

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων



Διπλωματική Εργασία

Θέμα:

«Υλοποίηση Αλγορίθμων πολλαπλής πρόσβασης σε  
ασύρματα δίκτυα με τη χρήση πλατφόρμας ανοικτού  
λογισμικού»

Επιμελητής:

Γιαλλελής Νικόλαος του Ιωάννη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Τασιούλας Λέανδρος  
(Καθηγητής Π.Θ.)

Συνεπιβλέπων Καθηγητής:

Κοράκης Αθανάσιος

Βόλος,  
Οκτώβριος 2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7701/1  
Ημερ. Εισ.: 16-12-2009  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΗΥΤΔ  
2009  
ΓΙΑ

## Ευχαριστίες

Ύστερα από μια πορεία πέντε και πλέον ετών στο Τμήμα Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ολοκληρώνω τις προπτυχιακές μου σπουδές με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα της εργασίας μου, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, κ. Λέανδρο Τασιούλα για την καθοδήγηση του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Θανάση Κοράκη, του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, συνεπιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, για τις χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις του καθώς και για την υποστήριξη που μου προσέφερε κατά την διάρκεια της φοίτησης μου αλλά και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Από καρδιάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Συρίβηλη, Διδάκτορα του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, για την πολύτιμη συνδρομή του στο προγραμματιστικό σκέλος της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου.

Στην οικογένειά μου

# Περιεχόμενα

1.Γενικά .....	4
1.1. Ασύρματα δίκτυα .....	4
1.2. Ιδιαιτερότητες της Επικοινωνίας στα Ασύρματα Δίκτυα .....	5
1.3. Multicast επικοινωνία (πολυεκπομπή) .....	7
1.4. Στόχος Εργασίας .....	9
2. Ανάκτηση δεδομένων μέσω συνεργασίας κόμβων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα .....	9
2.1. Εισαγωγή .....	9
2.2. Αρχιτεκτονική συστήματος .....	10
2.3. Σχεδιασμός πρωτοκόλλου .....	11
2.4. Υλοποίηση και Απόδοση συστήματος .....	15
3. Υλοποίηση του πρωτοκόλλου στο εργαλείο Click .....	17
3.1. Εισαγωγή.....	17
3.2. Το εργαλείο Click.....	17
3.3. Περιγραφή υλοποιημένου πρωτοκόλλου.....	19
3.4. Σχεδιασμός πρωτοκόλλου.....	21
3.5. Υλοποίηση – Αποτελέσματα.....	22
4. Βιβλιογραφία.....	24

# 1. Γενικά

## 1.1. Ασύρματα δίκτυα

Ένα ασύρματο δίκτυο ορίζεται ως η τοπολογία και η τεχνολογία που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερους υπολογιστές, εξοπλισμένους με μια κάρτα ασύρματης πρόσβασης (Wireless Networking Interface Card, WNIC), να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χωρίς την χρήση καλωδίων. Η ανάπτυξη και η χρήση των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (Wireless Local Area Networks, WLANs) αποτελεί το επίκεντρο της σύγχρονης τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα αναπτύσσονται σε μια περιορισμένη σχετικά περιοχή όπως μια αίθουσα, ένα κτήριο ή την περιοχή ενός συγκροτήματος.

Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Στα αδόμητα (ad-hoc) ασύρματα δίκτυα και στα ασύρματα δίκτυα με υποδομή (infrastructure).

### *Αδόμητα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα*

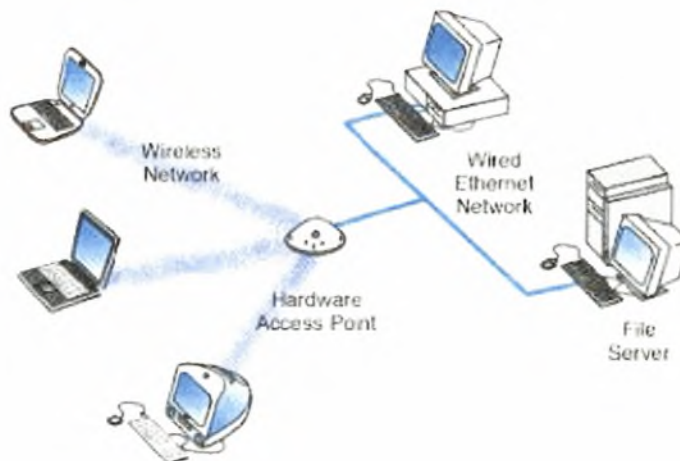
Στα αδόμητα δίκτυα κάθε υπολογιστής μπορεί να επικοινωνήσει απ' ευθείας με οποιονδήποτε άλλο υπολογιστή. Με τον τρόπο αυτό έχουν όλοι πρόσβαση σε κοινούς πόρους όπως εκτυπωτές ή αρχεία. Επιπλέον μπορούν να επικοινωνήσουν με τον έξω κόσμο, αν ένας από τους υπολογιστές του δικτύου είναι συνδεδεμένος με κάποιο ενσύρματο δίκτυο και παίζει έτσι τον ρόλο της Γέφυρας (Bridge) μεταξύ των δύο δικτύων. Ένα παράδειγμα αδόμητου ασύρματου δικτύου φαίνεται στην εικόνα 1.

### *Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα με Υποδομή*

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο διαθέτει εκτός από τους υπολογιστές-σταθμούς και ένα ειδικό σταθμό που ονομάζεται Σημείο Πρόσβασης (Access Point, AP) ή Σταθμός Βάσης (Base Station, BS). Το AP είναι υπεύθυνο για την διασύνδεση των σταθμών, καθότι όλοι μπορούν να επικοινωνούν μόνο με αυτό και διαμέσου αυτού με όλους τους υπόλοιπους σταθμούς. Επίσης το AP είναι υπεύθυνο για την διασύνδεση του ασύρματου δικτύου με το εξωτερικό ενσύρματο δίκτυο, την διαχείριση των κοινών πόρων και τον τρόπο πρόσβασης των σταθμών στο ασύρματο μέσο. Ένα παράδειγμα ασύρματου δικτύου με υποδομή φαίνεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 1: Αδόμητο Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο



Εικόνα 2: Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο με Υποδομή

## 1.2. Ιδιαιτερότητες της Επικοινωνίας στα Ασύρματα Δίκτυα

Στα ασύρματα δίκτυα οι κόμβοι χρησιμοποιούν ράδιο-σήματα για την επικοινωνία τους. Στην κλασική περίπτωση, κάθε κόμβος μπορεί να μεταδίδει ή να λαμβάνει σε μια χρονική στιγμή άλλα όχι και τα δύο συγχρόνως. Η επικοινωνία των κινητών κόμβων είναι εφικτή όταν οι κόμβοι βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης περιοχής κάλυψης. Όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα για να μεταδώσουν και να παραλάβουν μηνύματα. Έτσι, μέσα στην

περιοχή κάλυψης, χρησιμοποιείται ένα κανάλι μετάδοσης, καλύπτοντας όλο το εύρος ζώνης.

Ένα χαρακτηριστικό της μετάδοσης των πακέτων στα ασύρματα δίκτυα είναι η έννοια της τοπικότητας. Όταν κάποιος σταθμός μεταδίδει σε κάποιον άλλο δεν είναι σίγουρο ότι οι υπόλοιποι σταθμοί του δικτύου θα το αντιληφθούν. Το ποιοι σταθμοί θα αντιληφθούν την μετάδοση εξαρτάται από την θέση στην οποία βρίσκονται, σε σχέση με τον αποστολέα του μηνύματος. Αυτοί που βρίσκονται στην περιοχή εμβέλειας του αποστολέα θα ακούσουν την μετάδοση, σε αντίθεση με όλους τους υπόλοιπους, που θα είναι σε θέση μόνο να επηρεάσουν αρνητικά την μετάδοση. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν παρατηρείται στα ενσύρματα δίκτυα, όπου όλοι οι σταθμοί είναι συνδεδεμένοι στο καλώδιο και ακούνε οποιαδήποτε μετάδοση.

Συνέπεια της παραπάνω ιδιότητας, είναι η χρήση ενδιάμεσων κόμβων κατά την μετάδοση πακέτων, όταν ο παραλήπτης δεν βρίσκεται στην περιοχή εμβέλειας του αποστολέα. Το πακέτο αναμεταδίδεται διαδοχικά σε ενδιάμεσους σταθμούς (multihop WLANs).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα των ασύρματων δικτύων είναι η ύπαρξη εξωτερικής παρεμβολής (interference). Κάποια πηγή εξωτερικής παρεμβολής όπως ένας φούρνος μικροκυμάτων ή ένα άλλο ασύρματο δίκτυο που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα, μπορεί να επηρεάσει έναν κοντινό σ' αυτό κόμβο και να μην του επιτρέψει να αντιληφθεί κάποια μετάδοση του δικτύου για μικρά ή μεγάλα διαστήματα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι επίσης κάτι που δεν συναντάται στα ενσύρματα δίκτυα, καθώς το μέσο είναι μονωμένο από τον έξω κόσμο.

Τέλος, ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στην λειτουργία των ασύρματων δικτύων είναι η κινητικότητα (mobility) των χρηστών. Ένας κόμβος μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε στο χώρο εμβέλειας του δικτύου. Αυτό είναι μία αδιαμφισβήτητη θετική ιδιότητα, αλλά παράλληλα αυξάνει την πολυπλοκότητα των μηχανισμών λειτουργίας των ασύρματων δικτύων. Ο χρήστης μπορεί να κινείται στο χώρο, έχοντας συνεχή σύνδεση στο δίκτυο και χωρίς να χρειάζεται να αναζητά πρίζες ή να ενημερώνει τους διαχειριστές δικτύου. Από την άλλη όμως, τα περισσότερα πρωτόκολλα δικτύων που έχουν δημιουργηθεί και λειτουργούν σήμερα, δεν προϋποθέτουν και κινητικότητα των χρηστών. Έχουν σχεδιαστεί με την υπόθεση ότι οι διευθύνσεις που δίνονται στους κόμβους του δικτύου θα παραμένουν σε σταθερές τοποθεσίες. Μια προσπάθεια επίλυσης

αυτού του προβλήματος γίνεται με την σχεδίαση νέων πρωτοκόλλων όπως το DHCP και το Mobile-IP.

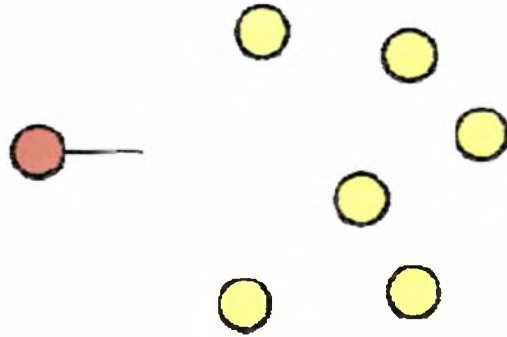
### 1.3. Multicast επικοινωνία (πολυεκπομπή)

Η πολυεκπομπή αποτελεί μία μέθοδο διευθυνσιοδότησης δικτύου για την παράδοση πληροφορίας σε μία ομάδα παραληπτών ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας την πιο αποδοτική στρατηγική για να παραδώσει τα μηνύματα πάνω από κάθε σύνδεση του δικτύου μόνο μια φορά. Ο όρος πολυεκπομπή χρησιμοποιείται συνήθως ως αναφορά στην IP πολυεκπομπή, η οποία είναι μία τεχνική για την επικοινωνία ενός με πολλούς πάνω από μία υποδομή IP. Σύμφωνα με τον ορισμό καταφέρει να κλιμακώνει σε ένα μεγαλύτερο αριθμό παραληπτών χωρίς να απαιτεί προγενέστερη γνώση του ποιοι ή πόσοι παραλήπτες υπάρχουν. Καταφέρει να χρησιμοποιεί τη δικτυακή υποδομή αποτελεσματικά με την απαίτηση η πηγή να στέλνει ένα πακέτο μόνο μια φορά, ακόμα κι αν πρέπει να παραδοθεί σε έναν μεγάλο αριθμό παραληπτών. Το πιο κοινό χαμηλού επιπέδου πρωτόκολλο που χρησιμοποιήσει την πολυεκπομπή είναι το UDP.

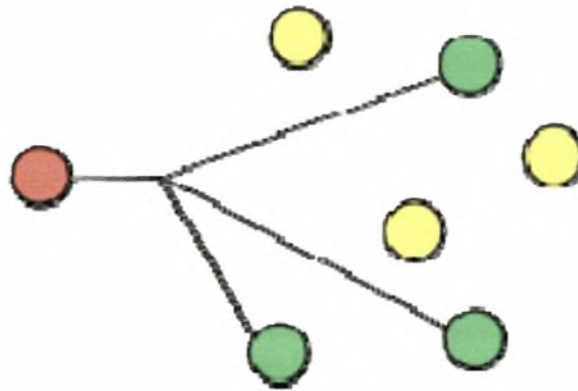
Από τη φύση του, το UDP δεν είναι αξιόπιστο – μηνύματα μπορούν να χαθούν ή να παραδοθούν εκτός σωστής σειράς παράδοσης. Βασική έννοια στην IP πολυεκπομπή αποτελεί η διεύθυνση IP ομάδας πολυεκπομπής, η οποία χρησιμοποιείται από τους αποστολείς και τους παραλήπτες για την αποστολή και παραλαβή δεδομένων. Οι αποστολείς χρησιμοποιούν τη διεύθυνση ομάδας ως την IP διεύθυνση προορισμού στα πακέτα δεδομένων τους. Οι παραλήπτες χρησιμοποιούν αυτήν την διεύθυνση ομάδας για να ενημερώσουν το δίκτυο ότι ενδιαφέρονται για τη λήψη πακέτων που στέλνονται σε εκείνη την ομάδα. Παραδείγματος χάριν, εάν κάποια πληροφορία συνδέεται με την ομάδα με διεύθυνση 239.1.1.1, ο αποστολέας θα στείλει πακέτα δεδομένων που προορίζονται στο 239.1.1.1. Οι παραλήπτες που ενδιαφέρονται για αυτή την πληροφορία θα ενημερώσουν το δίκτυο ότι ενδιαφέρονται για τη λήψη των πακέτων που στέλνονται στην ομάδα 239.1.1.1, δηλαδή θα προσχωρήσουν στην ομάδα με IP διεύθυνση 239.1.1.1. Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται από τους παραλήπτες για να προσχωρήσουν σε μια ομάδα είναι το Internet Group Management Protocol ή IGMP.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε το δίκτυο της Εικόνας 3, οι παραλήπτες που προσχώρησαν στην ομάδα του κόκκινου αποστολέα είναι οι πράσινοι κόμβοι (βλέπε Εικόνα 4) οι οποίοι και θα λάβουν μια κοινή πληροφορία που θα διαθέσει στο δίκτυο ο κόκκινος κόμβος αποστολέας. Αντίστοιχα, οι κίτρινοι κόμβοι αποτελούν απλούς κόμβους του δικτύου που δε θα λάβουν την κοινή πληροφορία.





Εικόνα 3: Γενική εικόνα ενός δικτύου



Εικόνα 4: Εικόνα Δικτύου με επισήμανση του γράφου πολυεκπομπής

#### 1.4. Στόχος εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιούμε μία μέθοδο για παροχή αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων, για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (QoS), με τη χρησιμοποίηση ενός βοηθητικού δικτύου για την ανάκτηση των χαμένων δεδομένων της κύριας μετάδοσης μέσω πολυεκπομπής. Η υλοποίηση έγινε με το λογισμικό - δρομολογητή Click. Για την υλοποίηση αυτή βασιστήκαμε στο πρωτόκολλο ανάκτησης δεδομένων μέσω συνεργασίας κόμβων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα το οποίο έχει προσομοιωθεί στο λογισμικό OPNET και είχε πολύ καλά αποτελέσματα. Το πρωτόκολλο αυτό αποτελεί ερευνητική εργασία ομάδας, μέλος της οποίας ήταν ο συνεπιβλέπων της παρούσας διπλωματικής ο κύριος Αθανάσιος Κοράκης.

## 2. Ανάκτηση δεδομένων μέσω συνεργασίας κόμβων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα

### 2.1. Εισαγωγή

Σε υπηρεσίες πολυεκπομπής/πανεκπομπής πάνω από ασύρματα δίκτυα (π.χ. 3G, WiMax, DVB) τα δεδομένα μεταδίδονται σε πολλαπλούς παραλήπτες από ένα AP ή έναν σταθμό βάσης. Η πολυεκπομπή αυξάνει πολύ την απόδοση του δικτύου όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων σε πολλούς παραλήπτες σε σύγκριση με πολλαπλές μεταδόσεις σε καθένα παραλήπτη ξεχωριστά. Παρ' όλα αυτά είναι δύσκολο να εγγυηθούμε την αξιόπιστη λήψη σε πολλαπλούς παραλήπτες διότι το ασύρματο μέσο είναι από τη φύση του επιρρεπές σε λάθη και κάθε παραλήπτης έχει διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Ακόμα μια δυσκολία είναι ότι στις υπηρεσίες πολυεκπομπής/πανεκπομπής δε παρέχεται μηχανισμός ανάκτησης δεδομένων μέσω αιτήσεων για επαναμετάδοση των χαμένων δεδομένων (λόγω UDP).

Με την αυξανόμενη δημοτικότητα και απαίτηση για ασύρματες υπηρεσίες πολυμέσων και με τις δυνατότητες των ασυρμάτων συσκευών, οι ασύρματες υπηρεσίες πολυμέσων πολυεκπομπής έχουν γίνει ένα σημαντικό κομμάτι των ασυρμάτων δικτύων. Μία πρόκληση στην παροχή τέτοιων υπηρεσιών είναι η εγγύηση της αξιόπιστης λήψης δεδομένων από τους πολλαπλούς παραλήπτες της πολυεκπομπής.

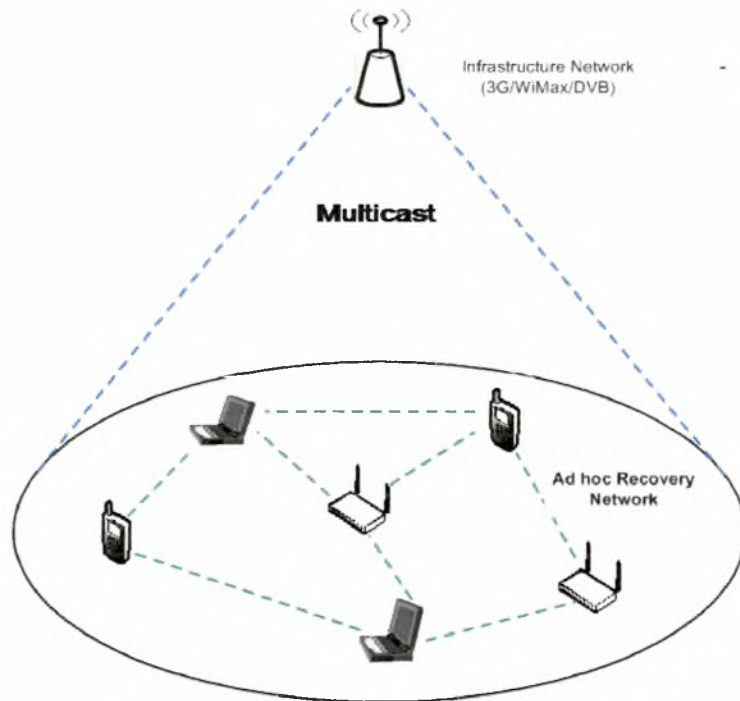
Σε αυτό το πρωτόκολλο προτείνεται το κυρίως ασύρματο δίκτυο (π.χ. 3G) να βοηθείται από ένα δευτερεύον ασύρματο δίκτυο (π.χ. Wi-Fi) μεταξύ γειτονικών κόμβων που χρησιμοποιούν την ίδια υπηρεσία πολυεκπομπής. Κάθε κόμβος είναι εφοδιασμένος με δύο ασύρματες κάρτες. Η μία κάρτα συνδέεται με το κυρίως δίκτυο πολυεκπομπής (3G) ενώ η δεύτερη κάρτα συνδέεται στο δευτερεύον δίκτυο (Wi-Fi) το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανάκτηση χαμένων πακέτων του κυρίου δικτύου. Κάθε κόμβος που ενεργοποιεί την διαδικασία ανάκτησης των χαμένων πακέτων στο βοηθητικό δίκτυό του, ζητάει και λαμβάνει τα χαμένα δεδομένα από τους γειτονικούς του κόμβους. Αυτοί οι γειτονικοί κόμβοι χρησιμοποιούν την ίδια υπηρεσία και έχουν λάβει σωστά αυτά τα πακέτα. Με αυτόν τον τρόπο οι κόμβοι ανακτούν τα χαμένα δεδομένα και έτσι βελτιώνουν την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας (QoS).

Γειτονικοί κόμβοι που συμμετέχουν στην υπηρεσία του κυρίου δικτύου αντιμετωπίζουν διαφορετικές απώλειες δεδομένων. Η πιθανότητα πολλοί κόμβοι να χάσουν τα ίδια δεδομένα είναι πολύ μικρή. Κάθε κόμβος μπορεί να ανακτήσει

χαμένα πακέτα δεδομένων με την προϋπόθεση ότι αυτά τα πακέτα τα έχει λάβει τουλάχιστον ένας γειτονικός κόμβος που συμμετέχει στο βοηθητικό δίκτυο.

## 2.2. Αρχιτεκτονική συστήματος

Ένα τυπικό δικτυακό σύστημα το οποίο προορίζεται για την υλοποίηση αυτού του πρωτοκόλλου συντελείται από δύο συνυπάρχοντα δίκτυα στην ίδια περιοχή: ένα κυρίως δίκτυο (3G) και ένα βοηθητικό. Το βοηθητικό δίκτυο είναι ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο (ad hoc Wi-Fi). Το κυρίως δίκτυο παρέχει κάποια υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων μέσω πολυεκπομπής από το σταθμό βάσης στους υπόλοιπους σταθμούς. Παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι ροή τηλεοπτική/ήχου ή άλλες υπηρεσίες πολυμέσων. Το βοηθητικό δίκτυο βελτιώνει το QoS και την αξιοπιστία μετάδοσης των υπηρεσιών πολυεκπομπής στο κύριο δίκτυο με την ανάκτηση των χαμένων πακέτων μεταξύ των κόμβων (βλ. Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική Συστήματος

Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με δύο ασύρματες κάρτες. Μια κάρτα συνδέεται με το κυρίως δίκτυο και είναι αρμόδια για τη λήψη των δεδομένων πολυεκπομπής από το κεντρικό κόμβο. Η άλλη ασύρματη κάρτα συνδέεται με το βοηθητικό δίκτυο και χρησιμοποιείται για να ανακτήσει τα χαμένα πακέτα του κύριου δικτύου. Οι κόμβοι λαμβάνουν τα δεδομένα από το κύριο δίκτυο μέσω της κύριας ασύρματης σύνδεσης. Συγχρόνως τρέχουν το συνεταιριστικό πρωτόκολλο ανάκτησης για να διαμορφώσουν δυναμικά ένα ειδικό

συνεταιριστικό δίκτυο και να συνεργαστούν για να ανακτήσουν τα χαμένα πακέτα δεδομένων της πολυεκπομπής από άλλους κόμβους μέσα από το βοηθητικό δίκτυο. Ένα πακέτο δεδομένων μπορεί να χαθεί σε έναν κόμβο, αλλά μπορεί να παραληφθεί σωστά από άλλους ασύρματους κόμβους λόγω της χωρικής ποικιλομορφίας και της ετερογένεια του καναλιού. Αυτή η μέθοδος ανάκτησης βελτιώνει την αξιοπιστία της πολυεκπομπής και το QoS για όλους τους περιληφθέντες κόμβους από μέσω της συνεργασίας μεταξύ τους για να ανακτήσουν τα χαμένα πακέτα. Βοηθά επίσης να επεκτείνουμε την κάλυψη του κύριου δικτύου.

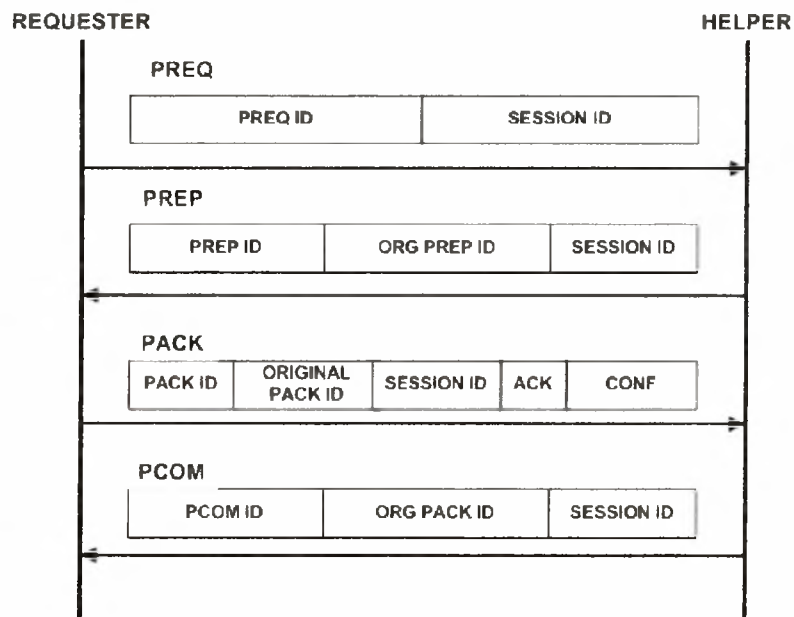
### 2.3. Σχεδιασμός πρωτοκόλλου

Όπως εξηγείται παραπάνω από τους ασύρματους κόμβους που λαμβάνουν την υπηρεσία πολυεκπομπής από το κυρίως δίκτυο σχηματίζεται δυναμικά ένα βοηθητικό ειδικό δίκτυο με το οποίο ανακτούν τα χαμένα πακέτα δεδομένων. Προκειμένου να ανακτήσει τα χαμένα πακέτα ένας κόμβος πρέπει να ανακαλύψει, να αρχικοποιήσει και να διατηρήσει τη συνεργασία με τους υπόλοιπους κόμβους μέσω του βοηθητικού δικτύου. Η λεπτομερής λειτουργία του πρωτοκόλλου μπορεί να επεξηγηθεί σε τρεις φάσεις: ανακάλυψη και αρχικοποίηση συνεργασίας, διατήρηση συνεργασίας και ανάκτηση δεδομένων.

#### *Ανακάλυψη και αρχικοποίηση συνεργασίας*

Οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να ξεκινήσει τη διαδικασία ανάκτησης δεδομένων μέσω συνεργασίας, ελπίζοντας ότι σε αυτήν την διαδικασία θα είναι σε θέση να ανακτήσει τα πακέτα που έχει χάσει. Οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να συμμετέχει εάν η ασύρματη λήψη δεδομένων πολυεκπομπής δεν είναι ικανοποιητική. Οι συσκευές με τις ετερογενείς απώλειες δεδομένων προσπαθούν να οργανώσουν ένα ειδικό δίκτυο με άλλες γειτονικές συσκευές για να ανακτήσουν τα χαμένα δεδομένα. Αυτή η φάση είναι αρμόδια για την ανακάλυψη και την αρχικοποίηση της συνεργασίας. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6, ένας αιτών (REQUESTER) (η ασύρματη συσκευή που προσπαθεί να αρχικοποιήσει το βοηθητικό δίκτυο) στέλνει ένα μήνυμα αιτήματος συνεργασίας (PREQ) με την ασύρματη μετάδοση στο βοηθητικό δίκτυο όταν αποφασίσει ότι πρέπει να ανακαλύψει και να αρχικοποιήσει τη συνεργασία με άλλους κόμβους. Το μήνυμα PREQ περιέχει τη διεύθυνση προέλευσης, διεύθυνση προορισμού, το αναγνωριστικό του μηνύματος PREQ, το αναγνωριστικό της ροής επικοινωνίας πολυεκπομπής και τον χρόνο ζωής (TTL). Η διεύθυνση προέλευσης είναι η διεύθυνση IP του δημιουργού του PREQ για το βοηθητικό δίκτυο. Η διεύθυνση προορισμού είναι η διεύθυνση IP του κόμβου προορισμού αυτού του μηνύματος στο βοηθητικό δίκτυο. Το πεδίο χρόνου ζωής (TTL) δείχνει τον αριθμό των hop που τα μηνύματα PREQ θα διαδώσουν μέσα στο βοηθητικό δίκτυο. Το

αναγνωριστικό της ροής επικοινωνίας πολυεκπομπής προσδιορίζει τη ροή επικοινωνίας στο κύριο δίκτυο για το οποίο ο αιτών (δημιουργός PREQ) θέλει να ανακτήσει τα χαμένα πακέτα του μέσω της συνεργασίας των κόμβων μέσα από το βοηθητικό δίκτυο. Είναι το αναγνωριστικό που φέρεται στα πακέτα δεδομένων που προσδιορίζει την ροή επικοινωνίας που ανήκουν στο κύριο δίκτυο. Όταν μια ασύρματη συσκευή λαμβάνει ένα μήνυμα PREQ από τη βοηθητική ασύρματη κάρτα δικτύου της, αποφασίζει εάν θα γίνει υποψήφιος συνεργάτης της αιτούσας ασύρματης συσκευής (δημιουργός PREQ) για τη ζητούμενη ροή επικοινωνίας.



Εικόνα 6: Αρχικοποίηση Συνεργασίας

Έπειτα μπορεί να ληφθεί μια απόφαση από τον υποψήφιο κόμβο για συνεργασία (δέκτης PREQ) βασισμένη στο εάν έχει αρκετή δύναμη επεξεργασίας, ισχύ μπαταριών και bandwidth στο βοηθητικό δίκτυο. Η ασύρματη συσκευή συνεργάτης που λαμβάνει το PREQ ενημερώνει το πεδίο TTL στο μήνυμα PREQ με τη μείωση της αξίας της κατά ένα. Εάν η ενημερωμένη αξία του πεδίου TTL είναι μεγαλύτερη από μηδέν, ο δέκτης αναμεταδίδει το μήνυμα PREQ στους γείτονές του στο βοηθητικό δίκτυο. Εάν η ενημερωμένη αξία του πεδίου TTL γίνεται μηδέν, το μήνυμα PREQ απορρίπτεται. Με βάση τα ανωτέρω κριτήρια εάν ένας κόμβος θέλει να εξυπηρετήσει την αιτούσα ασύρματη συσκευή για την αποκατάσταση των χαμένων πακέτων στέλνει μια απάντηση συνεργασίας unicast (PREP) στον αιτούντα. Το PREP μήνυμα περιέχει το αρχικό αναγνωριστικό του μηνύματος PREP, το αναγνωριστικό της ροής της επικοινωνίας και το αναγνωριστικό του PREQ μηνύματος. Εάν η ασύρματη συσκευή έχει δημιουργήσει ήδη μια συνεργασία με τον αιτούντα για την ροή επικοινωνίας που προσδιορίζεται στο μήνυμα PREQ, αγνοεί αυτό το μήνυμα PREQ. Αφού λάβει ο αιτών ένα PREP μήνυμα από έναν πιθανό υποψήφιο



συνεργάτη, θα αποφασίσει εάν θα ξεκινήσει μια συνεργασία με αυτήν την συσκευή. Ο αιτών στέλνει έπειτα ένα μήνυμα ειδοποίησης συνεργασίας unicast (PACK) σε κάθε συσκευή από στην οποία έλαβε ένα PREP μήνυμα που επιβεβαιώνει ή όχι τη συνεργασία. Το μήνυμα PACK περιέχει το αρχικό PREP αναγνωριστικό, το αναγνωριστικό PACK, το αναγνωριστικό της ροής της επικοινωνίας, ένα πεδίο ειδοποίησης και ένα πεδίο επιβεβαίωσης. Το πεδίο ειδοποίησης καθορίζει εάν ο υποψήφιος συνεργασίας έχει επιλεχτεί ως συνεργάτης από τον αιτούντα. Το πεδίο επιβεβαίωσης δείχνει εάν ο συνεργάτης πρέπει να στείλει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης συνεργασίας (PCOM). Αφού λάβει ο κόμβος συνεργάτης το μήνυμα PACK, στέλνει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης συνεργασίας unicast (PCOM) στον αιτούντα (δημιουργός του PACK) εάν το πεδίο επιβεβαίωσης στο μήνυμα PACK είναι ορισμένο. Το μήνυμα PCOM χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το χαμηλότερο πρωτόκολλο μεταφοράς δεν έχει έναν αξιόπιστο μηχανισμό μετάδοσης (π.χ., UDP). Όταν το χαμηλότερο στρώμα δεν παρέχει την αξιοπιστία μεταφοράς, ο αιτών (δημιουργός PACK) μπορεί να ορίσει το πεδίο επιβεβαίωσης στο μήνυμα PACK που στέλνει. Εάν το χαμηλότερο στρώμα παρέχει έναν αξιόπιστο μηχανισμό μεταφορών (π.χ., TCP), μπορεί να εξαρτηθεί από το εκείνο για να παραδώσει το μήνυμα PACK επιτυχώς. Μετά την επιτυχή ανταλλαγή αυτών των μηνυμάτων, η συνεργασία μεταξύ του αιτούντος και του κόμβου συνεργάτη επιτυγχάνεται.

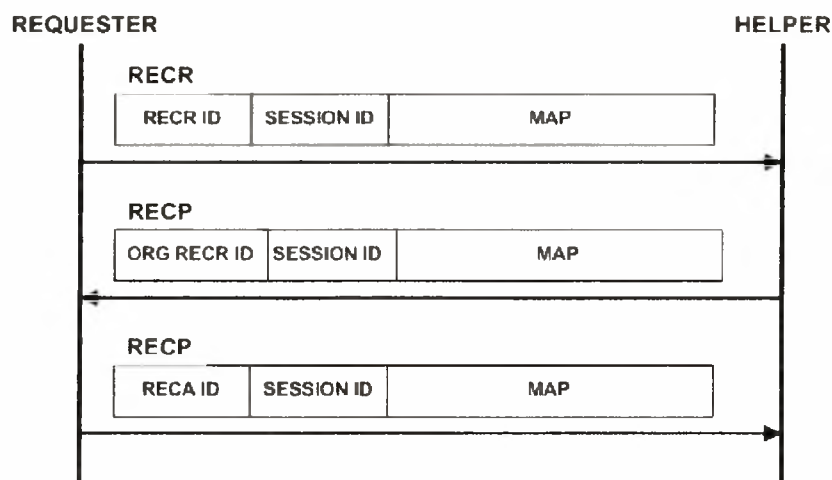
### *Διατήρηση Συνεργασίας*

Αφού καθιερωθεί μια συνεργασία μεταξύ δύο συσκευών, διατηρείται με την ανταλλαγή Keep-Alive μηνυμάτων μεταξύ τους. Ένα Keep-Alive unicast μήνυμα (KA) στέλνεται περιοδικά με περίοδο K\_INTERVAL από τον αιτούντα στο βοηθητικό κόμβο για να διατηρήσει τη συνεργασία. Το Keep-Alive μήνυμα περιέχει τις διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού του μηνύματος KA, το Keep-Alive αναγνωριστικό μηνύματος, το χαρακτηριστικό της ροής της επικοινωνίας και τον χρόνο ζωής του μηνύματος (TTL). Ο κόμβος απαντάει με ένα μήνυμα unicast, Keep-Alive-Reply (KAR) στον αιτούντα (δημιουργός KA) μετά από την παραλαβή του μηνύματος KA. Εάν ένα μήνυμα KAR δεν παραληφθεί μέσα σε ένα KAR\_TIMEOUT αφότου στέλνεται το μήνυμα KA, ο αιτών (δημιουργός PREQ) αναμεταδίδει ένα μήνυμα KA με ένα νέο αναγνωριστικό μηνύματος KA. Ο αιτών μπορεί να αναμεταδώσει ένα Keep-Alive μήνυμα για έναν μέγιστο αριθμό KEEP\_ALIVE\_RETRIES\_LIMIT φορές, εάν το μήνυμα KAR δεν παραλαμβάνεται από το κόμβο. Εάν το μήνυμα KAR εξακολουθεί να μην παραλαμβάνεται από το κόμβο αφού έχει επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός αναμεταδόσεων, ο αιτών (δηλ. ο δημιουργός PREQ) υποθέτει ότι τη συνεργασία με αυτόν τον κόμβο τελειώνει. Ο αιτών μπορεί να βρει έναν συνεργάτη ανάκτησης χρησιμοποιώντας την ανωτέρω όμοια διαδικασία αρχικοποίησης και ανακάλυψης συνεργασίας. Εάν ένας κόμβος συνεργασίας με αρχικοποιημένη συνεργασία με έναν αιτούντα (δημιουργός PREQ) δεν λάβει το

ΚΑ μήνυμα από τον αιτών για ένα χρονικό διάστημα KEEP\_ALIVE\_LIMIT, υποθέτει ότι η συνεργασία με αυτόν έχει τελειώσει.

### Ανάκτηση Δεδομένων

Αφού καθιερωθεί η συνεργασία, για να ανακτηθούν τα χαμένα πακέτα της επικοινωνίας από τους κόμβους μέσα από το βοηθητικό δίκτυο, και οι δύο κόμβοι αποθηκεύουν τα πακέτα δεδομένων της συγκεκριμένης ροής επικοινωνίας που παραλαμβάνονται από το κύριο δίκτυο. Μια ασύρματη συσκευή μπορεί να ανιχνεύσει την απώλεια πακέτων για μια ροή επικοινωνίας που παραλαμβάνεται από το κύριο δίκτυο χρησιμοποιώντας τον αριθμό ακολουθίας των πακέτων στην επικεφαλίδα πακέτων. Εάν μια ασύρματη συσκευή δεν λαμβάνει ορισμένα πακέτα δεδομένων από το κύριο δίκτυο, θα προσπαθήσει να ανακτήσει αυτά τα χαμένα πακέτα από τους συνεργάτες της μέσω του βοηθητικού δικτύου.



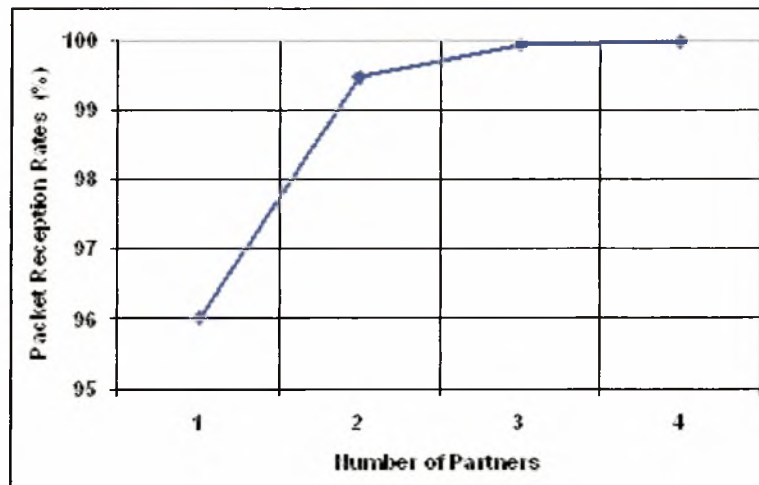
Εικόνα 7: Ανάκτηση δεδομένων

Η μέθοδος ανάκτησης απεικονίζεται στην εικόνα 7. Η ασύρματη συσκευή στέλνει ένα μήνυμα αιτήματος αποκατάστασης (RECR) σε έναν ή σε πολλούς συνεργάτες της. Το μήνυμα RECR περιέχει τη διεύθυνση προέλευσης, διεύθυνση προορισμού, το αναγνωριστικό της ροής της επικοινωνίας, το αναγνωριστικό των μηνυμάτων RECR, τον ζητούμενο χάρτη πακέτων ή κατάλογο. Ο ζητούμενος χάρτης ή ο κατάλογος πακέτων προσδιορίζει τα πακέτα που ο δημιουργός RECR ζητά από τον/τους συνεργάτη/ες του. Μετά από τη λήψη του μηνύματος RECR, ο συνεργάτης καθορίζει ποια πακέτα μπορεί να προσφέρει. Ο συνεργάτης στέλνει ένα μήνυμα απάντησης (RECP) στον αιτών (δημιουργός RECR). Το μήνυμα RECP περιέχει τις διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού, το αναγνωριστικό της ροής της επικοινωνίας, το αρχικό αναγνωριστικό μηνύματος RECR, και τον χάρτη ή τον κατάλογο των διαθέσιμων πακέτων. Ο χάρτης ή ο

κατάλογος πακέτων προσδιορίζει τα πακέτα που αυτός ο συνεργάτης μπορεί να προσφέρει. Ο δημιουργός RECR καθορίζει ποια πακέτα που έχασε μπορούν να ανακτηθούν από συγκεκριμένο συνεργάτη σύμφωνα με τον χάρτη πακέτων ή τον κατάλογο στο μήνυμα RECP. Εάν περισσότεροι από ένας συνεργάτες μπορούν να προσφέρουν το ίδιο πακέτο, ο δημιουργός RECR μπορεί να επιλέξει έναν συνεργάτη για να λάβει αυτό το πακέτο βασισμένο στα κριτήρια όπως το ποιότητα του καναλιού και τον ρυθμό απώλειας PDU. Ο δημιουργός RECR στέλνει έπειτα ένα μήνυμα αναγνώρισης αποκατάστασης (RECA) στο συνεργάτη. Το μήνυμα RECA περιέχει τη διεύθυνση προέλευσης, τη διεύθυνση προορισμού, το αναγνωριστικό της ροής της επικοινωνίας, το αναγνωριστικό των μηνυμάτων RECA, τον χάρτη των πακέτων ή αλλιώς κατάλογο. Ο χάρτης πακέτων προσδιορίζει τα πακέτα που ο αιτών αποφασίζει να ζητήσει από αυτόν τον συνεργάτη. Ο συνεργάτης στέλνει τα αντίστοιχα πακέτα στον αιτούντα σύμφωνα με το χάρτη πακέτων στο RECA αφού λάβει το RECA. Εάν οι συνεργάτες δεν μπορούν να προσφέρουν όλα τα ζητούμενα πακέτα, ο αιτών μπορεί να στείλει ένα RECR σε άλλους συνεργάτες με έναν ενημερωμένο χάρτη πακέτων.

#### 2.4. Υλοποίηση και Απόδοση συστήματος

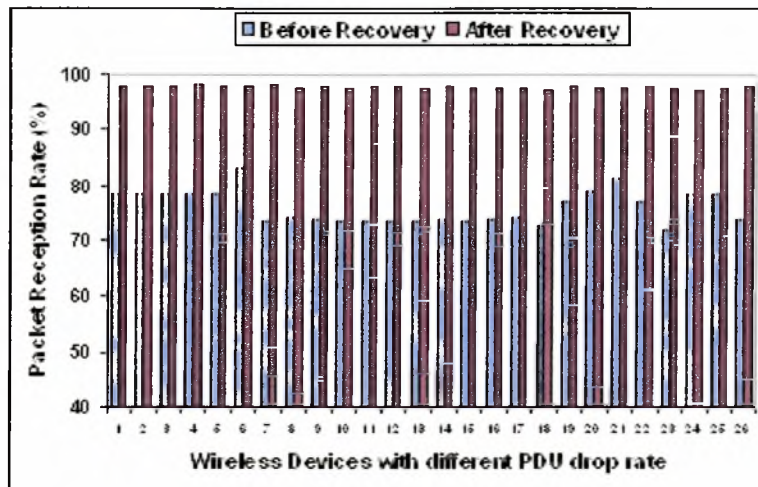
Το παραπάνω πρωτόκολλο έχει υλοποιηθεί στον προσομοιωτή δικτύων OPNET. Για να γίνει αξιολόγηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου έγινε σύγκριση του ρυθμού απώλειας πακέτων πριν την ανάκτηση και μετά από αυτήν.



Εικόνα 8: Αποτέλεσμα αριθμού βοηθών κόμβων

Στην εικόνα 8 βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερο αριθμό βοηθών κόμβων έχουμε τόσο μεγαλύτερη ανάκτηση δεδομένων γίνεται. Το Throughput επίσης βελτιώνεται σημαντικά σε κάθε κόμβο που συμμετέχει στην διαδικασία ανάκτησης (βλ. Εικόνα 9).





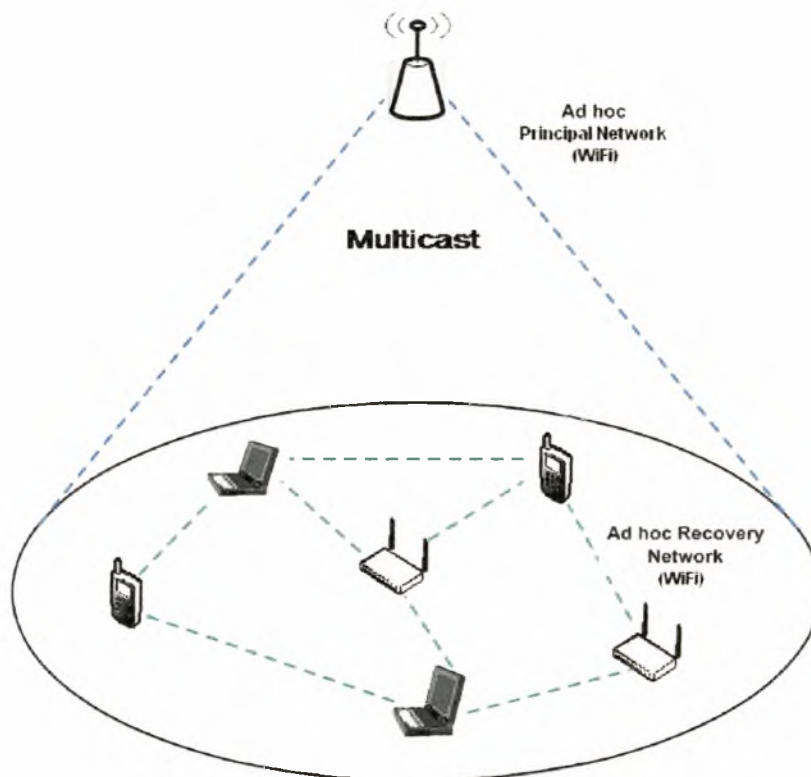
Εικόνα 9: Βελτίωση του Throughput

Βλέπουμε πως μετά την διαδικασία ανάκτησης ο ρυθμός απώλειας πακέτων μπορεί να περιοριστεί σημαντικά και σε μερικές περιπτώσεις να περιοριστεί από το 20% στο 4% και λιγότερο.

## 3. Υλοποίηση του πρωτοκόλλου στο εργαλείο Click

### 3.1. Εισαγωγή

Όπως είπαμε και παραπάνω η υλοποίησή μας βασίζεται στο πρωτόκολλο που περιγράψαμε προηγουμένως. Οι κύριες διαφορές είναι πως στην υλοποίησή μας και τα δύο δίκτυα είναι 802.11 (Wi-Fi) και το κυρίως δίκτυο δεν είναι ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή (infrastructure) αλλά ένα αδόμητο δίκτυο (ad hoc) όπως και το βοηθητικό δίκτυο (βλ. εικόνα 10).



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική υλοποιημένου συστήματος

### 3.2. Το εργαλείο Click

Το εργαλείο Click είναι μια αρχιτεκτονική λογισμικού για την οικοδόμηση ευέλικτων και διαμορφώσιμων δρομολογητών. Ένας δρομολογητής Click απαρτίζεται από ενότητες επεξεργασίας πακέτων (modules) αποκαλούμενες στοιχεία (elements). Τα μεμονωμένα στοιχεία εφαρμόζουν απλές λειτουργίες δρομολογητών όπως η κατηγοριοποίηση πακέτων, δημιουργώντας ουρές αναμονής διασυνδεδεμένες με συσκευές δικτύων. Για να δημιουργήσουμε μία δική μας ρύθμιση δρομολογητή στο Click, σχηματίζουμε μία συλλογή στοιχείων και συνδέσεων μεταξύ τους, ώστε να σχηματίσουμε έναν κατευθυνόμενο γράφο. Οι

ρυθμίσεις στο Click είναι διαμορφώσιμες και εύκολα επεκτάσιμες. Ένας δρομολογητής συμβατός με το Click έχει 16 στοιχεία στο μονοπάτι προώθησης εκ της δημιουργίας του. Για να επεκταθεί περαιτέρω, ώστε να υποστηρίζει πολιτικές απόρριψης πακέτων, απαιτεί απλά την προσθήκη κάποιων στοιχείων στη σωστή θέση.

Για την υλοποίηση αυτού του πρωτοκόλλου δημιουργήσαμε τα δικά μας στοιχεία (elements) στον Click. Η γλώσσα προγραμματισμού την οποία χρησιμοποιεί ο Click και στην οποία υλοποιήσαμε αυτά τα στοιχεία είναι η C++.

Πιο αναλυτικά, ο Click Modular Router είναι μια αρχιτεκτονική η οποία αναπτύχθηκε στο MIT για χρήση σε δρομολογητές εγκατεστημένους σε τάρτσες κτηρίων (building routers). Είναι υλοποιημένος εξ' ολοκλήρου σε λογισμικό (software), ενώ η λειτουργικότητά του δεν χαρακτηρίζεται από περιορισμούς σχετικά με τον εξοπλισμό που δύναται να την φιλοξενήσει. Η καινοτομία πίσω από τον σχεδιασμό του έγκειται στην αφαίρεση του συνόλου της λειτουργικότητας του Επιπέδου Δικτύου του εκάστοτε κόμβου που το φιλοξενεί, πχ ενός Router - Linux Box.

Προφανώς, η χαμένη λειτουργικότητα του Επιπέδου δεν αναμένεται να ανακτηθεί με την από το μηδέν συγγραφή κώδικα χαμηλού επιπέδου από τον εκάστοτε διαχειριστή. Αντίθετα, η αρχιτεκτονική διαθέτει ένα πολύ μεγάλο αριθμό έτοιμων κομματιών κώδικα υπό την μορφή συναρτήσεων. Ο διαχειριστής θα πρέπει να επιλέξει τις κατάλληλες συναρτήσεις και, αφού τις τοποθετήσει στην σωστή σειρά, να αποδώσει στο Επίπεδο Δικτύου την απαιτούμενη λειτουργικότητα. Κατ' αντιστοιχία με ένα πάζλ, ο διαχειριστής θα πρέπει να επιλέξει τα κατάλληλα κομμάτια και, εν συνεχεία, να τα τοποθετήσει σε τέτοια σειρά ώστε να επιτύχει τον επιθυμητό στόχο. Οι προαναφερθείσες αυτές συναρτήσεις αναφέρονται στην γλώσσα του Click ως Elements.

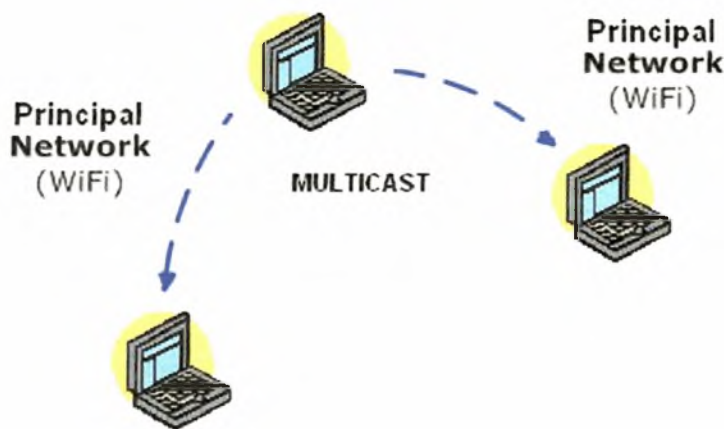
Η αρχιτεκτονική φέρει έτοιμα υλοποιημένα τα περισσότερα Element που κάποιος μπορεί να χρειαστεί, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα τροποποίησης ή από το μηδέν υλοποίησης νέων ώστε να καλυφθούν οι κατά περίπτωση ανάγκες. Προφανώς, αποτελούν τους δομικούς λίθους της αρχιτεκτονικής Click, ενώ οτιδήποτε πράττουν έχει αντίκρισμα στο πακέτο το οποίο επεξεργάζονται την εκάστοτε στιγμή. Η επικοινωνία μεταξύ τους στηρίζεται στην χρήση θυρών (ports), μέσω των οποίων ανταλλάσσουν πακέτα. Οι push συνδέσεις προωθούν πακέτα από τον αποστολέα στον παραλήπτη όταν ο πρώτος το αποφασίσει, ενώ για τις pull ισχύει το αντίστροφο.

Για να οριστεί δε η απαιτούμενη προσφερόμενη λειτουργικότητα του Επιπέδου Δικτύου αρκεί η συγγραφή ενός ειδικού αρχείου παραμετροποίησης (configuration file). Το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει ονόματα από Elements

συνοδευόμενα από τις αντίστοιχες μεταβλητές εισόδου τους, ενώ αυτά συνδέονται κατάλληλα ώστε να δημιουργούν έναν νοητό κατευθυνόμενο γράφο. Στην συνέχεια, το αρχείο διερμηνεύεται από την μηχανή διερμηνείας της αρχιτεκτονικής Click και οι κατάλληλες ενέργειες λαμβάνουν χώρα.

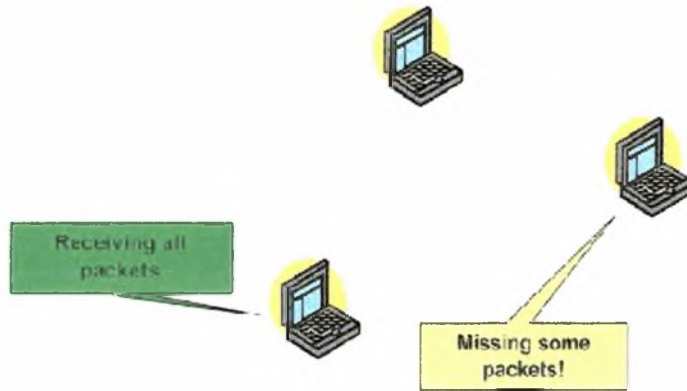
### 3.3. Περιγραφή υλοποιημένου πρωτοκόλλου

Στο πρωτόκολλο που υλοποιήσαμε κάθε κόμβος έχει δύο ασύρματες κάρτες 802.11 (Wi-Fi). Και οι δύο κάρτες λειτουργούν σε ad hoc mode αλλά σε διαφορετικό κανάλι ώστε να μην υπάρχει περίπτωση συγκρούσεων. Στην μία κάρτα έχουμε το κυρίως δίκτυο πολυεκπομπής και στην άλλη κάρτα το βοηθητικό δίκτυο ανάκτησης δεδομένων. Κάθε κόμβος μπορεί να στείλει σαν κύριος κόμβος πολυεκπομπής.



Εικόνα 11: Πολυεκπομπή

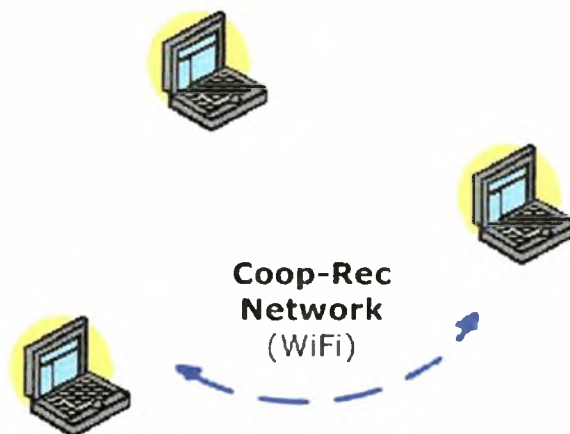
Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο πολυεκπομπής το αποθηκεύει τοπικά για πιθανή μετέπειτα χρήση (διαδικασία ανάκτησης). Ελέγχει τον αριθμό ακολουθίας και του πακέτου και το προωθεί ανάλογα. Δηλαδή, αν είναι το πρώτο ή το επόμενο προς παραλαβή πακέτο και τότε το προωθεί στην εφαρμογή αλλιώς αν είναι μελλοντικό πακέτο το κρατάει σε αναμονή μέχρι να έρθει το σωστό πακέτο. Στην περίπτωση που το πακέτο είναι παλιό το πετάει.



Εικόνα 12: Απώλεια πακέτων

Αν ένας κόμβος παραλάβει ένα μελλοντικό πακέτο τότε στέλνει σε πανεκπομπή στο βοηθητικό δίκτυο ένα μήνυμα αίτησης για το πακέτο που περιμένει. Μέχρι να έρθει το πακέτο που περιμένει αποθηκεύει τοπικά όλα τα μελλοντικά πακέτα που του έρχονται. Τη στιγμή που θα έρθει το πακέτο που του λείπει τότε θα το προωθήσει στην εφαρμογή μαζί με τα υπόλοιπα μελλοντικά πακέτα των οποίων ο αριθμός σειράς είναι ο πρότερος.

Αν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα αίτησης τότε ελέγχει αν έχει ήδη εξυπηρετήσει αυτή την αίτηση και έπειτα αν έχει το ζητούμενο πακέτο. Αν έχει ήδη εξυπηρετήσει αυτήν την αίτηση τότε την αγνοεί αλλιώς αποθηκεύει το αναγνωριστικό της αίτησης και ελέγχει αν έχει το ζητούμενο πακέτο. Αν το έχει το στέλνει με πανεκπομπή στο βοηθητικό δίκτυο.



Εικόνα 13: Αρχικοποίηση Ανάκτησης

### 3.4. Σχεδιασμός πρωτοκόλλου

#### *Element εισερχόμενης κίνησης*

Για να υποστηρίξουμε τις παραπάνω λειτουργίες αλλάξαμε την πληροφορία `type/length` (2 bytes) του Ethernet πλαισίου. Κάθε πλαίσιο δεδομένων που υποστηρίζει αυτό το πρωτόκολλο έχει συγκεκριμένο αριθμό σε αυτό το πεδίο του πλαισίου. Οπότε με το που έρχεται ένα πλαίσιο από το κυρίως δίκτυο ελέγχουμε πρώτα αυτόν τον αριθμό αν είναι ο αριθμός που χαρακτηρίζει το πρωτόκολλό μας.

Αν δεν είναι ο αριθμός που χαρακτηρίζει το πρωτόκολλό μας τότε το πλαίσιο δεν το επεξεργάζεται το Element που έχουμε υλοποιήσει αλλά το προωθούμε στο παραπάνω επίπεδο του Click. Αν είναι, ελέγχουμε αν το έχουμε ήδη λάβει. Αν δε το έχουμε λάβει το αντιγράφουμε και το αποθηκεύουμε (σε ουρά για μελλοντική χρήση σε περίπτωση εξυπηρέτησης ανάκτησης) με αναγνωριστικό τον σειριακό του αριθμό συνδυασμένο με την IP του αποστολέα μέσω μιας hash συνάρτησης, αλλιώς αν το έχουμε ήδη λάβει τότε το απορρίπτουμε.

Κάτω από το Header του Ethernet επιπέδου έχουμε το Header του πρωτοκόλλου μας. Σε αυτόν είναι αποθηκευμένος ένας αριθμός που προσδιορίζει τη σειρά του πακέτου (καθώς στο UDP δεν υπάρχει τέτοιος αριθμός) στην περίπτωση που το πακέτο είναι δεδομένα ή ένα αναγνωριστικό στην περίπτωση που είναι αίτηση.

Οπότε ελέγχουμε τον σειριακό αριθμό και ή το στέλνουμε στην εφαρμογή αν είναι το επόμενο προς παραλαβή πακέτο ή το αποθηκεύουμε σε μια ουρά μελλοντικών πακέτων αν ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος. Αν είναι μεγαλύτερος τότε στέλνουμε μια αίτηση για αυτό το πακέτο μέσω πανεκπομπής στο βοηθητικό δίκτυο. Στην αίτηση αυτή ζητάμε το πακέτο του οποίου το αναγνωριστικό είναι ο συνδυασμός του σειριακού αριθμού με την διεύθυνση IP του αποστολέα πολυεκπομπής. Στην περίπτωση που έχει μικρότερο σειριακό αριθμό από αυτόν που περιμένουμε το απορρίπτουμε. Κάθε φορά που παραδίδουμε στην εφαρμογή ένα πακέτο ελέγχουμε την ουρά μελλοντικών πακέτων για πιθανά πακέτα που είναι η σειρά τους να παραδοθούν στην εφαρμογή.

Όταν λάβουμε μία αίτηση για ένα πακέτο (έχει διαφορετικό αριθμό στο `type/length` του Ethernet πλαισίου) ελέγχουμε αν την έχουμε εξυπηρετήσει με βάση το αναγνωριστικό που φέρει στο Header της και την διεύθυνση IP του αποστολέα της. Αν την έχουμε εξυπηρετήσει την απορρίπτουμε. Αλλιώς αποθηκεύουμε το αναγνωριστικό της που υπολογίσαμε παραπάνω στην ουρά αιτήσεων και ελέγχουμε αν έχουμε το πακέτο με βάση το αναγνωριστικό που έχει στο Header της. Αν το έχουμε το στέλνουμε στο βοηθητικό δίκτυο.



### *Element εξερχόμενης κίνησης*

Σε αυτό το Element απλώς γίνεται encapsulate τα πακέτα που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν το πρωτόκολλό μας. Ελέγχουμε αν τα πακέτα που έρχονται από το από πάνω επίπεδο πρόκειται να χρησιμοποιήσουν αυτό το πρωτόκολλο. Αν ναι τότε δημιουργούμε το Header του πρωτοκόλλου μας και αναθέτουμε έναν σειριακό αριθμό στο πακέτο. Έπειτα δημιουργούμε το Ethernet Header και του αναθέτουμε το αναγνωριστικό του πρωτοκόλλου μας στο πεδίο type/length.

### **3.5. Υλοποίηση – Αποτελέσματα**

Το παραπάνω πρωτόκολλο το υλοποιήσαμε και πειραματιστήκαμε στο testbed του τμήματος Μηχανικών Η/Υ Τηλεπικοινωνιών και δικτύων. Στο πείραμά μας χρησιμοποιήσαμε τρεις κόμβους. Έναν για πολυεκπομπή και τους άλλους δύο ως κόμβους βοηθητικού δικτύου.

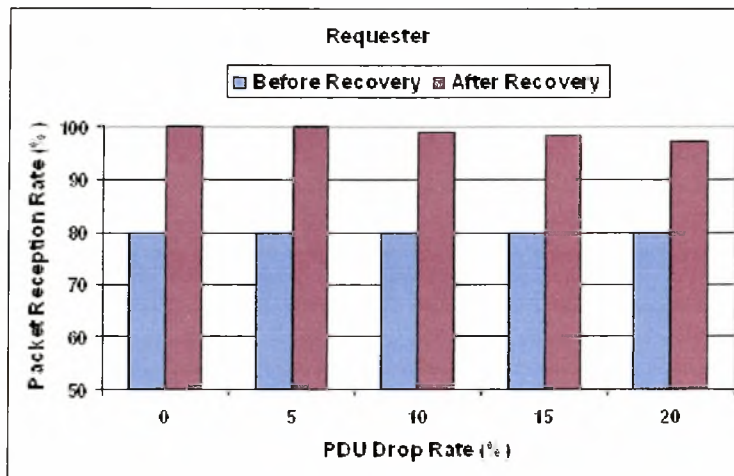
Τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν παρόμοια με τις προσομοιώσεις του πρωτοκόλλου ανάκτησης δεδομένων μέσω συνεργασίας κόμβων σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Κάθε χαμένο πακέτο που είχαν οι κόμβοι από το κυρίως δίκτυο το ανακτούσαν από το βοηθητικό δίκτυο.

Στην περίπτωση που έχουμε έναν κόμβο πολυεκπομπής και δύο κόμβους σε βοηθητικό δίκτυο είχαμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

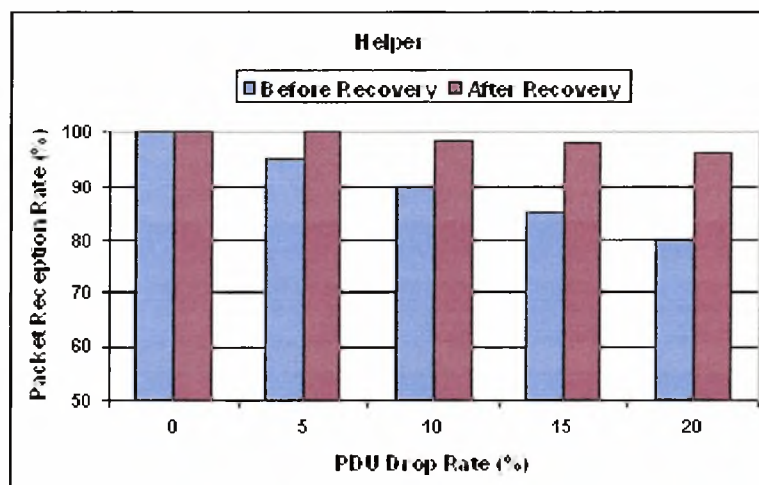
Ο κόμβος που είχε σταθερή απώλεια πακέτων 20% ζητούσε από κόμβο που δεν είχε απώλειες τα χαμένα πακέτα. Έπειτα ρυθμίσαμε το κόμβο να έχει σταδιακή απώλεια πακέτων μέχρι και 20%. Η συνολική απώλεια πακέτων δεν υπερέβη το 3%. Αυτό είναι αποτέλεσμα τις ετερογένειας του ασύρματου καναλιού που έχει ως αποτέλεσμα οι κόμβοι να έχουν διαφορετικά χαμένα πακέτα. Η πιθανότητα να έχουν χάσει την ίδια πληροφορία είναι πολύ μικρή (βλ. εικόνες 14,15).

### *Unicast -> Multicast*

Ο Multicaster δεν χρειάζεται να στέλνει σε multicast IP αλλά σε μία απλή unicast. Το multicasting επιτυγχάνεται μέσω του EtherType και της ροής στην οποία συμμετέχει ο κόμβος. Κάθε κόμβος που έχει ενεργοποιημένο το coor λαμβάνει τα πακέτα αυτά ασχέτως αν προορίζονται για αυτόν (Δεν ελέγχουμε IP διεύθυνση προορισμού αλλά προέλευσης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο bit rate. Καθώς στη multicast IP περίπτωση θα είχαμε μόνο το βασικό bit rate διαθέσιμο.



Εικόνα 14: Ρυθμός απώλειας πακέτων του αιτούντα



Εικόνα 15: Ρυθμός απώλειας πακέτων του βοηθού



## 4. Βιβλιογραφία

- [1] Kaustubh Sinkar, Amit Jagirdar, Thanasis Korakis, Hang Liu, Saurabh Mathur, Shivendra Panwar, “Cooperative Recovery in Heterogeneous Mobile Networks”
- [2] Click Modular Router Project.  
<http://read.cs.ucla.edu/click/>
- [3] Herbert Schildt, “C++ from the Ground Up”, Third Edition.
- [4] Morris, R., Kohler, E., Jannotti, J., and Kaashoek, M. F. 1999. The Click modular router.
- [5] Κοράκης Αθανάσιος. “*Μέθοδοι Υποστήριξης Ποιότητας Υπηρεσιών σε Ασύρματα Δίκτυα με Έξυπνες Κεραίες*”. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. 2005



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073657

