↔ Tsakalidis και Lygerakis ↔ UoC όπως και το ζεύγος Lygerakis ↔ Tsakalidis και Lygerakis ↔ Ekab.

Για το πρώτο ζευγάρι συνδέσμων οι δύο διεπαφές στον κόμβο Lygerakis είναι συνδεδεμένες με δύο 21 dBi panel κεραίες (Πίνακας II), οι οποίες είναι τοποθετημένες στον ίδιο ιστό με την μεταξύ τους απόσταση να είναι περίπου 0.75 μέτρα και την αντίστοιχη γωνία τους περίπου στις 150 μοίρες. Για το δεύτερο ζευγάρι συνδέσμων, οι δύο διεπαφές στον κόμβο Lygerakis είναι επίσης συνδεδεμένες με δύο 21 dBi panel κεραίες, οι οποίες όμως είναι τοποθετημένες σε διαφορετικό ιστό η κάθε μία. Η απόσταση τους είναι 2.5 μέτρα και η αντίστοιχη γωνία τους περίπου 90 μοίρες.



Εικόνα 17: Ζεύγη ασύρματων συνδέσεων του μητροπολιτικού δικτύου όπου εξετάζεται η παρεμβολή

Κάθε πείραμα που παρουσιάζουμε παρακάτω εκτελέστηκε 10 φορές με διάρκεια 100 sec το καθένα. Περιλάμβανε UDP κίνηση με ρυθμό 3 Mb/s. Για την δημιουργία κίνησης χρησιμοποιήσαμε ξανά το πρόγραμμα iperf. Ωστόσο, αντιμετωπίσαμε πρόβλημα στην υπερφόρτωση της CPU του κόμβου, όταν το iperf ήταν σε λειτουργία αποστολέα (client mode - sender). Αυτό επηρέαζε τις μετρήσεις μας στον κεντρικό κόμβο (Lygerakis) καθώς όλοι οι πόροι της CPU, αναλώνονταν στο iperf. Για την επίλυση του προβλήματος ο αποστολέας του iperf ήταν σε έναν υπολογιστή του εργαστηρίου. Η ροή δεδομένων δρομολογούνταν από τον Η/Υ του εργαστηρίου μέσω του δικτύου διαχείρισης στον κόμβο Lygerakis. Εκεί γινόταν προώθηση των πακέτων στην αντίστοιχη διεπαφή και μέσω του συνδέσμου κατέληγαν κόμβο όπου έτρεχε ο παραλήπτης του iperf (server - receiver).

### 5.2.1 Κεραίες αποστολής/λήψης (Tx/Rx) στον ίδιο κόμβο

Στο πρώτο πείραμα θεωρήσαμε την παρεμβολή μεταξύ συνδέσεων, όταν μία διεπαφή παραλήπτης και μία αποστολέας λειτουργούν στον ίδιο κόμβο. Συγκεκριμένα δύο ροές 3 Mb/s η κάθε μία, μεταδίδονται πάνω στον σύνδεσμο Lygerakis → Tsakalidis (2 Km) και UoC → Lygerakis (1.6 Km).

Ο Πίνακας VIII απεικονίζει τον ρυθμό διεκπεραίωσης που επιτυγχάνεται (ο οποίος μετριέται στον παραλήπτη), για κάθε μία από τις δύο UDP ροές, για τρεις διαφορετικές αποστάσεις καναλιών. Από αυτόν τον πίνακα παρατηρούμε ότι όταν στους δύο συνδέσμους έχει οριστεί το ίδιο κανάλι (36-36 στον πίνακα), ο αποστολέας επηρεάζει σημαντικά τον παραλήπτη (ρυθμός διεκπεραίωσης για Rx

Lygerakis ← UoC), εφόσον βρίσκονται στον ίδιο κόμβο (Lygerakis). Όταν στους δύο συνδέσμους οριστούν γειτονικά κανάλια (36-40), η παρεμβολή μειώνεται σημαντικά αλλά ακόμα υπάρχει. Αντιθέτως, όταν ανάμεσα στα κανάλια λειτουργίας των συνδέσμων είναι ανενεργό (36-44) δεν υπάρχει καθόλου παρεμβολή και ο ρυθμός διεκπεραίωσης είναι ουσιαστικά ίσος με τον ρυθμό αποστολής της UDP ροής.

απόσταση καναλιών	Tx Lygerakis → Tsakalidis		Rx Lygerakis ← UoC	
	avg	conf.interval	avg	conf.interval
0(36-36)	2.970	± 0.004	2.358	± 0.125
1(40-36)	2.995	± 0.002	2.976	± 0.006
2(44-36)	2.997	± 0.002	2.997	± 0.002

**Πίνακας VIII: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν ο παραλήπτης και ο αποστολέας είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές στον ίδιο ιστό σε απόσταση περίπου 0.75 μέτρα**

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν σε εργαστηριακό περιβάλλον (Πίνακες VI, VII), παρατηρούμε ότι η παρεμβολή είναι πολύ πιο σημαντική στο δίκτυο εσωτερικού χώρου παρά στο μητροπολιτικό δίκτυο. Αυτό συμβαίνει γιατί στο μητροπολιτικό δίκτυο χρησιμοποιούμε κατευθυντικές (directional) κεραιές στις διεπαφές των συνδέσμων, ενώ για τα πειράματα του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκαν μη κατευθυντικές (omnidirectional) κεραιές.

Η παρεμβολή μεταξύ συνδέσμων προκαλείται λόγω του ισχυρού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργούν η διεπαφές γύρω από τις κεραιές εκπομπής. Αυτό γιατί η ένταση του σήματος λήψης είναι τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτήν της εκπομπής λόγω της εξασθένησης από την απόσταση. Επιπλέον, ακόμα και αν γίνεται χρήση κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας (όπως στο HMESH δίκτυο) υπάρχει διαρροή (leakage) του σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις (λοβούς) με μικρότερη ένταση από την κύρια κατεύθυνση (κεντρικό λοβό).

Εκτελέσαμε το παραπάνω πείραμα, αλλά με δύο UDP ροές 3 Mbps που μεταδίδονταν πάνω στους συνδέσμους Lygerakis → Ekab (5 Km) και Tsakalidis → Lygerakis (2 Km). Ο Πίνακας IX δείχνει τον ρυθμό διεκπεραίωσης που επιτυγχάνεται για τις δύο ροές. Παρατηρούμε ότι η παρεμβολή σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερη από το προηγούμενο πείραμα. Αυτό αποδίδεται στην

μεγαλύτερη απόσταση (περίπου 2.5 μέτρα) μεταξύ των κεραιών, που είναι συνδεδεμένες με τις ασύρματες διεπαφές του κόμβου Lygerakis και αντιστοιχούν στους δύο υπό εξέταση συνδέσμους.

απόσταση καναλιών	Tx Lygerakis → Ekab		Rx Lygerakis ← Tsakalidis	
	avg	conf.interval	avg	conf.interval
0(36-36)	3	$\leq \pm 0.001$	2.75	$\pm 0.1$
1(40-36)	3	$\leq \pm 0.001$	3	$\leq \pm 0.001$
2(44-36)	3	$\leq \pm 0.001$	3	$\leq \pm 0.001$

**Πίνακας IX:** Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν ο παραλήπτης και ο αποστολέας είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές σε διαφορετικό ιστό σε απόσταση περίπου 2.5 μέτρα

### 5.2.2 Δύο κεραιές λήψης (Rx/Rx) στον ίδιο κόμβο

Στην συνέχεια ερευνήσαμε την παρεμβολή μεταξύ συνδέσμων όταν δύο διεπαφές που λαμβάνουν είναι τοποθετημένες στον ίδιο κόμβο. Συγκεκριμένα, δύο UDP ροές των 3 Mbps μεταδίδονται πάνω στους συνδέσμους Tsakalidis → Lygerakis και UoC → Lygerakis. Ο Πίνακας X δείχνει τον ρυθμό διεκπεραίωσης που επιτυγχάνεται στις δύο ροές. Παρατηρούμε ότι καμία ροή δεν επηρεάζεται και ουσιαστικά ο ρυθμός διεκπεραίωσης των συνδέσμων είναι ίσος με τον ρυθμό αποστολής της UDP ροής ακόμα και στην περίπτωση που οι σύνδεσμοι λειτουργούν στο ίδιο κανάλι. Κατά συνέπεια, η παρεμβολή των δύο συνδέσμων σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι σημαντική.

Απόσταση καναλιών	Rx Lygerakis ← Tsakalidis		Rx Lygerakis ← UoC	
	avg	conf.interval	avg	conf.interval
0(36-36)	2.996	$\pm 0.002$	2.996	$\pm 0.002$
1(40-36)	2.996	$\pm 0.002$	3	$\leq \pm 0.001$
2(44-36)	3	$\leq \pm 0.001$	3	$\leq \pm 0.001$

**Πίνακας X:** Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν δύο παραλήπτες είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές στον ίδιο ιστό σε απόσταση περίπου 0.75 μέτρα



### 5.2.3 Δύο κεραιές αποστολής (Tx/Tx) στον ίδιο κόμβο

Επαναλάβουμε τα παραπάνω πειράματα αλλάζοντας την κατεύθυνση των δύο ροών. Τώρα στον κόμβο Lygerakis οι δύο διεπαφές των συνδέσμων Lygerakis → Tsakalidis και Lygerakis → UoC λειτουργούν ως αποστολές δεδομένων. Καμία παρεμβολή (μείωση στον ρυθμό διεκπεραίωσης) δεν παρατηρείται ούτε σε αυτήν την περίπτωση, όπως συμπεραίνεται από τα δεδομένα του πίνακα XI.

Απόσταση καναλιών	Tx Lygerakis ← Tsakalidis		Tx Lygerakis ← UoC	
	avg	conf.interval	Avg	conf.interval
0(36-36)	3	≤ ±0.001	3	≤ ±0.001
1(40-36)	3	≤ ±0.001	3	≤ ±0.001
2(44-36)	3	≤ ±0.001	3	≤ ±0.001

**Πίνακας XI: Ρυθμός διεκπεραίωσης (Mbps) δύο ροών όταν δύο αποστολές είναι στον ίδιο κόμβο και οι κεραιές στον ίδιο ιστό σε απόσταση περίπου 0.75 μέτρα**

## 5.3 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εκτέλεση των πειραμάτων αυτού του κεφαλαίου είναι:

- Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός ενός κόμβου (προσαρμογέας PCI to PCI και Atheros wireless cards) μπορεί να υποστηρίξει την ταυτόχρονη λειτουργία και των τεσσάρων διεπαφών χωρίς πρόβλημα.
- Σε εσωτερικό περιβάλλον (τοπικό δίκτυο) υπάρχει παρεμβολή σε συνδέσμους που λειτουργούν στα ίδια ή σε γειτονικά κανάλια και μάλιστα γίνεται εντονότερη όσο η απόσταση των αντιστοίχων κεραιών, μειώνεται (για παράδειγμα, σε απόσταση καναλιών 1 από 19,37 Mbps που μπορεί να μεταδώσει ο σύνδεσμός όταν οι κεραιές απέχουν περισσότερο από 2 μέτρα, πέφτει στα 2,228 Mbps όταν οι κεραιές είναι κοντά - <0,4 μέτρα).
- Στο περιβάλλον του μητροπολιτικού δικτύου του Ηρακλείου, παρεμβολές στις διεπαφές συνδέσμων του ίδιου κόμβου, συμβαίνουν στην περίπτωση που μία διεπαφή λειτουργεί σαν παραλήπτης και μία σαν αποστολέας (Tx/Rx). Η παρεμβολή επηρεάζει τον ρυθμό

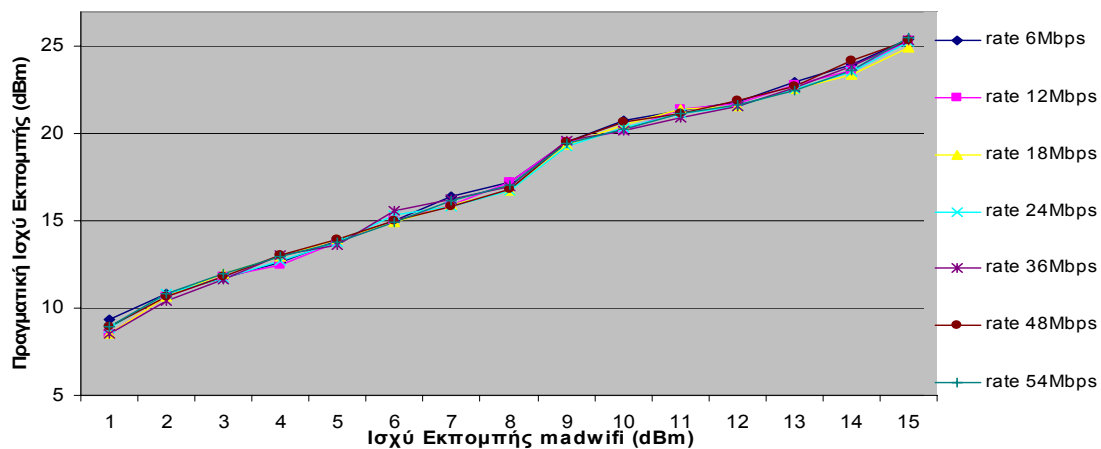
διεισπεραίωσης του παραλήπτη και γίνεται πιο έντονη όσο μειώνεται η απόσταση των καναλιών λειτουργίας των συνδέσμων (2,358 Mbps σε ίδιο κανάλι λειτουργίας – 36:36 - και 2,976 Mbps σε γειτονικά κανάλια λειτουργίας – 36:40 – όταν στέλνουμε 3 Mbps) και όσο ελαττώνεται η απόσταση των κεραιών.

## Κεφάλαιο 6 Μετρήσεις απόδοσης του Μητροπολιτικού Δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό, θα μελετήσουμε την συμπεριφορά διαφόρων μετρηκών στο ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, θεωρούμε τρεις ασύρματους συνδέσμους του δικτύου με διαφορετικό μήκος ο καθένας. Αυτοί είναι: Lygerakis ↔ Ekab (5 Km), Tsakalidis ↔ Lygerakis (2 Km) και Tsakalidis ↔ UoC (3.3 Km). Στους συνδέσμους αυτούς εξετάζεται η συμπεριφορά: του ρυθμού απωλειών των πακέτων (Packet Error Rate - PER), του ρυθμού διεκπεραίωσης και του χρόνου απόκρισης (TCP Latency), συναρτήσει της ισχύος εκπομπής (Txpower) των δύο κόμβων και του ρυθμού μετάδοσης. Τέλος, παρουσιάζεται η έρευνα για την συσχέτιση των απωλειών των προηγούμενων συνδέσμων και η εξάρτησή τους από την ώρα της ημέρας.

### 6.1 Πραγματική ισχύς εκπομπής της διεπαφής

Ο madwifi εμφανίζει και επιτρέπει διακριτές τιμές ισχύος εκπομπής. Με χρήση αναλυτή φάσματος εξακριβώσαμε ότι η πραγματική ισχύς εκπομπής της διεπαφής δεν ταυτίζεται με αυτήν που εμφανίζει ο madwifi. Αναλυτικότερα, συνδέσαμε την έξοδο μιας διεπαφής με ένα εξασθενητή (-10 dB) και την έξοδο του εξασθενητή με τον αναλυτή φάσματος με pigtail (-1.77 dB ανά μέτρο). Υπολογίσαμε και τις υπόλοιπες απώλειες (συνδετήρες κ.τ.λ.) της σύνδεσης και τις προσθέσαμε στα αποτελέσματα που μας έδωσε ο αναλυτής φάσματος.



Διάγραμμα 4: Πραγματική ισχύς εκπομπής της διεπαφής

Πήραμε μετρήσεις για όλες τις διακριτές τιμές ισχύος εκπομπής του madwifi όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4 (άξονας x) και για όλους τους ρυθμούς μετάδοσης. Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι η διεπαφή δεν εκπέμπει ακριβώς την ίδια ισχύ για όλους τους ρυθμούς μετάδοσης.

## 6.2 Ανάλυση του ρυθμού απωλειών των πακέτων

Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των απωλειών στους συνδέσμους απενεργοποιήσαμε τις επαναμεταδόσεις (retransmissions) του επιπέδου MAC. Ο madwifi δεν δίνει την δυνατότητα απενεργοποίησης στους χρήστες, οπότε χρειάστηκε να αλλάξουμε κάποιες παραμέτρους σε τμήμα του κώδικα του, που είναι εφικτό εφόσον είναι ανοικτό λογισμικό. Ειδικότερα, αλλάξαμε τον κώδικα ath/if\_ath.c και ξαναφορτώσαμε τον madwifi.

Απώτερος σκοπός μας ήταν η εφαρμογή που μετράει τα χαμένα πακέτα να λαμβάνει υπόψη όλα τα κατεστραμμένα πακέτα του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου MAC (PHY και CRC errors, βλέπε παράγραφο 2.5). Παρόλα αυτά, μετρήσεις έγιναν και με ενεργοποιημένες τις επαναμεταδόσεις, με την συμπεριφορά να έχει την ίδια τάση αλλά με μικρότερο ποσοστό χαμένων πακέτων όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Στις επαναμεταδόσεις το επίπεδο MAC ξαναστέλνει τα κατεστραμμένα πακέτα για έναν αριθμό φορών μέχρι να τα απορρίψει εντελώς.

Για την μέτρηση των χαμένων πακέτων χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο ping, που εμφανίζει την καθυστέρηση διάδοσης προς τις δύο κατευθύνσεις της ζεύξης ενός ICMP πακέτου και τον αριθμό των χαμένων πακέτων. Ορίσαμε το μέγεθος του πακέτου στα 1000 Bytes στο οποίο προστίθενται 8 και 20 Bytes της ICMP και της IP επικεφαλίδας αντίστοιχα.

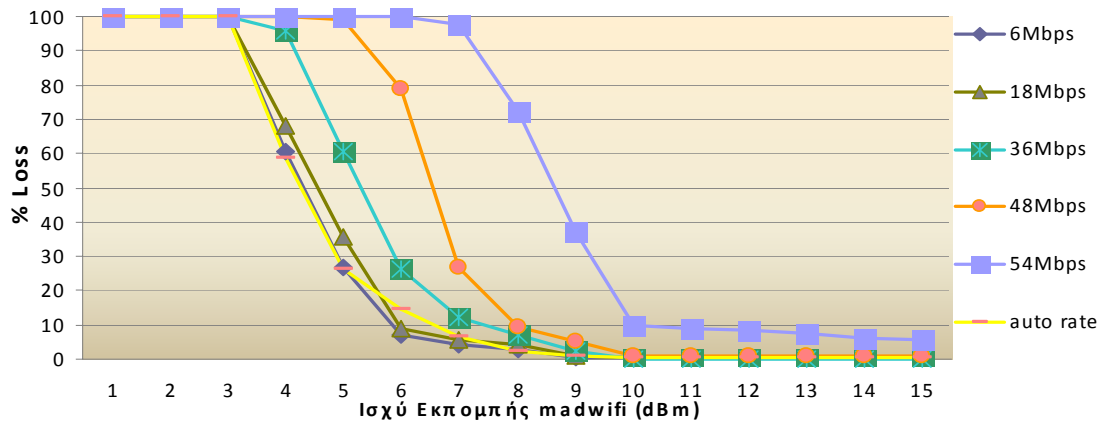
Η διάρκεια όλων των πειραμάτων που περιγράφονται παρακάτω είναι 10 sec, το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων πακέτων είναι 0.1 sec, ενώ για τον υπολογισμό των σημείων των καμπύλων στα διαγράμματα λήφθηκε υπόψη ο μέσος όρος είκοσι πειραμάτων.

### 6.2.1 Εξάρτηση του ρυθμού απωλειών από την ισχύ εκπομπής

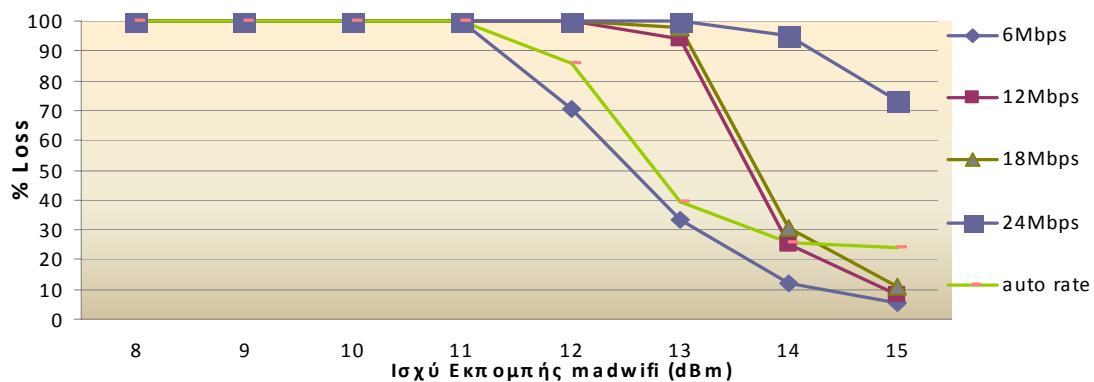
Τα επόμενα διαγράμματα (5, 6, 7) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας. Ο οριζόντιος άξονας δείχνει την ισχύ εκπομπής των δύο αντίστοιχων διεπαφών, όπως μας δίνεται από τον madwifi, ενώ ο κατακόρυφος το ποσοστό των χαμένων πακέτων. Οι καμπύλες αντιστοιχούν στους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης.

Σε όσα διαγράμματα η αρίθμηση του οριζόντιου άξονα δεν ξεκινάει από το ένα (π.χ. Διάγραμμα 6, 7), δηλώνει ότι στις συγκεκριμένες ζεύξεις δεν είναι εφικτή η ύπαρξη σύνδεσης για τις τιμές της

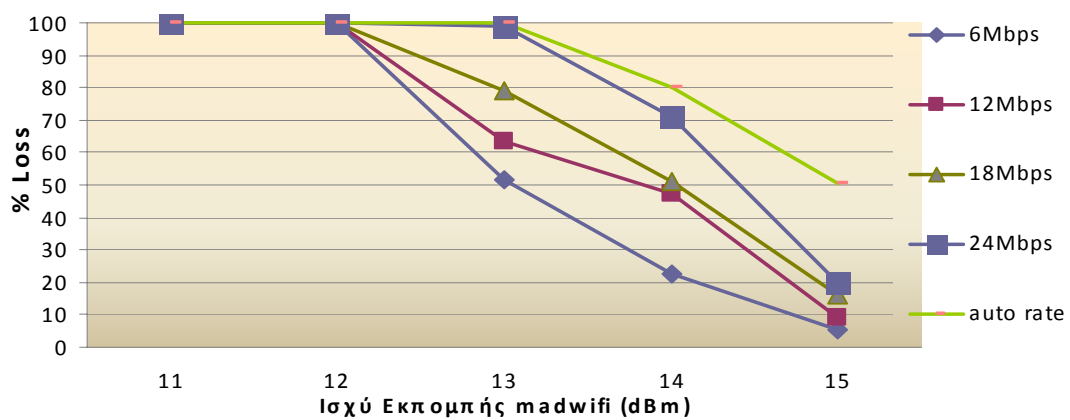
ισχύος που δεν αναγράφονται. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που δεν εμφανίζονται όλες οι καμπύλες για τον ρυθμό μετάδοσης.



Διάγραμμα 5: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ Lygerakis



Διάγραμμα 6: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ UoC



Διάγραμμα 7: Ποσοστό απωλειών Lygerakis ↔ Ekab

Μελετώντας τα προηγούμενα διαγράμματα (5, 6, 7) συμπεραίνουμε ότι:

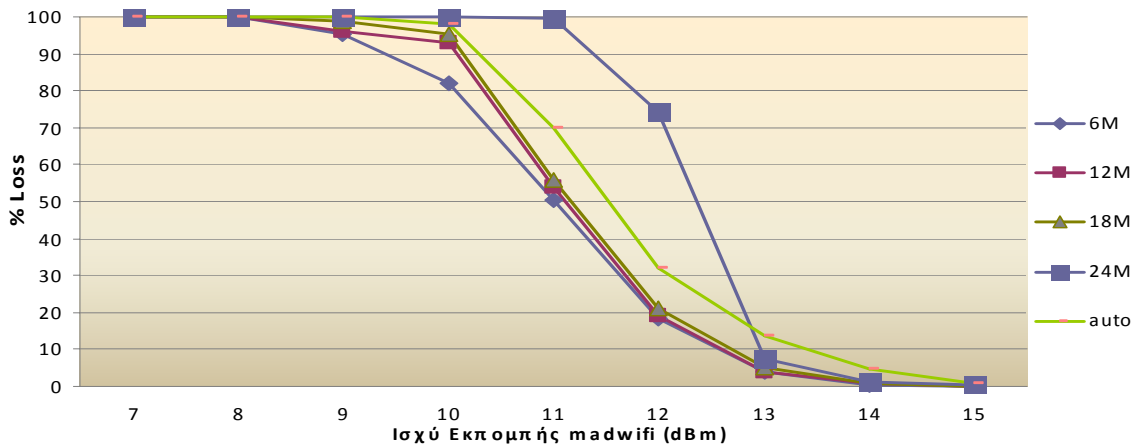
- μόνο στον σύνδεσμο Lygerakis ↔ Tsakalidis είναι εφικτή η ύπαρξη σύνδεσης για ισχύ εκπομπής μικρότερη από 10 dBm (πραγματική ισχύ < 21dBm, από Διάγραμμα 4),
- ο προαναφερθέν σύνδεσμος παρουσιάζει ελάχιστο ποσοστό χαμένων πακέτων για ισχύ εκπομπής μεγαλύτερη των 10 dBm,
- ούτε ο σύνδεσμος Tsakalidis ↔ UoC, ούτε ο Lygerakis ↔ Ekab μπορούν να λειτουργήσουν για ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους των 24 Mbps, ενώ και οι δύο παρουσιάζουν απώλειες ( $\approx 10\%$ ) ακόμα και στην μέγιστη ισχύ,
- υπάρχει ασυμμετρία στο ρυθμό απώλειας πακέτων,
- υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό χαμένων πακέτων (εμφανίζεται καλύτερα στην επόμενη παράγραφο 6.2.2, Διάγραμμα 9),
- καθώς μειώνεται η ισχύ εκπομπής αυξάνεται ο αριθμός των χαμένων πακέτων,
- και στους τρεις συνδέσμους ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης (SampleRate βλέπε 3.4), παρουσιάζει ποσοστό απωλειών μεγαλύτερο από καθορισμένους ρυθμούς, οι οποίοι ποικίλουν στους διαφορετικούς συνδέσμους.

Ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης, των τριών υπό εξέταση συνδέσμων, ώστε το ποσοστό απωλειών των πακέτων να είναι μικρότερο του 10% εμφανίζεται στον Πίνακα XII. Παρατηρούμε ότι καθώς μεγαλώνει η απόσταση των συνδέσμων μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης. Αυτό οφείλεται στην δραματική αύξηση του αριθμού των χαμένων πακέτων που προκαλείται από την μεγαλύτερη απόσταση των συνδέσμων.

σύνδεσμος	απόσταση	μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για ποσοστό απωλειών < 10%
Tsakalidis ↔ Lygerakis	2 Km	54 Mbps
Tsakalidis ↔ UoC	3.3 Km	18 Mbps
Lygerakis ↔ Ekab	5 Km	12 Mbps

**Πίνακας XII: Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης των τριών συνδέσμων ώστε το ποσοστό απωλειών να είναι μικρότερο του 10 %**

Ολοκληρώνοντας, παραθέτουμε ενδεικτικά το Διάγραμμα 8 με το ποσοστό των απωλειών συναρτήσει της ισχύος εκπομπής έχοντας ενεργοποιήσει αυτήν την φορά τις επαναμεταδόσεις των κατεστραμμένων πακέτων του επιπέδου MAC.



**Διάγραμμα 8: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ UoC με ενεργοποιημένες τις επαναμεταδόσεις του επιπέδου MAC**

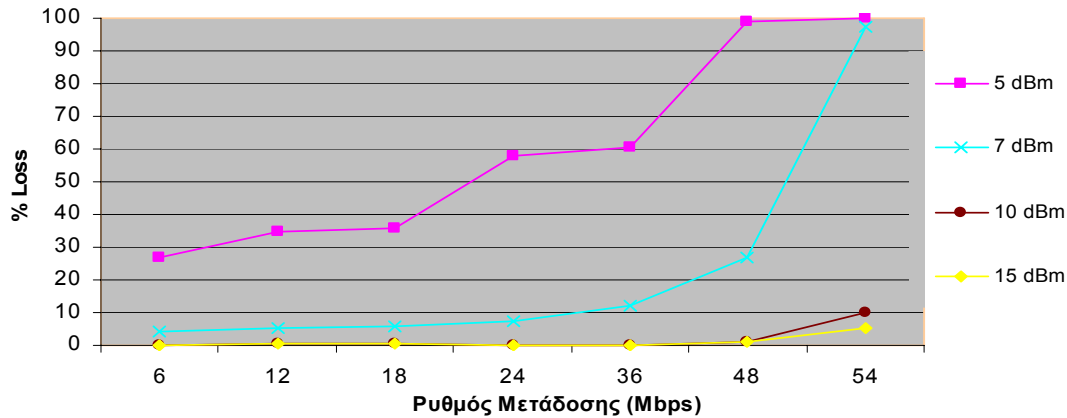
Διαπιστώνεται ότι και εδώ ισχύουν τα προηγούμενα συμπεράσματα, με την διαφορά ότι οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα αριστερά. Αυτό γιατί τα κατεστραμμένα πακέτα δεν απορρίπτονται αμέσως αλλά γίνονται προσπάθειες (επίπεδο MAC) σωστής αναμετάδοσής τους. Επίσης, παρατηρείται και εδώ ότι οι απώλειες των πακέτων που προκύπτουν έχοντας ενεργοποιήσει τον αλγόριθμο αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης, δεν παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα από την περίπτωση που έχει οριστεί κατάλληλα ο ρυθμός μετάδοσης.

### 6.2.2 Εξάρτηση του ρυθμού απωλειών από τον ρυθμό μετάδοσης

Χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα των προηγούμενων μετρήσεων για να βγάλουμε πιο σαφή συμπεράσματα για την εξάρτηση των απωλειών από τον ρυθμό μετάδοσης του συνδέσμου. Παραθέτουμε το Διάγραμμα 9 από τις μετρήσεις του συνδέσμου Tsakalidis ↔ Lygerakis, στην περίπτωση όπου οι επαναμεταδόσεις είναι απενεργοποιημένες. Ο άξονας x τώρα αντιπροσωπεύει τους ρυθμούς μετάδοσης και οι καμπύλες τις διάφορες τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος (όχι πραγματικής).

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες είναι αύξουσες. Αυτό δηλώνει ότι το ποσοστό των απωλειών μεγαλώνει όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης. Επίσης, για συγκεκριμένο ρυθμό (π.χ. 48 Mbps), διακρίνουμε την αύξηση του ποσοστού χαμένων πακέτων όσο μειώνεται η τιμή της εκπεμπόμενης ισχύος. Τέλος, πρέπει να τονίσουμε την ελάχιστη διαφορά μεταξύ της καμπύλης της ισχύος εκπομπής των 10 dBm με αυτήν των 15 dBm. Αυτό επιβεβαιώνει τα όσα έχουμε αναφέρει

προηγουμένως για τον συγκεκριμένο σύνδεσμό, ο οποίος παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση για ισχύ εκπομπής μεγαλύτερη των 10 dBm.



Διάγραμμα 9: Ποσοστό απωλειών Tsakalidis ↔ Lygerakis συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης

### 6.3 Ανάλυση του ρυθμού διεκπεραίωσης

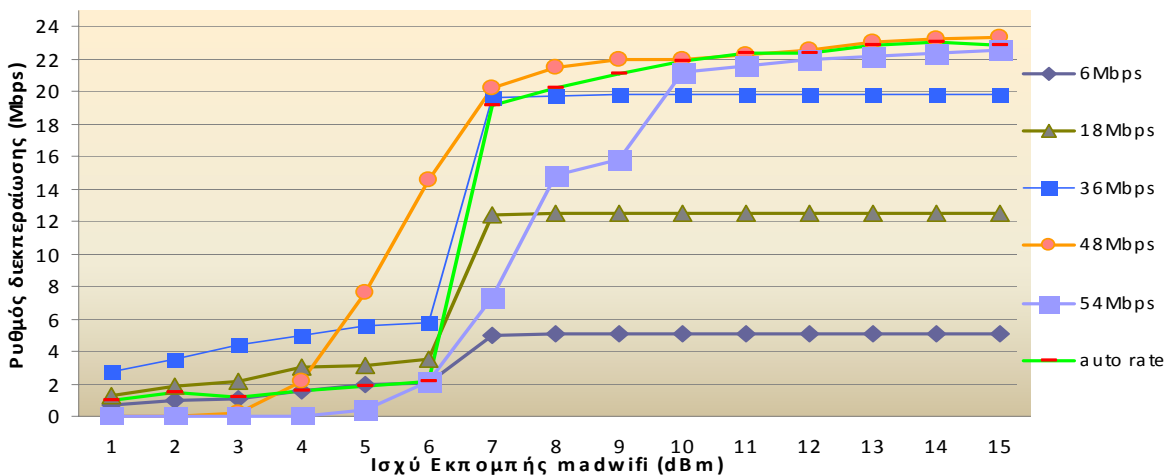
Συνεχίζοντας την έρευνα για την απόδοση των συνδέσμων του μητροπολιτικού δικτύου παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της εξάρτησης του ρυθμού διεκπεραίωσης από την εκπεμπόμενη ισχύ και από τον ρυθμό μετάδοσης. Οι μετρήσεις και εδώ (όπως και στην προηγούμενη παράγραφο 6.2) πραγματοποιήθηκαν αρχικά με ενεργοποιημένες και τις επαναμεταδόσεις του επιπέδου MAC και στην συνέχεια με απενεργοποιημένες. Θεωρούμε όμως ότι η λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου χωρίς τη βασική λειτουργία του επιπέδου MAC δεν είναι σύνηθες φαινόμενο. Οπότε, παραθέτουμε κυρίως τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την κανονική λειτουργία του MAC επιπέδου. Θα εστιάσουμε στην εξάρτηση του ρυθμού διεκπεραίωσης από τον ρυθμό μετάδοσης καθώς εκεί προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Η μέτρηση του ρυθμού διεκπεραίωσης των πειραμάτων έγινε με τη χρήση του εργαλείου iperf, ώστε να δημιουργηθούν UDP ροές. Το μέγεθος των πακέτων είναι 1470 Bytes (+8 +20 Bytes η UDP και η IP επικεφαλίδα αντίστοιχα). Η διάρκεια ενός πειράματος είναι 20 δευτερόλεπτα και υπολογίζεται η μέση τιμή δέκα πειραμάτων. Μεταξύ των πειραμάτων παρεμβάλλεται χρονικό διάστημα 10 δευτερολέπτων.

#### 6.3.1 Εξάρτηση του ρυθμού διεκπεραίωσης από την ισχύ εκπομπής



Το Διάγραμμα 10 που παρουσιάζουμε παρακάτω, απεικονίζει τον μέγιστο δυνατό ρυθμό διεκπεραίωσης που μπορεί να επιτύχει ο σύνδεσμος Tsakalidis → Lygerakis συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος. Προκειμένου να γίνει εμφανής η μεγάλη διαφορά στον ρυθμό διεκπεραίωσης UDP ροών, που προκαλεί η ακύρωση της βασικής λειτουργίας του επιπέδου MAC, παραθέτουμε ενδεικτικά και το Διάγραμμα 11. Στο διάγραμμα αυτό οι μετρήσεις έγιναν έχοντας απενεργοποιήσει τις επαναμεταδόσεις κατεστραμμένων πακέτων του MAC επιπέδου.

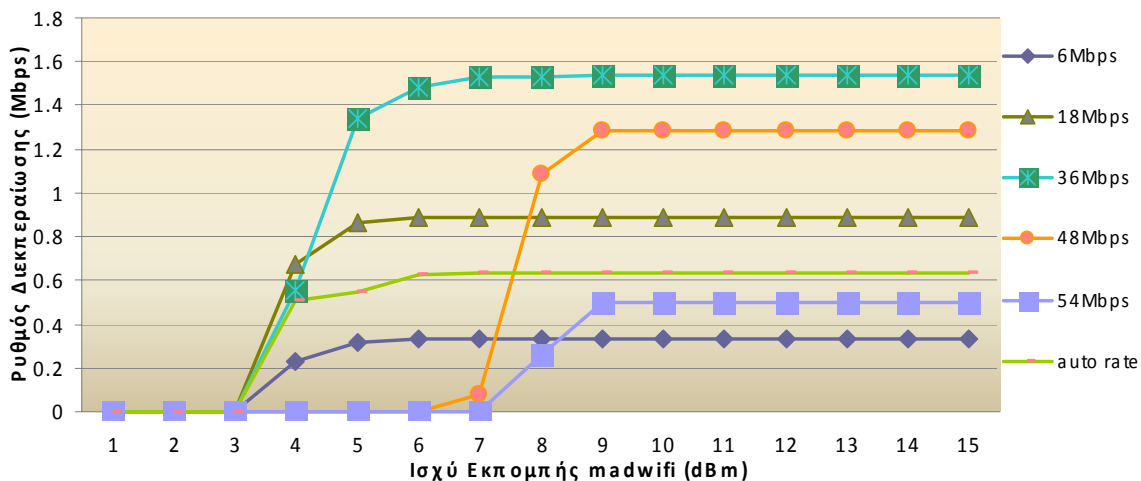


**Διάγραμμα 10: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → Lygerakis, συναρτήσει της ισχύος εκπομπής**

Εύκολα παρατηρούμε την αναμενόμενη σχέση της ισχύος εκπομπής με τον ρυθμό διεκπεραίωσης (αυξάνεται όσο αυξάνουμε την ισχύ). Επίσης, βλέπουμε ότι όλοι οι ρυθμοί μετάδοσης (εκτός από τα 54 Mbps) φθάνουν την μέγιστη τιμή τους σε τιμές ισχύος λίγο μεγαλύτερες από 8 dBm (πραγματική ισχύς 16.5 dBm, βλέπε Διάγραμμα 4). Επομένως, μπορούμε να μειώσουμε την ισχύ λειτουργίας των δύο διεπαφών. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι ο ρυθμός των 48 Mbps, παρουσιάζει το μεγαλύτερο ρυθμό διεκπεραίωσης στον συγκεκριμένο σύνδεσμο, γεγονός που θα φανεί καλύτερα στην επόμενη (6.3.2) ενότητα. Τέλος, παρακολουθώντας την καμπύλη του αλγορίθμου αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης διακρίνουμε ότι δε ξεπερνά τους ρυθμούς διεκπεραίωσης που πετυχαίνουμε έχοντας ορίσει κατάλληλα τον ρυθμό μετάδοσης (όπως συμβαίνει και με τον ρυθμό απωλειών των πακέτων).

Συγκρίνοντας τώρα το Διάγραμμα 10 με το Διάγραμμα 11, βλέπουμε τεράστια μείωση σε όλες τις τιμές του ρυθμού διεκπεραίωσης (π.χ. για τον ρυθμό μετάδοσης 48 Mbps από 23 Mbps μειώνεται σε 1.3 Mbps). Για να εξηγήσουμε την διαφορά αυτήν αρκεί να θυμηθούμε την λειτουργία του UDP πρωτοκόλλου. Το UDP πρωτόκολλο μεταδίδει πακέτα στην εφαρμογή του προορισμού χωρίς

καμία εγγύηση για την σωστή μετάδοση των πακέτων, σε αντίθεση με το TCP. Υπεύθυνη για την σωστή μετάδοση είναι μόνο η εφαρμογή (επίπεδο εφαρμογής OSI) που στην περίπτωση μας, εργαλείο iperf, δεν «ξαναζητάει» τα κατεστραμμένα πακέτα. Αυτό συμβαίνει όταν δεν λειτουργεί σωστά το επίπεδο MAC (Διάγραμμα 11). Αντίθετα, με επαναμεταδόσεις MAC (Διάγραμμα 10), στα πακέτα που ανιχνεύονται λάθη, πριν αυτά φτάσουν στο επίπεδο της εφαρμογής, γίνονται ξανά προσπάθειες σωστής μετάδοσης.



**Διάγραμμα 11:** Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → Lygerakis, συναρτήσει της ισχύος εκπομπής (χωρίς επαναμεταδόσεις χαμένων πακέτων)

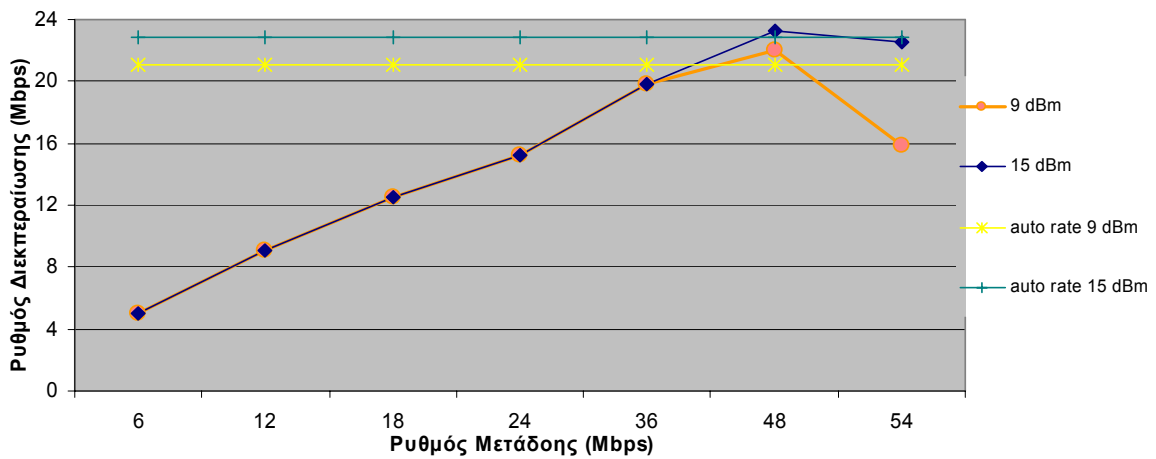
Επιπροσθέτως, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός διεκπεραίωσης που δίνεται επηρεάζεται περισσότερο όταν λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί, δεν χάνονται μόνο UDP πακέτα αλλά καταστρέφονται και τα πακέτα που στέλνει ο αλγόριθμος (rolling packets), προκειμένου να γίνει σωστή εκτίμηση (αύξηση ή μείωση) του ρυθμού μετάδοσης.

### 6.3.2 Εξάρτηση του ρυθμού διεκπεραίωσης από τον ρυθμό μετάδοσης

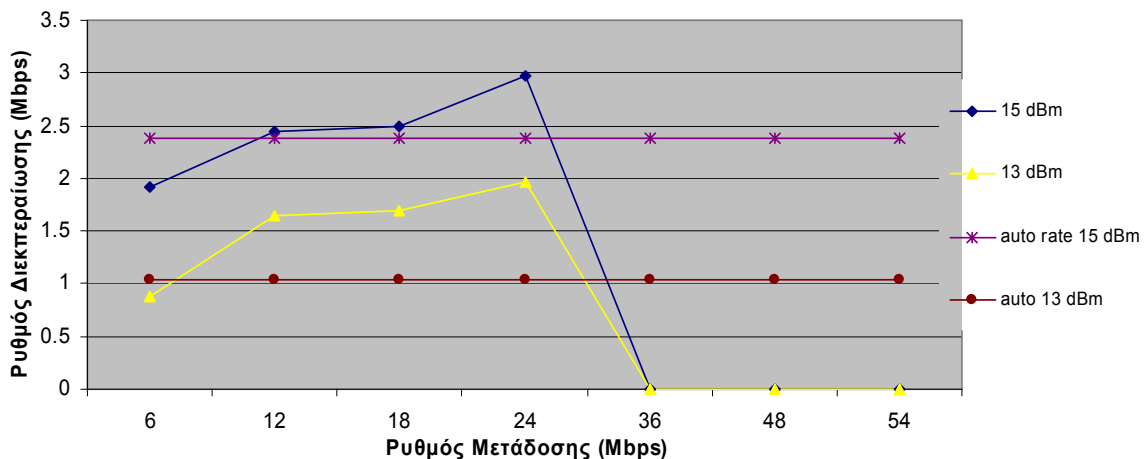
Ερευνώντας την εξάρτηση των διάφορων μετρητών από την ισχύ εκπομπής είναι δύσκολο να εξάγουμε σπουδαία συμπεράσματα που θα μας βοηθήσουν στη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου μας, δεδομένου ότι όλα τα ασύρματα μητροπολιτικά (και μη) δίκτυα εκπέμπουν στην μέγιστη δυνατή επιτρεπόμενη ισχύ. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να μελετήσουμε την εξάρτηση του ρυθμού διεκπεραίωσης από τον ρυθμό μετάδοσης. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν οδηγούν

στην βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων συνδέσμων. Παραθέτουμε και αναλύουμε τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την μελέτη της τελευταίας προαναφερθείσας εξάρτησης.

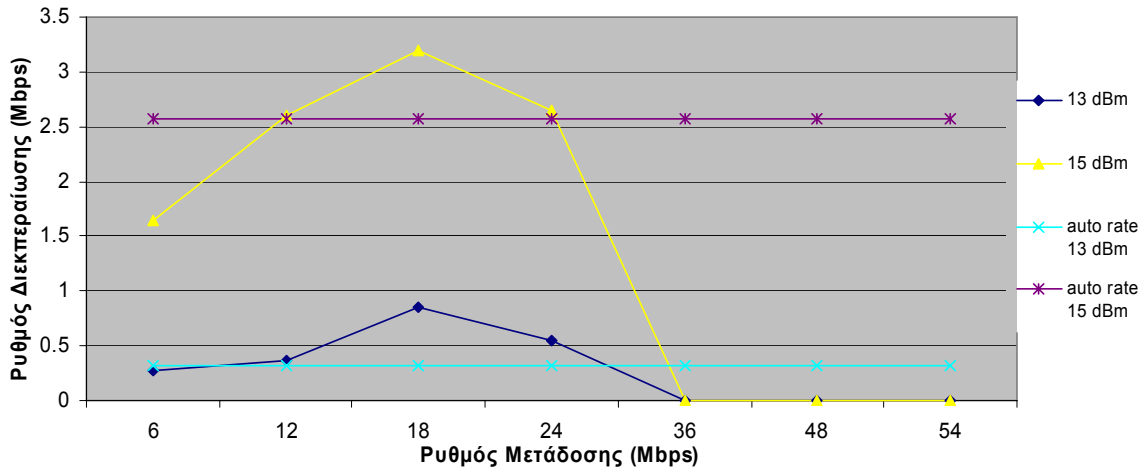
Παρακάτω προβάλλονται τα Διαγράμματα (12, 13, 14) που δημιουργήθηκαν από τις μετρήσεις των τριών υπό εξέταση συνδέσμων (Tsakalidis → Lygerakis, Tsakalidis → UoC, και Lygerakis → Ekab). Όταν λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης ο ρυθμός διεκπεραίωσης που επιτυγχάνεται σε καθορισμένες τιμές ισχύος συμβολίζεται στα διαγράμματα με ευθείες. Με τις ευθείες αυτές συγκρίνουμε εύκολα την απόδοση του αλγορίθμου σε σχέση με τις καθορισμένες τιμές ρυθμού μετάδοσης (fixed rate).



**Διάγραμμα 12: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → Lygerakis, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης**



**Διάγραμμα 13: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Tsakalidis → UoC, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης**



**Διάγραμμα 14: Ρυθμός διεκπεραίωσης του συνδέσμου Lygerakis → Ekab, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης**

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι:

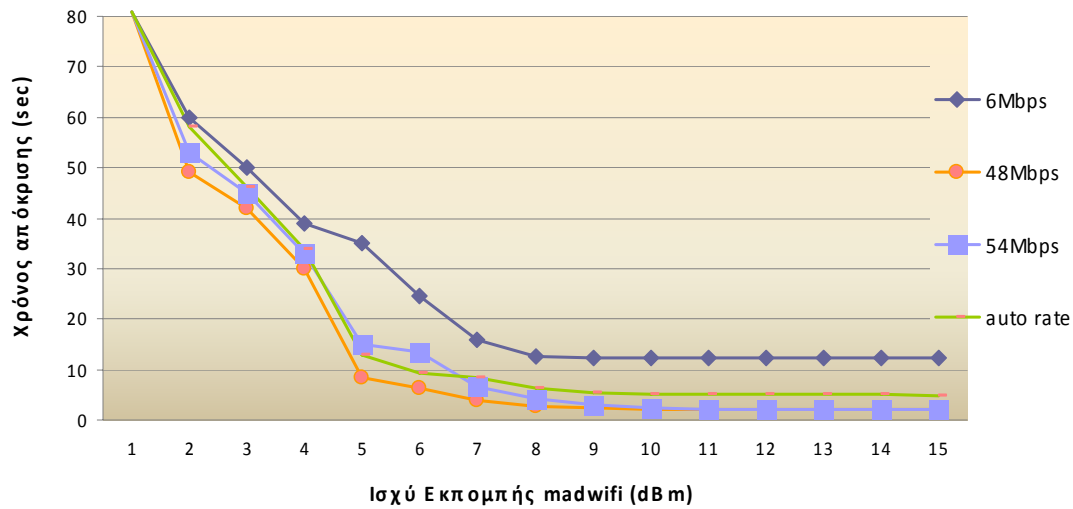
- στον σύνδεσμο Tsakalidis → Lygerakis παρατηρείται ελάχιστη διαφορά στον ρυθμό διεκπεραίωσης για ισχύ εκπομπής 9 dBm σε σχέση με ισχύ 15 dBm, για ρυθμούς μετάδοσης μικρότερους των 48Mbps (δηλαδή σχεδόν ίδια συμπεριφορά για ισχύ μεγαλύτερη των 9 dBm),
- οι ζεύξεις Tsakalidis → UoC και Lygerakis → Ekab δεν μπορούν να μεταδώσουν σε ρυθμό μεγαλύτερο των 24 Mbps. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι δεν μπορεί να υπάρξει σύνδεση σε ρυθμούς μεγαλύτερους από 24 Mbps,
- οι καμπύλες της ισχύος παρουσιάζουν τοπικό μέγιστο σε καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης, για κάθε σύνδεσμο. Για παράδειγμα στο Διάγραμμα 14 το τοπικό μέγιστο εμφανίζεται για ρυθμό μετάδοσης 18 Mbps. Αυτό δηλώνει ότι στον συγκεκριμένο σύνδεσμο ο μέγιστος δυνατός ρυθμός διεκπεραίωσης μπορεί να επιτευχθεί ορίζοντας τον ρυθμό μετάδοσης στα 18 Mbps,
- και στους τρεις συνδέσμους η απόδοση του ρυθμού διεκπεραίωσης είναι καλύτερη στην περίπτωση που έχουμε ορίσει κατάλληλα τον ρυθμό μετάδοσης, παρά όταν επιλέγεται αυτόματα μέσω του αλγορίθμου.

## 6.4 Ανάλυση του χρόνου απόκρισης (Latency)

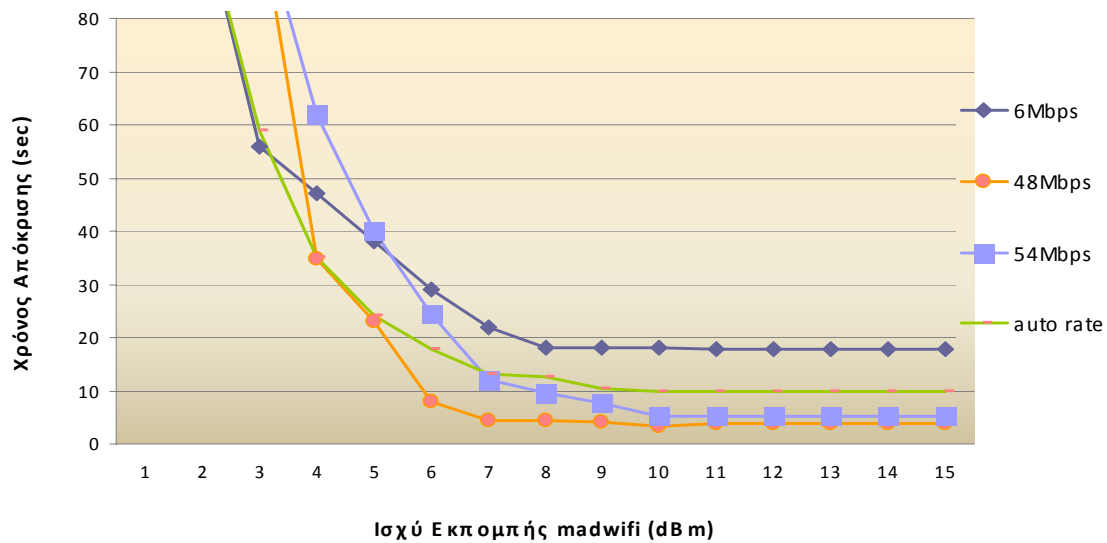
Ερευνήσαμε την απόδοσή του χρόνου απόκρισης στους συνδέσμους για ροή δεδομένων - ιστοσελίδας (web-traffic). Χρόνος απόκρισης ονομάζεται το χρονικό διάστημα από την αποστολή της αίτησης μέχρι την ολοκληρωμένη μεταφορά μιας ιστοσελίδας ή ενός αρχείου (latency). Εγκαταστήσαμε έναν Apache web server [26] στους κόμβους Tsakalidis, UoC και Ekab, ώστε να έχουμε από ένα ζευγάρι εξυπηρέτη-πελάτη (server-client) σε κάθε υπό εξέταση σύνδεσμο. Ως εκ τούτου, δημιουργήσαμε τα εξής ζεύγη: Lygerakis (πελάτης) ← Tsakalidis (εξυπηρέτης), Tsakalidis (πελάτης) ← UoC (εξυπηρέτης) και Lygerakis (πελάτης) ← Ekab (εξυπηρέτης). Οι πελάτες εκτελούν HTTP αιτήσεις με τη χρήση της εντολής wget (), για να μεταφορτώσουν (download) ένα αρχείο μεγέθους 1 MByte το οποίο έχει τοποθετηθεί στους εξυπηρέτες. Κάθε νέα αίτηση πραγματοποιείται σε τυχαίο εκθετικά κατανεμημένο χρονικό διάστημα, με μέσο το 1 δευτερόλεπτο μετά την άφιξη του προηγούμενου αρχείου. Για τον υπολογισμό των τιμών των γραφικών παραστάσεων λάβαμε υπόψη μας τον μέσο όρο των χρόνων απόκρισης 20 αρχείων. Στα πειράματα όμως, που ο χρόνος απόκρισης υπερέβαινε τα 80 δευτερόλεπτα (κυρίως σε αυτά με χαμηλή ισχύ εκπομπής), διακόπταμε την εκτέλεση της wget θεωρώντας αδύνατη την μεταφορά των πακέτων. Όπως και στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου θα αναλύσουμε ενδεικτικά ένα μέρος των διαγραμμάτων που δημιουργήσαμε, καθώς τα συμπεράσματα είναι παρόμοια για όλες τις μετρήσεις μας. Θα επικεντρωθούμε κυρίως στην μελέτη του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης. Εκεί διαπιστώνονται συμπεράσματα που οδηγούν στην βελτιστοποίηση της απόδοσης του μητροπολιτικού δικτύου. Επίσης, θα δώσουμε έμφαση στα αποτελέσματα που προέκυψαν έχοντας ενεργοποιήσει τις αναμεταδόσεις στο επίπεδο MAC.

### 6.4.1 Εξάρτηση του χρόνου απόκρισης από την ισχύ εκπομπής

Τα επόμενα Διαγράμματα (15, 16) απεικονίζουν τον χρόνο απόκρισης στον σύνδεσμο, Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσει της ισχύος εκπομπής των διεπαφών για τους διαφόρους ρυθμούς μετάδοσης. Οι τιμές του Διαγράμματος 15 προήλθαν χωρίς να έχει τροποποιηθεί η λειτουργία των συνδέσμων, ενώ στο Διάγραμμα 16, έχουν απενεργοποιηθεί οι επαναμεταδόσεις του επιπέδου MAC.



Διάγραμμα 15: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος



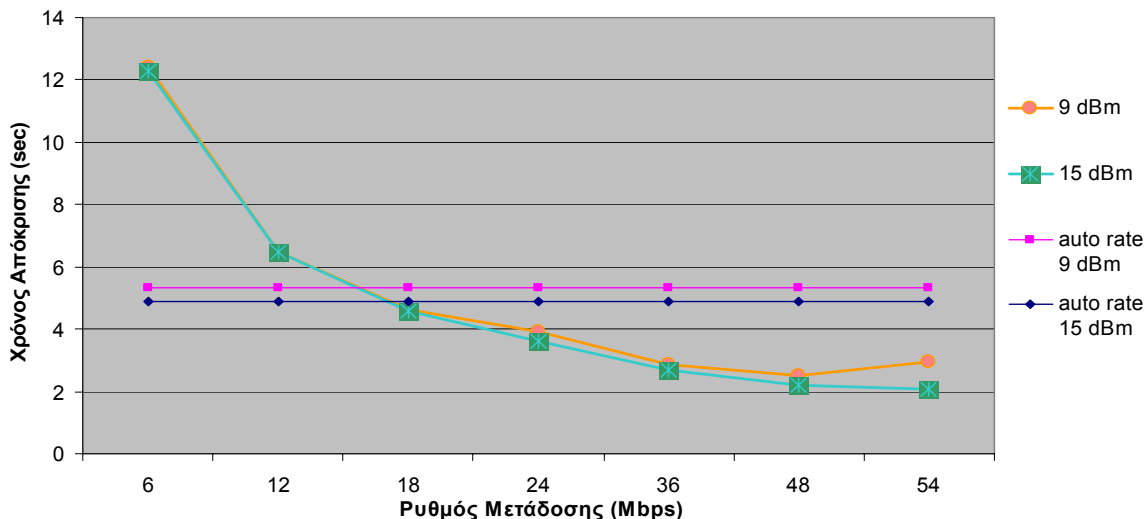
Διάγραμμα 16: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις)

Αναλύοντας το Διάγραμμα 15, βλέπουμε ότι ο χρόνος απόκρισης αυξάνεται καθώς μειώνουμε την ισχύ εκπομπής, ενώ μειώνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης (θα αναλυθεί καλύτερα στην επόμενη ενότητα). Η απόδοση του αλγόριθμου επιλογής, ξανά, δεν δίνει καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που παίρνουμε έχοντας καθορίσει τον ρυθμό μετάδοσης.

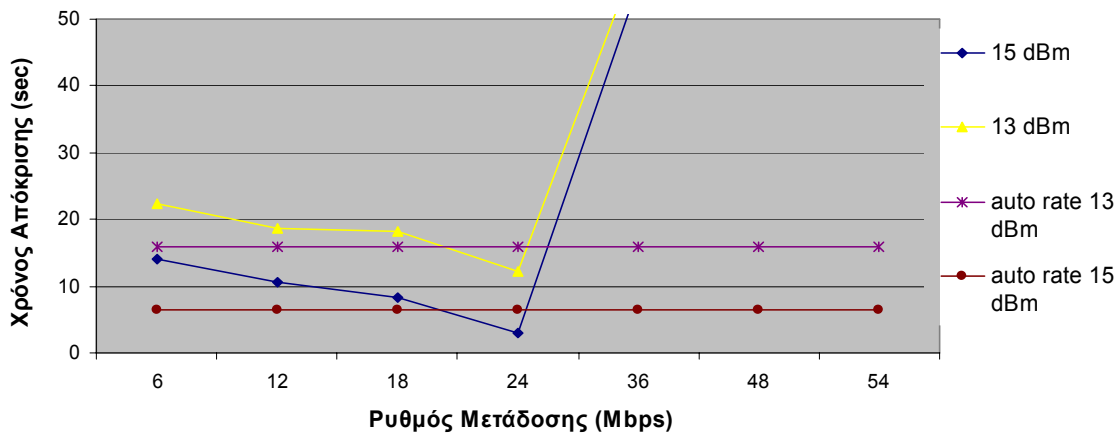
Κοιτάζοντας παράλληλα τώρα τα Διαγράμματα 15 και 16 διαπιστώνουμε ότι, αντίθετα με ότι συνέβη στον ρυθμό διεκπεραίωσης, εδώ έχουμε μικρή αύξηση στον χρόνο απόκρισης του πακέτου. Για παράδειγμα παρατηρώντας την καμπύλη των 48 Mbps και στα δύο διαγράμματα βλέπουμε ότι για ισχύ εκπομπής μεγαλύτερη των 10 dBm ( $\approx 21$  dBm πραγματική ισχύς), έχουμε αύξηση μόνο 2 sec (αντίστοιχα στον ρυθμό διεκπεραίωσης η μείωση ήταν περίπου στα 20 Mbps). Αυτό εξηγείται ανατρέχοντας στην λειτουργία του πρωτοκόλλου HTTP, κατά την οποία για να μεταφορτωθεί ένα αρχείο ή μια ιστοσελίδα δημιουργείται μια TCP σύνδεση (επίπεδο μεταφοράς OSI). Εφόσον το TCP είναι υπεύθυνο για την σωστή μεταφορά των πακέτων, όσα δεν ληφθούν σωστά από το MAC (επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων OSI), στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επαναμεταδόσεις θα ξαναζητηθούν από το TCP. Συνεπώς, το HTTP (επίπεδο εφαρμογής OSI) θα λάβει σίγουρα όλα τα πακέτα αλλά με λίγο μεγαλύτερη καθυστέρηση.

#### 6.4.2 Εξάρτηση του χρόνου απόκρισης από τον ρυθμό μετάδοσης

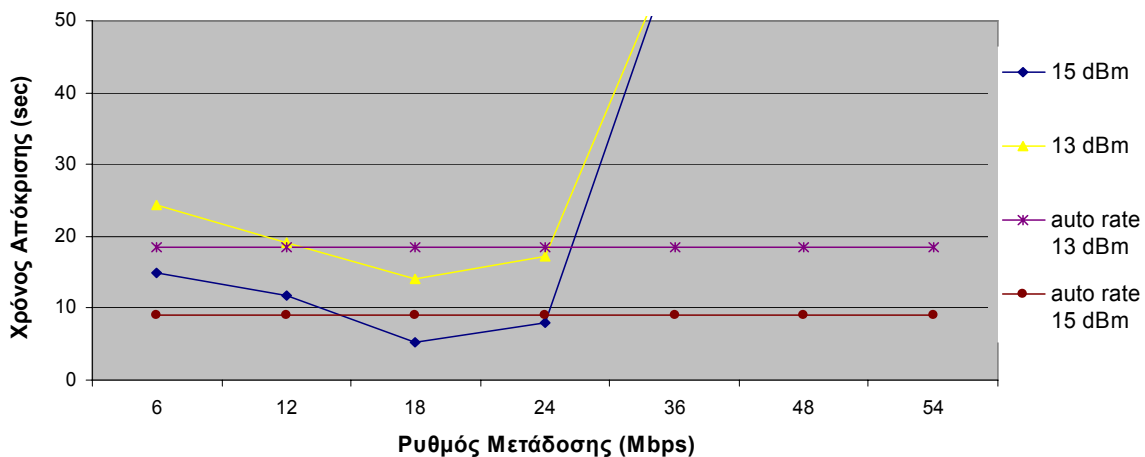
Στην συνέχεια παραθέτουμε τις μετρήσεις της εξάρτησης του χρόνου απόκρισης από τον ρυθμό μετάδοσης. Τα Διαγράμματα 17, 18 και 19 αντιστοιχούν στους τρεις συνδέσμους του δικτύου που επιλέξαμε. Οι διαφορετικές καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις τιμές της ισχύος, ενώ οι ευθείες τις τιμές που πήραμε έχοντας ενεργοποιήσει τον αλγόριθμο αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης.



Διάγραμμα 17: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Tsakalidis, συναρτήσε της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις)



Διάγραμμα 18: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Tsakalidis ← UoC, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις)



Διάγραμμα 19: Χρόνος απόκρισης του συνδέσμου Lygerakis ← Ekab, συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος (χωρίς MAC επαναμεταδόσεις)

Οι παρατηρήσεις που εξάγονται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι:

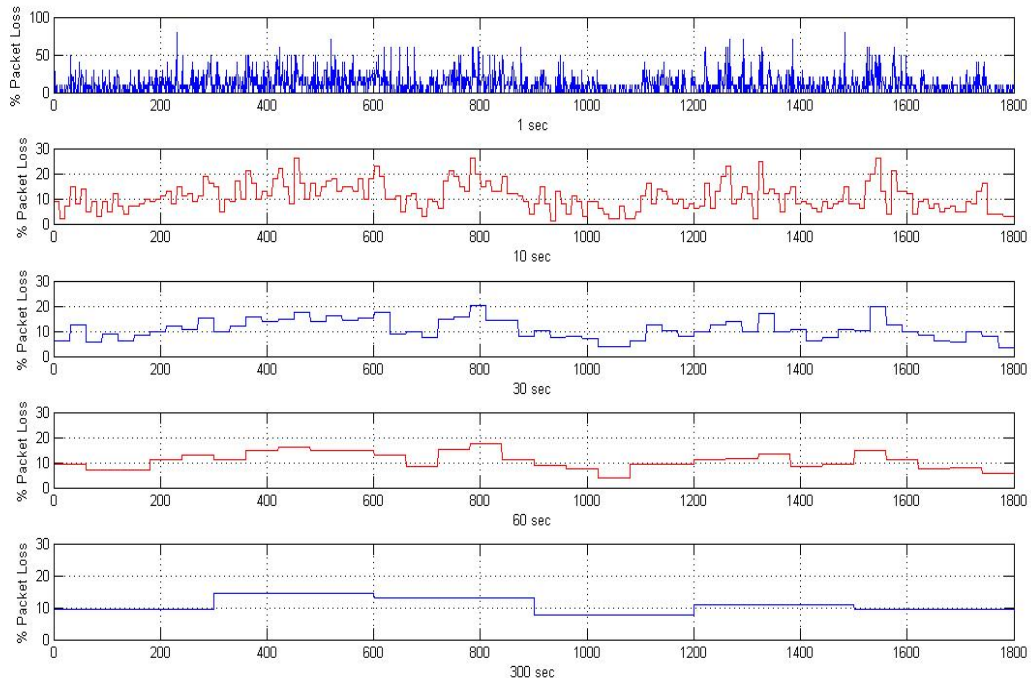
- στους συνδέσμους Tsakalidis ← UoC και Lygerakis ← Ekab ο χρόνος απόκρισης του αρχείου για ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους των 24Mbps είναι άπειρος. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στους δύο κόμβους και το TCP προσπαθεί συνέχεια (άσκοπα) να λάβει τα επιμέρους πακέτα του αρχείου,
- και στους τρεις συνδέσμους οι καμπύλες της ισχύος παρουσιάζουν τοπικό ελάχιστο για κάποιον καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης (48, 24, 18 Mbps αντίστοιχα). Συνεπώς, αφού η συμπεριφορά της συγκεκριμένης μετρικής μεγιστοποιείται στα συγκεκριμένα αυτά σημεία (ρυθμούς μετάδοσης), μεγιστοποιείται και η απόδοση των συνδέσμων,



- ο χρόνος απόκρισης του αρχείου, όταν έχει ενεργοποιηθεί ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης είναι μεγαλύτερος από την περίπτωση που ο ρυθμός μετάδοσης έχει προκαθοριστεί στον βέλτιστο για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης (48, 24, 18 Mbps, οι ευθείες εμφανίζονται υψηλότερα από τα ελάχιστα των καμπύλων).

## 6.5 Χρονική συσχέτιση της απώλειας πακέτων

Απώτερος στόχος αυτής της παραγράφου είναι η έρευνα της συσχέτισης μεταξύ συνεχόμενων χαμένων πακέτων. Για να πραγματοποιήσουμε αυτήν την μελέτη κινηθήκαμε ως εξής: Αρχικά απενεργοποιήσαμε τις επαναμεταδόσεις του επιπέδου MAC. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας το εργαλείο ring, μετρήσαμε τα χαμένα πακέτα για διάρκεια μισής ώρας. Ειδικότερα, αναπτύξαμε ένα πρόγραμμα (script) που έτρεχε το ring για ένα δευτερόλεπτο, 1800 φορές (μισή ώρα = 1800 δευτερόλεπτα). Το μέγεθος των ICMP πακέτων το ορίσαμε στα 1000 Bytes (+28 οι επικεφαλίδες IP και ICMP) και το διάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων πακέτων στα 0.1 δευτερόλεπτα (δηλαδή 10 πακέτα το δευτερόλεπτο). Τέλος, τυπώσαμε σε διαγράμματα αυτές τις τιμές, όπως επίσης και τις τιμές που προέκυψαν από το μέσο όρο 10, 30, 60 και 300 δευτερολέπτων.



**Διάγραμμα 20: Χρονική συσχέτιση χαμένων πακέτων του συνδέσμου Tsakalidis ↔ UoC (ρυθμός μετάδοσης 18 Mbps και ισχύς 15 dBm)**

Επιλέξαμε να παρουσιάσουμε ενδεικτικά το Διάγραμμα 20 του συνδέσμου Tsakalidis ↔ UoC. Ορίσαμε κατάλληλα τον ρυθμό μετάδοσης στα 18 Mbps ο οποίος δίνει ποσοστό απωλειών περίπου 10%, ούτε πολύ κοντά στο 0% ούτε στο 100%.

Παρατηρούμε ότι η χρονική συσχέτιση των απωλειών υφίσταται έντονα στον συγκεκριμένο σύνδεσμο του Ασύρματου Μητροπολιτικού δικτύου. Η διακύμανση της απώλειας πακέτων ανά μονάδα χρόνου μειώνεται όταν οι μετρήσεις είναι σε μεγάλα χρονικά διαστήματα (λεπτά). Ουσιαστικά, η διακύμανση ομαλοποιείται όταν υπολογίζεται η μέση τιμή (averaging) όλο και μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων (από δευτερόλεπτα σε λεπτά).

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων μας διαπιστώσαμε μία ακόμα αιτία που δημιουργεί συσχέτιση. Καθώς εκτελούνταν τα πειράματα με χαμηλή ισχύ εκπομπής στους κόμβους παρατηρήθηκε η στιγμιαία διακοπή της σύνδεσης, εξαιτίας του χαμηλού λόγου του σήματος προς το θόρυβο. Σαν αποτέλεσμα ήταν η έκρηξη λαθών (100% loss) η οποία διαρκούσε όσο χρειάζεται για να συνδεθούν ξανά ασύρματα οι δύο κόμβοι. Η διάρκεια της επανασύνδεσης κυμαινόταν από 10 έως 30 δευτερόλεπτα.

## 6.6 Συμπεριφορά απωλειών κατά την διάρκεια της ημέρας

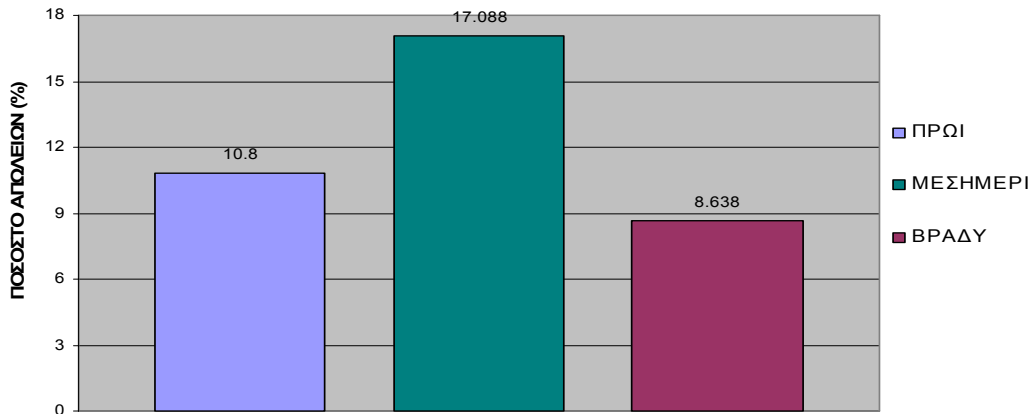
Για να διαπιστώσουμε την συμπεριφορά του ρυθμού των απωλειών κατά την διάρκεια της ημέρας, εκτελέσαμε τα πειράματα της παραγράφου 6.5 σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές: πρωί (9.00 π.μ), μεσημέρι (15.00 μ.μ) και βράδυ (24.00 μ.μ). Παραθέτουμε τον Πίνακα XIII που προέκυψε από τις μετρήσεις στον σύνδεσμο Tsakalidis ↔ UoC.

ώρα	μέση τιμή απωλειών (%)	std	95% confidence interval
9:00 - 9:30	10.8	13.001	± 0.019
15:00 - 15:30	17.088	14.301	± 0.021
00:00 - 00:30	8.638	10.595	± 0.015

**Πίνακας XIII: Ποσοστό απωλειών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στον σύνδεσμο Tsakalidis ↔ UoC (ρυθμός μετάδοσης 18 Mbps και ισχύς 15 dBm)**

Από το Διάγραμμα 21 φαίνεται ότι οι απώλειες δεν είναι σταθερές κατά την διάρκεια της ημέρας. Το ποσοστό των χαμένων πακέτων αυξάνεται το μεσημέρι ενώ μειώνεται κατά την διάρκεια της

νύχτας. Η αύξηση των χαμένων πακέτων οφείλεται σε παρεμβολές από άλλα γειτονικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, ακριβώς δίπλα στον κόμβο UoC εκπέμπουν κεραιές στο 802.11a που ανήκουν στο ασύρματο δίκτυο των φοιτητών (Heraklion Student Wireless Network - HSWN).



Διάγραμμα 21: Ποσοστό απωλειών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στον σύνδεσμο Tsakalidis ↔ UoC (ρυθμός μετάδοσης 18 Mbps και ισχύς 15 dBm)

## 6.7 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας αυτό το κεφάλαιο συμπεραίνουμε:

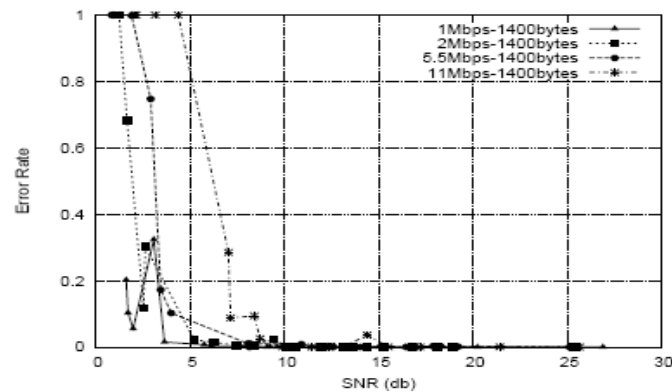
- ο ρυθμός απωλειών των πακέτων αυξάνεται καθώς μειώνεται η ισχύς εκπομπής. Επίσης, αυξάνεται όσο αυξάνουμε τον ρυθμό μετάδοσης,
- ο ρυθμός διεκπεραίωσης αυξάνεται όταν αυξάνουμε την ισχύ εκπομπής. Η καμπύλη που προκύπτει από τον ρυθμό διεκπεραίωσης συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο σε διαφορετικό για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης, ο οποίος εξαρτάται από την απόσταση του συνδέσμου. Συνεπώς, ορίζοντας κατάλληλα τον ρυθμό μετάδοσης, μεγιστοποιούμε τον ρυθμό διεκπεραίωσης,
- ο χρόνος απόκρισης μειώνεται καθώς αυξάνουμε την ισχύ εκπομπής. Ένα τοπικό ελάχιστο εμφανίζεται στην καμπύλη του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης, σε συγκεκριμένο αλλά διαφορετικό για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης (ίδιο σε κάθε σύνδεσμο με αυτόν που μεγιστοποιεί τον ρυθμό διεκπεραίωσης). Δηλαδή ο χρόνος απόκρισης βελτιστοποιείται όταν ο ρυθμός μετάδοσης είναι ίσος με αυτόν που προκαλεί το τοπικό ελάχιστο,

- ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης δεν επιτυγχάνει βέλτιστα αποτελέσματα σε καμία από τις τρεις μετριχές. Συγκεκριμένα, σε σχέση με τον βέλτιστο για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης επιτυγχάνει: απώλειες πακέτων χειρότερες κατά τουλάχιστον 10%, ρυθμό διεκπεραίωσης μικρότερο κατά περίπου 0.5 Mbps και χρόνο απόκρισης μεγαλύτερο κατά σχεδόν 3 δευτερόλεπτα,
- χρονική συσχέτιση των απωλειών υφίσταται στους συνδέσμους του ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου,
- η διακύμανση των απωλειών δεν είναι ίδια καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, καθώς υπάρχουν παρεμβολές από άλλα δίκτυα.

## Κεφάλαιο 7 Προηγούμενες εργασίες

Η ανάγκη για μελέτη διάφορων μηχανισμών των προτύπων 802.11 έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ασυρμάτων δικτύων από διάφορα πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικά από αυτά και συγκρίνονται με το ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο του Ηρακλείου. Επίσης, παραθέτονται ενδιαφέροντα και σχετικά με την εργασία μας, συμπεράσματα από εργασίες και άρθρα (papers) που έχουν δημοσιευτεί και η έρευνα των οποίων έχει στηριχθεί πάνω σε αυτά τα δίκτυα.

Το Digital Gangetic Plains πειραματικό (test-bed) δίκτυο στο [4], είναι ένα 802.11b δίκτυο που έχει αναπτυχθεί με οκτώ συνδέσμους μήκους από 1 έως 37 Km. Οι παραβολικές (grid) κεραιές που χρησιμοποιούν συνδέονται σε διεπαφές Prism2. Εξετάζεται η εξάρτηση των απωλειών των πακέτων από το SNR (αντίθετα με εμάς που εξετάζουμε τον ρυθμό απωλειών συναρτήσει της ισχύος εκπομπής) και τον ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον, εξετάζουν την συμπεριφορά των απωλειών συναρτήσει του μεγέθους των πακέτων. Δείχνουν ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης και το μέγεθος των πακέτων, αυξάνεται το ποσοστό των απωλειών (Διάγραμμα 22).

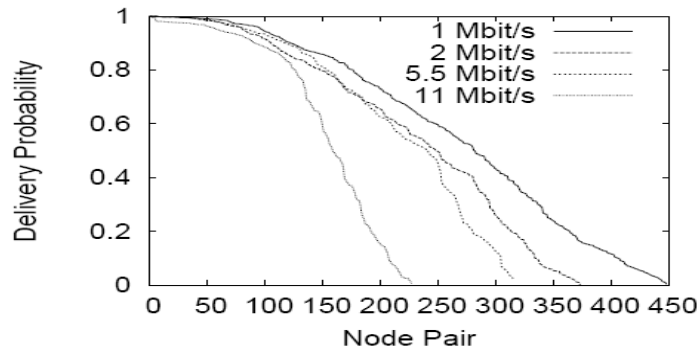


Διάγραμμα 22: Ρυθμός απωλειών συναρτήσει του SNR στο [4]

Επίσης, μελετάται η συσχέτιση των απωλειών, η οποία όπως δείχνουν τα πειράματα δεν είναι σημαντική. Επιπροσθέτως, δείχνουν ότι δεν υπάρχει επίδραση των καιρικών συνθηκών στους συνδέσμους. Τέλος, εξετάζεται η παρεμβολή μεταξύ συνδέσμων, με εντελώς διαφορετικό τρόπο από εμάς, αλλά το γενικό συμπέρασμα των πειραμάτων τους είναι το ίδιο με των δικών μας.

Στο [5] το 802.11b δίκτυο που έχει αναπτυχθεί αποτελείται από 38 κόμβους οι οποίοι είναι κατανομημένοι σε μία περιοχή 6 Km<sup>2</sup>. Χρησιμοποιούν Prism2.5 διεπαφές που συνδέονται σε μη

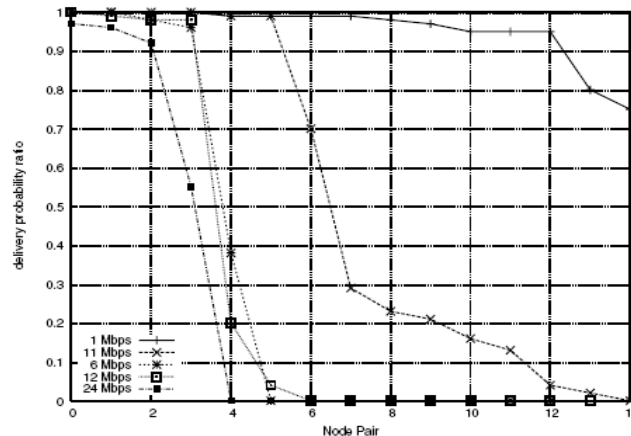
κατευθυντικές κεραιές (ενώ εμείς Atheros και κατευθυντικές). Ερευνάται η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης (Διάγραμμα 23). Αντίθετα όμως με εμάς εξετάζουν μόνο την περίπτωση που ο ρυθμός μετάδοσης έχει καθοριστεί (fixed rate). Παρόλα αυτά τα συμπεράσματα τους συμφωνούν με τα δικά μας, καθώς αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης μειώνεται η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης των πακέτων.



**Διάγραμμα 23: Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων συναρτήσει του αριθμού των συνδέσμων για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης στο [5]**

Επίσης, εξετάζεται η ειρηνικότητα των απωλειών στους διάφορους συνδέσμους και η συσχέτιση του ρυθμού των απωλειών που δείχνεται ότι είναι σημαντική. Μελετάται ακόμα η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης συναρτήσει του SNR (αντί της ισχύος εκπομπής που εξετάζουμε εμείς), με παρόμοια με εμάς συμπεράσματα. Τέλος ερευνώνται οι παρεμβολές από άλλες πηγές μετάδοσης που μεταδίδουν στο ίδιο κανάλι ή σε επικαλυπτόμενα κανάλια. Τα αποτελέσματα τους συμφωνούν με τα δικά μας.

Η απόσταση των συνδέσμων του ασύρματου τοπικού δικτύου στο [6] ποικίλει μεταξύ των 100 και 250 μέτρων. Οι κεραιές των 8 κόμβων είναι μη κατευθυντικές και συνδέονται με διεπαφές Atheros (madwifi driver), που μεταδίδουν σύμφωνα με τα πρότυπα 802.11b/g. Εξετάζεται και εδώ η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης των πακέτων συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης στα πρότυπα 802.11b και 802.11g (Διάγραμμα 24), αλλά μόνο για καθορισμένους ρυθμούς μετάδοσης. Επιπλέον, ερευνώνται οι αιτίες που προκαλούν τις απώλειες (PHY, CRC errors). Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία δείχνουν ότι το 802.11g είναι πιο ευαίσθητο σε απώλειες πακέτων από το 802.11b, σε δίκτυα εξωτερικού περιβάλλοντος.

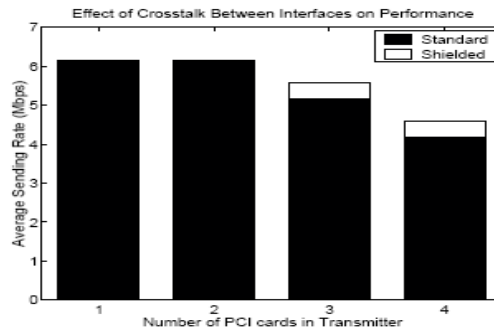


**Διάγραμμα 24: Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων συναρτήσει του αριθμού των συνδέσμων για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης (802.11 b/g) στο [6]**

Το δίκτυο στο [10] (Quail Ridge Wireless Mesh Network), είναι ανεπτυγμένο σε μια περιοχή έκτασης 2000 acres, μακριά από πόλεις. Το γεγονός αυτό, προσφέρει στους ερευνητές το πλεονέκτημα (που δεν έχουμε εμείς) ότι δεν υπάρχει καμία παρεμβολή από άλλες ηλεκτρομαγνητικές συσκευές στις ραδιοζεύξεις τους. Χρησιμοποιούν (όπως και στο ασύρματο δίκτυο μας) 802.11 b/g Atheros διεπαφές που λειτουργούν με χρήση του madwifi driver και είναι συνδεδεμένες με κατευθυντικές κεραιές. Μετρούν την απόδοση του δικτύου (ρυθμό διεκπεραίωσης και χρόνο διάδοσης - RTT), αλλά κυρίως παραθέτουν τις εμπειρίες που απόκτησαν από την υλοποίηση του δικτύου.

Το δίκτυο WILDNet στο [9] αποτελείται από συνδέσμους μήκους από 1 έως 44 Km. Χρησιμοποιούν (όπως και εμείς) Atheros 802.11 a/b/g (madwifi driver) που συνδέονται με υψηλής κατευθυντικότητας κεραιές. Μελετάται η διακύμανση των απωλειών, η παρεμβολή μεταξύ των ασύρματων ζεύξεων και η επιλογή παραμέτρων (όπως slot time), που βελτιώνουν το ρυθμό διεκπεραίωσης και τον χρόνο διάδοσης.

Στο [8] χρησιμοποιούν ένα κόμβο πολλαπλών ασυρμάτων 802.11b διεπαφών. Οι διεπαφές είναι Prism 2.5 και λειτουργούν με χρήση του HostAP driver. Όλα τα πειράματα γίνονται σε εσωτερικό περιβάλλον με απόσταση συνδέσμων μικρότερη από 21 μέτρα. Εξετάζεται η συμπεριφορά του ρυθμού διεκπεραίωσης συναρτήσει του μεγέθους των πακέτων, όπως και στο [4]. Αντίθετα με εμάς δείχνουν ότι ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός των διεπαφών επηρεάζει την απόδοση λειτουργίας των συνδέσμων, όταν λειτουργούν ταυτόχρονα περισσότερες από δύο διεπαφές σε ένα κόμβο (Διάγραμμα 25). Αυτό οφείλεται στον μη προηγμένο εξοπλισμό που χρησιμοποιούν για την υλοποίηση των δικτύων τους.



**Διάγραμμα 25: Μείωση του ρυθμού διεκπεραίωσης λόγω της προσθήκης διεπαφών στο [8]**

Στην συνέχεια εξετάζουν την επίδραση της απόδοσης συναρτήσει της απόστασης των καναλιών, διαπιστώνοντας (όπως και εμείς) ότι μία κεραιά εκπομπής επηρεάζει πάρα πολύ μία κεραιά λήψης όταν λειτουργούν ταυτόχρονα. Τέλος, παρόμοια με εμάς, ερευνούν την σχέση του ρυθμού διεκπεραίωσης δύο γειτονικών συνδέσμων με την απόσταση των αντίστοιχων κεραιών.

Στο [7] βασίζονται σε μετρήσεις που γίνονται σε περιβάλλον εργαστηρίου και σε περιβάλλον ανοιχτού χώρου. Χρησιμοποιούν διεπαφές 802.11 a/b/g βασισμένες στην Atheros (madwifi) που συνδέονται σε μη κατευθυντικές κεραιές. Μελετούν την παρεμβολή γειτονικών καναλιών, ελέγχοντας την διαρροή ισχύος από ένα συγκεκριμένο κανάλι στα γειτονικά του. Ερευνούν την σχέση μιας UDP ροής συναρτήσει του λόγου του σήματος προς την παρεμβολή (Signal to Interference Ratio - SIR). Τέλος, προτείνουν λύσεις για την παρεμβολή γειτονικών καναλιών.



## *Κεφάλαιο 8 Σύνοψη (συμπεράσματα)*

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε το πρόβλημα της παρεμβολής σε συνδέσμους ίδιων ή γειτονικών καναλιών τόσο σε τοπικό (εργαστηριακό) περιβάλλον, όσο και στο περιβάλλον του μητροπολιτικού δικτύου. Σε εσωτερικό περιβάλλον υπάρχει παρεμβολή σε συνδέσμους ίδιων και γειτονικών καναλιών και μάλιστα γίνεται εντονότερη όσο η απόσταση των αντιστοίχων κεραιών, μειώνεται. Στο περιβάλλον του μητροπολιτικού δικτύου του Ηρακλείου, παρεμβολές στις διεπαφές συνδέσμων του ίδιου κόμβου, συμβαίνουν στην περίπτωση που μία διεπαφή λειτουργεί σαν παραλήπτης και μία σαν αποστολέας (Tx/Rx). Η παρεμβολή επηρεάζει τον ρυθμό διεκπεραίωσης του παραλήπτη και γίνεται πιο έντονη όσο μειώνεται η απόσταση των καναλιών λειτουργίας των συνδέσμων και όσο ελαττώνεται η απόσταση των κεραιών.

Επίσης, μελετήθηκε η απόδοση του ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η συμπεριφορά τριών μετริกών (ρυθμός απωλειών πακέτων, ρυθμός διεκπεραίωσης και χρόνος απόκρισης) συναρτήσει της ισχύος εκπομπής των κόμβων και του ρυθμού μετάδοσης αυτών. Ο ρυθμός απωλειών των πακέτων αυξάνεται καθώς μειώνεται η ισχύ εκπομπής. Επίσης, αυξάνεται όσο αυξάνουμε τον ρυθμό μετάδοσης. Ο ρυθμός διεκπεραίωσης αυξάνεται όταν αυξάνουμε την ισχύ εκπομπής. Η καμπύλη που προκύπτει από τον ρυθμό διεκπεραίωσης συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο σε διαφορετικό για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης. Ο χρόνος απόκρισης μειώνεται όσο αυξάνουμε την ισχύ εκπομπής. Ένα τοπικό ελάχιστο εμφανίζεται στην καμπύλη του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης, σε συγκεκριμένο αλλά διαφορετικό για κάθε σύνδεσμο ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον, ο αλγόριθμος αυτόματης επιλογής ρυθμού μετάδοσης δεν προικαλεί βέλτιστα αποτελέσματα σε καμία από τις τρεις μετριάς. Επιπροσθέτως, ερευνήθηκε η χρονική συσχέτιση των απωλειών, η οποία υφίσταται στους συνδέσμους του ασύρματου μητροπολιτικού δικτύου. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά των απωλειών δεν είναι ίδια καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, καθώς υπάρχουν παρεμβολές από άλλα δίκτυα.



## *Βιβλιογραφία*

- [1] 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*
- [2] 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*
- [3] 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*
- [4] K.Chebrolu, B. Raman, and S. Sen, “Long-Distance 802.11b Links: Performance Measurements and Experience,” *in Proc. of ACM MOBICOM*, 2006.
- [5] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, G. Judd, and R. Morris, “Link- Level Measurement from an 802.11b Mesh Network,” *in Proc. of ACM Sigmetrics*, 2004.
- [6] G. Bianchi, F. Formisano, and D. Giustiniano, “802.11b/g Link Level Measurements for an Outdoor Wireless Campus Network,” *in Proc. of IEEE WoWMoM*, 2006.
- [7] 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.
- [8] J. Robinson, K. Papagiannaki, C. Diot, X. Guo, and L. Krishnamurthy, “Experimenting with a Multi-Radio Mesh Networking Testbed,” *in Proc. of WinMee*, 2005.
- [9] R. Patra, S. Nedevschi, S. Surana A. Sheth, L. Subramanian, E. Brewer “WiLDNet: Design and Implementation of High Performance WiFi Based Long Distance Networks”, *In Proc. Of USENIX NSDI, 2006*
- [10] D. Wu, D. Gupta, P. Mohapatra “Quail Ridge Wireless Mesh Network: Experiences, Challenges and Findings” *In Proc. of TRIDENTCOM, 20073*
- [11] V. Angelakis, M. Genetzakis, N. Kossifidis, K. Mathioudakis, M. Ntelakis, S. Papadakis, N. Petroulakis, and V. Siris, “Heraklion MESH: An Experimental Metropolitan Multi-Radio Mesh Network,” *in Proc. of 2<sup>nd</sup> ACM Intl Workshop on*

- Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation and Characterization (WiNTECH), held in conjunction with ACM MobiCom, 2007.*
- [12] V. Angelakis, S. Papadakis, V. Siris, A. Traganitis “Adjacent Channel Interference in 802.11a: Modeling and Validation” *IEEE radio and wireless symposium (RWS) 2008, 22-24 jan, orlando, FL.*
- [13] J. Jun, P. Peddabachagari, M. Sichitiu, “Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its applications”, *IEEE NCA’03, Cambridge MA., Apr. 2002*
- [14] J. C. Bicket, “Bit-rate Selection in Wireless Networks”, *M.S Thesis, MIT, February 2005*
- [15] 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.*
- [16] K. N. Ramachandran, E. M. Belding, K. C. Almeroth, and M. M. Buddhikot, “Interference-Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks,” *in Proc. of IEEE INFOCOM, 2006.*
- [17] D. Wu, D. Gupta, and P. Mohapatra, “Quail Ridge Reserve Wireless Mesh Network: Experiences, Challenges and Findings,” *in Proc. IEEE TRIDENTCOM, 2007.*
- [18] Sheth, S. Nedeveschi, R. Patra, S. Surana, L. Subramanian, and E. Brewer, “Loss Characterization in WiFi-based Long Distance Networks,” *in Proc. of IEEE INFOCOM, 2007.*
- [19] T. Ireland, A. Nyzio, M. Zink, and J. Kurose, “The Impact of Directional Antenna Orientation, Spacing, and Channel Separation on Long-distance Multi-hop 802.11g Networks: A Measurement Study,” *in Proc. of 3rd Intl Workshop on Wireless Network Measurement (WiNMee), 2007.*
- [20] P. Subramanian, H. Gupta, and S. R. Das, “Minimum-Interference Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks,” *in Proc. of IEEE SECON, 2007.*
- [21] <http://www.gentoo.org/>
- [22] <http://madwifi.org/>
- [23] <http://olsr.org/>
- [24] <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>
- [25] <http://oss.oetiker.ch/rrdtool/>
- [26] <http://www.apache.org/>