

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας-Πολυτεχνική Σχολή

**Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων**



**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΩΝ
ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ**

Φοιτητής: Ηλίας Συρίγος

Επιβλέπων καθηγητής:

Αντώνιος Αργυρίου: (Λέκτορας ΤΜΗΥΤΔ)

Δεύτερο μέλος επιτροπής:

Λεάνδρος Τασσιούλας: (Καθηγητής ΤΜΗΥΤΔ)

**Βόλος ,
Οκτώβριος 2012**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιορδάνη Κουτσόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, αρχικό επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Αντώνη Αργυρίου, Λέκτορα του Τμήματος Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου και τον κ. Λέανδρο Τασιούλα, Καθηγητή του Τμήματος Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, συνεπιβλέποντα της εργασίας, για τη ουσιαστική συμβολή τους.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Απόστολο Αποστολάρα, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, για την καθοριστική βοήθειά του, για τις απαντήσεις στις αμέτρητες ερωτήσεις μου, για την καθοδήγησή του και γενικότερα για τον χρόνο που διέθεσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Επίσης ευχαριστώ πολύ τον κ. Κωνσταντίνο Χούμα, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, και τον κ. Γιάννη Καζδαρίδη μεταπτυχιακό φοιτητή του Τμήματος Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, για τη συνδρομή τους στο προγραμματιστικό κομμάτι της εργασίας, όποτε αυτή ήταν αναγκαία.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου για την υποστήριξη, τη συμπαράσταση και κυρίως για την απεριόριστη υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	5
1.1	Συνεργατική επικοινωνία	6
1.2	Σχετική Βιβλιογραφία.....	7
2	Συνεργατική χρονοδρομολόγηση σε ασύρματα δίκτυα.....	9
2.1	Εισαγωγή.....	9
2.2	Μοντέλο συστήματος	9
2.3	Μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης	10
2.4	Ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ισχύος.....	11
3	Υλοποίηση.....	12
3.1	Εισαγωγή.....	12
3.2	Μεθοδολογία Υλοποίησης.....	12
3.3	Σχεδίαση ενός TDMA πρωτοκόλλου για πρόσβαση στο μέσο	14
3.4	Υλοποίηση αλγορίθμων	15
3.5	Τροποποίηση του ath9k driver	17
3.6	Υλοποίηση με τη χρήση του Click.....	17
4	Πειραματικά αποτελέσματα – συμπεράσματα	21
4.1	Μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης	22
4.2	Ελαχιστοποίηση συνολικής κατανάλωσης ισχύος.....	27
5	Παράρτημα Α	29
6	Παράρτημα Β	32
7	Βιβλιογραφία.....	33

1 Εισαγωγή

Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας έχει προκαλέσει την ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων δικτύων όσον αφορά στην αποδοτικότητα τόσο του υλικού, όσο και των ασύρματων υπηρεσιών. Παρόλα αυτά, τα μέγιστα όρια απόδοσης των ασύρματων δικτύων δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί και καταβάλλεται προσπάθεια ώστε να βρεθούν οι πρακτικοί εκείνοι τρόποι που θα μας επιτρέψουν να τα προσεγγίσουμε.

Σε αντίθεση με τα ενσύρματα, τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας τον αέρα ως το μέσο επικοινωνίας δίνουν τη δυνατότητα στις συσκευές να προσπελάσουν το μέσο ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους. Η βασική αυτή διαφορά δεν αξιοποιήθηκε από τα ασύρματα δίκτυα, τα οποία είναι βασισμένα σε μια point-to-point (από σημείο-σε σημείο) επικοινωνία δανεισμένη από τα ενσύρματα. Η ιδέα της point-to-point επικοινωνίας βοήθησε στην εύκολη επέκταση των ήδη υπάρχουσών λύσεων από τα ενσύρματα δίκτυα στα ασύρματα, ωστόσο περιόρισε την απόδοση. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι το πρωτόκολλο IEEE 802.11, που διαχωρίζει τα links στον χρόνο, έχει πρόβλημα επεκτασιμότητας, το οποίο δεδομένης της συνεχούς αύξησης των ασύρματων συσκευών είναι πολύ σοβαρό.

Το ασύρματο μέσο έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τόσο τα προβλήματα όσο και τις λύσεις όσον αφορά την δικτύωση:

1) Τη διάδοση του σήματος σε ένα εύρος από τοποθεσίες, σε αντίθεση με το ενσύρματο μέσο που το σήμα διαδίδεται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Έτσι το σήμα φτάνει σε μη επιθυμητές περιοχές προκαλώντας παρεμβολές.

2) Την πρόκληση παρεμβολών ανάμεσα σε κοντινούς χρήστες που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης (throughput) και να αυξάνονται οι απώλειες των δεδομένων (loss rate).

3) Τη μεταβολή τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο της ποιότητας του καναλιού που έχει ως αποτέλεσμα και πάλι τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης και την αύξηση των απωλειών δεδομένων.

1.1 Συνεργατική επικοινωνία

Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι στο ασύρματο μέσο το σήμα διαδίδεται σε πολλές τοποθεσίες, μπορούμε να βελτιώσουμε δραστικά την απόδοση ενός ασύρματου δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην αναμετάδοση της πληροφορίας που αποστέλλεται από έναν κόμβο πηγή σε ένα κόμβο προορισμό από γειτονικούς κόμβους που "ακούνε" την πληροφορία αυτή. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εξασθένησης του σήματος λόγω της απόστασης, αλλά και των παρεμβολών. Έτσι η μετάδοση μπορεί να γίνει με χαμηλότερη ισχύ (transmit power) ή με υψηλότερο ρυθμό (throughput).

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση στο IEEE 802.11 (WiFi) ενός συνεργατικού αλγορίθμου σε ένα ασύρματο δίκτυο με τοπολογία διαμαντιού. Αυτό αποτελείται από έναν κόμβο πηγή (source), ένα κόμβο προορισμό (destination) και δύο κόμβους αναμεταδότες (relays). Τα ζητούμενα της υλοποίησης ήταν η σταθεροποίηση των ουρών των κόμβων και η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης (throughput) ή η ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος (power consumption). Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένα TDMA σχήμα επικοινωνίας όπου σε κάθε χρονοθυρίδα (time slot) επιλέγεται ο κατάλληλος κόμβος για αναμετάδοση με βάση το ζητούμενο αποτέλεσμα (μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης/ελαχιστοποίηση καταναλισκόμενης ισχύος). Επιπλέον δημιουργήθηκε ο κατάλληλος μηχανισμός για τη μετάδοση της επιλογής του κόμβου αναμεταδότη και της πληροφορίας για τα μήκη των ουρών των κόμβων.

Η υλοποίηση βασίστηκε στον click modular router, ένα λογισμικό (software architecture) για την κατασκευή ευέλικτων και παραμετροποιήσιμων δρομολογητών που υλοποιούν διεργασίες, όπως ταξινόμηση πακέτων και αποθήκευσή τους σε ουρές, χρονοδρομολόγηση και επικοινωνία με ασύρματες συσκευές. Επίσης, έγινε χρήση του ath9k driver, ο οποίος υλοποιεί το πρωτόκολλο IEEE 802.11.

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν πειράματα και για τα δύο ζητούμενα που αποσκοπούσαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την απόδοση του αλγορίθμου. Για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης μετρήθηκε ο λαμβανόμενος ρυθμός στον κόμβο προορισμό, καθώς και οι απώλειες των

πακέτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση του υλοποιημένου αλγορίθμου με έναν αλγόριθμο τυχαίας επιλογής των κόμβων αναμεταδοτών και με έναν αλγόριθμο point-to-point επικοινωνίας. Για την ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος μετρήθηκε με κάποια προσέγγιση που αναφέρεται παρακάτω η μέση συνολική κατανάλωση ισχύος, αλλά και το μέσο μήκος ουράς κάθε κόμβου.

1.2 Σχετική Βιβλιογραφία

Η ερευνητική κοινότητα έχει ήδη αρχίσει να μελετά τις δυνατότητες και τα οφέλη που προσφέρει η συνεργασία στα ασύρματα δίκτυα. Για παράδειγμα, στο (1) παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός MAC πρωτοκόλλου που ονομάζεται CoorMAC, στο οποίο οι κόμβοι με υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων βοηθούν εκείνους με χαμηλό, προωθώντας τα πακέτα τους.

Στο (2) υλοποιείται στον Mad-Wifi driver ένα πρωτόκολλο, στο οποίο γειτονικά access points και stations στέλνουν σε ένα access point μετρήσεις που αφορούν την κίνηση στα διάφορα κανάλια συχνότητας, ώστε εκείνο με βάση την πληροφορία αυτή να διαλέξει το κατάλληλο κανάλι και να συντονιστεί σε αυτό δυναμικά. Η υλοποίηση αυτή επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση στο συνολικό throughput του δικτύου.

Στο (3) παρουσιάζεται μια σχεδίαση που προσθέτει στη SoftMAC υλοποίηση (mac80211) του Linux Kernel τη δυνατότητα για συνεργατική επανεκπομπή. Με τη συνεργατική επανεκπομπή ένα πακέτο, για το οποίο δεν φτάνει στον αποστολέα βεβαίωση λήψης από τον παραλήπτη (acknowledgement), επανεκπέμπεται από ένα γειτονικό κόμβο που το "άκουσε" και το link του με τον παραλήπτη έχει καλύτερη ποιότητα.

Το (4) βλέπει τη συνεργατική επικοινωνία από μια άλλη ματιά και προτείνει ένα συνεργατικό MAC πρωτόκολλο για πυκνά ασύρματα δίκτυα. Κατά τη διευθέτηση των συγκρούσεων, όταν γίνονται παράλληλες μεταδόσεις, οι κόμβοι σε αυτό το πρωτόκολλο συνεργάζονται μεταξύ τους για να επιλέξουν το κατάλληλο backoff window (το χρόνο δηλαδή που θα περιμένουν για να μεταδώσουν ξανά) ώστε να εξασφαλιστεί η δίκαιη χρήση του μέσου χωρίς να επηρεαστεί το throughput του δικτύου.

Τέλος, στο (5) τοποθετούνται πολλαπλά access points στο ίδιο κελί ώστε οι ασύρματες συσκευές να αποσυσχετιστούν από ένα access point και να συσχετιστούν με ένα άλλο σε πραγματικό χρόνο, αν η ποιότητα του καναλιού βρεθεί σε μη αποδεκτά επίπεδα.

2 Συνεργατική χρονοδρομολόγηση σε ασύρματα δίκτυα

2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο χρονοδρομολόγηση εννοούμε την παραχώρηση του δικαιώματος για μετάδοση στους χρήστες του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή που γίνεται με στόχο την βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και πιο συγκεκριμένα την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, τη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού η χρονοδρομολόγηση βασίζεται σε κάποιον κανόνα, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τα μήκη των ουρών των κόμβων, τις ισχύες των μεταδόσεων και την ποιότητα επικοινωνίας κάθε link.

2.2 Μοντέλο συστήματος

Το μοντέλο του συστήματος είναι ένα two-hop δίκτυο που αποτελείται από έναν κόμβο πηγή (source) **S**, δύο κόμβους αναμεταδότες (relays) **R1**, **R2** και έναν κόμβο προορισμό (destination) **D**.

Οι αναμεταδότες (relays) βοηθούν την πηγή (source), όταν οι συνθήκες καναλιού ή άλλοι παράγοντες δεν ευνοούν την απευθείας επικοινωνία πηγής – προορισμού, να μεταφέρει κίνηση προς τον προορισμό (destination).

Κάθε κόμβος διατηρεί μια ουρά για την αποθήκευση των πακέτων και υπάρχει ένας ελεγκτής του δικτύου (controller) που επιλέγει μεταξύ δυο δρομολογήσεων (schedules), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, για μετάδοση των πακέτων: η πρώτη είναι από το **S** στο **R1** και από το **R2** στο **D** και η δεύτερη είναι από το **S** στο **R2** και από το **R1** στο **D**. Στόχος του ελεγκτή είναι με την κατάλληλη εναλλαγή των δρομολογήσεων να επιτύχει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ή την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος στο σύστημα σταθεροποιώντας τις ουρές στους κόμβους. Τον ρόλο του ελεγκτή αναλαμβάνει η πηγή **S** και οι αποφάσεις για τις δρομολογήσεις λαμβάνονται και στέλνονται στους αναμεταδότες **R1** και **R2**. Αυτή η εναλλαγή των αποφάσεων χρονοδρομολόγησης οδηγεί, εξαιτίας της δυναμικής του δικτύου, στην αποφυγή λιμοκτονίας υπό την έννοια να

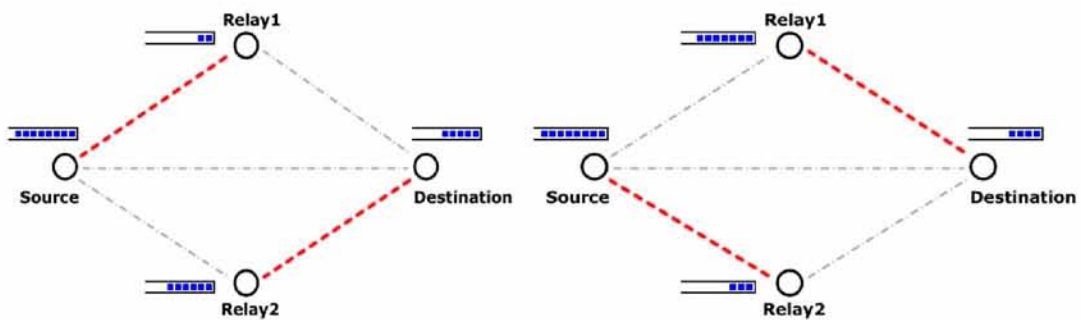
επιλέγεται συνεχώς (επ' άπειρον) μια απόφαση δρομολόγησης εις βάρος της άλλης. Στην παρούσα υλοποίηση, η χρονοδρομολόγηση βασίζεται στον παρακάτω κανόνα που προκύπτει από τη λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης βασισμένη στη θεωρία του Lyapunov Drift και που περιγράφεται στο βιβλίο (6)

$$-\left(Q_S^{(t)} - Q_{R1}^{(t)}\right)r_{SR1}^{(t)} - Q_{R2}^{(t)}r_{R2D}^{(t)} + \left(Q_S^{(t)} - Q_{R2}^{(t)}\right)r_{SR2}^{(t)} + Q_{R1}^{(t)}r_{R1D}^{(t)} > V(P_{SR2}^{(t)}S_{SR2}^{(t)} + P_{R1D}^{(t)}S_{R1D}^{(t)} - P_{SR1}^{(t)}S_{SR1}^{(t)} - P_{R2D}^{(t)}S_{R2D}^{(t)}) \quad [1]$$

(Όπου : Q_a το μήκος της ουράς στον κόμβο a , r_{ab} ο ρυθμός μετάδοσης από το a στο b , P_{ab} η ισχύς μετάδοσης από το a στο b και S_{ab} η κατάσταση του link από το a στο b .)

Αν η ανισότητα αυτή ισχύει επιλέγεται η 2^η δρομολόγηση, αλλιώς επιλέγεται η 1^η σε μία χρονοθυρίδα (time slot).

Ο κανόνας αυτός αντικατοπτρίζει την στρατηγική για την επίτευξη ενός αντικειμενικού στόχου που είναι είτε η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης είτε η ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος.



Σχήμα 1: Εφικτά schedules

2.3 Μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης

Στην παρούσα εργασία, ένας από τους δύο στόχους είναι να επιλέξουμε τις δρομολογήσεις εκείνες που μεγιστοποιούν το ρυθμό μετάδοσης στο συνεργατικό δίκτυο. Για $V = 0$ ο κανόνας [1] επιλέγει τις δρομολογήσεις αυτές και απλοποιείται στον παρακάτω :

$$\left(Q_S^{(t)} - Q_{R1}^{(t)}\right)r_{SR1}^{(t)} + Q_{R2}^{(t)}r_{R2D}^{(t)} > \left(Q_S^{(t)} - Q_{R2}^{(t)}\right)r_{SR2}^{(t)} + Q_{R1}^{(t)}r_{R1D}^{(t)} \quad [2]$$

ο οποίος, αν ισχύει, επιλέγει την 1^η δρομολόγηση, αλλιώς επιλέγει τη 2^η σε κάθε χρονοθυρίδα (time slot). Κάθε κόμβος εκπέμπει με τη μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος και μαζί με την προαναφερθείσα επιλογή των δρομολογήσεων επιτυγχάνεται το ζητούμενο, δηλαδή η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης.

2.4 Ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ισχύος

Ο δεύτερος στόχος μας είναι η επιλογή των δρομολογήσεων εκείνων που ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ισχύος. Για $V \gg 0$ στον κανόνα [1] ο όρος των καταναλισκόμενων ισχύων υπερτερεί στην έκφραση, η οποία απλοποιείται στην παρακάτω:

$$P_{SR2}^{(t)} S_{SR2}^{(t)} + P_{R1D}^{(t)} S_{R1D}^{(t)} > P_{SR1}^{(t)} S_{SR1}^{(t)} + P_{R2D}^{(t)} S_{R2D}^{(t)} \quad [3]$$

η οποία, αν ισχύει, επιλέγει την 1^η δρομολόγηση, αλλιώς επιλέγει τη 2^η σε κάθε χρονοθυρίδα (time slot).

Για $0 < V < +\infty$ εφαρμόζεται ο γενικός κανόνας [1] και η μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου, όσον αφορά την επιλογή των δρομολογήσεων, καθώς μεταβάλλουμε το V , θα αξιολογηθεί μέσω πειραμάτων. Αυτό που αναμένεται είναι ότι με την αύξηση του V ο αλγόριθμος θα επιλέγει δρομολογήσεις που καταναλώνουν λιγότερη ισχύ, αλλά αυξάνουν την καθυστέρηση δικτύου εφόσον θα αυξάνονται τα μήκη των ουρών. Αντίθετα, η μείωση του V θα οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης ισχύος, αλλά βελτίωση της καθυστέρησης δικτύου αφού τα μήκη των ουρών θα μειώνονται.

Πέρα από την επιλογή των δρομολογήσεων, γίνεται και επιλογή της τιμής ισχύος, με την οποία μεταδίδεται κάθε πακέτο από τους κόμβους με βάση την ποιότητα των links. Έτσι ο αλγόριθμος προσαρμόζεται στις συνθήκες του δικτύου καθώς επιλέγει τις δρομολογήσεις που ελαχιστοποιούν τη συνολική καταναλισκόμενη ισχύ.

3 Υλοποίηση

3.1 Εισαγωγή

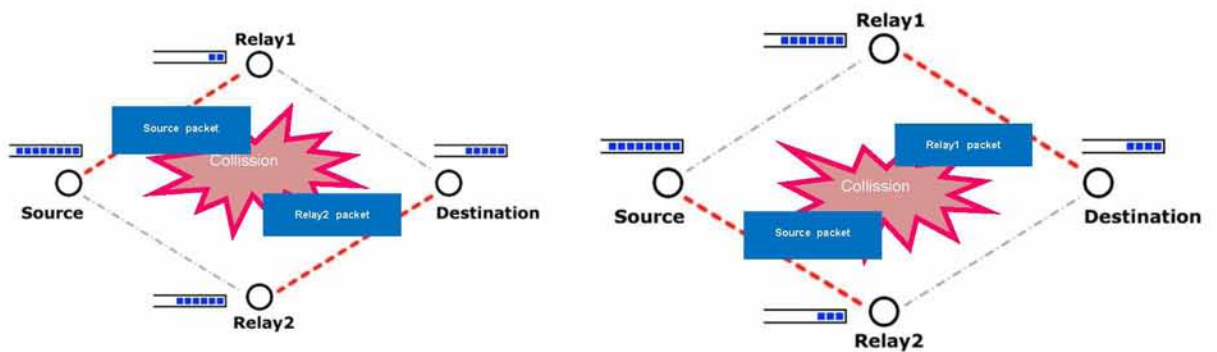
Οι λεπτομέρειες της υλοποίησης του μοντέλου που περιγράφηκε παραπάνω είναι διαφανείς ως προς τους αντικειμενικούς στόχους του προβλήματος, δηλαδή την μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης και την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος του συστήματος, και δεν διαφέρουν καθόλου.

Η υλοποίηση σε λογισμικό βασίστηκε στον Click modular router (7), ένα λογισμικό για την κατασκευή ευέλικτων και παραμετροποιήσιμων εργαλείων για τη διαχείριση και επαναπροώθηση των πακέτων. Ο Click modular router αποτελείται από modules επεξεργασίας πακέτων που καλούνται elements. Το κάθε element υλοποιεί απλές λειτουργίες ενός δρομολογητή, όπως η κατηγοριοποίηση πακέτων, η αποθήκευσή τους σε ουρά και η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών δικτύου. Μια ολοκληρωμένη σχεδίαση δρομολόγησης (router configuration) δημιουργείται ενώνοντας elements και σχηματίζοντας ένα γράφο, όπου τα πακέτα ρέουν πάνω στις ακμές του.

Θα παραθέσουμε πρώτα τα προβλήματα που έπρεπε να επιλυθούν ώστε να γίνει εφικτή η παράλληλη μετάδοση στο συνεργατικό δίκτυο.

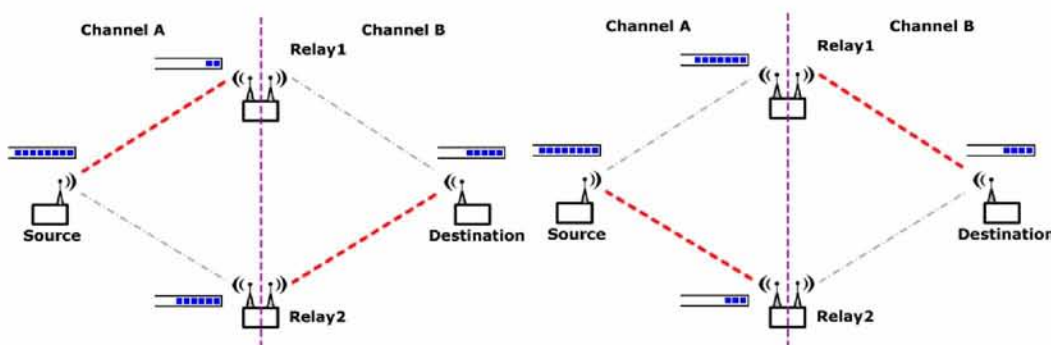
3.2 Μεθοδολογία Υλοποίησης

Σε ένα δίκτυο που λειτουργεί σε μια συχνότητα, όταν πραγματοποιούνται παράλληλες μεταδόσεις, προκαλούνται συγκρούσεις (collisions) των πακέτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Παρόλο που γίνεται χρήση του CSMA πρωτοκόλλου από το WiFi για την αποφυγή των συγκρούσεων, το κέρδος από τη συνεργατική επικοινωνία, όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης, θα είναι μικρότερο εξαιτίας του back-off μηχανισμού. Κάθε φορά που υπάρχει σύγκρουση, ο μηχανισμός αυτός εξαναγκάζει το χρήστη που επιθυμεί να πραγματοποιήσει μια μετάδοση, να περιμένει για κάποιο χρονικό διάστημα προτού την πραγματοποιήσει.



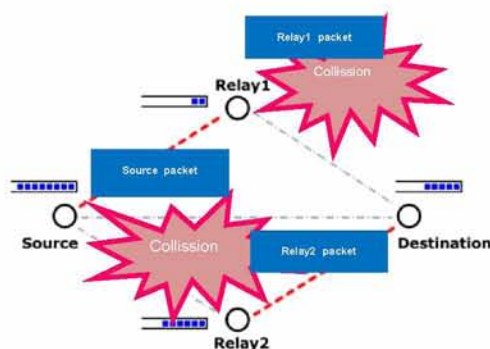
Σχήμα 2: Συγκρούσεις πακέτων όταν υπάρχουν παράλληλες μεταδόσεις

Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι το δίκτυο να λειτουργεί σε διαφορετικά κανάλια σε κάθε hop και οι κόμβοι αναμεταδότες να έχουν δύο ασύρματα interfaces. Για το λόγο αυτό η προσέγγιση που ακολουθήθηκε είναι τα first-hop links (**S** -> **R1** και **S** -> **R2**) να χρησιμοποιούν το κανάλι A και τα second-hop links (**R1** -> **D** και **R2** -> **D**) να χρησιμοποιούν το κανάλι B, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3:



Σχήμα 3: Οι μεταδόσεις σε κάθε hop γίνονται σε διαφορετικό κανάλι για την αποφυγή συγκρούσεων

Ένα ακόμα πρόβλημα που έρχοι αντιμετώπισης ήταν το σενάριο όπου ο ελεγκτής του δικτύου επιλέγει να ενεργοποιήσει ένα ζεύγος από links για μετάδοση (π.χ. **S** -> **R1** και **R2** -> **D**) μετά από μια περίοδο μετάδοσης στο άλλο ζεύγος links (**S** -> **R2** και **R1** -> **D**). Το ζήτημα που προκύπτει είναι ότι κάποια πακέτα μπορεί να έχουν απομείνει στην ουρά επιπέδου MAC στον **R1**, και δεδομένου ότι δεν υπάρχει έλεγχος στο firmware της ασύρματης κάρτας, με αποτέλεσμα να προκληθεί σύγκρουση με τα πακέτα που μεταδίδονται στα ενεργά links (**S** -> **R1** και **R2** -> **D**), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Συγκρούσεις πακέτων λόγω περιορισμένου ελέγχου στο firmware της ασύρματης κάρτας

Για να αποτραπεί κάτι τέτοιο, σχεδιάστηκε η TDMA μέθοδος πρόσβασης που περιγράφεται παρακάτω ώστε κάθε απόφαση χρονοδρομολόγησης να είναι ενεργή για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Επίσης, με σκοπό την αποτροπή της μετάδοσης πακέτων που ανήκουν σε διαφορετική δρομολόγηση από εκείνη που είναι ενεργή, η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στο υποεπίπεδο 2.5 του μοντέλου OSI με χρήση του Click Modular Router που προσφέρει ευελιξία στη συλλογή και αποθήκευση των πακέτων. Επιπλέον, η χωρητικότητα της ουράς επιπέδου MAC σε κάθε κόμβο ορίστηκε ίση με ένα και η είσοδος σ' αυτήν επιτρέπεται μόνο εάν ο κόμβος έχει επιλεγεί για μετάδοση.

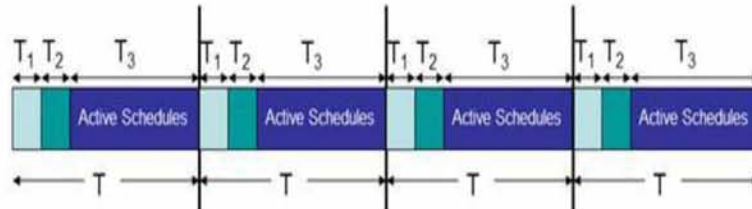
3.3 Σχεδίαση ενός TDMA πρωτοκόλλου για πρόσβαση στο μέσο

Για την πρόσβαση στο μέσο σχεδιάστηκε ένα TDMA σχήμα πρόσβασης, το οποίο λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο CSMA του WiFi, και στο οποίο όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Πιο συγκεκριμένα, το κανάλι χωρίζεται σε χρονοθυρίδες, κατά τις οποίες γίνεται χρήση του μέσου μόνο από ένα χρήστη.

Για την λειτουργία του TDMA σχήματος απαιτείται ένας μηχανισμός, ο οποίος θα συλλέγει στατιστικά από το δίκτυο, όπως τα μήκη των ουρών, την ποιότητα των links κτλ. ώστε η πληροφορία αυτή να φτάνει στον κόμβο πηγή για να πάρει την απόφαση για τις δρομολογήσεις. Επίσης χρειάζεται ένας ακόμα μηχανισμός για να μεταδίδει την απόφαση αυτή στους κόμβους αναμεταδότες. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί, των οποίων η υλοποίηση αναλύεται παρακάτω, παρέχουν στους κόμβους του δικτύου την πληροφορία που χρειάζονται πλήρως συγχρονισμένη.

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται μια ροή δεδομένων και σε κάθε χρονικό πλαίσιο TDMA διάρκειας T έχουμε τρεις χρονοθυρίδες. Η πρώτη είναι η T_1 , κατά την οποία αποστέλλονται τα μήκη των ουρών των κόμβων και πληροφορία για την ποιότητα του καναλιού. Στην T_2 η πηγή στέλνει την απόφασή της για το ποιος αναμεταδότης θα λάβει πακέτα και ποιος θα στείλει μαζί με την τιμή ισχύος που θα γίνει η μετάδοση. Η απόφαση αυτή έχει παρθεί πριν ξεκινήσει η T_2 και αφού η πηγή έχει λάβει την πληροφορία που χρειάζεται. Τέλος, στην T_3 στέλνονται τα data πακέτα με κατεύθυνση τον κόμβο προορισμού.

Η διάρκεια των χρονικών διαστημάτων T_1 , T_2 , T_3 καθορίζεται κατά την αρχική φάση ρύθμισης του συστήματος. Όσο πιο συχνά λαμβάνουν χώρα οι λειτουργίες των διαστημάτων T_1 και T_2 , τόσο πιο ακριβείς είναι οι αποφάσεις για τις δρομολογήσεις. Επιτυγχάνονται έτσι καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τους στόχους του προβλήματος, ωστόσο αυτό απαιτεί περισσότερη προσπάθεια και προσθέτει επιπλέον overhead στο δίκτυο.



Σχήμα 5: Πλαίσιο TDMA

3.4 Υλοποίηση αλγορίθμων

Η υλοποίηση των αλγορίθμων τόσο για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης, όσο και για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος έγινε εφικτή χάρη στη σχεδίαση μιας αρχιτεκτονικής που επιτρέπει τις παράλληλες μεταδόσεις, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Η αρχιτεκτονική αυτή του συστήματος βασίστηκε στις δυνατότητες που προσφέρουν ο Click Modular Router και ο ath9k driver.

Επιστρέφοντας στο TDMA σχήμα που μόλις περιγράφηκε, αναλύουμε τις λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε χρονικό διάστημα:

- **T1:** Οι κόμβοι αναμεταδότες αναφέρουν στον κόμβο πηγή τα μήκη των ουρών τους, καθώς και την τιμή του ETT (Expected Transmission Time) για κάθε link στο οποίο ανήκουν. Το ETT χρησιμοποιείται ως το μέτρο της ποιότητας του link. Η τιμή του υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$ETT = \frac{1}{d_f d_r} \frac{B}{S}$$

Όπου:

d_f και d_r : μέση πιθανότητα παράδοσης ενός πακέτου στο ευθύ και στο αντίστροφο link αντίστοιχα

S : μέσο μήκος πακέτου

B : μέσος ρυθμός μετάδοσης του πακέτου

- **T2 :** Ο κόμβος πηγή που είναι και ο ελεγκτής του δικτύου έχει συλλέξει την απαιτούμενη πληροφορία (μήκη ουρών, ETT τιμές) από το προηγούμενο χρονικό διάστημα T1. Έπειτα στην περίπτωση του αλγόριθμου μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης αποφασίζει για την επόμενη δρομολόγηση υπολογίζοντας τον κανόνα [2]. Στην περίπτωση τώρα του αλγόριθμου ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ισχύος υπολογίζεται ο κανόνας [1]. Για τον υπολογισμό της κατάστασης κάθε link (S_{ab}) έγινε κβαντοποίηση του ETT metric σε τρεις στάθμες που αντιπροσωπεύουν το καλό, το μέτριο και το κακό link. Ο καθορισμός των σταθμών έγινε με βάση την συγκεκριμένη τοπολογία των κόμβων στο εργαστήριο του NITlab όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Ανάλογα με την κατάσταση του link γίνεται και ο υπολογισμός της ισχύος, με την οποία γίνεται η μετάδοση (P_{ab}). Πιο συγκεκριμένα, στο καλό link η μετάδοση γίνεται στα 3 dBm, στο μέτριο στα 9 dBm και στο κακό στα 15 dBm. Η αντιστοίχιση αυτή έγινε αυθαίρετα λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η μέγιστη ισχύς, με την οποία μεταδίδουν οι ασύρματες κάρτες των συγκεκριμένων κόμβων είναι 17 dBm.
- **T3 :** Οι επιλεγμένες δρομολογήσεις ενεργοποιούνται και οι μεταδόσεις των πακέτων πραγματοποιούνται σύμφωνα με το TDMA σχήμα.

3.5 Τροποποίηση του ath9k driver

Για τον καθορισμό του ρυθμού και της ισχύος μετάδοσης ανά πακέτο έγινε χρήση του radiotap header, ενός μηχανισμού που προσφέρει επιπρόσθετες πληροφορίες για τα πακέτα, τόσο από τον driver προς τις εφαρμογές επιπέδου χρήστη, όσο και από μια εφαρμογή προς τον driver για τη μετάδοση. Πιο συγκεκριμένα, το radiotap header περιέχει διάφορα πεδία είτε για τον καθορισμό ορισμένων παραμέτρων κατά τη μετάδοση, είτε για την ανάγνωση στατιστικών πληροφοριών κατά τη λήψη ενός πακέτου. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο όσα πεδία επιθυμεί από το header και να προσθέσει την κατάλληλη πληροφορία. Με αυτή τη λογική, μέσα από τα elements του Click δημιουργούμε ένα radiotap header, το οποίο έχει ενεργοποιημένα τα πεδία RATE και DBM_TX_POWER όπου περνάμε τις επιθυμητές τιμές για το ρυθμό και την ισχύ μετάδοσης του πακέτου.

Τα πακέτα περνάνε από τον Click στον ath9k (8) driver, στον οποίο έχει γίνει η κατάλληλη τροποποίηση για να ελέγχεται ποια πεδία του radiotap header είναι ενεργοποιημένα και να αποθηκεύονται οι τιμές τους. Έπειτα αφαιρείται το radiotap header και οι τιμές που αποθηκεύτηκαν αποτελούν τις παραμέτρους, με τις οποίες γίνεται η μετάδοση.

3.6 Υλοποίηση με τη χρήση του Click

Για την υλοποίηση του μοντέλου, που περιγράφηκε παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές σχεδιάσεις (configurations) για τους κόμβους πηγή και προορισμό και διαφορετικές για τους αναμεταδότες, οι οποίοι διαθέτουν δύο interfaces για να λειτουργούν ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικά κανάλια.

Τα πακέτα, τα οποία στέλνονται μεταξύ των κόμβων, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα control πακέτα και τα data πακέτα. Τα πρώτα αποθηκεύονται σε μια απλή FIFO ουρά που υλοποιεί το element *SimpleQueue* και χρησιμεύουν τόσο στον υπολογισμό στατιστικών μεγεθών, όπως του ETT (Expected Transmission Time) metric και του μήκους της ουράς του κάθε κόμβου, όσο και για την κοινοποίηση των αποφάσεων για το scheduling. Τα δεύτερα αποθηκεύονται στην ουρά που υλοποιεί το element *DiamondQueue* και περιέχουν την πληροφορία που

κατευθύνεται από την πηγή στον προορισμό. Στην περίπτωση της πηγής το *DiamondQueue* στέλνει τα πακέτα στον αναμεταδότη που υποδεικνύει ο κανόνας [1], ενώ στην περίπτωση των αναμεταδοτών επιτρέπει την αποστολή των πακέτων στον προορισμό, μόνο όταν ο κόμβος δεν λαμβάνει μηνύματα από την πηγή. Για τον καθορισμό του παραλήπτη κάθε πακέτου το *DiamondQueue* τροποποιεί το πεδίο προορισμού στο MAC header προσθέτοντας την MAC διεύθυνση του παραλήπτη. Η διεύθυνση αυτή λαμβάνεται από ένα ARP (Address Resolution Protocol) table που περιέχει τις αντιστοιχίσεις των IP διευθύνσεων σε MAC διευθύνσεις. Η αποστολή του πακέτου ολοκληρώνεται, αφού οριστεί μέσω του radiotap header η ισχύς με την οποία θα γίνει η μετάδοση στην περίπτωση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ισχύος.

Τα control πακέτα στέλνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα τόσο από το element *ETTStat*, όσο και από το *DiamondStat*. Το *ETTStat* χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ETT metric που καθορίζει τον εφικτό ρυθμό, με τον οποίο μπορούμε να στείλουμε δεδομένα πάνω σε ένα link. Το ETT (Expected Transmission Time) metric υπολογίζεται στέλνοντας διερευνητικά πακέτα σε κάθε link. Ο λόγος $1 / ETT$ μας δίνει το ρυθμό, με τον οποίο στέλνονται τα δεδομένα πάνω σε ένα link. Το *DiamondStat* χρησιμοποιείται: α) από την πηγή για να εκπέμπει την απόφασή της για τον επόμενο αναμεταδότη που θα λάβει πακέτα και την τιμή της ισχύος, με την οποία θα εκπέμψει ο άλλος αναμεταδότης και β) από τους αναμεταδότες για να εκπέμπουν τα μήκη των ουρών τους.

Το *DiamondStat* στον κόμβο πηγή συλλέγει την πληροφορία από τα control πακέτα των αναμεταδοτών (μήκος ουράς) και με βάση αυτή και την πληροφορία του ETT metric αποφασίζει για τις δρομολογήσεις και την τιμή ισχύος, με την οποία θα γίνει η μετάδοση τόσο από την πηγή στον έναν αναμεταδότη, όσο και από τον άλλο αναμεταδότη στον προορισμό. Σε έναν κόμβο αναμεταδότη το *DiamondStat* λαμβάνει την απόφαση της πηγής και ενημερώνει το *DiamondQueue* για το αν θα στείλει πακέτα ή όχι και με ποια τιμή ισχύος.

Η ροή των data πακέτων από την πηγή στον προορισμό, όπως αυτή πραγματοποιείται κατά την χρονοθυρίδα T3, περιγράφεται στα παρακάτω σχήματα. Μια εφαρμογή στην πηγή δημιουργεί αυτά τα πακέτα, τα οποία περνούν στο element *Pseudo-Interface* που τα προωθεί στο *DiamondQueue* για να αποθηκευτούν. Κάθε φορά που υπάρχει ευκαιρία για μετάδοση στον αέρα, το

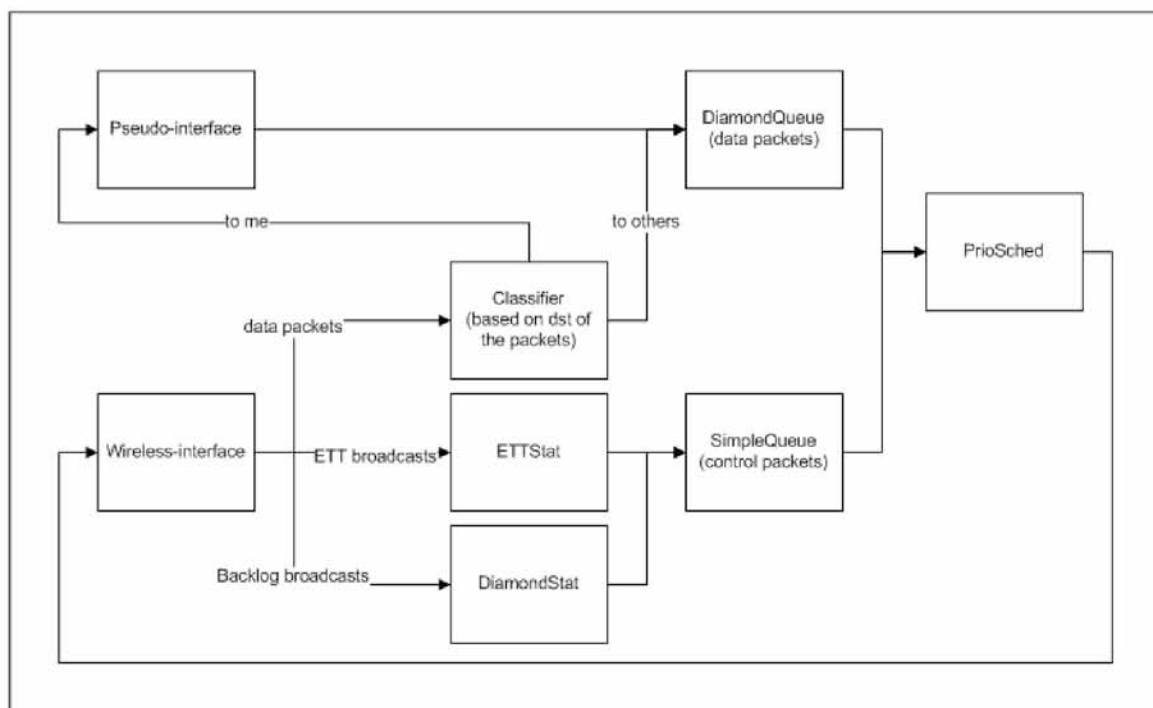
element *PrioSched* επιλέγει μεταξύ των ουρών *SimpleQueue* (control πακέτα) και *DiamondQueue*, δίνοντας προτεραιότητα στην πρώτη, και προωθεί τα πακέτα στο element *Wireless-interface* για την μετάδοσή τους (Σχήμα 6).

Ο κόμβος αναμεταδότης (Σχήμα 7) χρησιμοποιεί το *Wireless-interface* (Κανάλι A) για να "ακούσει" τα πακέτα από την πηγή. Τα πακέτα αυτά κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο τους και τα data πακέτα περνούν στο element *Classifier*, το οποίο τα ξεχωρίζει με βάση τον προορισμό τους. Τα συγκεκριμένα πακέτα κατευθύνονται στον κόμβο προορισμό και επομένως θα αποθηκευτούν στο *DiamondQueue* (Κανάλι B). Έπειτα θα ακολουθήσουν τη ίδια διαδρομή με εκείνη στον κόμβο πηγή για να μεταδοθούν στον αέρα.

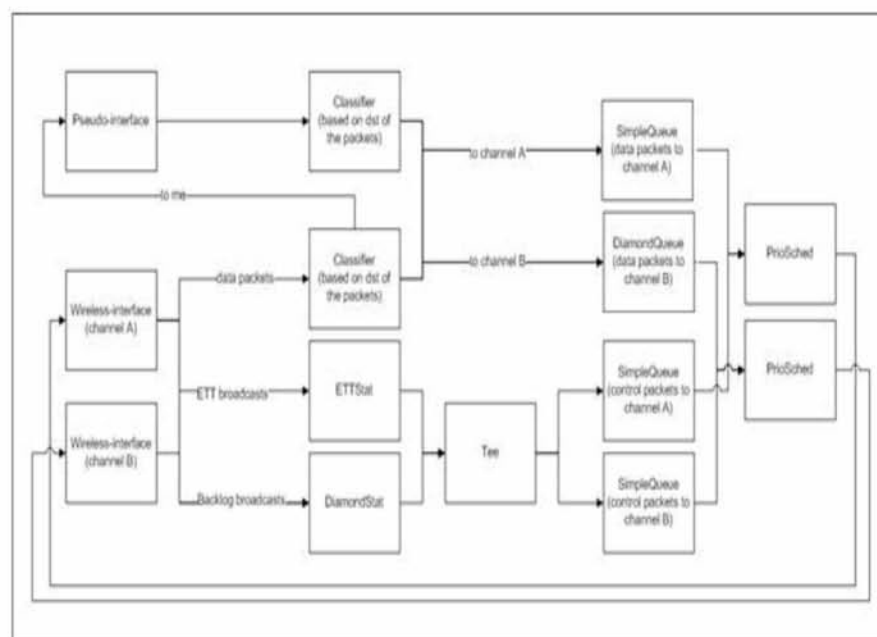
Τέλος, ο κόμβος προορισμού που έχει την ίδια σχεδίαση (configuration) με τον κόμβο πηγή θα "ακούσει" τα πακέτα μέσω του element *Wireless-interface* και, αφού ξεχωρίσει τα control από τα data πακέτα, θα προωθήσει τα δεύτερα στο *Classifier* που με τη σειρά του θα τα στείλει στο *Pseudo-interface*, αφού ο προορισμός τους είναι ο ίδιος ο κόμβος. Από εκεί θα περάσουν στην εφαρμογή στο πιο πάνω επίπεδο δικτύου.

Η ροή των control πακέτων, όπως αυτή πραγματοποιείται κατά τις χρονοθυρίδες T1, T2, περιγράφεται επίσης από τα σχήματα που ακολουθούν. Ο κόμβος πηγή μέσω του *Wireless-interface* λαμβάνει control πακέτα, τα οποία μπορεί να είναι είτε μετρήσεις του ETT είτε τα μήκη των ουρών των αναμεταδοτών. Με βάση τα πακέτα αυτά το element *DiamondStat* υπολογίζει τον κανόνα, με τον οποίο γίνεται το scheduling και στέλνει την απόφασή του μαζί με την τιμή ισχύος που θα γίνει η μετάδοση σε ένα IP broadcast πακέτο που ακολουθεί τη διαδρομή (*SimpleQueue*→*PrioSched*→*Wireless-Interface*). Έτσι οι αναμεταδότες συγχρονίζονται γνωρίζοντας πότε θα λάβουν και πότε θα στείλουν πακέτα και με πόση ισχύ.

Οι αναμεταδότες αντίστοιχα ενθυλακώνουν την πληροφορία για τα μήκη των ουρών τους και για το ETT σε IP broadcast πακέτα, για το καθένα από τα οποία δημιουργείται ένα ακόμα αντίγραφο στο element Tee και αποστέλλονται στα δύο κανάλια.



Σχήμα 6: Η σχεδίαση στην πηγή και στον προορισμό



Σχήμα 7: Η σχεδίαση στους αναμεταδότες

4 Πειραματικά αποτελέσματα – συμπεράσματα

Για τη μελέτη των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν και για την εξαγωγή συμπερασμάτων, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο **NITOS testbed** (9) του εργαστηρίου **NITlab** και συγκεκριμένα στους καινούριους κόμβους **ICARUS**.



4.1 Μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης

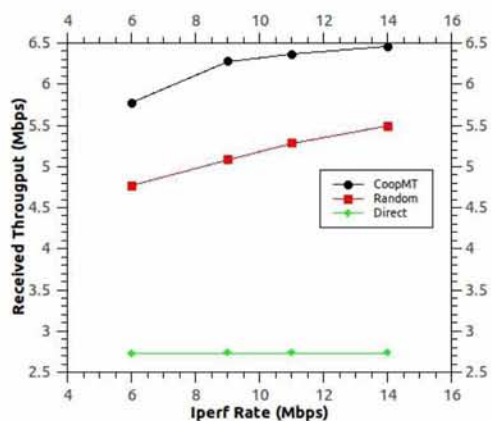
Για τη μελέτη της απόδοσης του αλγορίθμου που έχει σκοπό τη μεγιστοποίηση του λαμβανόμενου ρυθμού μετάδοσης (received throughput) πραγματοποιήθηκαν πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες και γραφήματα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η συμπεριφορά τριών αλγορίθμων: α) του Coop (που αναφέρθηκε παραπάνω), β) του Random όπου γίνεται τυχαία επιλογή μεταξύ των κόμβων αναμεταδοτών για το ποιος θα είναι ο επόμενος που θα λάβει πακέτα και γ) του Direct όπου γίνεται απευθείας επικοινωνία μεταξύ της πηγής και του προορισμού σε ένα "κακό" κανάλι με παρεμβολές.

Η μετάδοση των control πακέτων γίνεται τόσο ενσύρματα (wired), όσο και ασύρματα (wireless). Στην περίπτωση της ενσύρματης μετάδοσης γνωρίζουμε με βεβαιότητα ότι τα control πακέτα φτάνουν στους κόμβους αναμεταδότες και έτσι επιτυγχάνεται ένα άνω όριο στις επιδόσεις των αλγορίθμων, δηλαδή στο λαμβανόμενο ρυθμό μετάδοσης και στις απώλειες πακέτων.

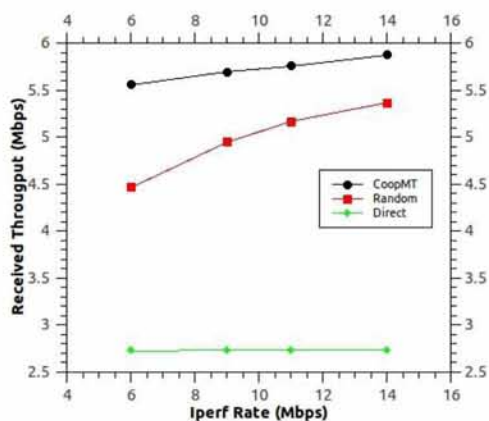
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο iperf, το οποίο δημιουργεί ροές πακέτων σε καθορισμένους από το χρήστη ρυθμούς (rates) πάνω σε ένα δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκαν οι επιδόσεις των τριών αλγορίθμων όσον αφορά το λαμβανόμενο ρυθμό μετάδοσης και την ποσοστιαία απώλεια για διαφορετικούς ρυθμούς δημιουργίας πακέτων, όταν ο ρυθμός μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο είναι 9 Mbps. Επίσης μελετήθηκε και η επιρροή του μεγέθους της ουράς κάθε κόμβου στις επιδόσεις αυτές, όταν ο ρυθμός δημιουργίας πακέτων είναι σταθερός στα 14 Mbps και ο ρυθμός μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο στα 9 Mbps.

Iperf Rate (Mbps)	Received Throughput (Mbps)					
	Wired			Wireless		
	Coop	Random	Direct	Coop	Random	Direct
6 Mbps	5.78	4.77	2.73	5.56	4.47	2.73
9 Mbps	6.28	5.09	2.74	5.7	4.95	2.74
11 Mbps	6.37	5.29	2.74	5.76	5.17	2.74
14 Mbps	6.46	5.5	2.74	5.88	5.37	2.74

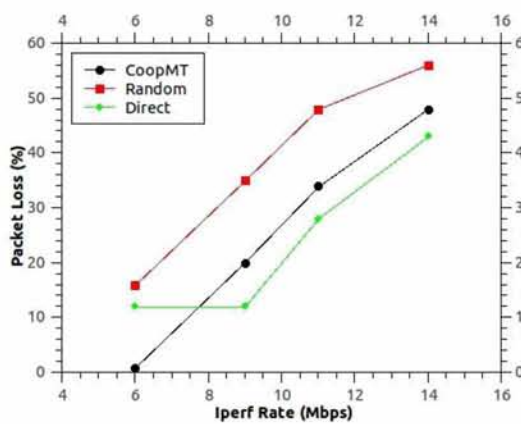
Iperf Rate (Mbps)	Packet Loss (%)					
	Wired			Wireless		
	Coop	Random	Direct	Coop	Random	Direct
6 Mbps	0.9%	16%	12%	2.65%	20%	12%
9 Mbps	20%	35%	12%	28%	38%	12%
11 Mbps	34%	48%	28%	41%	50%	28%
14 Mbps	48%	56%	43%	53%	59%	43%



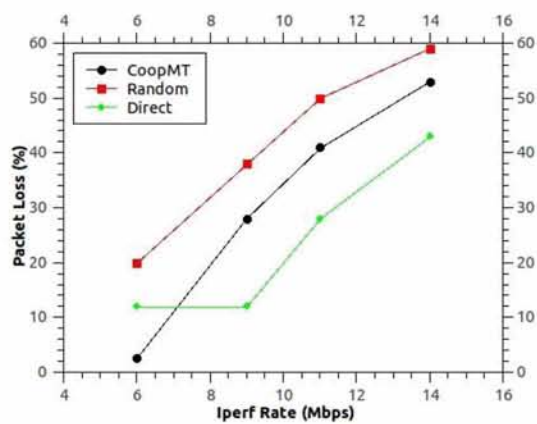
Εικόνα 1 : Throughput Wired



Εικόνα 2 : Throughput Wireless



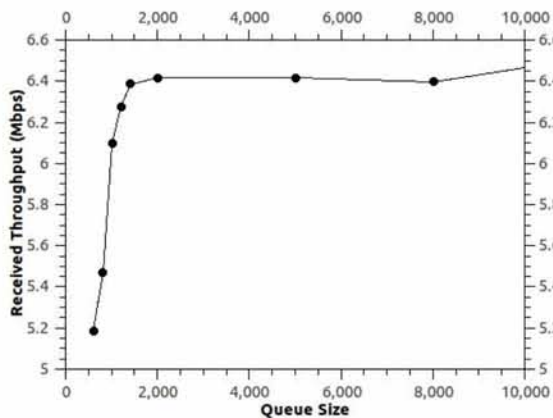
Εικόνα 3 : Packet Loss Wired



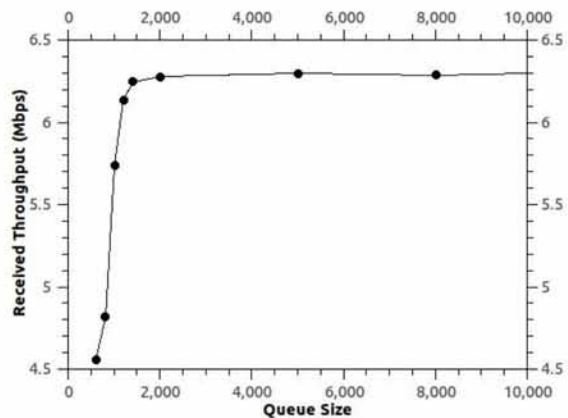
Εικόνα 4 : Packet Loss Wireless

Queue Size	Received Throughput (Mbps)	
	Wired	Wireless
600	5.19	4.56
800	5.47	4.82
1000	6.1	5.74
1200	6.28	6.14
1400	6.39	6.25
2000	6.42	6.28
5000	6.42	6.3
8000	6.4	6.29
10000	6.47	6.3

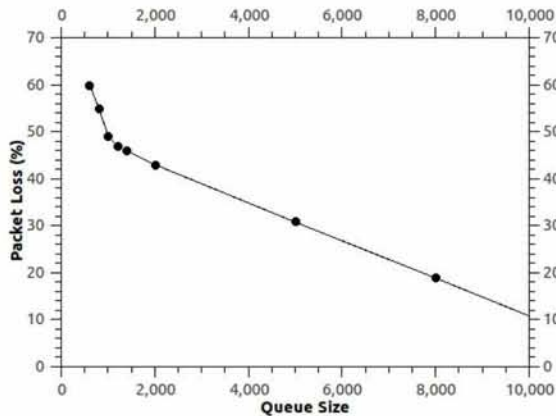
Queue Size	Packet Loss (%)	
	Wired	Wireless
600	60%	64%
800	55%	61%
1000	49%	56%
1200	47%	47%
1400	46%	46%
2000	43%	43%
5000	31%	31%
8000	19%	19%
10000	11%	11%



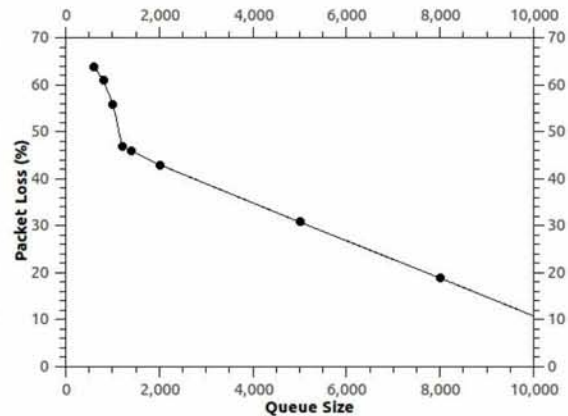
Εικόνα 5 : Throughput Wired



Εικόνα 6: Throughput Wireless



Εικόνα 7 : Packet Loss Wired



Εικόνα 8 : Packet Loss Wireless

Το συμπέρασμα που βγαίνει από τα αποτελέσματα αυτά είναι ότι ο Coop αλγόριθμος έχει καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά το λαμβανόμενο ρυθμό μετάδοσης και την απώλεια πακέτων από τον Random και από τον Direct. Η διαφορά είναι ιδιαίτερα εμφανής στους χαμηλούς ρυθμούς δημιουργίας πακέτων. Για τον Direct η προσέγγιση που ακολουθήθηκε ήταν να υπάρχουν ασύρματα δίκτυα κοντά στους κόμβους πηγής και προορισμού που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι ώστε να δημιουργείται ισχυρή παρεμβολή. Όσον αφορά τις απώλειες πακέτων παρατηρούμε ότι αυτές αυξάνονται όσο αυξάνεται ο ρυθμός της iperf, γεγονός που είναι αναμενόμενο, αφού ο ρυθμός μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο παραμένει σταθερός στα 9 Mbps. Η συμπεριφορά του αλγορίθμου για την απευθείας επικοινωνία μεταξύ πηγής και προορισμού είναι διαφορετική από τους υπόλοιπους αλγορίθμους, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν αναμεταδότες. Επίσης παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το μήκος της ουράς αυξάνεται και ο λαμβανόμενος ρυθμός μετάδοσης μέχρι ενός σημείου, πέραν του οποίου παραμένει σταθερός. Τέλος, από τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνεται το γεγονός που αναφέρεται παραπάνω, ότι δηλαδή οι επιδόσεις της υλοποίησης της ενσύρματης μετάδοσης των control πακέτων αποτελούν το άνω όριο στις επιδόσεις του συστήματος.

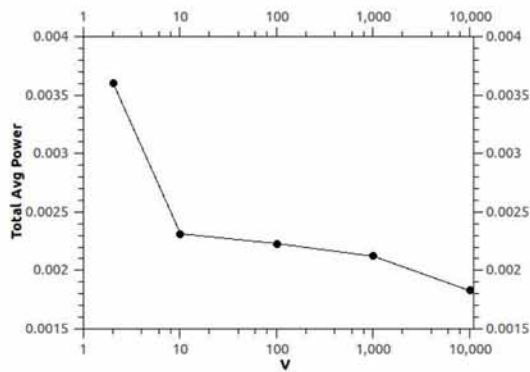
4.2 Ελαχιστοποίηση συνολικής κατανάλωσης ισχύος

Όσον αφορά τον αλγόριθμο για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος υλοποιήθηκε ο ανά πακέτο καθορισμός της ισχύος μετάδοσης μέσω του radiotap header και για τα control μηνύματα.

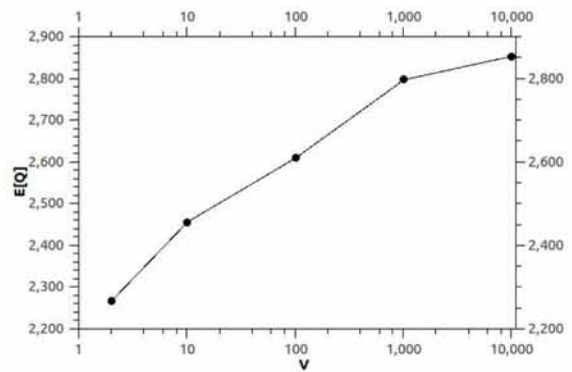
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν μελετήθηκε η συμπεριφορά του αλγορίθμου στις μεταβολές της παραμέτρου V του κανόνα [1]. Ουσιαστικά υπολογίστηκε η συνολική μέση κατανάλωση ισχύος και το μέσο μήκος ουράς των κόμβων για διάφορες τιμές του V .

Η μέση κατανάλωση ισχύος υπολογίστηκε ως εξής: $P_{avg}(t+1) = \frac{t}{t+1} P_{avg}(t) + P(t)$, ενώ το μέσο μήκος ουράς: $Q_{avg}(t+1) = \frac{t}{t+1} Q_{avg}(t) + Q(t)$. Τα προαναφερθέντα μεγέθη υπολογίστηκαν σε κάθε κόμβο και οι τελικές τιμές που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα αποτελούν τη μέση τιμή τους. Για τα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκε και πάλι το εργαλείο iperf, του οποίου ο ρυθμός δημιουργίας των πακέτων καθορίστηκε στα 14 Mbps, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης με τον οποίο ο ath9k driver στέλνει τα πακέτα στο φυσικό επίπεδο ήταν 9 Mbps. Τα πειράματα διήρκησαν 40s το καθένα και οι ουρές των κόμβων είχαν χωρητικότητα 10000 πακέτα.

V	Total Avg. Power (Watt)	E[Q]
2	0.003608	2269
10	0.002315	2457
100	0.002233	2611
1000	0.002129	2798
10000	0.001835	2853



Εικόνα 9 : Μέση κατανάλωση ισχύος



Εικόνα 10 : Μέσο μήκος ουράς

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου V μειώνει την κατανάλωση ισχύος, η οποία τείνει να σταθεροποιηθεί για πολύ μεγάλες τιμές του V . Αντίθετα, το μέσο μήκος ουράς αυξάνεται με αποτέλεσμα να υπάρχει καθυστέρηση όσον αφορά τη μετάδοση στο δίκτυο. Παρατηρείται, δηλαδή, ότι όσο πιο μεγάλο είναι το V , ο αλγόριθμος επιλέγει δρομολογήσεις που καταναλώνουν λιγότερη ισχύ με δυσμενή επίπτωση στην καθυστέρηση δικτύου αφού τα μήκη των ουρών αυξάνονται. Από την άλλη, όσο μικρότερο είναι το V , ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται καλύτερα όσον αφορά την καθυστέρηση δικτύου, αλλά παρατηρούμε αύξηση στην κατανάλωση ισχύος.

5 Παράρτημα A

Element DiamondStat

```
Packet *simple_action(Packet *);
```

```
/* Η συνάρτηση αυτή καλείται όταν φτάνει ένα control πακέτο στον
κόμβο και αφού αφαιρέσει το Ethernet header διαβάζει την πληροφορία
που περιέχει. Η πληροφορία αυτή, αν ο αποστολέας είναι ένας
αναμεταδότης, είναι το μήκος της ουράς του, το οποίο η πηγή
αποθηκεύει σε κατάλληλη δομή, αλλιώς αν ο αποστολέας είναι η πηγή η
πληροφορία αυτή είναι η απόφαση για το ποιος κόμβος αναμεταδότης θα
λαμβάνει πακέτα και με ποια τιμή ισχύος θα μεταδίδει ο άλλος.*/
```

```
void send_probe();
```

```
/* Η συνάρτηση αυτή έχει επίσης διπλή λειτουργικότητα ανάλογα με
το εάν ο κόμβος είναι πηγή ή αναμεταδότης. Στην πρώτη περίπτωση με
βάση τα μήκη των ουρών που έχουν στείλει οι αναμεταδότες καθώς και
τα ETT metrics για κάθε link υπολογίζεται ο κανόνας που αποφασίζει
ποιος είναι ο επόμενος κόμβος αναμεταδότης που θα λάβει πακέτα. Η
απόφαση αυτή ενθυλακώνεται σε ένα πακέτο μαζί με την τιμή της ισχύος
με την οποία θα μεταδώσει ο άλλος αναμεταδότης, το οποίο γίνεται
broadcast. Στην δεύτερη περίπτωση ενθυλακώνεται απλώς το μήκος της
ουράς του κόμβου σε ένα πακέτο που επίσης γίνεται broadcast.*/
```

```
void run_timer(Timer *);
```

```
/* Η συνάρτηση αυτή απλώς καλεί ανά τακτά χρονικά διαστήματα την
send_probe()*/
```

Element DiamondQueue

```
void push(int port, Packet *p);
```

```
/* Η συνάρτηση αυτή εισάγει ένα πακέτο στην ουρά αν υπάρχει διαθέσιμος χώρος και ενημερώνει το μήκος της. */
```

```
Packet* diamond_reset_route(Packet *p, IPAddress next_rcv);
```

```
/* Η συνάρτηση αυτή παίρνει σαν όρισμα ένα πακέτο και μια IP διεύθυνση, η οποία αντιστοιχεί στον παραλήπτη που επιθυμούμε να λάβει το πακέτο άσχετα από τον προορισμό που αναγράφεται στο IP header του πακέτου. Αφού γίνει η αντιστοίχιση της IP διεύθυνσης που περάστηκε σαν όρισμα στην αντίστοιχη MAC διεύθυνση, η τελευταία αναγράφεται στο πεδίο προορισμού του Ethernet header. */
```

```
Packet* pull(int);
```

```
/* Η συνάρτηση αυτή εξάγει ένα πακέτο από την ουρά, εάν αυτή δεν είναι άδεια. Στην περίπτωση που ο κόμβος είναι πηγή, με τη βοήθεια της diamond_reset_route(Packet *p, IPAddress next_rcv) γίνεται αλλαγή του παραλήπτη του πακέτου σε αυτόν που ορίζει ο κανόνας. Στην περίπτωση που ο κόμβος είναι αναμεταδότης γίνεται έλεγχος για το εάν είναι η σειρά του να στείλει, αλλιώς επιστρέφει NULL. */
```

Element ETTStat

```
/* Το element αυτό δέχεται σαν είσοδο διερευνητικά πακέτα που έρχονται από τους υπόλοιπους κόμβους και υπολογίζει το ρυθμό με τον οποίο χάνονται τα πακέτα αυτά μέσα σε ένα καθορισμένο από το χρήστη χρονικό διάστημα TAU. Ακόμα, στέλνει και το ίδιο broadcast διερευνητικά πακέτα ανά PERIOD milliseconds, επίσης καθορισμένα από το χρήστη. */
```

Element PrioSched

```
/* Το element αυτό είναι ένας pull scheduler με πολλές εισόδους οι οποίες είναι ουρές ή άλλοι schedulers. Κάθε φορά που γίνεται pull στην έξοδό του ο PrioSched "τραβά" πακέτα από τις εισόδους,
```

αρχίζοντας από την πρώτη. Το πακέτο από το πρώτο επιτυχές "τράβηγμα" επιστρέφεται. */

Element Classifier

```
/* Το element αυτό είναι της μορφής Classifier(pattern1,
pattern2, ...,patternN) και έχει N εξόδους που αντιστοιχούν στα
configuration patterns. Κάθε pattern έχει τη μορφή "offset/value"
και έχουμε ταίριασμα αν το πακέτο έχει τη συγκεκριμένη τιμή στο
καθορισμένο offset. Τα patterns ελέγχονται με τη σειρά και το πακέτο
πηγαίνει στην έξοδο που αντιστοιχεί στο πρώτο pattern που έχουμε
ταίριασμα. */
```

Element SimpleQueue

```
/* Το element SimpleQueue(CAPACITY) αποθηκεύει τα εισερχόμενα
πακέτα σε μια FIFO ουρά αν περιέχει λιγότερα από CAPACITY πακέτα,
αλλιώς τα απορρίπτει. */
```

Element Tee

```
/* Το element Tee([N]) στέλνει αντίγραφα του εισερχόμενου
πακέτου σε κάθε μια από τις N εξόδους του. */
```

6 Παράρτημα Β

Per packet rate configuration in ath9k driver

Στο αρχείο tx.c του ath9k driver προστέθηκε το εξής κομμάτι κώδικα:

```
case IEEE80211_RADIOTAP_RATE:

    bitrate = (*iterator.this_arg) * 5;

    for (i = 0; i < sband->n_bitrates; i++) {

        if (sband->bitrates[i].bitrate == bitrate)

            break;

    }

    if (i != sband->n_bitrates)

        info->control.rates[0].idx = i;

    break;
```

Per packet power configuration in ath9k driver

Στο αρχείο tx.c του ath9k driver προστέθηκε το εξής κομμάτι κώδικα:

```
case IEEE80211_RADIOTAP_DBM_TX_POWER:

    tx->local->user_power_level = *iterator.this_arg;

    ieee80211_hw_config(tx->local, 0);

    break;
```


7 Βιβλιογραφία

1. **Pei Liu, Zhifeng Tao, Sathya Narayanan, Thanasis Korakis and Shivendra S. Panwar.** *CoopMAC: A Cooperative MAC for Wireless LANs.*
2. **Giannis Kazdaridis, Stratos Keranidis, Adamantios Flamegkos, Thanasis Korakis, Iordanis Koutsopoulos, Leandros Tassioulas.** *Novel Metrics and Experimentation Insights for Dynamic Frequency Selection in Wireless LANs.*
3. **Vitalik Nikolyenko, Lavy Libman.** *Coop80211: Implementation and Evaluation of a SoftMAC-based Linux Kernel Module for Cooperative Retransmission.*
4. **C. Cetinkaya, F.Orsun.** *Cooperative medium access protocol for dense wireless networks.*
5. **A. Miu, G.Tan, H. Balakrishnan, J. G. Apostolopoulos.** *Divert: Fine-grained path selection for wireless networks.*
6. **Michael, Neely.** *Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems.* s.l. : Morgan & Claypool, 2010.
7. Click Modular Router. <http://www.read.cs.ucla.edu/click/>.
8. "Ath9k driver". <http://linuxwireless.org>.
9. **NITlab.** <http://nitlab.inf.uth.gr/NITlab/>.