



Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών



F.O.R.T.H.  
Ινστιτούτο Πληροφορικής

---

## **A Contention-Aware Routing Metric for Multi-Rate Multi-Radio Wireless Mesh Networks**

---

Μεταπτυχιακή Εργασία

Εμμανουήλ Γ. Γενετζάκης

*Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2008*



Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Σχολή Θετικών & Τεχνολογικών Επιστημών  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

**A Contention-Aware Routing Metric for Multi-Rate Multi-  
Radio Wireless Mesh Networks**

Εργασία που υποβλήθηκε από τον  
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Γ. ΓΕΝΕΤΖΑΚΗ  
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Συγγραφέας:

---

Εμμανουήλ Γ. Γενετζάκης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

**Εξεταστική Επιτροπή:**

Επόπτης

---

Βασίλειος Σύρης  
Επίκουρος Καθηγητής

Μέλος:

---

Απόστολος Τραγανίτης  
Καθηγητής

Μέλος:

---

Αθανάσιος Μουχτάρης  
Επίκουρος Καθηγητής

Δεκτή:

Πρόεδρος Επιτροπής  
Μεταπτυχιακών Σπουδών

---

Παναγιώτης Τραχανιάς  
Καθηγητής

Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2008



**Αφιερωμένο στην αγαπημένη μου Ευγενία  
και στην οικογένεια μου ...**





# A Contention-Aware Routing Metric for Multi-Rate Multi-Radio Wireless Mesh Networks

**Emmanouel G. Genetzakis**

M.Sc. Thesis

Department of Computer Science

University of Crete

## **Abstract**

With the rapid spread of wireless telecommunications technologies, mesh networks have emerged as a significant new technology that has experienced growing research and commercial interest. Having a variety of applications, wireless mesh networks have the potential to provide ubiquitous network access in urban and rural areas with low operation and management costs, to both fixed and mobile users.

Routing is the process of selecting a path in the network along which to send data from one node to another and is one of the main operations that a network should support. Routing in mesh networks constitutes an important research area, because existing routing metrics are inadequate due to particular characteristics of such networks.

In this thesis, we present a new routing metric for multi-rate multi-radio mesh networks, which takes into account both contention for the shared wireless channel and rate diversity in multi-radio multi-channel mesh networks. A key property of the proposed Contention Aware Transmission Time (CATT) metric is that it is isotonic, hence can be applied to link-state routing protocols.

We have implemented the CATT metric in the OLSR routing protocol, and evaluate it in a test-bed with mesh nodes each equipped with four radio interfaces. Our experiments show that the proposed routing metric significantly outperforms other metrics that have appeared in the

literature, in a number of scenarios that correspond to different mesh network topologies





Μια εξαρτώμενης συμφόρησης μετρική για δρομολόγηση πάνω σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλών διεπαφών και πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης

**Εμμανουήλ Γ. Γενετζάκης**

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

Πανεπιστήμιο Κρήτης

## **Περίληψη**

Με την ραγδαία εξάπλωση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, τα δίκτυα πλέγματος (mesh networks) αναδεικνύονται ως μια νέα σημαντική τεχνολογία παρουσιάζοντας παράλληλα έντονο ερευνητικό και εμπορικό ενδιαφέρον. Έχοντας ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πρόσβαση σε αστικές και αγροτικές περιοχές, με χαμηλό κόστος διαχείρισης και λειτουργίας τόσο σε σταθερούς όσο και σε κινητούς χρήστες.

Η διαδικασία εύρεσης των διαδρομών που πρέπει να ακολουθήσουν τα δεδομένα για να μεταφερθούν από τον ένα κόμβο στον άλλο ονομάζεται δρομολόγηση και είναι μια από τις κύριες λειτουργίες που πρέπει να υποστηρίζει ένα δίκτυο. Η δρομολόγηση σε δίκτυα πλέγματος αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας επειδή οι υπάρχουσες μετρικές δρομολόγησης δεν είναι αποδοτικές εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δικτύων αυτών.

Σε αυτή τη διατριβή παρουσιάζουμε μια νέα μετρική δρομολόγησης (CATT – Contention Aware Transmission Time) για δίκτυα πολλαπλών διεπαφών και πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης που λαμβάνει υπόψη της τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων πλέγματος. Βασική ιδιότητα της προτεινόμενης μετρικής είναι ότι εκτιμά τη

συμφόρηση που προκαλείται τόσο από παρεμβολές των γειτονικών κόμβων όσο και από ροές δεδομένων που ανήκουν στην ίδια διαδρομή. Επίσης λαμβάνει υπόψη της τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης που υποστηρίζονται σήμερα από τα περισσότερα πρωτόκολλα.

Υλοποιήσαμε τη νέα μετρική CATT στο πρωτόκολλο δρομολόγησης Optimized Link-State Routing (OLSR) και την αξιολογήσαμε σε ένα πραγματικό περιβάλλον με κόμβους που είναι εξοπλισμένοι με τέσσερις ασύρματες διεπαφές. Για ένα αριθμό από διαφορετικά σενάρια, που αντιστοιχούν σε πραγματικές τοπολογίες δικτύων, τα αποτελέσματα των πειραμάτων επιβεβαίωσαν ότι η μετρική CATT επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες μετρικές δρομολόγησης.



## Ευχαριστίες

---

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν, είτε με τις γνώσεις τους, είτε με ψυχολογική στήριξη, να ολοκληρώσω την παρούσα μεταπτυχιακή μου εργασία. Ένα ιδιαίτερα θερμό ευχαριστώ οφείλω στον επόπτη καθηγητή μου Βασίλειο Σύρη, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το θέμα της εργασίας αυτής και με καθοδήγησε σε όλη τη διάρκειά της. Ιδιαίτερα τον ευχαριστώ για την εξαιρετική συνεργασία, την ενθάρρυνση που μου προσέφερε, καθώς και για τις εύστοχες πάντα παρατηρήσεις και υποδείξεις του. Ευχαριστώ επίσης του καθηγητές κ. Απόστολο Τραγανίτη και κ. Αθανάσιο Μουχτάρη για την συμμετοχή τους στην εισηγητική επιτροπή της εργασίας αυτής.

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

Ευχαριστώ ακόμη τους Μανώλη Πλουμίδη, Βαγγέλη Μπουτσάκη, Θεόδωρο Διονυσίου, Μανώλη Ντελάκη, Κώστα Μαθιουδάκη, Βαγγέλη Αγγελάκη, Χάρη Μελισσάρη, Στέφανο Παπαδάκη και Νίκο Πετρουλάκη για τη βοήθεια και συμπαράστασή τους καθώς και όλα τα μέλη των ομάδων Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων (TNL) του Ινστιτούτου Πληροφορικής για τη συνεργασία τους.

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

«Δεν μπορείς να διδάξεις τίποτα στον άνθρωπο.

Το μόνο που μπορείς να κάνεις, είναι να τον βοηθήσεις να ανακαλύψει αυτό που έχει μέσα του.»

**Γαλιλαίος**



# Πίνακας Περιεχομένων

---

Abstract.....	viii
Περίληψη.....	x
Ευχαριστίες.....	xiii
Πίνακας Περιεχομένων .....	xv
Κατάλογος Σχημάτων.....	xviii
Κατάλογος Πινάκων.....	xix
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1. Παρουσίαση Προβλήματος .....	3
1.2. Συνεισφορά Εργασίας .....	4
1.3. Οργάνωση - Δομή Εργασίας.....	5
<b>2. Σχετική Εργασία.....</b>	<b>6</b>
2.1. Hop Count .....	6
2.2. Expected Transmission Count ( ETX ).....	6
2.3. Expected Transmission Time ( ETT ).....	8
2.4. Weighted Cumulative Expected Transmission Time ( WCETT ) .....	9
2.5. Metric of Interference and Channel Switching ( MIC ) .....	10
2.6. Interference Aware Routing Metric ( iAware ).....	12
<b>3. Δρομολόγηση.....</b>	<b>14</b>
3.1. Το πρόβλημα της δρομολόγησης.....	14
3.2. Δρομολόγηση στο επίπεδο των συνδέσεων .....	15
3.3. Δρομολόγηση με την χρήση του διανύσματος της απόστασης .....	15
3.4. Δρομολόγηση πηγής.....	15
3.5. Δρομολόγηση βήμα-προς-βήμα .....	16
3.6. Τεχνική πλημμύρας.....	16
3.7. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης .....	17
3.7.1. Proactive.....	17
3.7.2. Reactive.....	18

3.8.	Προϋποθέσεις Μετρικών Δρομολόγησης .....	18
3.8.1.	Σταθερότητα Διαδρομών .....	19
3.8.2.	Καλή Απόδοση διαδρομών ελαχίστου κόστους.....	20
3.8.3.	Αποδοτικοί αλγόριθμοι υπολογισμού διαδρομών .....	23
3.8.4.	Δρομολόγηση Χωρίς Κυκλικούς Βρόχους .....	24
<b>4.</b>	<b>Θεωρητική Προσέγγιση μετρικής δρομολόγησης.....</b>	<b>26</b>
4.1.	Μοντελοποίηση Throughput για ασύρματη πρόσβαση σε μεριζόμενα κανάλια .....	26
4.2.	CATT: Η μετρική Contention-Aware Transmission Time .....	29
4.2.1.	Επεκτάσεις.....	30
4.2.1.1.	Loss Dependence.....	30
4.2.1.2.	Load Dependence .....	31
<b>5.</b>	<b>Υλοποίηση Μετρικής Δρομολόγησης.....</b>	<b>33</b>
5.1.	Περιγραφή Πρωτοκόλλου OLSR.....	33
5.1.1.	MultiPoint Relays (MPR) .....	35
5.2.	Αλλαγές – Τροποποιήσεις στο πρωτόκολλο OLSR.....	36
<b>6.</b>	<b>Αξιολόγηση.....</b>	<b>39</b>
6.1.	Περιβάλλον Μετρήσεων .....	39
6.2.	Εξοπλισμός Υλικού - Λογισμικού .....	39
6.3.	Μετρήσεις Επιδόσεων – Πειράματα.....	42
6.3.1.	Σενάριο 1: Single Radio A.....	43
6.3.2.	Σενάριο 2: Single Radio B.....	47
6.3.3.	Σενάριο 3: Mixed single- and multi-radio .....	51
6.3.4.	Σενάριο 4: Asymmetric Link .....	53
6.3.5.	Σενάριο 5: Point-to-Multipoint .....	57
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....</b>	<b>60</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>62</b>
	<b>Παράρτημα .....</b>	<b>66</b>





## Κατάλογος Σχημάτων

---

1. <b>Εικόνα 1:</b> Κατηγοριοποίηση Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης.....	17
2. <b>Εικόνα 2:</b> Παράδειγμα inter-flow παρεμβολής .....	22
3. <b>Εικόνα 3:</b> Παράδειγμα intra-flow παρεμβολής. CH αναπαριστά το κανάλι εκπομπής.....	22
4. <b>Εικόνα 4:</b> Παράδειγμα της ισοτονικότητας .....	24
5. <b>Εικόνα 5:</b> Τεχνική Πλημμύρας στο απλό link-state και στο OLSR..	36
6. <b>Εικόνα 6:</b> Κεφαλίδα τροποποιημένου Hello πακέτου.....	37
7. <b>Εικόνα 7:</b> Κεφαλίδα τροποποιημένου TC πακέτου .....	38
8. <b>Εικόνα 8:</b> Εσωτερική όψη κόμβου πολλαπλών διεπαφών .....	40
9. <b>Εικόνα 9:</b> Εξωτερική όψη κόμβου πολλαπλών διεπαφών .....	40
10. <b>Εικόνα 10:</b> Σενάριο 1 - Single Radio Scenario A.....	44
11. <b>Εικόνα 11:</b> Σενάριο 1 - Μέσο UDP Throughput.....	45
12. <b>Εικόνα 12:</b> Σενάριο 1 - End-to-end packet delay.....	46
13. <b>Εικόνα 13:</b> Σενάριο 2 - Single Radio Scenario B.....	48
14. <b>Εικόνα 14:</b> Σενάριο 2 - Μέσο UDP Throughput.....	49
15. <b>Εικόνα 15:</b> Σενάριο 2 - End-to-end packet delay.....	50
16. <b>Εικόνα 16:</b> Σενάριο 3 - Mixed-Single and Multi-Radio Scenario .....	51
17. <b>Εικόνα 17:</b> Σενάριο 3 - Μέσο UDP Throughput.....	52
18. <b>Εικόνα 18:</b> Σενάριο 3 - End-to-end packet delay.....	52
19. <b>Εικόνα 19:</b> Σενάριο 4 - Asymmetric Link Scenario .....	54
20. <b>Εικόνα 20:</b> Σενάριο 4 - Μέσο UDP Throughput.....	54
21. <b>Εικόνα 21:</b> Σενάριο 4 - End-to-end packet delay.....	55
22. <b>Εικόνα 22:</b> Σενάριο 4 - Http Latency για ένα και 10 Clients .....	56
23. <b>Εικόνα 23:</b> Σενάριο 5 - Point-to-MultiPoint Scenario .....	57
24. <b>Εικόνα 24:</b> Σενάριο 5 - Μέσο UDP Throughput.....	58
25. <b>Εικόνα 25:</b> Σενάριο 5 - End-to-end packet delay.....	58

## Κατάλογος Πινάκων

---

26. <b>Πίνακας 1:</b> Σενάριο 1 - Single Radio A. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης.....	47
27. <b>Πίνακας 2:</b> Σενάριο 2 - Single Radio B. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης.....	50
28. <b>Πίνακας 3:</b> Σενάριο 3 - Mixed Single and Multi-Radio. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης.....	53
29. <b>Πίνακας 4:</b> Σενάριο 4 - Asymmetric Link. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης.....	56
30. <b>Πίνακας 5:</b> Σενάριο 5 - Point-to-MultiPoint. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης.....	59

## 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση προσωπικών υπολογιστών από κινούμενους χρήστες παρουσιάζει ιδιαίτερη αύξηση. Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για επικοινωνία αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες τάσεις της εποχής μας με αποτέλεσμα τα δίκτυα επικοινωνίας να αποκτούν ιδιαίτερη βαρύτητα σε τεχνολογικό επίπεδο. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία οδήγησαν στην ανάπτυξη των ασύρματων τεχνολογιών, οι οποίες θα αλλάξουν την έννοια του όρου «βρίσκομαι σε επαφή». Για παράδειγμα ήδη πολλοί άνθρωποι χρησιμοποιούν το τηλέφωνο του γραφείου τους για να λαμβάνουν μηνύματα ενώ οι ίδιοι απουσιάζουν και βασίζονται στα κινητά τους τηλέφωνα για πιο σημαντικά ή βιαστικά μηνύματα. Στις μέρες μας ο στόχος των ασύρματων δικτύων είναι να καταφέρουν η επικοινωνία να είναι εφικτή παντού και πάντα. Ο στόχος αυτός οδηγεί στη περαιτέρω εξέλιξη των ασύρματων δικτύων ώστε συσκευές όπως τα Notebooks και PDAs να μπορέσουν να αποτελέσουν μέρος ενός ενιαίου δικτύου σύνδεσης.

Η επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και συγκεκριμένα ο τομέας των ασύρματων δικτύων για τη νέα αυτή πραγματικότητα που δημιουργείται, έρχεται να αναπτύξει τα απαραίτητα πρωτόκολλα και συστήματα επικοινωνιών, ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες των χρηστών για εύκολη και άνετη πρόσβαση. Οι χρήστες απαιτούν καθολική και εύκολη πρόσβαση στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό και σε υπηρεσίες τις οποίες χρησιμοποιούν σήμερα καθημερινά τόσο για προσωπική όσο και για επαγγελματική χρήση με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση και κόστος και την μεγαλύτερη δυνατή ευκολία και ευελιξία. Στις μέρες μας η απαίτηση αυτή έχει σχεδόν ικανοποιηθεί αφού υπάρχουν ασύρματες τεχνολογίες, οι οποίες επιτρέπουν την ικανοποιητική, γρήγορη και χωρίς μεγάλο σχετικά κόστος επικοινωνία. Στο μέλλον οι επικοινωνίες αυτού του είδους θα θεωρούνται δεδομένες για τους πολίτες.

Τα ασύρματα δίκτυα επιτρέπουν στους χρήστες τους την πρόσβαση εν κινήσει συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στη σημαντική αύξηση παραγωγικότητας, καθώς οι δικτυακοί πόροι είναι πλέον προσβάσιμοι παντού και στη δημιουργία προοπτικών για καινοτόμες χρήσεις. Τα ασύρματα συστήματα του τοπικού δικτύου LAN μπορούν να παρέχουν στους χρήστες τους, πρόσβαση σε οποιεσδήποτε πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τη οργάνωση τους. Αυτή η κινητικότητα υποστηρίζει την παραγωγικότητα και τις δυνατότητες πολλών υπηρεσιών οι οποίες δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν με το καλωδιακό δίκτυο.

Η ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιείται επιτρέπει στο δίκτυο να φτάσει εκεί όπου το καλώδιο δεν μπορεί να πάει. Η αναδιοργάνωση ενός ενσύρματου δικτύου είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και δύσκολη, σε αντίθεση με εκείνη ενός ασύρματου δικτύου ( Wireless LAN ), όπου απλώς η μετακίνηση (ή προσθήκη) ενός σημείου πρόσβασης ( Access Point ) αλλάζει και την έκταση του καλυπτόμενου χώρου. Φορητές εφαρμογές που απαιτούν πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικές βάσεις δεδομένων βρίσκουν ιδανικό περιβάλλον στην ασύρματη δικτύωση.

Η εγκατάσταση ενσύρματου δικτύου σε κτήριο (μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του τελευταίου) παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, καθώς απαιτούνται το πέρασμα καλωδίου από τους τοίχους και άλλες μετατροπές από εξειδικευμένο προσωπικό, σε αντίθεση με τα ασύρματα δίκτυα όπου ο χρόνος εγκατάστασης είναι ελάχιστος ανεξάρτητα με τη κτιριακή υποδομή, γεγονός που επιτρέπει στους χρήστες να εργάζονται και να συνεργάζονται καλύτερα με αποτέλεσμα να αποδίδουν περισσότερο και να μη σπαταλούν χρόνο στην ανταλλαγή δεδομένων.

Παράλληλα με την ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων παρατηρείται και μια ανάλογη ανάπτυξη στις τεχνολογικές λύσεις, οι οποίες υποστηρίζουν την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων. Το λογισμικό εξελίσσεται ιδιαίτερα γρήγορα για να

μπορέσει να υποστηρίξει τις νέες αυτές υπηρεσίες και τεχνολογίες. Καθημερινά στην παγκόσμια αγορά παρουσιάζονται όλο και περισσότερα προϊόντα προς αυτή την κατεύθυνση. Στο γεγονός αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχει και η ανάπτυξη του εύρους των ασύρματων καναλιών που είχαμε πριν μερικά χρόνια.

### 1.1. Παρουσίαση Προβλήματος

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι η δρομολόγηση σε πειραματικά δίκτυα πλέγματος πολλαπλών διεπαφών ( Multi-Radio ) και πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων ( Multi-Rate ). Σκοπός της εργασίας είναι η σχεδίαση και υλοποίηση μιας νέας μετρικής δρομολόγησης που θα λαμβάνει υπόψη της τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των παραπάνω δικτύων με στόχο την εύρεση βέλτιστων διαδρομών.

Είναι σαφές ότι η δρομολόγηση των πακέτων σε δίκτυα πλέγματος είναι πιο απαιτητική σε σχέση με τα κλασικά ενσύρματα δίκτυα, λόγω των περιορισμών και των διαφορετικών παραγόντων που τίθενται σε τέτοιου τύπου δίκτυα , όπως είναι το ασύρματο περιβάλλον, η τοπολογία των κόμβων, η στατική φύση των κόμβων του δικτύου, η έλλειψη κεντρικής υποδομής, οι περιορισμένοι πόροι (ενέργεια, υπολογιστική ισχύς) κ.α. που θα μπορούσαν να συμβάλλουν γρήγορα και αποτελεσματικά στην εύρεση των βέλτιστων διαδρομών.

Για να επιτευχθεί αποδοτική δρομολόγηση σε δίκτυα πλέγματος, οι συναρτήσεις ανάθεσης κόστους θα πρέπει να απεικονίζουν τη κοινή φύση του ασύρματου μέσου και να υποστηρίζουν την εύκολη και γρήγορη εύρεση διαδρομών χωρίς κυκλικούς βρόχους. Επίσης θα πρέπει να εκμεταλλεύονται την ύπαρξη των πολλαπλών διεπαφών και των πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης, με την επιλογή διαδρομών που βελτιστοποιούν την απόδοση του δικτύου. Ένας σημαντικός παράγοντας στην ασύρματη διάδοση είναι οι παρεμβολές. Οι παρεμβολές μπορεί να προέρχονται είτε από μεταδόσεις γειτονικών κόμβων ( inter-flow interference ) είτε από ροές δεδομένων που ανήκουν στο ίδιο μονοπάτι (

intra-flow interference ) προκαλώντας συμφόρηση σε διαδρομές του δικτύου. Οι ήδη υπάρχουσες μετρικές δρομολόγησης που έχουν σχεδιαστεί για δίκτυα πλέγματος, όπως είναι το hop count, ETX και WCETT δεν ικανοποιούν τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Επομένως η σχεδίαση μιας αποδοτικής μετρικής δρομολόγησης που θα λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δικτύων πλέγματος, σε συνδυασμό με την υλοποίηση της σε ένα κατάλληλο πρωτόκολλο κρίνεται επιτακτική.

## 1.2. Συνεισφορά Εργασίας

Με την εργασία αυτή στοχεύουμε στη δημιουργία και παρουσίαση μιας νέας μετρικής δρομολόγησης ( **C**ontention-**A**ware **T**ransmission **T**ime ) για δίκτυα πολλαπλών διεπαφών και πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης που λαμβάνει υπόψη της τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων πλέγματος και διαχειρίζεται αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους. Βασιζόμενοι σε μια προσπάθεια μοντελοποίησης του μέγιστου throughput που μπορεί να επιτευχθεί σε ασύρματα δίκτυα διαμοιραζόμενων καναλιών σχεδιάσαμε τη συνάρτηση ανάθεσης κόστους. Βασική ιδιότητα της προτεινόμενης μετρικής είναι ότι εκτιμά την παρεμβολή που προκαλείται τόσο από γειτονικούς κόμβους ( inter-flow interference ) όσο και από ροές δεδομένων που ανήκουν στην ίδια διαδρομή ( intra-flow interference ) καθώς και τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Επίσης, η συνάρτηση υπολογισμού κόστους είναι ισοτονική, γεγονός που μας επιτρέπει να υπολογίζουμε βέλτιστες διαδρομές χωρίς κυκλικούς βρόχους ( loop-free ) με τη χρησιμοποίηση «link-state» πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε την υλοποίηση της νέας μετρικής στο πρωτόκολλο δρομολόγησης Optimized Link-State Routing ( OLSR ) και την αξιολογούμε σε ένα πραγματικό περιβάλλον με κόμβους που είναι εξοπλισμένοι με πολλαπλές ασύρματες διεπαφές. Για ένα αριθμό από διαφορετικά σενάρια, που αντιστοιχούν σε πραγματικές τοπολογίες δικτύων, τα αποτελέσματα των πειραμάτων επιβεβαίωσαν ότι η νέα

μετρική δρομολόγησης ( CATT ) επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερη απόδοση συγκρινόμενη με τις ήδη υπάρχουσες μετρικές.

### 1.3. Οργάνωση - Δομή Εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής: Το κεφάλαιο 2 κάνει μια ανασκόπηση των μετρικών δρομολόγησης που έχουν προταθεί στο παρελθόν, καθορίζοντας τις διαφορές τους με τη νέα προτεινόμενη συνάρτηση ανάθεσης κόστους.

Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει διάφορες τεχνικές δρομολόγησης, κατηγοριοποιεί τα διαθέσιμα πρωτόκολλα για δίκτυα πλέγματος και αναλύει τις ιδιότητες που πρέπει να τηρούν οι μετρικές δρομολόγησης.

Στο κεφάλαιο 4, περιγράφουμε ένα μοντέλο για ασύρματα δίκτυα διαμοιραζόμενων καναλιών που υπολογίζει τη μέγιστη τιμή του throughput που μπορεί να επιτευχθεί στο επίπεδο MAC, εκτιμώντας παράλληλα τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης που έχουν οι ασύρματες διεπαφές. Στη συνέχεια, βασιζόμενοι σε αυτήν την μοντελοποίηση, παρουσιάζουμε τη θεωρητική προσέγγιση της νέας μετρικής δρομολόγησης Contention-Aware Transmission Time ( CATT ) καθώς και το ενδεχόμενο επέκτασης της.

Στο κεφάλαιο 5 αναφέρουμε τον τρόπο λειτουργίας του «link-state» πρωτοκόλλου δρομολόγησης OLSR καθώς και τις απαραίτητες τροποποιήσεις που έγιναν προκειμένου να υλοποιηθεί η νέα συνάρτηση κόστους CATT.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφουμε τον εξοπλισμό ( hardware ) που χρησιμοποιήσαμε και αξιολογούμε τη νέα μετρική δρομολόγησης CATT σε πέντε πραγματικές τοπολογίες δικτύων πλέγματος.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 αναφέρουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των πειραμάτων και αναλύουμε τις μελλοντικές μας σκέψεις για το πώς θα διευρύνουμε τη μετρική δρομολόγησης CATT.



## 2. Σχετική Εργασία

Ο υπολογισμός και η ανάθεση κόστους σε κόμβους του δικτύου, για να επιλεγεί η βέλτιστη διαδρομή όσον αφορά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων, είναι ένας τομέας που έχει απασχολήσει αρκετά τους ερευνητές. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μετρικές δρομολόγησης για τη βελτίωση απόδοσης των ασύρματων δικτύων πλέγματος, που η καθεμία αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης. Στη ενότητα αυτή παρουσιάζουμε μια μικρή ανασκόπηση των εναλλακτικών μετρικών δρομολόγησης που είχαν προταθεί στο παρελθόν, επισημαίνοντας τις διαφορές τους από την νέα μετρική «Contention-Aware Transmission Time» ( CATT ).

### 2.1.Hop Count

Είναι ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων ( hops ) που χρειάζεται ένα πακέτο για να μεταβεί από την πηγή στον προορισμό. Πρόκειται για την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μετρική που εφαρμόζεται από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως είναι το DSR, AODV, DSDV, OLSR, GSR κ.α. Καθώς η μετρική «Hop Count» είναι ισοτονική, αποδοτικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να βρεθούν μονοπάτια με το ελάχιστο κόστος και χωρίς να περιέχουν κυκλικούς βρόχους. Εντούτοις όμως η συγκεκριμένη μετρική δε λαμβάνει υπόψη της τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζονται σήμερα από τα περισσότερα πρωτόκολλα, καθώς επίσης και τις παρεμβολές που προκαλούνται από τις μεταδόσεις γειτονικών κόμβων. Επιπρόσθετα δεν «εκτιμά» την ποιότητα των ασύρματων ζεύξεων δεδομένου ότι τα ποσοστά απώλειας πακέτων εξαιτίας της ενιαίας φύσης του ασύρματου μέσου είναι εξίσου σημαντικά. Αυτό έχει ως συνέπεια να υποβαθμίζει τις περισσότερες φορές την συνολική απόδοση του δικτύου.

### 2.2.Expected Transmission Count ( ETX )

Η μετρική ETX για μια ζεύξη είναι ο εκτιμώμενος αριθμός μεταδόσεων, συμπεριλαμβανομένων και των αναμεταδόσεων, που

χρειάζονται προκειμένου να σταλεί ένα πακέτο κατά μήκος αυτής της ζεύξης [1]. Εάν με  $p_l$  συμβολίσουμε την πιθανότητα ότι η μετάδοση ενός πακέτου πάνω από μια ζεύξη  $l$  δεν είναι επιτυχής τότε:

$$ETX_l = \frac{1}{1-p_l}$$

Η πιθανότητα απώλειας πακέτων  $p_l$  υπολογίζεται βασιζόμενη στην πιθανότητα απώλειας δεδομένων τόσο από την μία ( forward )  $p_l^f$  όσο και από την αντίθετη ( reverse )  $p_l^r$  κατεύθυνση χρησιμοποιώντας την παρακάτω ισότητα.

$$p_l = 1 - (1 - p_l^f) \cdot (1 - p_l^r)$$

Οι δυο παράμετροι (  $p_l^f$  και  $p_l^r$  ) υπολογίζονται από τη μετάδοση μικρών πακέτων ( probe packets ) πάνω από μία ζεύξη σε μία χρονική περίοδο  $\tau$ . Το ποσοστό παράδοσης των πακέτων για ένα αποστολέα σε μία χρονική στιγμή  $t$  είναι:

$$r(t) = \frac{count \cdot (t - w, t)}{w/\tau}$$

όπου  $count(t - w, t)$  είναι ο αριθμός των λαμβανόμενων πακέτων σε ένα χρονικό διάστημα  $w$ . Η επιλογή μιας βέλτιστης διαδρομής, περιλαμβάνει την εύρεση ενός μονοπατιού με τη μικρότερη αθροιστική τιμή της μετρικής ETX για όλες τις ζεύξεις που ανήκουν στο μονοπάτι.

Αποτελέσματα από προσομοιώσεις και πειράματα έδειξαν ότι η μετρική ETX λειτουργεί πολύ καλά σε τοπολογίες που δεν έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων καθώς και με κόμβους που είναι εξοπλισμένοι με μία μόνο ασύρματη διεπαφή [3]. Σε περιβάλλοντα με πολλαπλές διεπαφές και πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης δεν «συμπεριφέρεται» καλά, υποβαθμίζοντας τη συνολική απόδοση αυτών των δικτύων.

Ένα άλλο εύθραυστο σημείο αυτής της μετρικής είναι το γεγονός ότι όταν το δίκτυο είναι 100% απασχολημένο με τη μετάδοση των πακέτων, τα πακέτα δεδομένων μπορούν να προκαλέσουν σε ένα μεγάλο ποσοστό των περιοδικών «μικρών» πακέτων ( probe packets ) να χαθούν εξαιτίας

των συγκρούσεων που προκαλούνται. Αυτό δεν είναι σημαντικό πρόβλημα για τα πακέτα δεδομένων, τα οποία το πρωτόκολλο 802.11 αναμεταδίδει, αλλά είναι σοβαρό για τα «broadcast» πακέτα, τα οποία δεν αναμεταδίδονται και η μετρική ETX τα υπολογίζει ως χαμένα. Κατά συνέπεια, η μετρική ETX ορίζει χαμηλής ποιότητας βάρη σε ζεύξεις που πραγματικά μεταφέρουν ένα μεγάλο ποσοστό των πακέτων δεδομένων. [8].

### 2.3.Expected Transmission Time ( ETT )

Η μετρική ETT που προτάθηκε από τον Draves [3], βελτιώνει την μετρική ETX, λαμβάνοντας υπόψη της τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης των ζεύξεων. Προσδιορίζει το κόστος για ένα μονοπάτι  $p$  ως το άθροισμα των επιμέρους ETT's για ένα μονοπάτι. Η μετρική ETT για μία ζεύξη  $l$  καθορίζεται ως:

$$ETT_l = ETX_l \cdot \frac{S}{B_l}$$

όπου  $B_l$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης της ζεύξης  $l$  και  $S$  είναι το μέγεθος του πακέτου. Επομένως,  $ETT_l$  είναι ο εκτιμώμενος χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου κατά μήκος της ζεύξης  $l$ . Όπως και το ETX, η μετρική ETT είναι επίσης ισοτονική.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μετρικής ETT είναι το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψη της τη συμφόρηση του δικτύου, που προκαλείται από τις παρεμβολές των άλλων κόμβων, όπως επίσης δεν εκμεταλλεύεται την παρουσία των διαφορετικών καναλιών και των πολλαπλών διεπαφών που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Για παράδειγμα, η μετρική ETT μπορεί να επιλέξει ένα μονοπάτι που χρησιμοποιεί ένα μόνο από τα διαθέσιμα κανάλια σε σχέση με ένα άλλο μονοπάτι που χρησιμοποιεί διαφορετικά κανάλια και έχει μικρότερη παρεμβολή και ως εκ τούτου μεγαλύτερο throughput και μικρότερη καθυστέρηση.

Ανεξάρτητα, στο άρθρο [2] οι ερευνητές προτείνουν τη μετρική **Medium Transmission Time ( MTM )**, η οποία εκτιμάει τον αναμενόμενο χρόνο αποστολής δεδομένων, βασιζόμενη αποκλειστικά στο εύρος ζώνης της ζεύξης χωρίς να υπολογίζει τις πιθανές αναμεταδόσεις των πακέτων.

Ένας σημαντικός περιορισμός της μετρικής ETT, καθώς επίσης και των άλλων μετρικών που εξαρτώνται από την απώλεια των πακέτων, όπως είναι και το ETT, είναι το γεγονός ότι για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, η πιθανότητα απώλειας δεδομένων είναι επίσης διαφορετική. Γι' αυτό το λόγο μερικοί προτείνουν να χρησιμοποιούν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης για να στέλνουν τα «μικρά» πακέτα ( probe packets) [8], έτσι ώστε να γίνεται καλύτερη εκτίμηση της πιθανότητας απώλειας πακέτων.

Για τους παραπάνω λόγους, στο άρθρο[3] προτείνουν τη βελτιωμένη μετρική **Weighted Cumulative ETT ( WCETT )** που εξετάζεται παρακάτω.

#### 2.4. **Weighted Cumulative Expected Transmission Time ( WCETT )**

Προκειμένου να μειωθεί η παρεμβολή που προκαλείται από τους κόμβους που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι, προτάθηκε η μετρική WCETT [3]. Για ένα μονοπάτι  $p$ , η μετρική WCETT ορίζεται ως:

$$WCETT_p = (1 - \beta) \cdot \sum_{l \in p} ETT_l + \beta \cdot \max_{1 \leq j \leq k} X_j$$

όπου  $ETT_l$  είναι η μετρική ETT για την ζεύξη  $l$ ,  $\beta \in [0, 1]$  είναι μια ρυθμιστική παράμετρος, ενώ ο παράγοντας  $X_j$  καθορίζεται ως:

$$X_j = \sum_{hop \ l \in p \ is \ on \ channel \ j} ETT_l \quad 1 \leq j \leq k$$

όπου  $k$  είναι ο αριθμός των ορθογώνιων καναλιών. Ο πρώτος παράγοντας στην μετρική WCETT βοηθάει στην εύρεση μονοπατιών με ζεύξεις που

έχουν το μικρότερο χρόνο μετάδοσης ( ελάχιστο ETT ). Ο δεύτερος παράγοντας βελτιώνει την «ποικιλομορφία» των καναλιών και βοηθάει στο να βρεθούν μονοπάτια που έχουν τη μικρότερη «intra-flow» παρεμβολή ( παρεμβολή που προκαλείται από κόμβους που ανήκουν στο ίδιο μονοπάτι και εκπέμπουν στο ίδιο ή σε γειτονικά κανάλια ).

Η συνάρτηση υπολογισμού κόστους ( WCETT ) έχει δυο σημαντικούς περιορισμούς. Ο πρώτος περιορισμός, ο οποίος είναι κοινός στις περισσότερες μετρικές δρομολόγησης, είναι το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψη της τις επιδράσεις που έχει η παρεμβολή, που προκαλείται από κόμβους που εκπέμπουν στη γειτονική περιοχή του μονοπατιού ( inter-flow interference ). Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι η μετρική WCETT δεν είναι ισοτονική [4]. Η ισοτονικότητα είναι μια σημαντική ιδιότητα των μετρικών δρομολόγησης, επειδή καθορίζει αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικοί αλγόριθμοι, όπως είναι ο Dijkstra ή ο Bellman-Ford για την εύρεση μονοπατιών με ελάχιστο κόστος και για το κατά πόσο τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούν προώθηση «βήμα-προς-βήμα», μπορούν να βρουν μονοπάτια χωρίς κυκλικούς βρόχους. Μη ισοτονικές μετρικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με πρωτόκολλα που βασίζονται στην δρομολόγηση πηγής. Γι' αυτό το λόγο, το άρθρο [3] υλοποιεί την μετρική WCETT στο «pro-active» πρωτόκολλο LQSR ( Link Quality Source Routing ) που χρησιμοποιεί δρομολόγηση πηγής.

### 2.5. Metric of Interference and Channel Switching Cost ( MIC )

Παρά το γεγονός ότι η μετρική WCETT λαμβάνει υπόψη της μόνο την «intra-flow» παρεμβολή, η συνάρτηση υπολογισμού κόστους MIC εκτιμά τόσο την «inter-flow» όσο και την «intra-flow» παρεμβολή [4]. Για να το επιτύχει αυτό, αποτελείται από δυο συστατικά ( μετρικές ): Την «Interference – aware Resource Usage» ( IRU ) και το «Channel Switching Cost» ( CSC ). Η συνάρτηση κόστους IRU για μια ζεύξη  $l$  ορίζεται ως:

$$IRU_l = ETT_l \cdot N_l$$

όπου  $N_l$  είναι ο αριθμός των γειτονικών κόμβων που προκαλούν παρεμβολή στην μετάδοση της ζεύξης  $l$ . Στην ουσία το συστατικό IRU εκτιμά το συνολικό χρόνο που οι μεταδόσεις της ζεύξης  $l$  χρησιμοποιούν το κανάλι στους γειτονικούς κόμβους.

Το δεύτερο συστατικό της μετρικής MIC, Channel Switching Cost, εκτιμά την «intra-flow» παρεμβολή για έναν κόμβο  $i$  και ορίζεται ως:

$$CSC = \begin{cases} w_1 & \text{αν } Channel(Prev(i)) \neq Channel(i) \\ w_2 & \text{αν } Channel(Prev(i)) = Channel(i) \end{cases}$$

όπου  $0 \leq w_1 < w_2$ ,  $Prev(i)$  είναι το κανάλι που χρησιμοποίησε ο κόμβος  $i$  στο προηγούμενο βήμα του, και  $Channel(i)$  είναι το τρέχον κανάλι στο οποίο εκπέμπει ο κόμβος  $i$  για να μεταβεί στο επόμενο βήμα. Ο παραπάνω ορισμός για τον υπολογισμό κόστους του CSC εκτιμά μόνο την «intra-flow» παρεμβολή που προκαλείται από δυο διαδοχικούς κόμβους σε ένα μονοπάτι.

Η μετρική MIC για μια διαδρομή  $p$  ορίζεται ως:

$$MIC_p = \frac{1}{N \cdot \min(ETT)} \cdot \sum_{l \in p} IRU_l + \sum_{node \ i \in p} CSC_i$$

όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων που υπάρχουν στο δίκτυο. Το άρθρο [4] δείχνει ότι το συστατικό IRU εκτιμά την «inter-flow» παρεμβολή όπου μια νέα ροή δεδομένων μπορεί να επιβάλει στο δίκτυο. Ωστόσο, το σύνολο των κόμβων  $N_l$  που πιθανόν να προκαλέσει παρεμβολές στη μετάδοση της ζεύξης  $l$  μπορεί να περιλαμβάνει κόμβους που ανήκουν στο ίδιο μονοπάτι με τη ζεύξη  $l$ . Ως εκ τούτου, το συστατικό IRU μπορεί να εκτιμήσει κάποιου είδους «intra-flow» παρεμβολή.

Εάν υλοποιηθεί όπως παρουσιάζεται στην παραπάνω ισότητα, η μετρική MIC δεν τηρεί την ιδιότητα της ισοτονικότητας. Γι' αυτό το λόγο, το άρθρο [4] προτείνει μια χαρτογράφηση του δικτύου σε ένα ιδεατό δίκτυο, το οποίο αποσυνθέτει τη μετρική MIC σε ισοτονική. Αυτή όμως η τεχνική καθιστά πολύπλοκη την υλοποίηση της σε ένα «link-state»

πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, η πολυπλοκότητα της χαρτογράφησης του ιδεατού δικτύου αυξάνεται ακόμα περισσότερο, εάν το συστατικό CSC επεκταθεί έτσι ώστε να εκτιμά την «intra-flow» παρεμβολή ανάμεσα σε περισσότερους από δυο διαδοχικούς κόμβους του δικτύου.

## 2.6. Interference Aware Routing Metric ( iAware )

Η μετρική iAware χρησιμοποιεί παρόμοια μέθοδο υπολογισμού κόστους με τη WCETT, με τη διαφορά ότι αντικαθιστά το ETT με το συστατικό iAware όπως ορίζεται παρακάτω:

$$iAware_l = \frac{ETT_l}{IR_l}$$

όπου IR ( **I**nterference **R**atio ) για μία ζεύξη  $l$  ανάμεσα στους κόμβους  $i$  και  $j$  ορίζεται ως:

$$IR_l = \frac{Noise_i}{Noise_i + \sum_{k \in InterferenceSet(i)-\{j\}} \theta(k) \cdot P_i(k)}$$

όπου  $Noise_i$  είναι ο θόρυβος που υπάρχει στον κόμβο  $i$ ,  $InterferenceSet(i)$  είναι το σύνολο των κόμβων που προκαλούν παρεμβολή στον κόμβο  $i$ ,  $P_i(k)$  είναι η ένταση του σήματος ενός πακέτου που μεταδίδεται από τον κόμβο  $k$  στον κόμβο  $i$ , και  $\theta(k)$  είναι ο μέσος κανονικοποιημένος ρυθμός μετάδοσης στον οποίο ο κόμβος  $k$  δημιουργεί κίνηση για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Το εύρος τιμών του IR είναι  $0 < IR_l \leq 1$  που σημαίνει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η παρεμβολή τόσο μικρότερη είναι η τιμή του  $IR_l$ .

Η μετρική iAware λαμβάνει υπόψη της την παρεμβολή από την ισχύ που λαμβάνει ένας κόμβος από όλους τους άλλους κόμβους. Ωστόσο δεν υπολογίζει την παρεμβολή που προκαλείται στο επίπεδο MAC. Για παράδειγμα, εάν δυο κόμβοι προκαλούν παρεμβολή ο ένας στον άλλο στο MAC επίπεδο, τότε δεν μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν πακέτα και ο βαθμός της παρεμβολής που προκαλείται έχει άμεση σχέση με το ρυθμό

μετάδοσης που στέλνουν τα δεδομένα. Αφετέρου, εάν δεν προκαλούν παρεμβολές στο MAC επίπεδο ( π.χ. οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι μακριά ο ένας από τον άλλο ), τότε η μετάδοση δεδομένων του ενός κόμβου θα ληφθεί ως παρεμβολή από τον άλλο κόμβο, με αποτέλεσμα να επηρεάσει σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης του. Τέτοιου είδους παρεμβολή μπορεί να ληφθεί υπόψη με την εξέταση ενός μοντέλου πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης, όπως είναι το Contention-Aware Transmission Time ( CATT ).

Επιπρόσθετα, η μετρική iAware δεν είναι ισοτονική γεγονός που δεν της επιτρέπει να υλοποιηθεί σε «link-state» πρωτόκολλα δρομολόγησης.



## 3. Δρομολόγηση

### 3.1. Το πρόβλημα της δρομολόγησης

Το πρόβλημα της δρομολόγησης σε ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος, ορίζεται ως η διαδικασία εύρεσης μιας διαδρομής από έναν κόμβο του δικτύου προς ένα άλλο κόμβο του ίδιου δικτύου με σκοπό τη μεταφορά δεδομένων. Ως διαδρομή σε ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος ορίζουμε την ακολουθία των κόμβων μέσω των οποίων θα διαβιβαστούν τα πακέτα δεδομένων στον προορισμό τους. Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι, στο δίκτυο αυτό, δεν μπορούν να μεταβιβάσουν απευθείας τα δεδομένα ο ένας στον άλλο, λόγω της περιορισμένης εμβέλειας του ασύρματου πομπού και γι' αυτό χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι κόμβοι για να μπορέσουν να μεταδοθούν τα δεδομένα στον προορισμό τους. Οι κόμβοι σε ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν και κινούνται, με αποτέλεσμα η θέση τους στο δίκτυο να αλλάζει συνεχώς. Καθώς αλλάζει η θέση τους, αλλάζει και η κατάσταση του δικτύου, άλλες συνδέσεις γίνονται ενεργές, άλλες ανενεργές, νέοι κόμβοι εισέρχονται και προσθέτονται στο δίκτυο, ενώ άλλοι απομακρύνονται και αποβάλλονται. Το γεγονός αυτό επιβάλλει οι κόμβοι του δικτύου άλλες φορές να παίζουν το ρόλο τερματικών κόμβων, που είναι είτε οι κόμβοι προέλευσης είτε οι κόμβοι του προορισμού των πακέτων, που ταξιδεύουν στο δίκτυο και άλλες το ρόλο των δρομολογητών ή των μεταγωγέων, που φροντίζουν να προωθήσουν πακέτα, που δεν προορίζονται γι' αυτούς στους κόμβους προορισμού. Για το λόγο αυτό, σε ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος είναι απαραίτητο ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σε συνδυασμό με μια αποδοτική συνάρτηση ανάθεσης κόστους, για να διατηρηθούν οι βασικές λειτουργίες του δικτύου, τις οποίες τώρα έχουν επιφορτιστεί οι κόμβοι.

### 3.2. Δρομολόγηση στο επίπεδο των συνδέσεων

Στη δρομολόγηση στο επίπεδο συνδέσεων κάθε κόμβος διατηρεί μια άποψη της τοπολογίας του δικτύου με ένα βάρος για κάθε σύνδεση. Κάθε κόμβος μεταδίδει σε όλους τους υπόλοιπους κόμβους περιοδικά τις πληροφορίες δρομολόγησης που κατέχει, τις οποίες λαμβάνουν οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου και ενημερώνουν τους πίνακες με τις δικές τους πληροφορίες δρομολόγησης. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο εύρεσης της συντομότερης διαδρομής επιλέγουν τον επόμενο κόμβο για κάθε ξεχωριστό προορισμό. Ασυνεπείς απόψεις της τοπολογίας του δικτύου μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό βρόχων στις διαδρομές, πράγμα που επηρεάζει την απόδοση του αλγόριθμου δρομολόγησης και σκοπός είναι ο εντοπισμός και η απαλοιφή αυτών.

### 3.3. Δρομολόγηση με τη χρήση του διανύσματος της απόστασης

Κάθε κόμβος κοιτάει μόνο το κόστος των εξερχόμενων συνδέσεων του και αντί της μετάδοσης αυτών των πληροφοριών σε όλους τους κόμβους, μεταδίδει περιοδικά σε καθένα από τους γείτονές του τη δικιά του εκτίμηση της πιο σύντομης διαδρομής προς κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο. Οι κόμβοι που λαμβάνουν την πληροφορία αυτή τη χρησιμοποιούν για να υπολογίσουν εκ νέου τις διαδρομές προς όλους τους κόμβους του δικτύου, με τη χρησιμοποίηση ενός αλγόριθμου εύρεσης των συντομότερων μονοπατιών.

### 3.4. Δρομολόγηση πηγής

Η δρομολόγηση πηγής περιγράφει ότι κάθε πακέτο έχει ενσωματωμένο το πλήρες μονοπάτι προς τον κόμβο προορισμού. Ο ενδιαφερόμενος κόμβος συλλέγει όλες τις δυνατές επιλογές διαδρομών και επιλέγει την καλύτερη, σύμφωνα με ένα μέτρο σύγκρισης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι είναι πολύ εύκολο να αποφευχθούν οι κυκλικοί βρόχοι στις διαδρομές δρομολόγησης, αφού ο κόμβος που επιλέγει μια διαδρομή μπορεί να εξασφαλίσει ότι δεν περιέχει

βρόχους. Το μειονέκτημα είναι ότι για κάθε πακέτο απαιτείται μία μικρή αρχική καθυστέρηση για την εύρεση μιας διαδρομής.

### 3.5. Δρομολόγηση βήμα-προς-βήμα

Στη δρομολόγηση βήμα-προς-βήμα, κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης που δείχνει το επόμενο «άλμα-βήμα» για τις διαδρομές προς όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου. Για ένα πακέτο, προκειμένου να φτάσει στον προορισμό του, το μόνο που χρειάζεται να μεταφέρει στην κεφαλίδα του πακέτου του, είναι η διεύθυνση προορισμού. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι απλά προωθούν το πακέτο κατά μήκος του μονοπατιού βασιζόμενοι μόνο στην διεύθυνση προορισμού. Εξαιτίας της απλότητας του τρόπου προώθησης και της μικρής επιβάρυνσης που εισάγει, η δρομολόγηση βήμα-προς-βήμα είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στα ενσύρματα δίκτυα. Παρόμοιοι λόγοι την καθιστούν δημοφιλή και στα ασύρματα δίκτυα πλέγματος. Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά της, απαιτεί προσεκτική σχεδίαση των μετρικών δρομολόγησης της έτσι ώστε να επιτυγχάνει τη χωρίς βρόχους προώθηση των πακέτων.

### 3.6. Τεχνική πλημμύρας

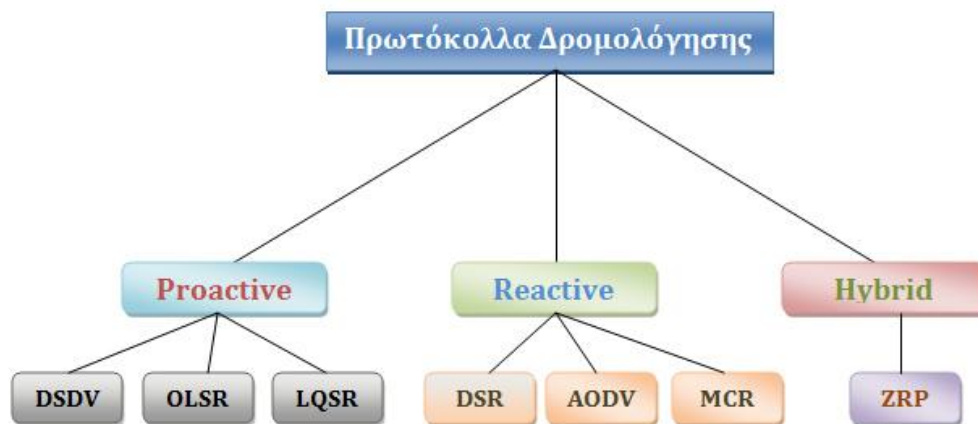
Πολλά πρωτοκόλλα δρομολόγησης για να μεταδώσουν πληροφορίες δρομολόγησης, τις εκπέμπουν από τον κόμβο προέλευσης προς όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου με την τεχνική της πλημμύρας. Η τεχνική αυτή είναι μια ευρέως χρησιμοποιημένη μορφή ασύρματης μετάδοσης και λειτουργεί ως εξής. Ο κόμβος προέλευσης στέλνει τις πληροφορίες του στους γείτονές του (στην ασύρματη περίπτωση, αυτό σημαίνει, σε όλους τους κόμβους που είναι μέσα στη εμβέλεια του πομπού). Οι γείτονες αναμεταδίδουν στους γείτονές τους τις πληροφορίες που λαμβάνουν. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου οι πληροφορίες δρομολόγησης παραληφθούν από όλους τους κόμβους του δικτύου. Ένας κόμβος αναμεταδίδει κάθε πακέτο μόνο μια φορά. Αν λάβει ξανά πακέτο που έχει ήδη προωθήσει απλά το αγνοεί και για να το εξασφαλίσει αυτό

χρησιμοποιεί έναν αριθμό ο οποίος αυξάνεται για κάθε νέο πακέτο που ο κόμβος στέλνει.

### 3.7. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να επιβάλουν διαφορετικές απαιτήσεις στο σχεδιασμό των μετρικών δρομολόγησης. Ωστόσο, είναι απαραίτητο πρώτα να ερευνήσουμε ποια πρωτόκολλα «ταιριάζουν» στα δίκτυα πλέγματος και στη συνέχεια να καταλάβουμε τις απαραίτητες ιδιότητες που πρέπει να έχουν οι μετρικές για να υποστηρίξουν αποδοτικά τη δρομολόγηση των δεδομένων.

Ανάλογα με το πότε υπολογίζονται οι διαδρομές, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης διαιρούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 1: σε proactive, reactive και σε υβριδικά, που τα τελευταία αποτελούν συνδυασμό των δυο άλλων κατηγοριών.



Εικόνα 1: Κατηγοριοποίηση Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης

#### 3.7.1. Proactive

Είναι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία κρατούν στοιχεία για όλες τις πιθανές διαδρομές που μπορεί να χρειαστούν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο και έχουν το πλεονέκτημα ότι όταν ζητηθεί μία συγκεκριμένη διαδρομή, από οποιοδήποτε σημείο του δικτύου σε οποιοδήποτε άλλο, αυτή θα υπάρχει και θα προωθηθεί προς χρήση χωρίς καθυστέρηση. Με

άλλα λόγια όποια διαδρομή και αν επιθυμούμε να ζητήσουμε προς χρήση, αν υπάρχει, θα μπορούμε να την έχουμε στη διάθεσή μας χωρίς να περιμένουμε, επειδή η διαδικασία αναζήτησης έχει ήδη ολοκληρωθεί και τα αποτελέσματα βρίσκονται έτοιμα προς χρήση. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι ότι περιοδικά αναζητούν όλες τις πιθανές διαδρομές προς κάθε κόμβο του δικτύου, για να μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν όποια στιγμή τις χρειαστούν. Μερικά πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το OLSR, LQSR, DSDV, WRP, TBRPF, LCA, DFR κ.α.

### 3.7.2. Reactive

Είναι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία ενεργοποιούν την διαδικασία εύρεσης ενός μονοπατιού (διαδρομής) από ένα κόμβο σε ένα άλλο, μόνο όταν εκδοθεί από τον ενδιαφερόμενο κόμβο ανάλογο αίτημα. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι φυσικό να κάνουν σαφώς μικρότερη χρήση του εύρους καναλιού σε σχέση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα για την εύρεση των ζητούμενων διαδρομών. Έχουν όμως το σημαντικό μειονέκτημα της αρχικής καθυστέρησης κάθε φορά που ζητείται μία διαδρομή, αφού πριν προωθηθεί στον αιτούντα κόμβο πρέπει να ενεργοποιηθεί η διαδικασία εύρεσης και μετά να τον εξυπηρετήσουν. Μερικά πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το DSR, AODV, MCR, LBAR, DLAR κ.α.

### 3.8. Προϋποθέσεις Μετρικών Δρομολόγησης

Για να διασφαλίσουμε την καλή απόδοση των δικτύων πλέγματος, οι μετρικές δρομολόγησης θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω τέσσερις βασικές προϋποθέσεις. Αρχικά, οι μετρικές δε θα πρέπει να προκαλούν συχνές αλλαγές στα μονοπάτια δρομολόγησης, για να εξασφαλίσουν με αυτό τον τρόπο τη σταθερότητα του δικτύου. Δεύτερον, θα πρέπει να αντιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά των δικτύων πλέγματος για να εξασφαλίσουν ότι μονοπάτια με μικρό κόστος θα έχουν

καλή απόδοση. Τρίτον, θα πρέπει να εξασφαλίσουν ότι μονοπάτια με ελάχιστο κόστος μπορούν να βρεθούν από αποδοτικούς αλγόριθμους με πολυωνυμική πολυπλοκότητα. Τέλος, οι μετρικές θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δε δημιουργούν κυκλικούς βρόχους.

Στη συνέχεια εξετάζουμε τις παραπάνω προϋποθέσεις με περισσότερη λεπτομέρεια.

### 3.8.1. Σταθερότητα Διαδρομών

Οι συχνές εναλλαγές διαδρομών μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλο ποσοστό μηνυμάτων ενημέρωσης με αποτέλεσμα να επιβαρύνουν τη συνολική απόδοση του δικτύου. Επίσης μπορούν να διαταράξουν την κανονική λειτουργία του δικτύου επειδή τα πρωτόκολλα δρομολόγησης να μην μπορούν να αντεπεξέλθουν στις τόσο συχνές αλλαγές.

Η σταθερότητα των διαδρομών καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των μονοπατιών που εκτιμούν οι μετρικές δρομολόγησης και εξαρτώνται είτε από το φόρτο δεδομένων ( load-sensitive ) είτε από την τοπολογία ( topology-dependent ) του δικτύου. Μετρικές που εξαρτώνται από το φόρτο του δικτύου αναθέτουν βάρη σε μία διαδρομή βασιζόμενες στο συνολικό φορτίο της κίνησης. Επειδή όμως ο παράγοντας της κίνησης των δεδομένων μεταβάλλεται συχνά, τέτοιου είδους μετρικές αναθέτουν βάρη σε διαδρομές, οι οποίες εναλλάσσονται επίσης συχνά. Αφετέρου, μετρικές οι οποίες εξαρτώνται από την τοπολογία του δικτύου, αναθέτουν βάρη σε διαδρομές βασιζόμενες αποκλειστικά στις τοπολογικές ιδιότητες των μονοπατιών, όπως είναι ο αριθμός αλμάτων που απαρτίζει μια διαδρομή καθώς και η χωρητικότητα των ζεύξεων που έχει ένα μονοπάτι. Τέτοιες μετρικές είναι γενικά πιο σταθερές, ειδικά όταν η τοπολογία του δικτύου δεν αλλάζει συχνά ( περιλαμβάνει στατικούς κόμβους ).

Συμπερασματικά, οι μετρικές δρομολόγησης θα πρέπει να υπολογίζονται με βάση κυρίως τις τοπολογικές ιδιότητες των δικτύων πλέγματος παρά από το φόρτο κίνησης των δεδομένων, προκειμένου να

μη διαταράσσεται η ευρωστία του δικτύου από τις συχνές εναλλαγές των διαδρομών δρομολόγησης.

### 3.8.2. Καλή Απόδοση διαδρομών ελαχίστου κόστους

Για τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης, στόχος τους είναι να προωθήσουν τα πακέτα δεδομένων κατά μήκος μονοπατιών ελαχίστου κόστους. Για να διασφαλίσουν ότι οι πόροι των δικτύων πλέγματος χρησιμοποιούνται αποδοτικά, τα μονοπάτια ελαχίστου κόστους που επιλέγονται από αυτά τα πρωτόκολλα θα πρέπει να έχουν καλή απόδοση όσον αφορά την υψηλή τιμή του throughput και τη μικρή καθυστέρηση των πακέτων. Για να επιτευχθεί αυτό, οι μετρικές δρομολόγησης πρέπει να είναι σχεδιασμένες να εκτιμούν τα πολλαπλά χαρακτηριστικά των δικτύων πλέγματος που επηρεάζουν κυρίως την απόδοση των διαδρομών.

Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι το μήκος των διαδρομών. Εφόσον κάθε βήμα εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση και ενδεχομένως μεγαλύτερη απώλεια πακέτων, μία μακρύτερη διαδρομή αυξάνει τη συνολική καθυστέρηση των πακέτων και μειώνει το throughput μιας ροής δεδομένων. Επομένως μια μετρική δρομολόγησης θα πρέπει να αυξάνει το κόστος μιας διαδρομής, όταν αυξάνεται το μήκος του μονοπατιού.

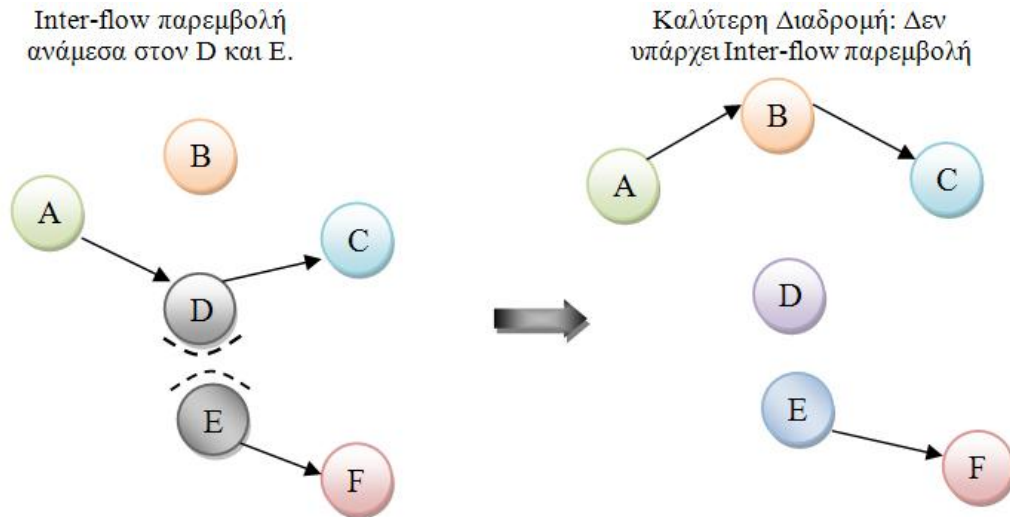
Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η χωρητικότητα της ζεύξης. Σε αντίθεση με μια ενσύρματη ζεύξη, της οποίας η χωρητικότητα είναι ανεξάρτητη από τη φυσική απόσταση των δυο κόμβων ( π.χ. η χωρητικότητα της ζεύξης ανάμεσα σε δυο κόμβους ), ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανάμεσα σε δύο ασύρματους κόμβους σχετίζεται άμεσα με τη φυσική απόσταση των κόμβων αυτών. Γενικά η χωρητικότητα μιας ζεύξης μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση των κόμβων, υποβαθμίζοντας παράλληλα την ποιότητα του καναλιού.

Ένα τρίτο χαρακτηριστικό είναι το ποσοστό απώλειας πακέτων. Διαφορετικές ασύρματες ζεύξεις μπορούν να έχουν διαφορετικά ποσοστά απώλειας δεδομένων. Ένας κόμβος μπορεί να χρειαστεί να αναμεταδώσει

ένα πακέτο πάνω σε μια ζεύξη αρκετές φορές με πολύ υψηλό ποσοστό απώλειας, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τόσο το throughput όσο και τη καθυστέρηση μιας οποιασδήποτε ροής που μεταδίδεται πάνω από αυτή τη ζεύξη. Για το λόγο αυτό, μια μετρική δρομολόγησης θα πρέπει να συνεκτιμά το ποσοστό απώλειας πακέτων προκειμένου να εξασφαλίσει καλή απόδοση για τα μονοπάτια ελαχίστου κόστους.

Το τέταρτο και τελευταίο χαρακτηριστικό είναι η συμφόρηση-παρεμβολή. Σε αντίθεση με τις ενσύρματες ζεύξεις οι οποίες έχουν συγκεκριμένο εύρος ζώνης, το εύρος ζώνης για τις ασύρματες ζεύξεις κατανέμεται μεταξύ των γειτονικών κόμβων που απαρτίζουν την τοπολογία του δικτύου. Μια ροή δεδομένων κατά μήκος μιας ασύρματης ζεύξης δεν καταναλώνει μόνο το εύρος ζώνης των κόμβων που ανήκουν στο ίδιο μονοπάτι, αλλά επίσης συναγωνίζεται για το εύρος ζώνης με τους κόμβους που ανήκουν στη γειτονική περιοχή αυτού του μονοπατιού. Μια τέτοιου είδους συμφόρηση ονομάζεται «inter-flow» παρεμβολή, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην εξάντληση του εύρους ζώνης για ορισμένους κόμβους που συνεχώς θα «ακούνε» απασχολημένα τα κανάλια. Για να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση, οι μετρικές θα πρέπει να «βοηθούν» τα πρωτόκολλα δρομολόγησης να επιλέγουν μονοπάτια που αντισταθμίζουν τη συνολική κίνηση των δεδομένων καθώς επίσης και να μειώνουν την «inter-flow» παρεμβολή.

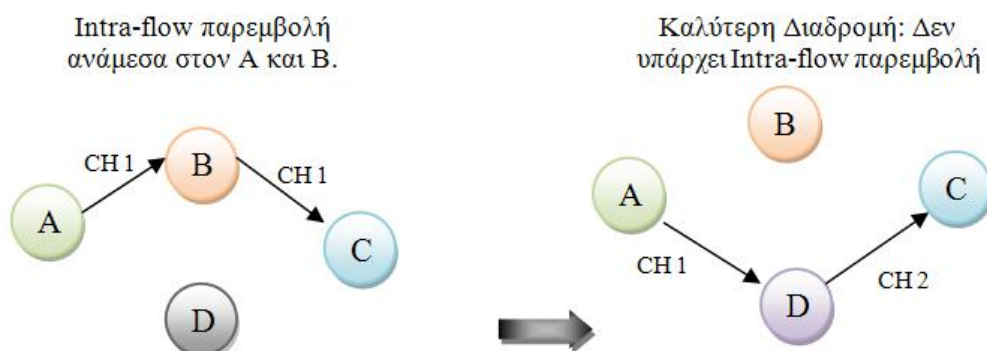




**Εικόνα 2:** Παράδειγμα inter-flow παρεμβολής

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 2, μια αποτελεσματική μετρική δρομολόγησης θα πρέπει να αναθέσει στο μονοπάτι  $A \rightarrow B \rightarrow C$  μικρότερο βάρος σε σχέση με το μονοπάτι  $A \rightarrow D \rightarrow C$  γιατί το πρώτο έχει μικρότερη παρεμβολή από ό,τι το άλλο μονοπάτι.

Κόμβοι που ανήκουν στο μονοπάτι της ίδιας ροής δεδομένων συναγωνίζονται μεταξύ τους για τη πρόσβαση στο ίδιο κανάλι. Αυτή η συμφόρηση ονομάζεται «intra-flow» παρεμβολή, η οποία υποβαθμίζει το εύρος ζώνης του δικτύου και την καθυστέρηση των πακέτων. Επομένως, μια πιθανή αύξηση των επιπέδων συμφόρησης εξαιτίας της «intra-flow» παρεμβολής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό των μετρικών δρομολόγησης.



**Εικόνα 3:** Παράδειγμα intra-flow παρεμβολής. CH αναπαριστά το κανάλι εκπομπής

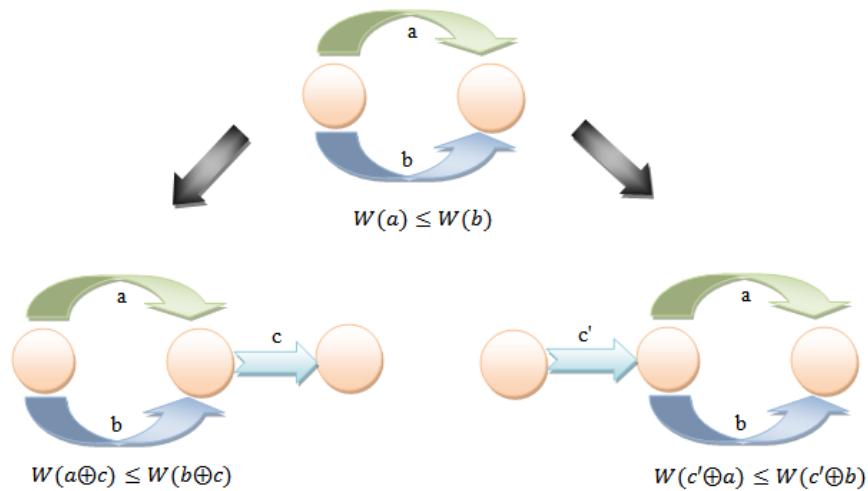
Για παράδειγμα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3 μια μετρική που λαμβάνει υπόψη της την παρεμβολή, θα πρέπει να αναθέσει στο μονοπάτι  $A \rightarrow B \rightarrow C$  μεγαλύτερο κόστος απ' ό,τι στο μονοπάτι  $A \rightarrow D \rightarrow C$ , καθώς η επαναχρησιμοποίηση του καναλιού 1 δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην απόδοση του δικτύου εξαιτίας της «intra-flow» παρεμβολής.

Συνοψίζοντας, προκειμένου να βρεθούν μονοπάτια ελαχίστου κόστους με καλή απόδοση, οι μετρικές δρομολόγησης θα πρέπει να επιλέγουν μονοπάτια που έχουν όσο το δυνατό μικρότερη «inter-flow» και «intra-flow» παρεμβολή.

### 3.8.3. Αποδοτικοί αλγόριθμοι υπολογισμού διαδρομών

Τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης βασίζονται ουσιαστικά στους αποδοτικούς αλγόριθμους, όπως είναι ο Bellman-Ford ή ο Dijkstra, για να βρίσκουν μονοπάτια ελαχίστου κόστους. Ακόμα όμως και αν μια μετρική εξασφαλίσει ότι τα μονοπάτια ελαχίστου κόστους θα έχουν καλή απόδοση, δεν υπάρχει κάποια εγγύηση ότι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να έχει καλή απόδοση εάν δεν υπάρχει κάποιος αποδοτικός αλγόριθμος εύρεσης διαδρομών που βασίζεται σε αυτή τη μετρική. Αναγκαία και ικανή συνθήκη λοιπόν για την ύπαρξη τέτοιων αποδοτικών αλγορίθμων είναι το γεγονός ότι οι μετρικές δρομολόγησης θα πρέπει να ικανοποιούν την ιδιότητα της ισοτονικότητας [11]. Εάν μια μετρική δεν είναι ισοτονική, μόνο αλγόριθμοι με εκθετική πολυπλοκότητα μπορούν να υπολογίζουν διαδρομές ελαχίστου κόστους, πράγμα που δεν είναι ανεκτό και εφικτό σε ασύρματα δίκτυα πλέγματος.

Γενικά, η ιδιότητα της ισοτονικότητας σημαίνει ότι μια μετρική θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι διατηρείται η σειρά του κόστους των δυο μονοπατιών ακόμα και αν προστεθεί ένα τρίτο μονοπάτι. Πιο αναλυτικά, ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα οποιοδήποτε μονοπάτι  $a$  που το κόστος του καθορίζεται από μια μετρική, η οποία είναι συνάρτηση του  $a$  και ορίζεται ως  $W(a)$ . Ορίζοντας τη συνένωση των δύο μονοπατιών  $a$  και  $b$  με  $a \oplus b$ , η ιδιότητα της ισοτονικότητας καθορίζεται ως:



**Εικόνα 4:** Παράδειγμα της ισοτονικότητας

**Ορισμός:** Μια μετρική δρομολόγησης  $W(\cdot)$  είναι ισοτονική εάν  $W(a) \leq W(b)$  τότε  $W(a \oplus c) \leq W(b \oplus c)$  και  $W(c' \oplus a) \leq W(c' \oplus b)$ , για όλες τις διαδρομές  $a, b, c, c'$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.

#### 3.8.4. Δρομολόγηση Χωρίς Κυκλικούς Βρόχους

Η ιδιότητα της ισοτονικότητας δεν καθορίζει μόνο το κατά πόσο μπορούν να υπολογιστούν μονοπάτια ελαχίστου κόστους αποδοτικά, αλλά επίσης είναι αναγκαία συνθήκη για τη δρομολόγηση πακέτων χωρίς κυκλικούς βρόχους. Επομένως, οι μετρικές υπολογισμού κόστους θα πρέπει να είναι ισοτονικές για να διασφαλίσουν τη δρομολόγηση χωρίς βρόχους, όταν συνδυάζεται η προώθηση βήμα-προς-βήμα με τον αλγόριθμο Dijkstra:

**Θεώρημα:** αν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Dijkstra με προώθηση βήμα-προς-βήμα, η ιδιότητα της ισοτονικότητας είναι αναγκαία και ικανή συνθήκη για τη αποφυγή κυκλικών βρόχων.

Τέλος, το παραπάνω θεώρημα φανερώνει τη σπουδαιότητα που έχει η ιδιότητα της ισοτονικότητας για τη χωρίς βρόχους δρομολόγηση. Η

ύπαρξη βρόχων κατά τη διαδικασία εύρεσης διαδρομών έχει σημαντικές επιπτώσεις στη συνολική απόδοση του δικτύου.

## 4. Θεωρητική Προσέγγιση μετρικής δρομολόγησης

Σε αυτή την ενότητα, προτού παρουσιάσουμε το μαθηματικό μοντέλο για τη νέα μετρική δρομολόγησης, θα μελετήσουμε ένα μοντέλο για την εκτίμηση του throughput στο φυσικό επίπεδο, όσον αφορά την κοινή πρόσβαση στο ασύρματο κανάλι. Αρχικά θα μελετήσουμε το MAC ( Medium Access Control ) επίπεδο του πρωτοκόλλου IEEE 802.11s και στη συνέχεια, θα δώσουμε έναν πιο γενικό τύπο στην προσπάθεια μοντελοποίησης του throughput, καθώς θα παρέχει ένα άνω όριο του εύρους ζώνης που θα μπορεί να επιτευχθεί αναφερόμενο σε ένα ασύρματο δίκτυο που περιλαμβάνει κόμβους με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Έπειτα θα παρουσιάσουμε τη μετρική Contention-Aware Transmission Time ( CATT ), επισημαίνοντας τις βασικές διαφορές με τις ήδη υπάρχουσες μετρικές δρομολόγησης. Τέλος θα επεκτείνουμε τη μετρική CATT έτσι ώστε να περιλαμβάνει την πιθανότητα απώλειας των πακέτων καθώς και το φόρτο των δεδομένων.

### 4.1. Μοντελοποίηση Throughput για ασύρματη πρόσβαση σε μεριζώμενα κανάλια

Ο μηχανισμός DCF ( Distributed Coordination Function ) που βασίζεται στο πρότυπο πρόσβασης CSMA/CA ( Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance ) του πρωτοκόλλου IEEE 802.11s μπορεί να μοντελοποιηθεί σε μια στοχαστική διεργασία που περιλαμβάνει τρεις τύπους διαστημάτων ( intervals ): ένα διάστημα επιτυχημένης μετάδοσης  $T^{suc}$ , ένα διάστημα στο οποίο προκαλούνται συγκρούσεις  $T^{col}$  και σε ένα αδρανές διάστημα  $T^{idle}$ . Η διάρκεια αυτών των χρονικών διαστημάτων εξαρτάται από την κωδικοποίηση στο φυσικό επίπεδο, καθώς επίσης και αν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων RTS/CTS ( Request To Sent / Clear To Send ) [12].

Ας συμβολίσουμε με  $\tau$  το ρυθμό στον οποίο ένας κόμβος προσπαθεί να μεταδώσει τα πακέτα δεδομένων και  $N$  το συνολικό αριθμό των κόμβων που συναγωνίζονται για την πρόσβαση στο ίδιο ασύρματο

κανάλι. Σε συνθήκες «κορεσμού», δηλαδή σε περιπτώσεις που όλοι οι κόμβοι έχουν πάντοτε έτοιμο ένα πακέτο να μεταδώσουν, καθώς και όταν έχουν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το throughput που επιτυγχάνεται από ένα κόμβο, προσεγγιστικά δίνεται από την παρακάτω ισότητα [12]:

$$x_i = \frac{\tau \cdot (1-\tau)^{N-1} \cdot L_i}{N \cdot \tau \cdot (1-\tau)^{N-1} \cdot T^{suc} + p^{col} \cdot T^{col} + p^{idle} \cdot T^{idle}}$$

Όπου  $L_i$  συμβολίζει το μέγεθος του πακέτου για τον κόμβο  $i$ . Η πιθανότητα για μία σύγκρουση  $p^{col}$  και για ένα αδρανές διάστημα  $p^{idle}$  δίνονται παρακάτω:

$$p^{col} = 1 - (1 - \tau)^N - N \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{N-1}, \quad p^{idle} = (1 - \tau)^N$$

Στην περίπτωση τώρα που οι κόμβοι έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, το διάστημα επιτυχημένης μετάδοσης  $T_i^{suc}$  για έναν κόμβο  $i$  με ρυθμό μετάδοσης  $R_i$  είναι:

$$T_i^{suc} = \frac{L_i}{R_i} + O$$

όπου  $O$  είναι η επιπλέον επιβάρυνση που δημιουργείται από τη μετάδοση των πακέτων τόσο στο MAC όσο και στο φυσικό επίπεδο, που περιλαμβάνει τις επιβεβαιώσεις ( acknowledgements ) και το IFS ( InterFrame Space ).

Στο πρωτόκολλο 802.11 με ενεργοποιημένο τον μηχανισμό RTS/CTS ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων δεν επηρεάζει το διάστημα που προκαλούνται οι συγκρούσεις ( collision interval ), δεδομένου ότι μια σύγκρουση περιλαμβάνει RTS πακέτα τα οποία στέλνονται με χαμηλό ρυθμό. Επομένως, όπως αναφέρουν και τα άρθρα [13], [14] το μέσο throughput  $x_i$  ενός κόμβου  $i$  δίνεται από την παρακάτω ισότητα:

$$x_i = \frac{\tau \cdot (1 - \tau)^{N-1} \cdot L_i}{\tau \cdot (1 - \tau)^{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N \left( \frac{L_j}{R_j} + O \right) + P^{col} \cdot T^{col} + P^{idle} \cdot T^{idle}} \quad (1)$$

Αν χρησιμοποιηθεί ο βασικός μηχανισμός του CSMA/CA, τότε το διάστημα συγκρούσεων θα εξαρτάται επίσης από το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Επιπρόσθετα, εάν είναι μικρός ο αριθμός των κόμβων που συναγωνίζονται για την απόκτηση πρόσβασης στο ίδιο κανάλι ή το ελάχιστο παράθυρο συναγωνισμού (Contention Window) είναι κατάλληλα ρυθμισμένο, όπως αναφέρεται στο άρθρο [15], τότε η πιθανότητα των συγκρούσεων είναι μικρή, γεγονός που έχει ελάχιστη επίδραση στη ισότητα (1) σε σχέση με τους άλλους παράγοντες.

Από την σχέση (1), όταν είναι ενεργοποιημένοι οι μηχανισμοί CSMA/CA και RTS/CTS, μια εκτίμηση για τη μέγιστη τιμή του throughput προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$x_i = \frac{L_i}{\sum_{j=1}^N \left( \frac{L_j}{R_j} + O \right)} \quad (2)$$

Στην περίπτωση τώρα που αγνοήσουμε την επιβάρυνση που προκαλείται από τη μετάδοση των πακέτων, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$x_i = \frac{L_i}{\sum_{j=1}^N \frac{L_j}{R_j}} \quad (3)$$

Η ισότητα (3) μας δίνει μια εκτίμηση του throughput, η οποία είναι η ίδια για όλους τους κόμβους, ανεξάρτητα από τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που έχουν οι ασύρματες διεπαφές τους. Η σχέση αυτή αποτυπώνει μια σημαντική ιδιότητα που έχουν τα 802.11 ασύρματα δίκτυα: ένας κόμβος με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεν επηρεάζει μόνο την δική του απόδοση, αλλά και την απόδοση όλων των

άλλων κόμβων που ανήκουν στο ίδιο δίκτυο ( Performance Anomaly ) [30].

Γενικά, η τελευταία σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του throughput από οποιοδήποτε μεριζόμενο μηχανισμό πρόσβασης καναλιών, κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός πακέτου όταν αποκτήσουν πρόσβαση στο ασύρματο κανάλι. Μια παρόμοια προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη σύνδεση των ασύρματων κόμβων σε σημεία πρόσβασης ( Access Points ) [16], [17], [18].

#### 4.2. CATT: Η μετρική Contention-Aware Transmission Time

Μια εκτίμηση του χρονικού διαστήματος για να μεταδοθεί ένα πακέτο κατά μήκος μιας ζεύξης  $l$ , είναι  $L_l/x_l$ , όπου  $L_l$  συμβολίζει το μέγεθος του πακέτου και  $x_l$  είναι το μέσο throughput, όπως ορίζεται στην ισότητα (3). Βασιζόμενοι στην παραπάνω εκτίμηση, ορίζουμε τη μετρική Contention-Aware Transmission Time ( CATT ) για μια ζεύξη  $l$  ως:

$$CATT_l = \sum_{j \in N_l} \frac{L_j}{R_j} \quad (4)$$

όπου  $N_l$  είναι το σύνολο των ζεύξεων, των οποίων οι μεταδόσεις προκαλούν παρεμβολή με τη μετάδοση δεδομένων κατά μήκος της ζεύξης  $l$ , περιλαμβανόμενης και της ζεύξης  $l$ .

Από την ισότητα (4), είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι η μετρική CATT είναι αυστηρά ισοτονική, για το λόγο ότι το συνολικό κόστος ενός μονοπατιού αποτελείται από το συνολικό άθροισμα του κόστους των ζεύξεων που ανήκουν στο ίδιο μονοπάτι. Επίσης το κόστος των ζεύξεων δεν παίρνει αρνητικές τιμές. Επιπρόσθετα, όπως παρουσιάζεται και στη σχέση (4), η νέα μετρική δεν εξαρτάται από ρυθμιστικές παραμέτρους, όπως συμβαίνει με τη μετρική WCETT, στην οποία διαφορετικές τιμές επηρεάζουν διαφορετικά την απόδοση του δικτύου.



Επομένως, η ιδιότητα της ισοτονικότητας μας επιτρέπει να υλοποιήσουμε την προτεινόμενη μετρική CATT σε link-state πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Dijkstra για την εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού με δρομολόγηση «βήμα-προς-βήμα». Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζουμε την υλοποίηση της μετρικής CATT στο πρωτόκολλο δρομολόγησης OLSR.

Η νέα συνάρτηση υπολογισμού κόστους CATT για μια ζεύξη  $l$  ομοιόμορφα λαμβάνει υπόψη της τόσο τη παρεμβολή που προκαλείται από μεταδόσεις ροών που ανήκουν στο ίδιο μονοπάτι ( intra-flow interference ) όσο και από ροές που βρίσκονται στη γειτονική περιοχή της ζεύξης  $l$  ( inter-flow interference ).

Σε αντίθεση, η μετρική MIC ανεξάρτητα λαμβάνει υπόψη της την «inter-flow» και «intra-flow» παρεμβολή, καθώς το IRU συστατικό της εκτιμά το κόστος που επιβάλλει μια νέα ροή σε μια ήδη υπάρχουσα ροή. Ως εκ τούτου, η επιλογή μιας διαδρομής που βασίζεται στο IRU, επιλέγει μονοπάτια που ελαχιστοποιούν το κόστος που επιφέρει μια νέα ροή σε άλλες ροές. Τέλος η μετρική iAware λαμβάνει υπόψη της την παρεμβολή σε σχέση με το ποσοστό του θορύβου και την ένταση του σήματος ( signal-to-noise ratio), χωρίς να εκτιμά τη διαφορετικότητα των ρυθμών μετάδοσης, που έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του δικτύου πλέγματος.

#### 4.2.1. Επεκτάσεις

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε δυο επεκτάσεις για την προτεινόμενη μετρική CATT, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη της τόσο την πιθανότητα απώλειας πακέτων όσο και το φορτίο δεδομένων που εξέρχεται από τις ασύρματες διεπαφές.

##### 4.2.1.1. Loss Dependence

Ο εκτιμώμενος χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου κατά μήκος μιας ζεύξης  $l$ , όπως υπολογίστηκε από την προηγούμενη ενότητα, δίνεται από την ισότητα (4). Εάν συμβολίσουμε με  $p_l$  την πιθανότητα μιας

ανεπιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου, τότε ο εκτιμώμενος μέσος αριθμός αναμεταδόσεων που χρειάζονται για να σταλεί ένα πακέτο κατά μήκος της ζεύξης  $l$  είναι  $ETX_l = \frac{1}{1-p_l}$ . Βασιζόμενοι σε αυτή τη σχέση η νέα μετρική CATT μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει και την πιθανότητα απώλειας των πακέτων ως:

$$CATT_l^{LD} = ETX_l \cdot \sum_{j \in N_l} \frac{L_j}{R_j} \quad (5)$$

#### 4.2.1.2. Load Dependence

Για να επεκτείνουμε τη μετρική CATT, έτσι ώστε να περιλαμβάνει στον υπολογισμό της και το φορτίο δεδομένων, ας εξετάσουμε το ακόλουθο: ο λόγος  $L_j/R_j$  στην ισότητα (4) αναπαριστά τη διάρκεια μιας μετάδοσης δεδομένων κατά μήκος της ζεύξης  $j$  με την προϋπόθεση ότι όλες οι ζεύξεις έχουν πάντοτε διαθέσιμο να μεταδώσουν ένα πακέτο. Εάν δεν ισχύει η παραπάνω προϋπόθεση, τότε η συνεισφορά της ζεύξης  $l$  στο χρόνο πρόσβασης του καναλιού θα είναι μικρότερη από τον λόγο  $L_j/R_j$  και ανάλογη με το ποσοστό μετάδοσης του  $j$  πακέτου  $\tau_j$ . Επίσης σε καταστάσεις μεγάλης συμφόρησης του δικτύου (saturation conditions), το ποσοστό προσπάθειας για όλους τους κόμβους είναι  $1/\sum_{k \in N_j} \frac{L_k}{R_k}$ , όπου  $N_j$  αντιπροσωπεύει το σύνολο των ζεύξεων που προκαλούν παρεμβολές με τις μεταδόσεις της ζεύξης  $l$ . Επομένως για να εισάγουμε την εξάρτηση από το φορτίο στη μετρική CATT, στη χειρότερη περίπτωση, τη συνεισφορά μιας ζεύξης  $l$  στο χρόνο πρόσβασης του καναλιού,  $L_j/R_j$ , πρέπει να την πολλαπλασιάσουμε με το ποσοστό μετάδοσης «πραγματικών» πακέτων δια του ποσοστού μετάδοσης πακέτων σε περιπτώσεις συμφόρησης του δικτύου, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\tau_j}{\frac{1}{\sum_{k \in N_j} \frac{L_k}{R_k}}} = \left( \sum_{k \in N_j} \frac{L_k}{R_k} \right) \cdot \tau_j$$

Βασιζόμενοι στην παραπάνω ισότητα, η μετρική CATT που λαμβάνει υπόψη της τόσο την πιθανότητα απώλειας πακέτων όσο και το φορτίο δεδομένων δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$CATT_l^{L2D} = ETX_l \cdot \sum_{j \in N_j} \left( \left( \sum_{k \in N_j} \frac{L_k}{R_k} \right) \cdot \tau_j \cdot \frac{L_j}{R_j} \right)$$

Σε περιπτώσεις που όλες οι ζεύξεις έχουν διαθέσιμο για μετάδοση ένα πακέτο ( saturation conditions ) η τελευταία ισότητα ισοδυναμεί με την ισότητα (5).

Είναι γνωστό ότι οι μετρικές που εξαρτώνται από το φορτίο των δεδομένων ( load-dependence ) δημιουργούν αστάθεια στο δίκτυο[22] και συνήθως η δρομολόγηση των πακέτων εμπεριέχει κυκλικούς βρόχους. Γι' αυτό το λόγο δεν έχουν υλοποιηθεί σε μεγάλα σταθερά δίκτυα. Ωστόσο ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει υπόψη της η μετρική CATT τη συμφόρηση, είναι στην ουσία μια προσέγγιση της χειρότερης περίπτωσης, καθώς υποθέτουμε ότι όλοι οι γειτονικοί κόμβοι που είναι στο πεδίο εμβέλειας μιας ζεύξης, πάντοτε προκαλούν παρεμβολές με τις μεταδόσεις κατά μήκος της ζεύξης. Ως εκ τούτου όμως οι μετρικές που εξαρτώνται από το φορτίο των δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα πλέγματος, εκτός του ότι επιτυγχάνουν εξισορρόπηση του φόρτου( όπως και στα ενσύρματα δίκτυα), επίσης βοηθούν στην ακριβή εκτίμηση της συμφόρησης, όπως αναφέρονται στα άρθρα [5]και [23].

Δύο ακόμα προσεγγίσεις που προσδίδουν μεγαλύτερη σταθερότητα στην επιλογή των διαδρομών είναι οι ακόλουθες: α) Να μεταδίδεται ο μέσος όρος του κόστους των ζεύξεων για ένα διάστημα μιας χρονικής περιόδου παρά τα στιγμιαία κόστη και β) Να οριστεί ένα κατώτερο όριο στο οποίο θα γίνονται οι αναπροσαρμογές στο δίκτυο ( update threshold ) δηλ. να μεταδίδονται τα νέα κόστη των ζεύξεων μόνο όταν είναι μεγαλύτερα από τα προηγούμενα στο προηγούμενο ελάχιστο διάστημα.

## 5. Υλοποίηση Μετρικής Δρομολόγησης

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μετρικής Contention-Aware Transmission Time ( CATT ) αποτελεί το γεγονός ότι είναι αυστηρά ισοτονική ( strictly isotonic ), με αποτέλεσμα να μπορεί να υλοποιηθεί σε Link State πρωτόκολλα δρομολόγησης, χρησιμοποιώντας προώθηση βήμα-προς-βήμα.

Για να είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε την απόδοση της μετρικής CATT, όπως αναφέρεται στην ενότητα 4, έπρεπε να την υλοποιήσουμε σε ένα από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Επιλέξαμε το πρωτόκολλο OLSR ( **O**ptimized **L**ink **S**tate **R**outing ), έκδοση 0.4.10, επειδή είναι πολύ σταθερό και λόγω της «*pro-active*» φύσης του, έχει το πλεονέκτημα να έχει άμεσα διαθέσιμες τις διαδρομές όταν χρειαστούν. Το πρωτόκολλο OLSR αποτελεί μια βελτιστοποίηση των link state πρωτοκόλλων δρομολόγησης, για το λόγο ότι μειώνει σημαντικά το μέγεθος των πακέτων ελέγχου, χρησιμοποιώντας την τεχνική των MPR ( **M**ulti-**P**oint **R**elays ).

### 5.1. Περιγραφή Πρωτοκόλλου OLSR

Το OLSR [26] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για κινητά ( mobile ) και σταθερά δίκτυα. Χρησιμοποιεί πίνακες δρομολόγησης για να αποθηκεύει τις καλύτερες διαδρομές ανάμεσα στους κόμβους, οι οποίες βέβαια υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Dijkstra. Ως «*pro-active*» πρωτόκολλο, είναι κατάλληλο για συνθήκες στις οποίες τα δύο άκρα αλλάζουν με τον χρόνο για το λόγο ότι δεν χρειάζεται επιπλέον κίνηση με δεδομένα ελέγχου, καθώς διατηρούνται διαρκώς οι διαδρομές προς όλα τα σημεία. Η επικοινωνία μεταξύ των δρομολογητών που τρέχουν τον OLSR δαίμονα γίνεται μέσω UDP broadcasts στο port 698. Σε κάθε UDP πακέτο εμπεριέχονται πολλαπλά μηνύματα OLSR, ενώ το κάθε μήνυμα περιέχει πληροφορία χρόνου εγκυρότητας. Όταν παρέλθει ο δηλωμένος χρόνος ( timeout ) η πληροφορία απορρίπτεται.

Στο πρωτόκολλο OLSR υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι μηνυμάτων ελέγχου, τα Hello, TC και MID μηνύματα.

- **Hello**: τα μηνύματα αυτά μεταδίδονται σε όλους τους γείτονες. Χρησιμεύουν στην ανίχνευση των γειτόνων και στον υπολογισμό των MPR.
- **TC ( Topology Control )**: αυτά τα μηνύματα χρησιμεύουν στη «σηματοδότηση» link-state. Η επικοινωνία με αυτόν τον τύπο των μηνυμάτων βελτιώνεται με πολλούς τρόπους με τη χρήση των MPR.
- **MID ( Multiple Interface Declaration )**: είναι μηνύματα που αποστέλλονται από κόμβους που τρέχουν OLSR σε περισσότερες από μία διεπαφές τους. Περιέχουν λίστα με όλες τις IP διευθύνσεις που χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος.

Μερικές σημαντικές ιδιότητες του πρωτοκόλλου είναι οι ακόλουθες:

- Είναι κατάλληλο για μεγάλα και πυκνά κινητά δίκτυα, καθώς η βελτιστοποίηση που επιτυγχάνεται με τη χρήση των MPR δουλεύει καλά σε τέτοιες συνθήκες.
- Χρησιμοποιεί βήμα-προς-βήμα ( hop-by-hop ) δρομολόγηση, με άλλα λόγια, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί την δική του τοπική πληροφόρηση για τη δρομολόγηση των πακέτων.
- Είναι ιδιαίτερα καλό για δίκτυα όπου η κίνηση είναι τυχαία και σποραδική ανάμεσα σε έναν μεγάλο αριθμό κόμβων, παρά σε καταστάσεις όπου η κίνηση αφορά σχεδόν αποκλειστικά ένα μικρό και συγκεκριμένο σετ από κόμβους.
- Διατηρεί διαρκώς πληροφορία για τις διαδρομές προς όλους τους προορισμούς στο δίκτυο, και ως εκ τούτου είναι ιδανικό για την κίνηση που δημιουργείται μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού κόμβων όπου η δυάδα [ αφετηρία – προορισμός ] αλλάζει διαρκώς.
- Έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί απολύτως κατανεμημένα, και δεν εξαρτάται από καμία κεντρική οντότητα.

- ✚ Δεν απαιτείται αξιόπιστη μετάδοση των μηνυμάτων ελέγχου: ο κάθε κόμβος αποστέλλει μηνύματα ελέγχου περιοδικά, και μπορεί να αντέξει απώλεια μηνυμάτων σε λογικά πλαίσια, χωρίς προβλήματα. Αυτές οι απώλειες είναι σύνηθες φαινόμενο στις ασύρματες επικοινωνίες.
- ✚ Επίσης δεν απαιτείται η μετάδοση των μηνυμάτων με συγκεκριμένη σειρά. Κάθε μήνυμα ελέγχου είναι αριθμημένο αυξητικά. Με αυτόν τον τρόπο, ο παραλήπτης μπορεί να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή ποια πληροφορία απ' αυτές είναι η πιο πρόσφατη, ακόμα και εάν έχουν μεταδοθεί με λάθος σειρά.
- ✚ Τέλος το OLSR παρέχει υποστήριξη για επεκτάσεις του πρωτοκόλλου, όπως η λειτουργία σε κατάσταση ύπνου ( sleep mode ) και το multicast routing, καθώς και άλλα. Αυτές οι επεκτάσεις έχουν το καλό ότι μπορούν να περιληφθούν ως πρόσθετες λειτουργίες δίχως αυτό να επηρεάσει τη συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις.

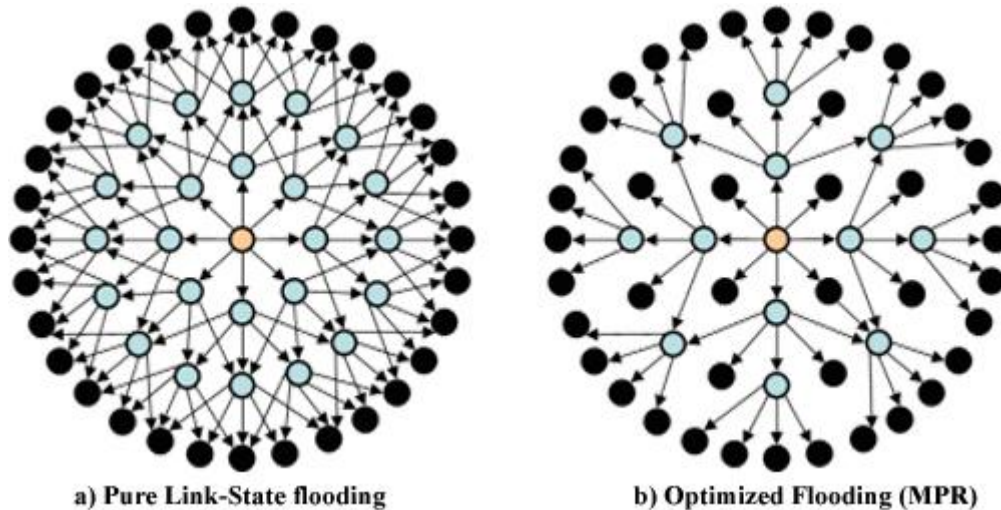
Γενικότερα θα λέγαμε ότι η βασική λειτουργικότητα του OLSR μπορεί να αναλυθεί σε τρία βήματα:

- Ανίχνευση συνδέσεων/γειτόνων
- MultiPoint Relaying
- Υπολογισμός διαδρομών και ανταλλαγή μηνυμάτων κατάστασης συνδέσεων (link state messaging).

### 5.1.1. MultiPoint Relays (MPR)

Το OLSR ελαχιστοποιεί την επιβάρυνση του δικτύου από την κίνηση πολυάριθμων μηνυμάτων ελέγχου, χρησιμοποιώντας μονάχα επιλεγμένους κόμβους -τους επονομαζόμενους MPRs- για την αναμετάδοση των μηνυμάτων ελέγχου, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 5. Οι κόμβοι αυτοί που έχουν επιλεγεί ως MPR από κάποιους γειτονικούς τους κόμβους, ανακοινώνουν αυτή την πληροφορία περιοδικά στα μηνύματα ελέγχου που αποστέλλουν. Με αυτόν τον τρόπο ένας κόμβος

ανακοινώνει στο δίκτυο, ότι έχει επαφή αυτή τη στιγμή με τους κόμβους που τον έχουν επιλέξει ως MPR. Στον υπολογισμό των διαδρομών, οι κόμβοι MPR χρησιμεύουν για να χαραχθεί το μονοπάτι από έναν δεδομένο κόμβο σε οποιονδήποτε προορισμό στο δίκτυο.



Εικόνα 5: Τεχνική Πλημμύρας στο απλό link-state και στο OLSR

Το OLSR δεν χρειάζεται παρά μερική πληροφορία για την κατάσταση των συνδέσεων (link state) να κυκλοφορήσει στο δίκτυο, για να παρέχει τα συντομότερα μονοπάτια. Το ελάχιστο αυτό τμήμα πληροφορίας που χρειάζεται είναι πως πρέπει όλοι οι κόμβοι που έχουν επιλεγεί ως MPRs να δηλώσουν τις συνδέσεις τους με τους κόμβους που τους επέλεξαν ως MPR. Βέβαια επιπλέον πληροφορία τοπολογικής φύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ο κάθε κόμβος επιλέγει και διατηρεί την δική του λίστα με MPRs.

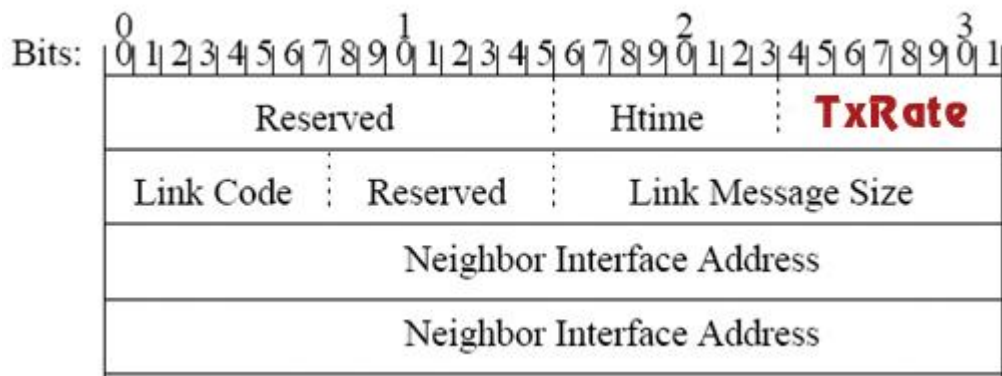
Ο κανόνας που ισχύει είναι: «Για κάθε  $n$  γείτονες των 2 hops, πρέπει να υπάρχουν  $m$  MPR ώστε  $n$  να μπορούν να προσπελαστούν μέσω των  $m$ ».

## 5.2.Αλλαγές – Τροποποιήσεις στο πρωτόκολλο OLSR

Για να είμαστε σε θέση να υλοποιήσουμε τη νέα μετρική στο πρωτόκολλο δρομολόγησης OLSR, έπρεπε να κάνουμε κάποιες καίριες ( Critical ) τροποποιήσεις στον πυρήνα του πρωτοκόλλου, ώστε να



παρέχουμε, με χαμηλό κόστος, την απαραίτητη πληροφορία που χρειάζεται για τη δημιουργία του CATT και στη συνέχεια να επιβάλουμε τη χρήση της μετρικής αυτής για την επιλογή των διαδρομών. Αρχικά, όπως αναφέρεται και στην ενότητα 4, κάθε κόμβος πρέπει τοπικά να υπολογίζει το ρυθμό μετάδοσης ( transmission rate ) για κάθε διεπαφή του. Την πληροφορία αυτή την παίρνουμε από το περιβάλλον του χρήστη μέσω του API ( Application Programming Interface ) του Madwifi driver για καθεμιά από τις διεπαφές που συμμετέχει στη διαδικασία της δρομολόγησης. Στη συνέχεια κάθε κόμβος θα πρέπει να γνωστοποιήσει το ρυθμό μετάδοσής του σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους ( one-hop neighbors ). Για την επίτευξή του, εισάγαμε ένα νέο πεδίο στη κεφαλίδα του Hello πακέτου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.



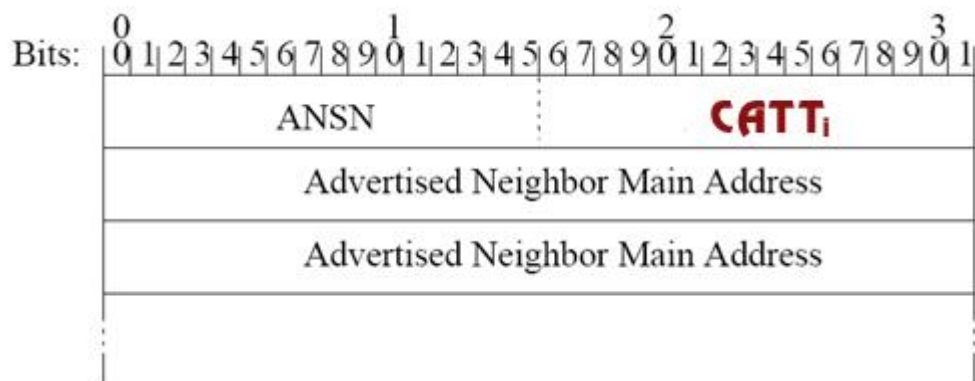
Εικόνα 6: Κεφαλίδα τροποποιημένου Hello πακέτου

Κάθε φορά που ένας κόμβος πρέπει να στείλει ένα Hello πακέτο ( τυπικά κάθε 2 δευτερόλεπτα ), παίρνουμε τον τρέχοντα ρυθμό μετάδοσης του από τον Madwifi driver και τον εισάγουμε στην τιμή του νέου πεδίου που δημιουργήσαμε. Έτσι η πληροφορία του ρυθμού μετάδοσης ( txrate ) κάθε κόμβου ανταλλάσσεται μεταξύ των γειτονικών του κόμβων. Με αυτή την πληροφορία διαθέσιμη, ο κάθε κόμβος μπορεί πλέον και υπολογίζει την επιμέρους μετρική CATT, όπως αναφέρεται στην ισότητα (4).

Η δεύτερη σημαντική αλλαγή που κάναμε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7, ήταν να τροποποιήσουμε με παρόμοιο τρόπο την κεφαλίδα του



TC ( **T**opology **C**ontrol ) πακέτου, προκειμένου η πληροφορία των επιμέρους CATT να μεταδοθεί σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Τέλος, η εύρεση και ο υπολογισμός της διαδρομής βασίζεται στο άθροισμα των επιμέρους CATT χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Dijkstra, προκειμένου να βρεθεί μία διαδρομή με τη μικρότερη τιμή της μετρικής CATT.



**Εικόνα 7:** Κεφαλίδα τροποποιημένου TC πακέτου

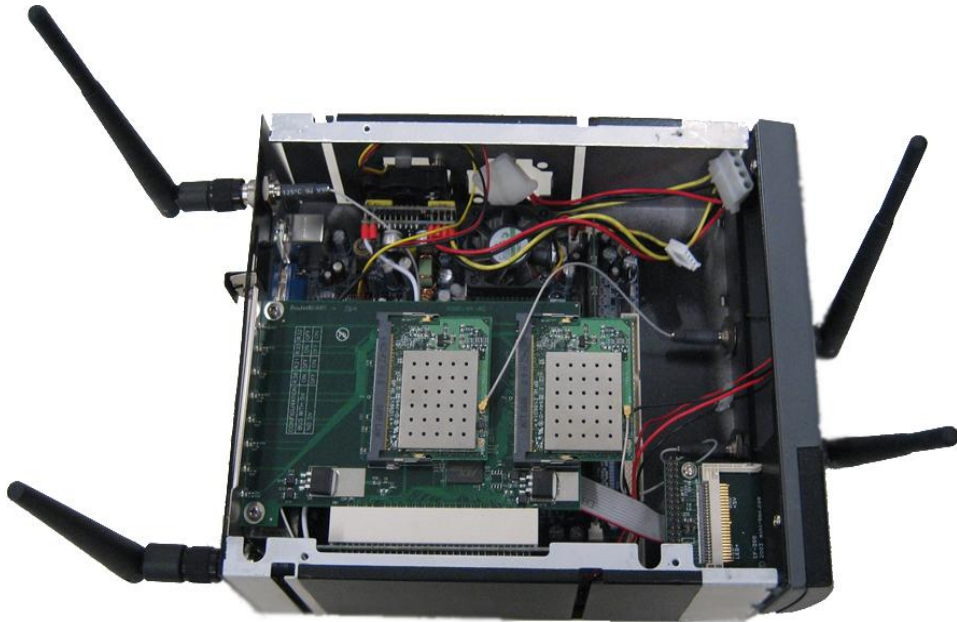
## 6. Αξιολόγηση

### 6.1. Περιβάλλον Μετρήσεων

Όλα τα πειράματα που αναφέρονται παρακάτω, προκειμένου να αξιολογήσουμε τη νέα μετρική δρομολόγησης CATT, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο **TNL** ( **T**elecommunications and **N**etworks **L**aboratory ) του Ινστιτούτου Πληροφορικής στο Ηράκλειο Κρήτης. Ο εσωτερικός χώρος του εργαστηρίου είναι γύρω στα 60 **τ.μ** με ξύλινα διαχωριστικά στη μέση. Τα πειράματα διεξήχθησαν κατά τις βραδινές ώρες, όπου δεν υπήρχαν άνθρωποι στο εργαστήριο, έτσι ώστε να διασφαλίσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Για τις ανάγκες των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν 6 κόμβοι εξοπλισμένοι με τέσσερις ασύρματες διεπαφές ο καθένας, καθώς και ένας αριθμός από laptops με μια ασύρματη διεπαφή. Να επισημάνουμε ότι το ίδιο λογισμικό ήταν εγκατεστημένο και στα laptops και στους κόμβους πολλαπλών διεπαφών.

### 6.2. Εξοπλισμός Υλικού - Λογισμικού

Ο κόμβος πολλαπλών Διεπαφών είναι ένας υπολογιστής γενικής χρήσης, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με τέσσερις ασύρματες κάρτες (High Power Super A/G dual Band 802.11a/b/g, Atheros, Wireless Mini-PCI Oem WLM54AG), οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε κεραίες εσωτερικού χώρου. Ο κόμβος αποτελείται από μια μητρική πλακέτα Mini-ITX (VIA EPIA Nehemiah M10000G) με 1GHz επεξεργαστή. Η μητρική πλακέτα έχει μια ενσύρματη διεπαφή (10/100 Ethernet) και μία διεπαφή IDE για την υποδοχή του σκληρού δίσκου. Η μνήμη του συστήματος είναι 512 MBytes χρονισμένη στη συχνότητα των 200MHz (DDR400). Η χωρητικότητα του σκληρού δίσκου είναι 80GB και το φυσικό του μέγεθος είναι 2.5" για εξοικονόμηση χώρου και για μικρότερη κατανάλωση.



**Εικόνα 8:** Εσωτερική όψη κόμβου πολλαπλών διεπαφών

Καθώς η μητρική πλακέτα έχει μια **PCI (Peripheral Component Interconnect)** υποδοχή, την έχουμε εξοπλίσει με ένα αντάπτορα MikroTik Router BOARD 14 MiniPCI-to-PCI, στον οποίο ενσωματώνονται οι τέσσερις ασύρματες κάρτες.



**Εικόνα 9:** Εξωτερική όψη κόμβου πολλαπλών διεπαφών

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι εσωτερικού χώρου (TriBand APXtender Indoor RP-TNC antennas) στα 2.2 dBi. Οι κεραίες είναι κατάλληλες για την συχνότητα των 5GHz ( 802.11a ). Η κάθε κεραία είναι

συνδεδεμένη με τον κόμβο πολλαπλών διεπαφών μέσω ενός 15cm U.FL to RP-TNC Bulkhead Pigtail connector

Σε όλους τους κόμβους πολλαπλών διεπαφών είναι εγκατεστημένο ως λειτουργικό σύστημα το Ubuntu 7.04 ( Feisty Fawn ), με Linux kernel 2.6.20-16-generic. Ως οδηγός ( device driver ) για τις ασύρματες κάρτες, χρησιμοποιούμε την έκδοση 0.9.3.1 του madwifi driver, του οποίου η διάθεση είναι ελεύθερη, παρέχοντας μας με αυτόν το τρόπο την δυνατότητα τροποποίησης του. Όλες οι ρυθμίσεις για τις παραμέτρους των ασύρματων καρτών γίνονται από τον Madwifi driver μέσω του Wireless Extension API.

### 6.3. Μετρήσεις Επιδόσεων – Πειράματα

Τα πειράματα τα οποία αναφέρονται σε αυτήν την ενότητα, περιλαμβάνουν σενάρια στα οποία οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι και με μία και με πολλαπλές ασύρματες διεπαφές, καθώς επίσης και με κόμβους που έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης ( transmission rates ) δεδομένων. Παρόλο που η φύση των τοπολογιών είναι απλή, τα σενάρια αντιστοιχούν σε τοπολογίες δικτύων που θα μπορούσαν να υπάρχουν σε πραγματικά περιβάλλοντα δικτύων πλέγματος ( mesh networks ), τόσο σε εσωτερικού όσο και εξωτερικού χώρου. Για παράδειγμα, τα σενάρια που αναφέρονται στο Asymmetric Link [1], [27] και στο Point-to-Multipoint Links [28], [29] συνήθως εμφανίζονται σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων του πρωτοκόλλου 802.11, καθώς επίσης και σε ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα. Επιπρόσθετα, η αξιολόγηση των μετρικών δρομολόγησης πάνω σε απλές τοπολογίες, μας βοηθά να καταλάβουμε καλύτερα πως οι πολλαπλοί ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται σήμερα από τα ασύρματα δίκτυα επηρεάζουν την συμφόρηση, και γενικότερα την συνολική απόδοση των δικτύων. Μια τέτοια προσέγγιση μας επιτρέπει να ερμηνεύσουμε αποτελέσματα για πιο πολύπλοκες τοπολογίες δικτύων.

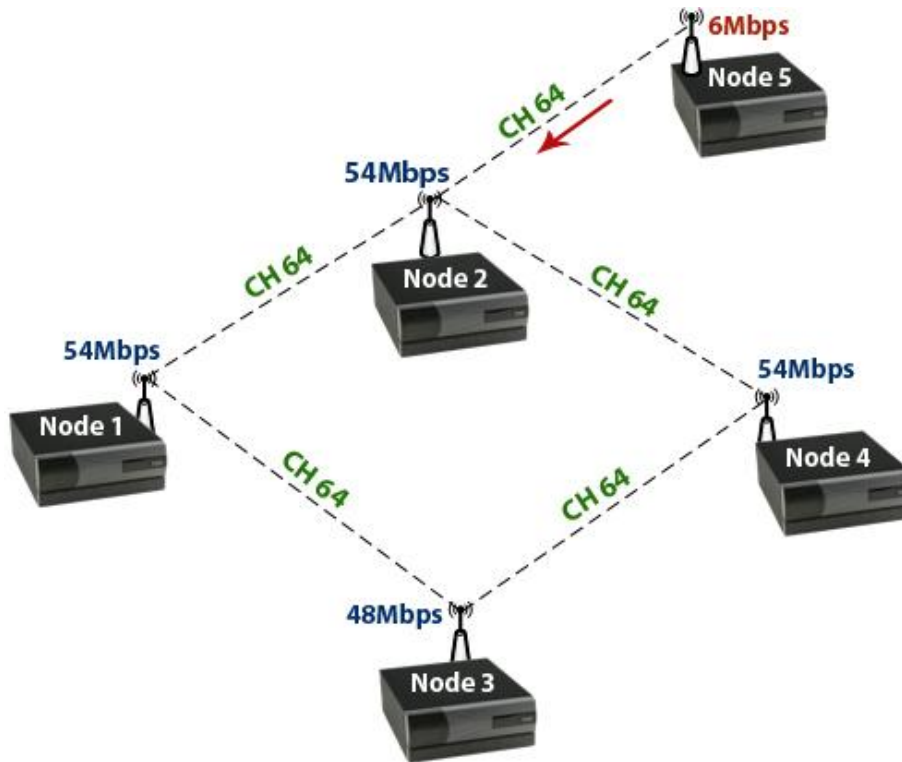
Για να μετρήσουμε το throughput ( ρυθμοαπόδοση ) μεταξύ των διαφορετικών συνδέσεων, χρησιμοποιήσαμε την έκδοση 2.0.2 του εργαλείου iperf. Το μέγεθος του UDP ( User Datagram Protocol ) πακέτου ήταν 1498 bytes. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, δείχνουν το μέσο throughput όταν μία νέα ροή μεταδίδει UDP κίνηση, καθώς επίσης και την συνολική καθυστέρηση των πακέτων ( end-to-end packet delay ) όταν μία νέα ροή μεταδίδει ICMP πακέτα μεγέθους 84 bytes, χρησιμοποιώντας το εργαλείο ping. Επίσης παραθέτουμε, αποτελέσματα για την καθυστέρηση των TCP συνδέσεων, τα οποία παράγονται από ένα http client, ο οποίος χρησιμοποιεί το εργαλείο *wget* για να ζητήσει διαδοχικά αρχεία μεγέθους 500 Kbyte από ένα Apache http server. Το διάστημα ανάμεσα στις διαδοχικές μεταφορές των αρχείων είναι εκθετικά κατανομημένο, με ένα μέσο χρόνο των 40 δευτερολέπτων.

Η διάρκεια του κάθε πειράματος ήταν 200 δευτερόλεπτα και το κάθε ένα εκτελέστηκε 5 φορές. Επομένως η συνολική διάρκεια εκτέλεσης του κάθε πειράματος ήταν 1000 δευτερόλεπτα. ( 5x200 ). Στην αρχή εκτέλεσης κάθε πειράματος, κάναμε «reset» το OLSR, για να αδειάσουν όλοι οι πίνακες δρομολόγησης και το αφήναμε να τρέχει αρκετά έως ότου βρεθεί σε μία σταθερή κατάσταση.

Στην υλοποίηση της μετρικής CATT στο πρωτόκολλο OLSR, τα Hello μηνύματα μεταδίδονται κάθε 2 δευτερόλεπτα ενώ τα TC μηνύματα κάθε 5. Έκτος από την ανακάλυψη των γειτόνων και τη γνωστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης, τα Hello μηνύματα χρησιμοποιούνται και για την εκτίμηση της πιθανότητας σφάλματος ( loss probability ) τόσο στο ETX ( Expected Transmission Count ) όσο και στις ETT ( Expected Transmission Time ) και IRU ( Interference Resource Usage ) μετρικές δρομολόγησης.

### 6.3.1. Σενάριο 1: Single Radio A

Η Εικόνα 10 αναπαριστά την τοπολογία δικτύου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σενάριο. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι εξοπλισμένοι με μία μόνο ασύρματη διεπαφή, που είναι σε Ad-Hoc mode και συναγωνίζονται για τη χρησιμοποίηση του ίδιου καναλιού. Ο μηχανισμός για την αποφυγή συγκρούσεων RTS/CTS ήταν απενεργοποιημένος. Για τις ανάγκες αυτού του πειράματος, έχουμε μειώσει σημαντικά την ισχύ μετάδοσης ( transmit power ) σε κάθε διεπαφή, έτσι ώστε κάθε κόμβος να μπορεί να έχει άμεση επικοινωνία μόνο με τους γείτονες του ( one-hop neighbors ).



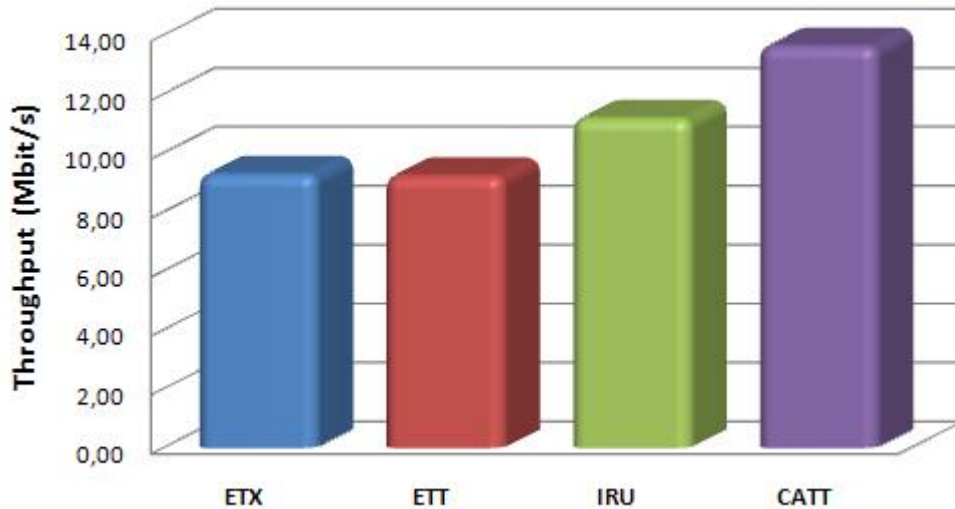
Εικόνα 10: Σενάριο 1 - Single Radio Scenario A

Σε αυτό το πειραματικό σενάριο ο κόμβος 5 έχει τον μικρότερο ρυθμό μετάδοσης ( 6 Mbps ) σε σχέση με τους άλλους κόμβους του δικτύου. Αυτό έχει ως συνέπεια την υποβάθμιση της απόδοσης όλων των κόμβων του δικτύου και περισσότερο την απόδοση στον κόμβο 2, εξαιτίας των συγκρούσεων που προκαλούνται. Οι ρυθμοί μετάδοσης καθώς και η συχνότητα στην οποία λειτουργούν όλοι οι κόμβοι φαίνονται στην Εικόνα 10.

Για να προσομοιώσουμε ένα δίκτυο πολλαπλών αλμάτων ( Multihop network ) ανάμεσα σε κοντά τοποθετημένους κόμβους, χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο «*iptables*». Αυτό το λογισμικό εκτελεί φιλτράρισμα στο MAC ( **Medium Access Control** ) επίπεδο. Κάθε κόμβος έχει μία λίστα από MAC διευθύνσεις που πρόκειται να φιλτραριστούν. Το φίλτρο αυτό απορρίπτει όλα τα πακέτα δεδομένων από τους κόμβους που ανήκουν στην λίστα αυτή. Χρησιμοποιώντας λοιπόν αυτό το εργαλείο σχεδιάσαμε την τοπολογία δικτύου που φαίνεται στην Εικόνα 10.

Υπάρχει μία ροή δεδομένων από τον κόμβο 5 στον κόμβο 2 με ρυθμό μετάδοσης 6 Mbps. Το αίτημα για την εύρεση μονοπατιού είναι μια νέα

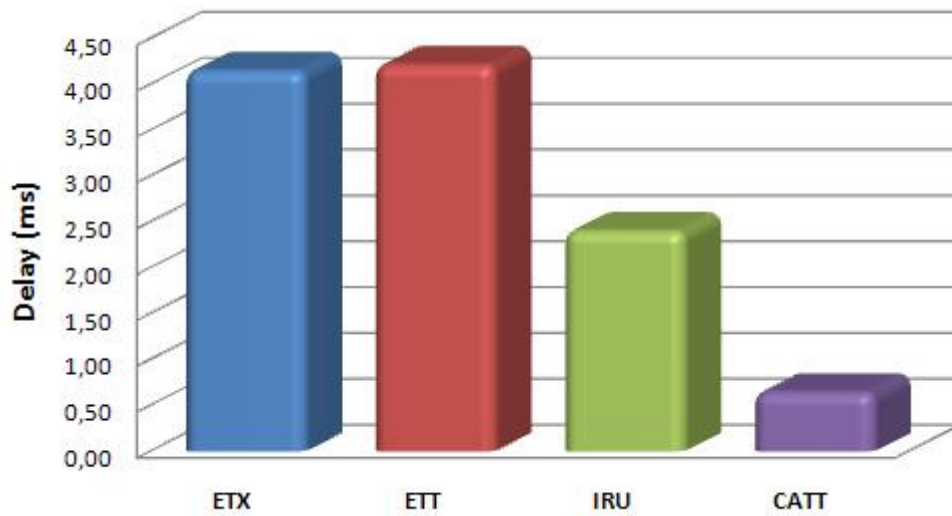
ροή από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4 με ρυθμό μετάδοσης 54 Mbps. Η κίνηση ( traffic ) που προέρχεται από τον κόμβο 1 μπορεί να προωθηθεί στον κόμβο 4 μέσω δύο εναλλακτικών μονοπατιών ( κόμβοι: 1-2-4 και 1-3-4 ).



**Εικόνα 11:** Σενάριο 1 – Μέσο UDP Throughput

Η Εικόνα 11 μας παρουσιάζει τη γραφική παράσταση του μέσου throughput που επιτυγχάνουν οι τέσσερις μετρικές δρομολόγησης. Αυτή η γραφική παράσταση μας δείχνει ότι με τη μετρική CATT, η νέα ροή πετυχαίνει 22% μεγαλύτερο throughput από το IRU, 48% μεγαλύτερο από το ETT και 47% μεγαλύτερο από την μετρική ETX. Για τις τρεις μετρικές, που εξαρτώνται άμεσα από την απώλεια των πακέτων, όπως είναι το ETX, ETT και IRU, το μονοπάτι για τη νέα ροή συνήθως ταλαντεύεται μεταξύ των δύο εναλλακτικών διαδρομών ( κόμβοι: 1-2-4 και 1-3-4 ) με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει την απόδοση του δικτύου τόσο από πλευράς throughput όσο και από την πλευρά της συνολικής καθυστέρησης των πακέτων [8] [24].





**Εικόνα 12:** Σενάριο 1 - End-to-end packet delay

Σε αντίθεση με τις άλλες μετρικές δρομολόγησης, η μετρική CATT επιλέγει το μονοπάτι ( κόμβοι: 1-3-4 ), το οποίο επιτυγχάνει το καλύτερο throughput και αυτή η διαδρομή δεν αλλάζει σε όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος. Η μετρική ETT συνήθως επιλέγει το μονοπάτι ( κόμβοι: 1-2-4 ), επειδή ο ρυθμός μετάδοσης που έχει η διεπαφή του κόμβου 2 ( 54 Mbps ) είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό μετάδοσης του κόμβου 3 ( 48 Mbps ). Η μετρική IRU επιτυγχάνει καλύτερο throughput από τις δυο άλλες μετρικές, ETX και ETT για το λόγο ότι επιλέγει περισσότερες φορές το καλύτερο μονοπάτι ( κόμβοι: 1-3-4 ), αλλά πετυχαίνει μικρότερο throughput σε σχέση με την προτεινόμενη μετρική CATT, εξαιτίας της ταλάντωσης που προκαλεί η πιθανότητα απώλειας πακέτων ( packet loss probability ). Η εναλλαγή αυτή των διαδρομών μπορεί να φανεί και από το 95% διάστημα εμπιστοσύνης του Πίνακας 1. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση του throughput και της καθυστέρησης και κατεπέκταση της ταλάντωσης μεταξύ των εναλλακτικών μονοπατιών.

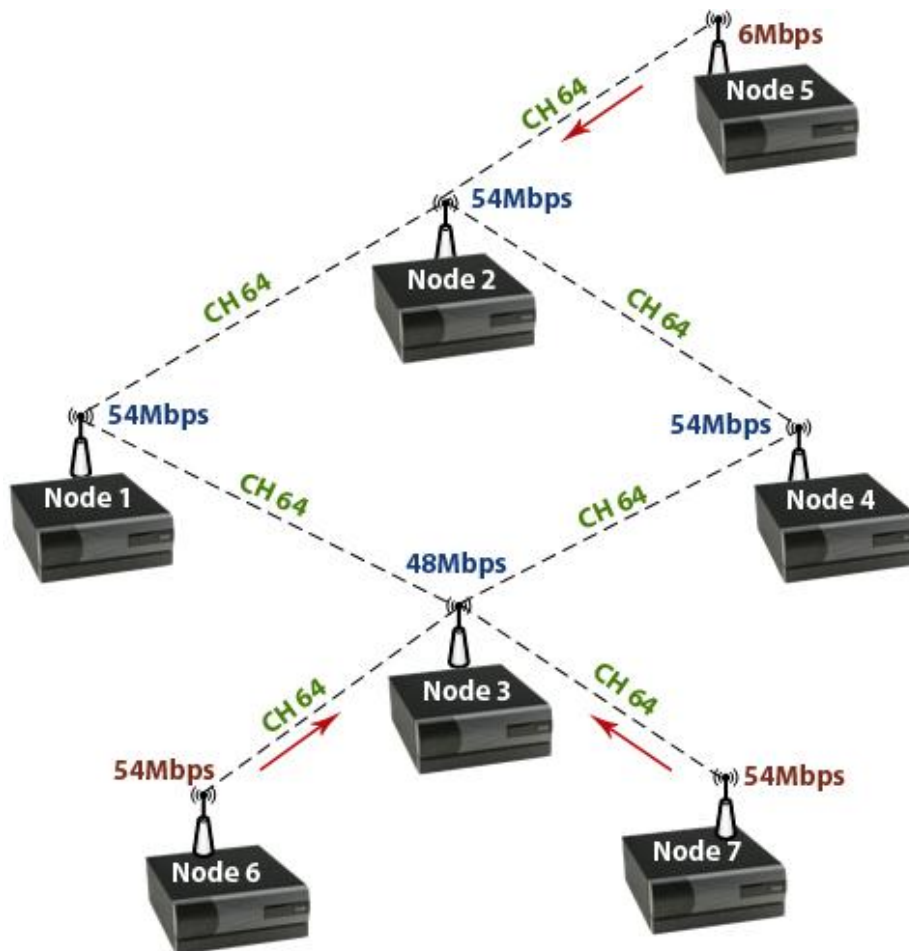
	Μέσο Throughput ( Mbit/s )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	Μέση Καθυστέρηση ( ms )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης
ETX	9,30	± 0,961	4,16	± 1,083
ETT	9,25	± 0,618	4,22	± 0,773
IRU	11,19	± 0,297	2,41	± 0,281
CATT	13,65	± 0,225	0,65	± 0,187

**Πίνακας 1:** Σενάριο 1 - Single Radio A. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης

Η γραφική παράσταση της Εικόνα 12 μας δείχνει ότι η μετρική CATT επιτυγχάνει μικρότερη από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση των πακέτων σε σχέση με τις άλλες μετρικές. Πιο συγκεκριμένα, βελτιώνει την απόδοση του δικτύου όσον αφορά την καθυστέρηση των πακέτων κατά 73% σε σχέση με το IRU, 85% σε σχέση με το ETT και 84% συγκρινόμενο με τη μετρική ETX.

### 6.3.2. Σενάριο 2: Single Radio B

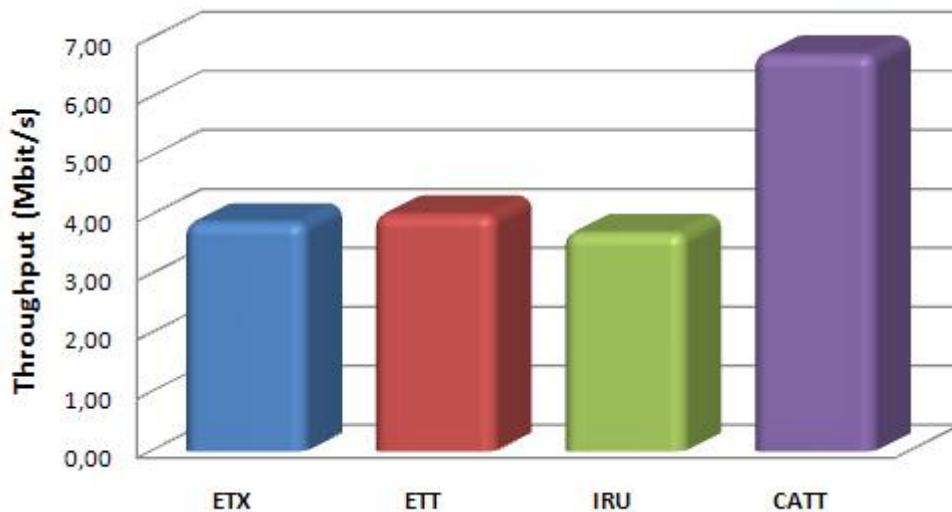
Η τοπολογία δικτύου που απεικονίζεται στην Εικόνα 13 είναι παρόμοια με το σενάριο «Single-Radio A» με τη διαφορά ότι είναι περισσότεροι οι κόμβοι που προκαλούν παρεμβολή. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, όλες οι ασύρματες διεπαφές είναι σε Ad-Hoc mode, ο μηχανισμός RTS/CTS είναι απενεργοποιημένος και όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι ρυθμισμένοι να εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι ( Channel 64 ). Επίσης κάθε κόμβος που συμμετέχει στη διαδικασία της δρομολόγησης είναι εξοπλισμένος με μία μόνο ασύρματη διεπαφή.



Εικόνα 13: Σενάριο 2 - Single Radio Scenario B

Για να προσομοιώσουμε το δίκτυο, που φαίνεται στην Εικόνα 13, έχουμε μειώσει την ισχύ μετάδοσης των κόμβων, έτσι ώστε ο κάθε κόμβος να μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους «ένα-βήμα» γείτονες του ( one-hop neighbors ). Συνολικά στην παραπάνω τοπολογία υπάρχουν τέσσερις ροές δεδομένων. Οι τρεις από αυτές προκαλούν παρεμβολές στη διαδικασία εύρεσης του μονοπατιού, αφού εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, η μία ροή δεδομένων κατευθύνεται από τον κόμβο 5 στον κόμβο 2 με ρυθμό μετάδοσης 6 Mbps, προκαλώντας παρεμβολές κυρίως στον κόμβο 2. Η 2<sup>η</sup> και η 3<sup>η</sup> ροή ( flow ) προέρχονται από τους κόμβους 6 και 7 προς τον κόμβο 3 με ρυθμούς μετάδοσης 54 Mbps. Οι δύο αυτές ροές προκαλούν παρεμβολές κυρίως στον κόμβο 3. Το αίτημα για την εύρεση μονοπατιού είναι μια νέα ροή

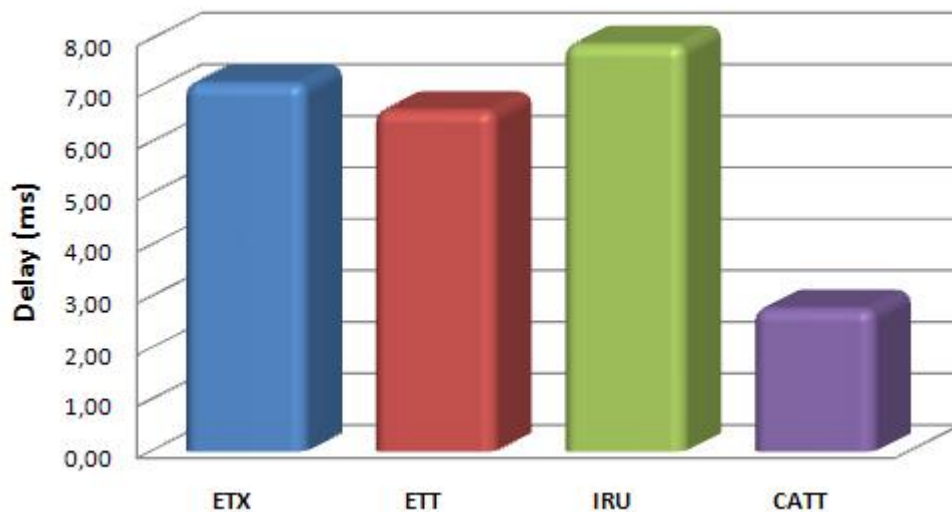
από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4, περιλαμβάνοντας δύο εναλλακτικές διαδρομές ( κόμβοι: 1-2-4 και 1-3-4 ).



**Εικόνα 14:** Σενάριο 2 - Μέσο UDP Throughput

Η γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην Εικόνα 14 μας δείχνει ότι το μέσο throughput που επιτυγχάνει η νέα ροή χρησιμοποιώντας τη μετρική δρομολόγησης CATT είναι 81% καλύτερο από το IRU, 67% καλύτερο από το ETT και 73% καλύτερο από το ETX. Η μετρική CATT επιλέγει πάντα το μονοπάτι με το υψηλότερο throughput, το οποίο είναι: ( κόμβοι 1-3-4 ). Ο κύριος λόγος επιλογής αυτού του μονοπατιού είναι το γεγονός ότι ο κόμβος 5, ο οποίος προκαλεί παρεμβολές στον κόμβο 2, έχει πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης ( 6 Mbps ), με αποτέλεσμα το μονοπάτι: ( κόμβοι 1-2-4 ) να έχει πολύ μικρό throughput σε σχέση με το εναλλακτικό μονοπάτι: ( κόμβοι 1-3-4 ). Σε αντίθεση, η μετρική IRU επιλέγει το μονοπάτι: ( κόμβοι 1-2-4 ), επειδή ο κόμβος 3 έχει πιο πολλούς γειτονικούς κόμβους που προκαλούν παρεμβολή από ό,τι ο κόμβος 2. Οι μετρικές ETX και ETT παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση από το IRU, επειδή επιλέγουν περισσότερες φορές το μονοπάτι: ( κόμβοι 1-3-4 ), καθώς επίσης και για το γεγονός ότι δεν λαμβάνουν υπόψη τους το αριθμό των παρεμβαλλόμενων κόμβων, όπως η μετρική IRU. Εντούτοις όμως, και το ETX και το ETT, επειδή

ταλαντεύονται μεταξύ των διαφορετικών μονοπατιών λόγω της διακύμανσης της πιθανότητας απώλειας των πακέτων, όπως αναφέραμε και στο σενάριο 1, επιτυγχάνουν μικρότερο throughput συγκρινόμενα με την προτεινόμενη μετρική CATT.



**Εικόνα 15:** Σενάριο 2 - End-to-end packet delay

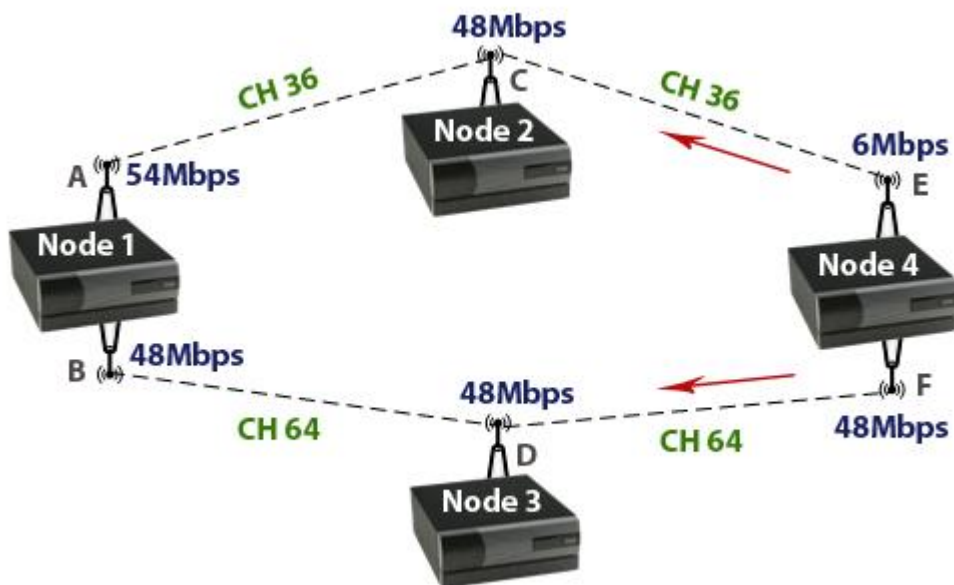
Η γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην Εικόνα 15 δείχνει ότι η μετρική CATT επιτυγχάνει επίσης σημαντικά μικρότερη μέση καθυστέρηση των πακέτων για τη νέα ροή δεδομένων έναντι όλων των άλλων μετρικών δρομολόγησης. Πιο αναλυτικά, επιφέρει 65% μικρότερη καθυστέρηση από το IRU, 58% μικρότερη από το ETT και 61% μικρότερη από το ETX. Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

	Μέσο Throughput (Mbit/s)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	Μέση Καθυστέρηση (ms)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης
ETX	3,90	± 0,522	7,17	± 0,671
ETT	4,03	± 0,313	6,64	± 0,581
IRU	3,72	± 0,261	7,92	± 0,675
CATT	6,74	± 0,137	2,79	± 0,619

**Πίνακας 2:** Σενάριο 2 - Single Radio B. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης

### 6.3.3. Σενάριο 3: Mixed single- and multi-radio

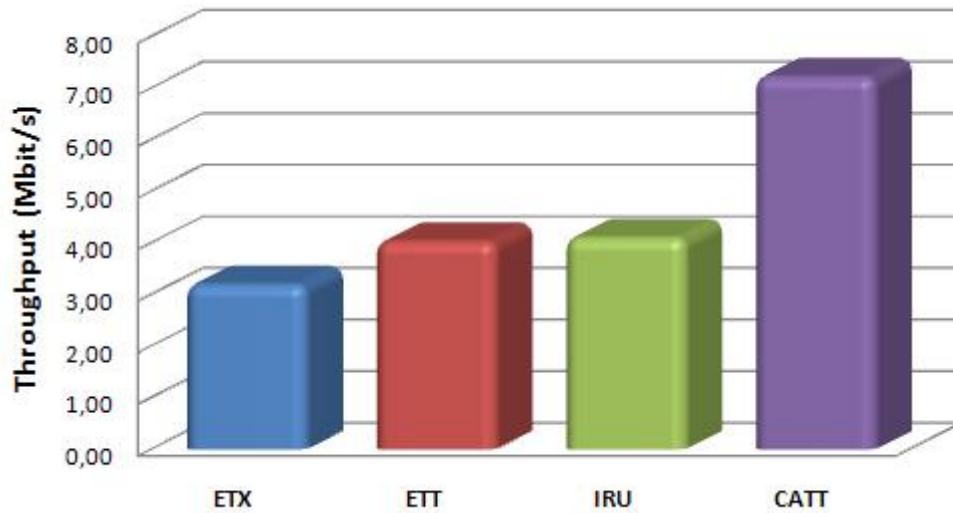
Η γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην Εικόνα 16 αναπαριστά την τοπολογία δικτύου, που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σενάριο. Το ασύρματο δίκτυο αποτελείται από 4 κόμβους, δύο από αυτούς είναι εξοπλισμένοι με μία ασύρματη διεπαφή ( κόμβοι: 2, 3 ), ενώ οι άλλοι δύο κόμβοι έχουν ενεργοποιημένες δύο ασύρματες διεπαφές ( κόμβοι: 1, 4 ). Κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους «ένα-βήμα» γείτονες του. Ο ρυθμός μετάδοσης, που έχει η κάθε ασύρματη διεπαφή, καθώς και το κανάλι στο οποίο εκπέμπει, φαίνονται στην Εικόνα 16. Και σε αυτό το σενάριο, ο μηχανισμός RTS/CTS ήταν απενεργοποιημένος.



Εικόνα 16: Σενάριο 3 - Mixed-Single and Multi-Radio Scenario

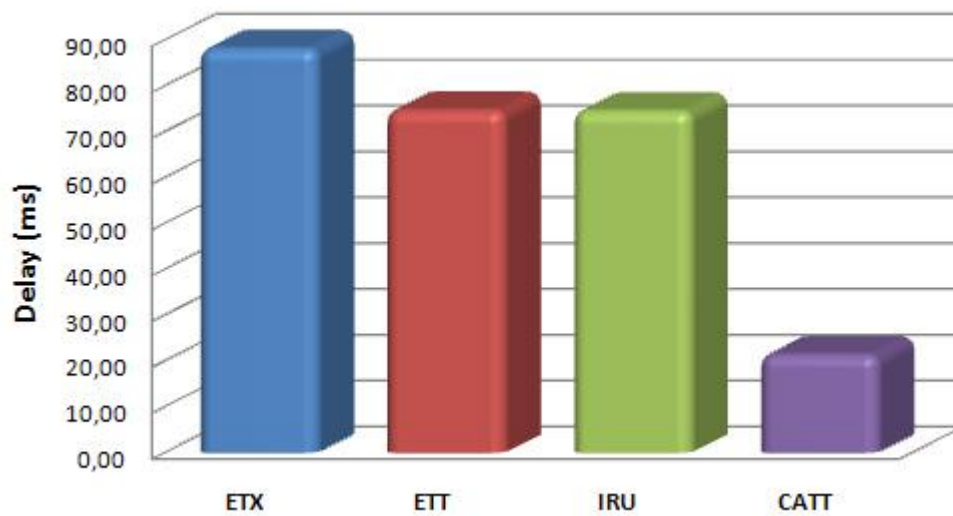
Όλες οι διεπαφές χρησιμοποιούν UDP για να διαβιβάσουν την κίνηση των δεδομένων. Στην τοπολογία του παραπάνω δικτύου υπάρχουν δύο ροές δεδομένων. Η 1<sup>η</sup> είναι από τον κόμβο 4 στον κόμβο 2 με ρυθμό μετάδοσης 6 Mbps, ενώ η 2<sup>η</sup> από τον κόμβο 4 στον κόμβο 3 με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης ( 48 Mbps ). Για να αξιολογήσουμε την απόδοση του δικτύου, δημιουργήσαμε μια νέα ροή δεδομένων από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4. Η νέα ροή δεδομένων μπορεί να προωθηθεί

στον κόμβο 4 μέσω δυο εναλλακτικών διαδρομών, χρησιμοποιώντας διαφορετικές διεπαφές κάθε φορά (κόμβοι: 1-2-4 και 1-3-4).



**Εικόνα 17:** Σενάριο 3 - Μέσο UDP Throughput

Η γραφική παράσταση που αναπαριστά η Εικόνα 17 μας δείχνει ότι με τη μετρική CATT, η νέα ροή δεδομένων επιτυγχάνει 76% καλύτερο μέσο throughput από το IRU, 79% καλύτερο από το ETT και 126% καλύτερο από το ETX.



**Εικόνα 18:** Σενάριο 3 - End-to-end packet delay

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και για τη μέση καθυστέρηση των πακέτων, όπως δείχνει η Εικόνα 18. Πιο συγκεκριμένα, με τη μετρική CATT επιτυγχάνεται 76% μικρότερη καθυστέρηση από το ETX και 71% μικρότερη από τις μετρικές ETT και ETX.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα για αυτή την πειραματική τοπολογία, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, η μετρική CATT επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερη απόδοση από όλες τις άλλες μετρικές δρομολόγησης, επειδή «αντιλαμβάνεται» την επίδραση στην απόδοση του δικτύου, που έχει ο πολύ χαμηλός ρυθμός μετάδοσης ( 6 Mbps ) της διεπαφής *E* του κόμβου 4, ο οποίος την οδηγεί στην επιλογή του μονοπατιού ( κόμβοι: 1-3-4 ) για τη νέα ροή δεδομένων. Οι άλλες μετρικές δρομολόγησης δεν «αντιλαμβάνονται» αυτή τη συμφόρηση του δικτύου, με αποτέλεσμα να επιλέγουν περισσότερες φορές το μονοπάτι ( κόμβοι: 1-2-4 ), το οποίο έχει τη χειρότερη απόδοση.

	Μέσο Throughput ( Mbit/s )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	Μέση Καθυστέρηση (ms)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης
ETX	3,21	± 0,309	88,33	± 4,456
ETT	4,05	± 0,238	74,88	± 3,480
IRU	4,11	± 0,204	74,72	± 3,669
CATT	7,24	± 0,178	21,52	± 2,342

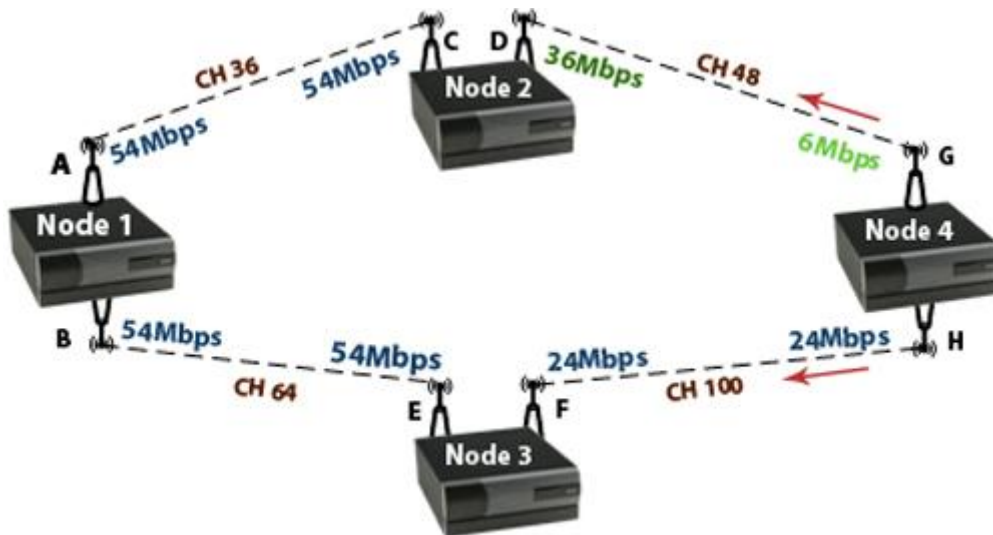
**Πίνακας 3:** Σενάριο 3 - Mixed Single and Multi-Radio. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης

#### 6.3.4. Σενάριο 4: Asymmetric Link

Η Εικόνα 19 αναπαριστά την τοπολογία δικτύου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σενάριο και κάθε ζεύξη του δικτύου χαρακτηρίζεται από την συχνότητα λειτουργίας της, καθώς επίσης και από το ρυθμό μετάδοσης, που έχει η κάθε διεπαφή. Αυτή η πειραματική τοπολογία αποτελείται από τέσσερις κόμβους, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με δυο ασύρματες διεπαφές ο καθένας. Όλες οι ζεύξεις ( links ) λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, γεγονός που προσδίδει καλύτερη απόδοση στο δίκτυο. Επιπρόσθετα όλες οι ζεύξεις είναι

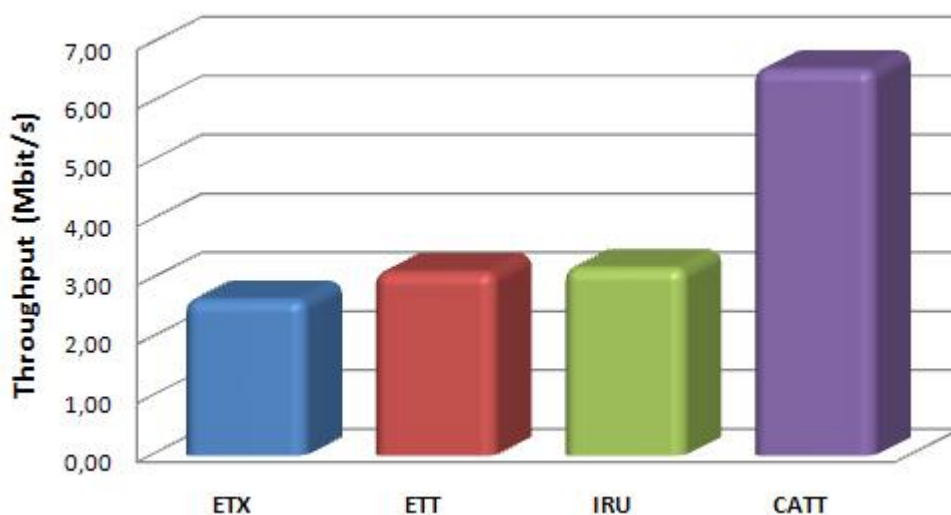


συμμετρικές, εκτός από τη ζεύξη D-G, που είναι ασύμμετρη ( 36 Mbps – 6 Mbps ). Υπάρχουν δύο ροές δεδομένων από τον κόμβο 4 στους κόμβους 2 και 3 με ρυθμούς μετάδοσης 6 Mbps και 24Mbps αντίστοιχα.



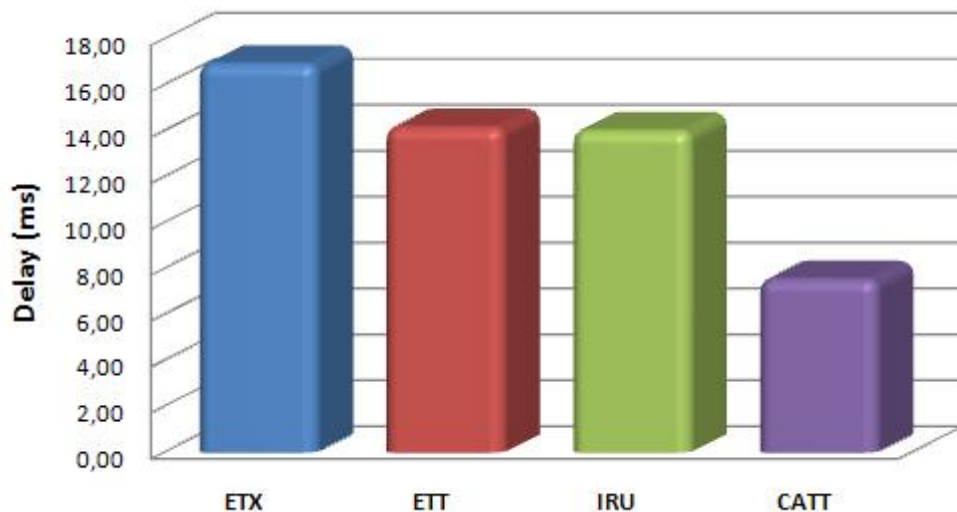
Εικόνα 19: Σενάριο 4 - Asymmetric Link Scenario

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω προέρχονται από μια νέα ροή από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4, για την οποία υπάρχουν δυο εναλλακτικά μονοπάτια ( κόμβοι: 1-2-4 και 1-3-4 ).



Εικόνα 20: Σενάριο 4 - Μέσο UDP Throughput

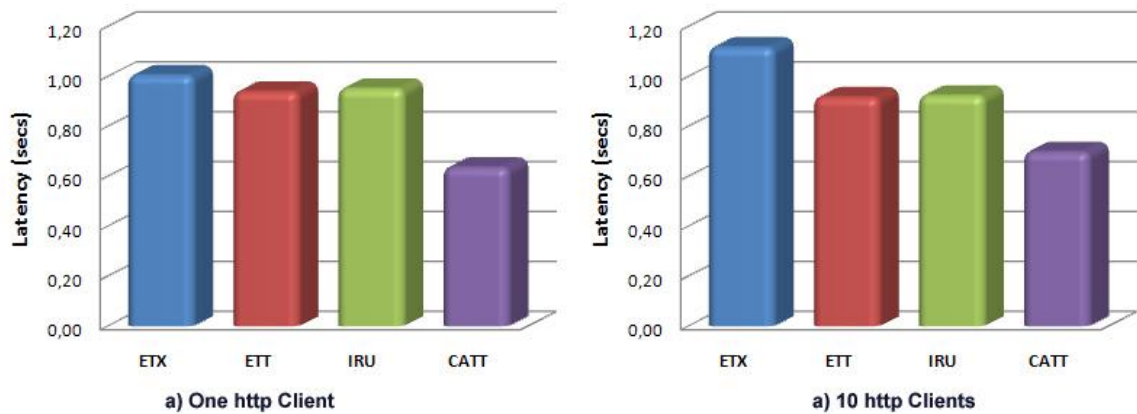
Η γραφική παράσταση που φαίνεται στην Εικόνα 20 μας δείχνει ότι το μέσο throughput που επιτυγχάνει η νέα ροή δεδομένων χρησιμοποιώντας τη μετρική CATT είναι 106% μεγαλύτερο από το IRU, 110% μεγαλύτερο από το ETT και 147% μεγαλύτερο από τη διαδρομή που επιλέγει η μετρική ETX. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι μετρικές IRU, ETT και ETX κυρίως επιλέγουν το μονοπάτι ( κόμβοι: 1-2-4 ), επειδή ο ρυθμός μετάδοσης ( 36 Mbps ) της διεπαφής D του κόμβου 2 είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό μετάδοσης ( 24Mbps ) της διεπαφής F του κόμβου 3.



**Εικόνα 21:** Σενάριο 4 - End-to-end packet delay

Σε αντίθεση όμως, η μετρική CATT «αντιλαμβάνεται» τη παρεμβολή που προκαλεί ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης ( 6 Mbps ) της διεπαφής G του κόμβου 4 και για αυτό το λόγο επιλέγει το μονοπάτι ( κόμβοι: 1-3-4 ) που επιφέρει καλύτερο throughput στο δίκτυο.

Κάτι ανάλογο με τα αποτελέσματα του throughput ( Εικόνα 20 ) μας αναπαριστά η γραφική παράσταση της Εικόνα 21, η οποία μας δείχνει ότι η νέα ροή δεδομένων, χρησιμοποιώντας τη μετρική CATT, επιτυγχάνει 46% μικρότερη μέση καθυστέρηση από το IRU, 47% μικρότερη από το ETT και 55% μικρότερη καθυστέρηση από την μετρική ETX.



Εικόνα 22: Σενάριο 4 - Http Latency για ένα και 10 Clients

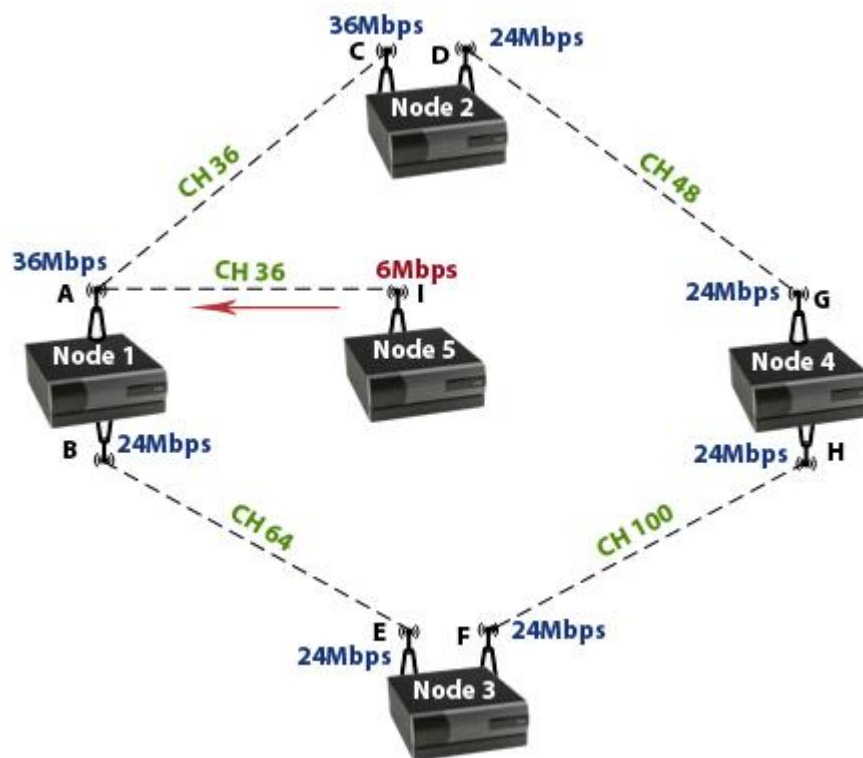
Στη συνέχεια εξετάζουμε τη καθυστέρηση των TCP συνδέσεων χρησιμοποιώντας http κίνηση δεδομένων, με αρχεία πεπερασμένου μεγέθους ( 500 Kbyte) από ένα http server σε ένα client, ο οποίος «ζητά» τα αρχεία μέσω του εργαλείου wget. Σε αυτό το πείραμα, οι ήδη υπάρχουσες ροές δεδομένων περιλαμβάνουν UDP κίνηση με ρυθμό μετάδοσης το μισό από το ρυθμό μετάδοσης που έχει η ασύρματη διεπαφή του κόμβου. Η γραφική παράσταση της Εικόνα 22 μας δείχνει ότι με τη μετρική CATT επιτυγχάνουμε μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με τις μετρικές ETX, ETT και IRU, η οποία είναι κατά 37%, 32% και 31% μικρότερη στην περίπτωση του ενός client και 35%, 21% και 21% μικρότερη στην περίπτωση που ταυτόχρονα αιτούνται τα αρχεία 10 clients.

	Μέσο Throughput ( Mbit/s )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	Μέση Καθυστέρηση (ms)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης
ETX	2,66	± 0,306	16,96	± 0,857
ETT	3,13	± 0,244	14,19	± 0,589
IRU	3,20	± 0,204	14,05	± 0,508
CATT	6,58	± 0,119	7,57	± 0,294

Πίνακας 4: Σενάριο 4 - Asymmetric Link. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης

### 6.3.5. Σενάριο 5: Point-to-Multipoint

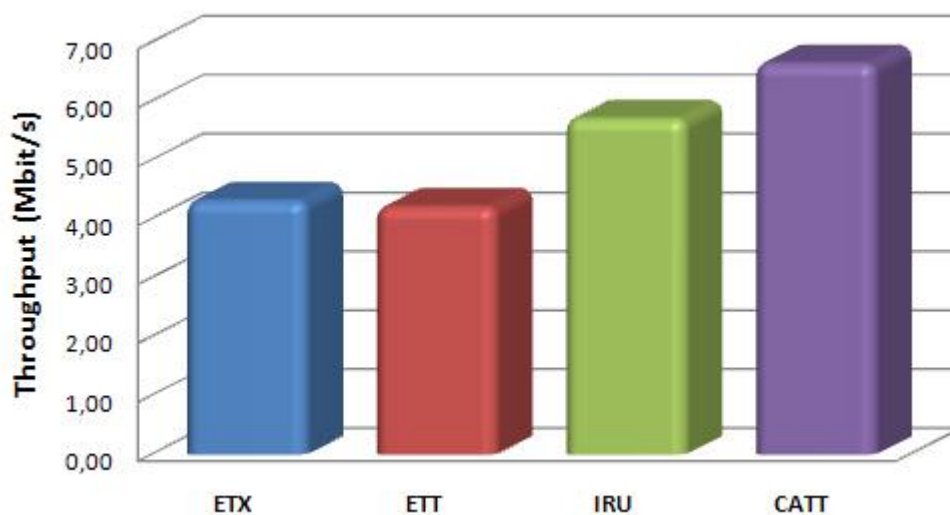
Η τοπολογία δικτύου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σενάριο απεικονίζεται στην Εικόνα 23. Όλοι οι κόμβοι έχουν ενεργοποιημένες δυο ασύρματες διεπαφές, εκτός από τον κόμβο 5 που έχει μόνο μία. Και σε αυτό το σενάριο, κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους «ένα-βήμα» γείτονές του, καθώς επίσης ο μηχανισμός RTS/CTS είναι απενεργοποιημένος. Η ιδιαιτερότητα αυτού του σεναρίου είναι το γεγονός ότι η ίδια διεπαφή ( η διεπαφή A του κόμβου 1 ) εκπέμπει στην ίδια συχνότητα με τους κόμβους 2 και 5, όπου ο τελευταίος έχει πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης ( 6 Mbps ), με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει τη συνολική απόδοση του μονοπατιού ( κόμβοι: 1-2-4 ).



Εικόνα 23: Σενάριο 5 - Point-to-MultiPoint Scenario

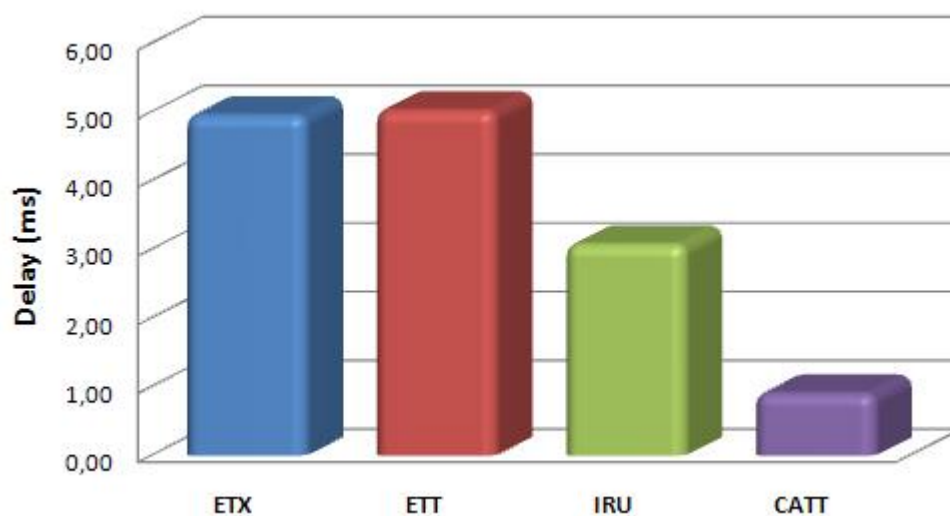
Υπάρχει μια ροή δεδομένων από τον κόμβο 5 προς τη διεπαφή A του κόμβου 1 με ρυθμό μετάδοσης 6 Mbps. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω προκύπτουν από τη δημιουργία μιας νέας ροής από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 4.

Η γραφική παράσταση που φαίνεται στην Εικόνα 24 μας δείχνει ότι με τη μετρική CATT, η νέα ροή δεδομένων επιτυγχάνει 16% υψηλότερο μέσο throughput από το IRU, 58% υψηλότερο από το ETT και 54% υψηλότερο από την μετρική ETX.



**Εικόνα 24:** Σενάριο 5 - Μέσο UDP Throughput

Ανάλογα αποτελέσματα μάς δείχνει και η Εικόνα 25, όπου η μετρική CATT επιτυγχάνει 70% μικρότερη μέση καθυστέρηση από το IRU και 82% μικρότερη από τις μετρικές ETT και ETX.



**Εικόνα 25:** Σενάριο 5 - End-to-end packet delay

Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής τοπολογίας παρουσιάζοντας επίσης το 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης για τις 4 μετρικές δρομολόγησης. Οι μετρικές ETT και ETX, κατά τον υπολογισμό τους, δε λαμβάνουν υπόψη τους την παρεμβολή που προκαλεί ο κόμβος 5, οποίος και συναγωνίζεται για την απόκτηση του ίδιου καναλιού με τη διεπαφή A του κόμβου 1 αλλά και έχει πολύ μικρό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ( 6 Mbps ), γεγονός που σημαίνει ότι όταν αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι, καθυστερεί πολύ να το αποδεσμεύσει [30]. Το 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης για τις δυο αυτές μετρικές είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το IRU και CATT, που σημαίνει ότι οι εναλλαγές ανάμεσα στα δυο μονοπάτια είναι πολλές, βασιζόμενες κυρίως στην πιθανότητα απώλειας πακέτων. Για το λόγο αυτό το ETT και το ETX επιλέγουν τις περισσότερες φορές το μονοπάτι ( κόμβοι: 1-2-4 ), το οποίο υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση του δικτύου σε σύγκριση με τις δυο άλλες μετρικές.

	Μέσο Throughput ( Mbit/s )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης		Μέση Καθυστέρηση (ms)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης
ETX	4,32	± 0,750		4,97	± 0,516
ETT	4,22	± 0,492		5,04	± 0,222
IRU	5,72	± 0,257		3,09	± 0,252
CATT	6,66	± 0,170		0,92	± 0,117

**Πίνακας 5:** Σενάριο 5 - Point-to-MultiPoint. Τιμές μέσου Throughput και μέσης Καθυστέρησης σε 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης

Από την άλλη μεριά τώρα, η μετρική IRU αν και «αντιλαμβάνεται» την παρεμβολή που προκαλεί ο κόμβος 5, εξαιτίας των εναλλαγών μεταξύ των μονοπατιών ( σε μικρότερο βαθμό όμως σε σχέση με το ETT και ETX ) που οφείλεται στην πιθανότητα απώλειας πακέτων, αποφέρει μικρότερη απόδοση στο δίκτυο σε σύγκριση με την προτεινόμενη μετρική CATT, η οποία υπερτερεί όλων των άλλων.

## 7. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Σε αυτή την μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάσαμε την υλοποίηση και αξιολόγηση μιας νέας μετρικής δρομολόγησης ( CATT ) για δίκτυα πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης ( Multi-Rate ) και πολλαπλών διεπαφών ( Multi-Radio ). Βασική ιδιότητα της νέας μετρικής είναι το γεγονός ότι λαμβάνει με ενιαίο τρόπο υπόψη της τη συμφόρηση που επικρατεί στο δίκτυο, καθώς επίσης και τους διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, που στέλνει τα πακέτα η κάθε ασύρματη διεπαφή. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα αποτελεί το γεγονός ότι είναι αυστηρά ισοτονική, πράγμα που μας επιτρέπει να την υλοποιήσουμε σε «link-state» πρωτόκολλα δρομολόγησης, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Dijkstra με προώθηση «βήμα-προς-βήμα» ( hop-by-hop ) για την εύρεση της καλύτερης διαδρομής. Η προτεινόμενη μετρική υλοποιήθηκε στο βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης OLSR και αξιολογήθηκε σε πέντε διαφορετικές πειραματικές τοπολογίες, που μπορούν να εμφανιστούν σε πραγματικά περιβάλλοντα δικτύων πλέγματος, οι οποίες περιλαμβάνουν ασύμμετρες και «point-to-multipoint» ζεύξεις με κόμβους που έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Τα αποτελέσματα και των πέντε πειραμάτων απέδειξαν ότι με την μετρική CATT επιτυγχάνουμε σημαντικά καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες μετρικές δρομολόγησης, τόσο από πλευράς throughput όσο και από την πλευρά της μέσης καθυστέρησης των πακέτων ( end-to-end packet delay ).

Μέρος της μελλοντικής μας εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση της προτεινόμενης μετρικής ( CATT ) σε πιο σύνθετες και με περισσότερους κόμβους τοπολογίες δικτύων, καθώς επίσης και την αξιολόγηση της στο μητροπολιτικό δίκτυο που έχουμε υλοποιήσει στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης [29]. Επιπρόσθετα, να μελετήσουμε την πιθανότητα επέκτασης της μετρικής ( CATT ), έτσι ώστε να περιλαμβάνει την απώλεια των πακέτων ( packet loss ) καθώς και τη συνολική «σταθμισμένη» κίνηση, που εξέρχεται από κάθε ασύρματη διεπαφή. Τέλος να ερευνήσουμε και τις περιπτώσεις της διαφοροποίησης των υπηρεσιών

στο MAC επίπεδο και την ασύρματη πρόσβαση, η οποία βασίζεται στο χρόνο κράτησης των καναλιών.



## Βιβλιογραφία

---

- [1]. D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. C. Bicket, and R. Morris, “A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing”, in *Proc. Of ACM MobiCom*, 2003.
- [2]. B. Awerbuch, D. Holmer, and H. Rubens, “The Medium Time Metric: High throughput route selection in multi-rate ad hoc wireless networks”, in *Proc. of WONS*, 2004.
- [3]. R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks”, in *Proc. of ACM MobiCom*, 2004.
- [4]. Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, “Load-balanced Routing for Mesh Networks”, *ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, 2006.
- [5]. A. P. Subramanian, M. M. Buddkhot, and S. Miller, “Interference Aware Routing in Multi-Radio Wireless Mesh Networks”, in *Proc. of IEEE WiMesh*, 2006.
- [6]. H. Zhai and Y. Fang, “Impact of Routing Metrics on Path Capacity in Multi- rate and Multi-hop Wireless Ad Hoc Networks”, in *Proc. of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2006.
- [7]. T. Salonidis, M. Garetto, A. Saha, and E. Knightly, “Identifying High Throughput Paths in 802.11 Mesh Networks: a Model-based Approach”, in *Proc. of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2007.
- [8]. D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, “SrcRR: A High Throughput Routing Protocol for 802.11 Mesh Networks”, Draft, 2006.
- [9]. J. L. Sobrinho, “Algebra and Algorithms for QoS Path Computation and Hop-by-Hop Routing in the Internet”, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 541–550, 2002.
- [10]. Y. Yang and J. Wang, “Routing Metrics Design for Multihop Wireless Networks,” in *Proc. of Communication & Networking Technology (CNT) Symposium (US - Korea)*, 2007.

- [11]. Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, “Designing Routing Metrics for Mesh Networks”, in *Proc. of IEEE WiMesh*, 2005.
- [12]. G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function”, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, March 2000.
- [13]. A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, “New Insights from a Fixed Point Analysis of Single Cell IEEE 802.11 WLANs”, in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2005.
- [14]. V. A. Siris and C. Courcoubetis, “Resource Control for the EDCA Mechanism in Multi-Rate IEEE 802.11e Networks”, in *Proc. of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2006.
- [15]. F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, “Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit”, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 8, no. 6, pp. 785–799, 2000.
- [16]. A. Kumar and V. Kumar, “Optimal Association of Stations and APs in an IEEE 802.11 WLAN”, in *Proc. of National Conference on Communications (NCC)*, 2005.
- [17]. G. Kasbekar, J. Kuri, and P. Nuggehalli, “Online Association Policies in IEEE 802.11 WLANs”, in *Proc. of International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2006.
- [18]. B. Kauffmann, F. Baccelli, A. Chaintreau, V. Mhatre, K. Papagiannaki, and C. Diot, “Measurement-based Self Organization of Interfering 802.11 Wireless Access Networks”, in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2007.
- [19]. I. Aad and C. Castelluccia, “Differentiation mechanisms for IEEE 802.11”, in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2001.
- [20]. A. Lindgren, A. Almquist, and O. Schelen, “Quality of Service Schemes for IEEE 802.11 Wireless LANs An Evaluation”, *Mobile Networks and Applications*, vol. 8, no. 3, pp. 223–235, June 2003.
- [21]. S. Zhao, Z. Wu, A. Acharya, and D. Raychaudhuri, “PARMA: a PHY/MAC aware routing metric for ad-hoc wireless networks with multi-rate radios”, in *Proc. of IEEE International Symposium on a*

*World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, (WoWMoM)*, 2005.

- [22]. A. Shaikh, J. Rexford, and K. G. Shin, “Load-Sensitive Routing of Long-Lived IP Flows”, in *Proc. of ACM SIGCOMM*, 1999.
- [23]. D. M. Shila and T. Anjali, “Load-aware Traffic Engineering for Mesh Networks”, in *Proc. of International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2007.
- [24]. K. Ramachandran, I. Sheriff, E. M. Belding, and K. Almeroth, “Routing Stability in Static Wireless Mesh Networks”, in *Proc. of Conference on Passive and Active Measurements (PAM)*, 2007.
- [25]. H. Wang and M. R. Ito, “Dynamics of Load-Sensitive Adaptive Routing”, in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2005.
- [26]. T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, and L. Viennot, “Optimized link state routing protocol (OLSR)”, RFC 3626, October 2003.
- [27]. A. 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.
- [28]. S. Jain and D. P. Agrawal, “Wireless community networks”, *Computer*, vol. 36, no. 8, pp. 90–92, August 2003.
- [29]. 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 2nd ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation and Characterization (WiNTECH), held in conjunction with ACM MobiCom*, 2007.
- [30]. M. Heusse, F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel, and A. Duda, “Performance Anomaly of 802.11b”, in *Proc of IEEE INFOCOM*, 2003.
- [31]. Y. Yang and J. Wang and R. Kravets, “Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks”, Technical Report UIUCDCS-R-2005-2526, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.

- [32]. R. Draves, J. Padhye, B. Zill, “Comparison of Routing Metrics for Static Multi-Hop Wireless Networks”, in *Proc. of ACM SIGCOMM*, 2004.
- [33]. E .Borgia, M. Conti, F. Delmastro, E. Gregori, “Experimental Comparison of Routing and Middleware Solutions for Mobile Ad Hoc Networks”, in *Proc of ACM SIGCOMM*, 2005.
- [34]. S. Pal, S. R. Kundu, K. Basu, and S. K. Das, “IEEE 802.11 Rate Control Algorithms: Experimentation and Performance Evaluation in Infrastructure Mode”, in *Proc. of Conference on Passive and Active Measurements (PAM)*, 2006.
- [35]. D. S. J. De Couto, D. Aguayo , B. A. Chambers , and R. Morris, “Performance of Multihop Wireless Networks-Shortest Path is not enough”, in *Proc. of HotNets-I, Princeton, New Jersey*, 2002.
- [36]. Madwifi Project, “<http://madwifi.org/>”.
- [37]. Optimized Link State Routing (OLSR), “<http://olsr.org/>”.

## Παράρτημα

---

### OLSR DEAMON CONFIGURATION

Αρχείο: «*/etc/olsrd.conf*»

---

```
DebugLevel      2
IpVersion       4
ClearScreen     yes
AllowNoInt      yes
UseHysteresis   no
LinkQualityLevel 2
LinkQualityWinSize 10
Pollrate        1.0
TcRedundancy    0
MprCoverage     1

IpcConnect
{
    MaxConnections 10
    Host           127.0.0.1
    Net            10.10.10.0 255.255.255.0
}

Interface "ath0" "ath1" "ath2" "ath3"
{
    HelloInterval      2.0
    HelloValidityTime  60.0
    TcInterval         5.0
    TcValidityTime     50.0
    MidInterval        2.0
    MidValidityTime    40.0
    HnaInterval        5.0
    HnaValidityTime    50.0
}

LoadPlugin "olsrd_httpinfo.so.0.1"
{
    PIParam "port" "8889"
    PIParam "host" "139.91.68.43"
    PIParam "host" "139.91.68.58"
}
```