

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων



Διπλωματική Εργασία

Θέμα:

«Υλοποίηση προχωρημένων μεθόδων μετάδοσης  
δεδομένων με χρήση τεχνικών συνεργασίας κόμβων  
σε ασύρματες κάρτες»

Επιμελητές:

Γαλάνης Ευάγγελος του Νικολάου  
Κερανίδης Ευστράτιος του Δημητρίου

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κουτσόπουλος Ιορδάνης  
(Λέκτορας)

Συνεπιβλέπων Καθηγητής:

Τασιούλας Λέανδρος  
(Καθηγητής)

Βόλος,  
Οκτώβριος 2008



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

Αριθ. Εισ.: 6600/1  
Ημερ. Εισ.: 03-10-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΗΥΤΔ  
2008  
ΓΑΛ

## Ευχαριστίες

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

Θα θέλαμε αρχικά να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Ιορδάνη Κουτσόπουλο, Λέκτορα του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, κύριο επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, για τις χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις του καθώς και για την υποστήριξη που μας προσέφερε κατά την διάρκεια της φοίτησης μας αλλά και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας. Τον ευχαριστούμε, ακόμη, για τη βοήθεια που μας παρείχε για την συνέχιση των σπουδών μας σε μεταπτυχιακό επίπεδο.

Ευχαριστούμε επίσης τον συνεπιβλέποντα της εργασίας μας, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, κ. Λέανδρο Τασιούλα για την καθοδήγηση του.

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

Τέλος, ευχαριστούμε θερμά τις οικογένειές μας για την αμέριστη συμπαράσταση που μας παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μας.

Στις οικογένειες μας

# Περιεχόμενα

Περληψη .....	5
<b>1. Δικτυακή Κωδικοποίηση .....</b>	<b>6</b>
1.1. Γενικά για τη Δικτυακή Κωδικοποίηση .....	6
1.2. Πλεονεκτήματα της δικτυακής κωδικοποίησης.....	9
1.2.1. Βελτίωση Ρυθμοαπόδοσης.....	9
1.2.2. Βελτίωση Κατανάλωσης Ενέργειας .....	10
1.2.3. Ανθεκτικότητα και προσαρμοστικότητα.....	10
1.2.4. Δίκτυα ευαίσθητα σε καθυστερήσεις και εφαρμογές υψηλών ρυθμών μετάδοσης.....	11
1.2.5. Παράγοντες που επηρεάζουν τα κέρδη του Network Coding.....	11
1.3. Χρήσεις - Εφαρμογές της δικτυακής κωδικοποίησης.....	12
1.3.1. Peer to peer διανομή αρχείων.....	12
1.3.2. Αμφίδρομη Επικοινωνία σε Ασύρματα δίκτυα.....	13
1.3.3. Δομημένα Ασύρματα Δίκτυα.....	14
1.3.4. Αδόμητα (ad-hoc) δίκτυα αισθητήρων.....	14
<b>2. Μελέτη υλοποιημένων πρωτοκόλλων.....</b>	<b>15</b>
2.1. Μελέτη - Ανάλυση της υλοποίησης «COPE».....	15
2.1.1. Γενικά για το COPE.....	15
2.1.2. Τεχνικά ζητήματα του «COPE».....	19
2.1.3. Περιβάλλον πειραμάτων - Αποτελέσματα υλοποίησης.....	21
2.2. Μελέτη - Ανάλυση της υλοποίησης «MORE».....	21
2.2.1. Εισαγωγή – Ευκαιριακή Δρομολόγηση (Opportunistic Routing)...	21
2.2.2. Αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης MORE.....	24
2.2.3. Πρακτικά ζητήματα του MORE.....	27
2.2.4. Περιβάλλον πειραμάτων – Αποτελέσματα υλοποίησης.....	27
2.3. Το εργαλείο Click.....	28
<b>3. Υλοποίηση πρωτοκόλλου δικτυακής κωδικοποίησης με C Sockets</b>	
3.1. Ανάλυση του περιβάλλοντος εκτέλεσης.....	29
3.1.1. Ασύρματες κάρτες δικτύου.....	29

3.1.2. Ασύρματα δίκτυα.....	30
3.1.3. Προγραμματισμός Δικτύων με τη χρήση Sockets.....	33
3.1.4. Multicast επικοινωνία (πολυεκπομπή).....	34
3.2. Σχεδιασμός του πρωτοκόλλου – Τεκμηρίωση των επιλογών.....	35
3.3. Αποτελέσματα αξιόπιστης και αναξιόπιστης μετάδοσης.....	40
3.4. Ανάλυση της υλοποίησης του reliable multicast.....	42
3.5. Μετρήσεις – Αποτελέσματα- Συμπεράσματα.....	45
3.6. Μελλοντικές Επεκτάσεις πρωτοκόλλου .....	50
3.6.1. Συνδυασμός COOPMAC με Network Coding.....	50
3.6.2. Αλγόριθμος χρόνου εκκίνησης με ή χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση .....	52
<b>4. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>53</b>
<b>Παράρτημα – Οδηγός.....</b>	<b>55</b>

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά μια εις βάθος μελέτη της δικτυακής κωδικοποίησης (network coding) και της εφαρμογής αυτής σε διάφορους τομείς.

Το πρώτο της τμήμα (θεωρητικό) περιλαμβάνει μια εισαγωγή στην έννοια της δικτυακής κωδικοποίησης, μια αναφορά στα οφέλη της δικτυακής κωδικοποίησης (βελτίωση ρυθμοαπόδοσης δικτύου, ανθεκτικότητα, προσαρμοστικότητα) και μια συνοπτική περιγραφή των πιο βασικών εφαρμογών της (peer to peer διανομή αρχείων, ασύρματα δίκτυα, αδόμητα (ad-hoc) δίκτυα αισθητήρων). Ακολούθως, υπάρχει μια εκτενής περιγραφή δύο πραγματικών υλοποιήσεων (COPE, MORE) που βασίζονται στη δικτυακή κωδικοποίηση και βρίσκουν χρήση σε ασύρματα δίκτυα. Αυτή περιλαμβάνει τα ακριβή σχεδιασμένα πρωτόκολλα αλλά και διάφορα τεχνικά ζητήματα των υλοποιήσεων.

Στη συνέχεια, περνώντας στο πρακτικό μέρος της εργασίας, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε εκ μέρους μας ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην δικτυακή κωδικοποίηση και προσεγγίζει σε ορισμένα σημεία την υλοποίηση του COPE. Η υλοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας C sockets και αξιολογήθηκε σε ασύρματο δίκτυο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας δείχνουν μια χαρακτηριστική βελτίωση στην ρυθμοαπόδοση του δικτύου όταν χρησιμοποιείται δικτυακή κωδικοποίηση σε σύγκριση με την απλή προώθηση μη κωδικοποιημένων πακέτων.

Εκτός από την τεκμηρίωση και την ανάλυση του πρωτοκόλλου που σχεδιάστηκε αλλά και των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις-πειράματα, στο τέλος της εργασίας παρατίθεται και ένας οδηγός «τρεξίματος» του πειράματος μας.

# 1. Δικτυακή Κωδικοποίηση

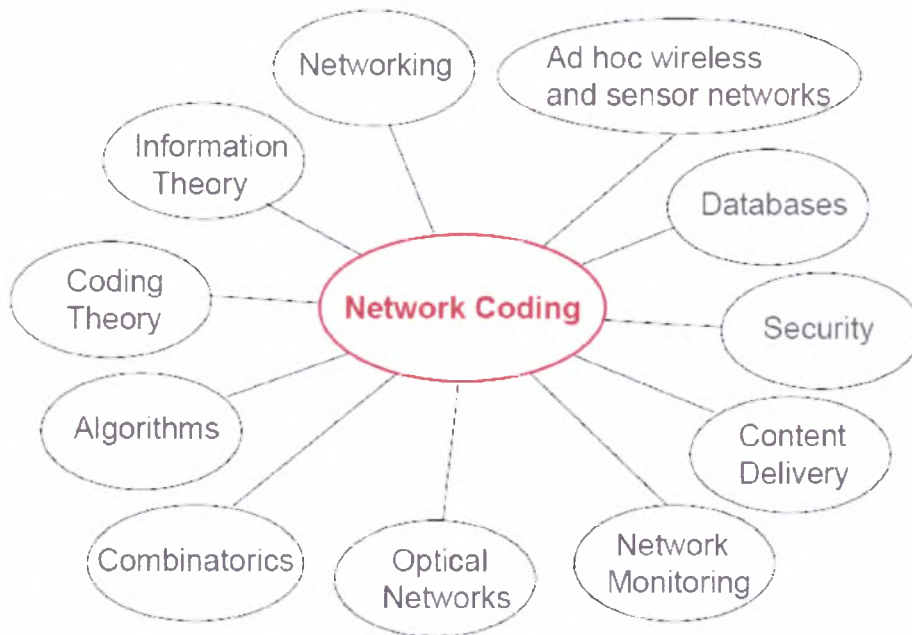
## 1.1 Γενικά για τη Δικτυακή Κωδικοποίηση (Network Coding)

Στη σημερινή εποχή τα δίκτυα επικοινωνιών μοιράζονται την ίδια βασική αρχή λειτουργίας. Έτσι, είτε πρόκειται για πακέτα που μεταδίδονται μέσω του διαδικτύου είτε για σήματα σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο, η πληροφορία μεταδίδεται με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο τα αυτοκίνητα μοιράζονται μια λεωφόρο ή τα υγρά τους σωλήνες. Δηλαδή, ανεξάρτητες ροές πληροφορίας μπορεί να μοιράζονται τους πόρους του δικτύου αλλά η πληροφορία αυτή καθαυτή παραμένει ξεχωριστή. Η δρομολόγηση, η αποθήκευση δεδομένων, ο έλεγχος λαθών και γενικά όλες οι δικτυακές λειτουργίες βασίζονται σε αυτήν την αρχή.

Η δικτυακή κωδικοποίηση (network coding) αποτελεί ένα πρόσφατο πεδίο στη θεωρία πληροφορίας το οποίο ακυρώνει για πρώτη φορά αυτή τη βασική αρχή. Πλέον, οι κόμβοι ενός δικτύου εκτός από την απλή προώθηση της πληροφορίας, έχουν τη δυνατότητα να συνδυάσουν διάφορα πακέτα που έχουν έρθει σε αυτούς σε ένα ή παραπάνω διαφορετικά πακέτα τα οποία και θα σταλούν στον τελικό προορισμό, ο οποίος θα «αποσπάσει» την ανεξάρτητη πληροφορία επαναφέροντας την στην αρχική της μορφή.

Η θεωρία αυτή κίνησε αμέσως το ενδιαφέρον των ερευνητικών κοινοτήτων τόσο των ηλεκτρολόγων μηχανικών όσο και της επιστήμης των υπολογιστών. Παράλληλα, η υπολογιστική επεξεργασία γίνεται ολοένα και φθηνότερη σύμφωνα με το νόμο του Moore οπότε το πρόβλημα έχει μετατοπιστεί στην χωρητικότητα του δικτύου η οποία πρέπει να υποστηρίξει τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των εφαρμογών. Η δικτυακή κωδικοποίηση χρησιμοποιεί φθηνή υπολογιστική ισχύ για να αυξήσει δραματικά τη συνολική ρυθμαπόδοση (throughput) του δικτύου.

Το ενδιαφέρον για αυτό το πεδίο συνεχίζει να αυξάνεται όσο εμφανίζονται νέες εφαρμογές αυτής της «ιδέας» στα δίκτυα τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, ενώ παράλληλα η δικτυακή κωδικοποίηση συσχετίζεται συνεχώς και με ποικίλα άλλα πεδία όπως είναι η βάσεις δεδομένων, η ασφάλεια, τα ασύρματα δίκτυα, τα οπτικά δίκτυα κλπ (βλέπε Εικόνα 1).

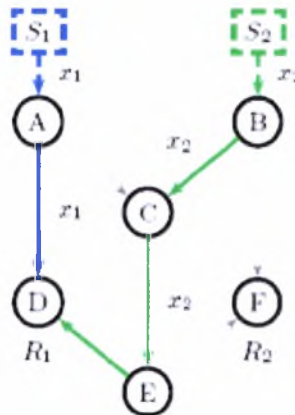


Εικόνα 1: Δικτυακή κωδικοποίηση και συσχέτιση με άλλα επιστημονικά πεδία

Για να γίνει πιο κατανοητή η λογική της δικτυακής κωδικοποίησης θα αναλυθεί η εφαρμογή της σε μια χαρακτηριστική τοπολογία, γνωστή ως δίκτυο «πεταλούδα» (butterfly network) στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Στις Εικόνες 2,3,4 απεικονίζεται ένα δίκτυο επικοινωνίας μέσω γράφου όπου οι κορυφές αντιστοιχούν σε κόμβους του δικτύου και οι ακμές σε κανάλια. Ο χρόνος χωρίζεται σε slots (μικρά διαστήματα) και μέσω κάθε καναλιού μπορούμε να στείλουμε ένα bit (ελάχιστη μονάδα πληροφορίας) σε κάθε slot. Το παράδειγμα αυτό περιλαμβάνει δύο πηγές (S1 και S2) και δύο παραλήπτες (R1 και R2). Κάθε πηγή παράγει ένα bit ανά slot τα οποία δηλώνουμε  $x_1$  και  $x_2$  αντίστοιχα.

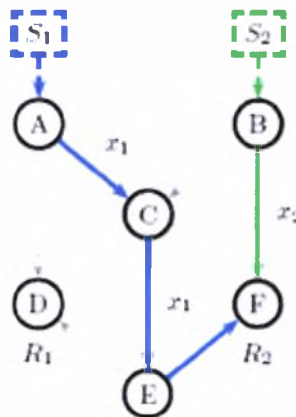
Αν ο R1 χρησιμοποιεί όλους τους πόρους του δικτύου από μόνος του, θα μπορούσε να παραλάβει την πληροφορία και των δύο πηγών. Πράγματι, μπορούμε να δρομολογήσουμε το bit  $x_1$  από την πηγή S1 μέσω του μονοπατιού {AD} και το bit  $x_2$  από την πηγή S2 μέσω του μονοπατιού {BC, CE, ED} όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.





Εικόνα 2: Δρομολόγηση στον R1

Αντίστοιχα, αν ο R2 χρησιμοποιεί όλους τους πόρους του δικτύου από μόνος του, θα μπορούσε να παραλάβει την πληροφορία και των δύο πηγών και αυτός. Μπορούμε να δρομολογήσουμε το bit  $x_1$  από την πηγή S1 μέσω του μονοπατιού {AC, CE, EF} και το bit  $x_2$  από την πηγή S2 μέσω του μονοπατιού {BF} (βλέπε Εικόνα 3).



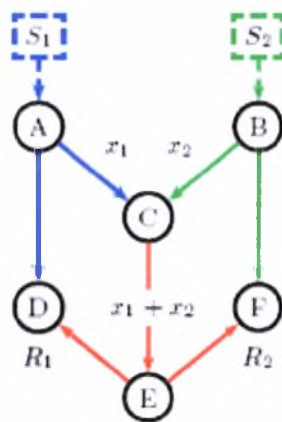
Εικόνα 3: Δρομολόγηση στον R2

Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι οι R1, R2 θέλουν να παραλάβουν ταυτόχρονα την πληροφορία από τις δύο πηγές. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε ανταγωνισμό για τη χρήση της ακμής CE, ο οποίος πηγάζει από το γεγονός ότι μέσω αυτής της ακμής μπορούμε να στείλουμε ένα μόνο bit ανά time slot. Όμως, εμείς θα θέλαμε να στείλουμε ταυτόχρονα το bit  $x_1$  για να φτάσει στον παραλήπτη R2 και το bit  $x_2$  για να φτάσει στον R1.

Εφαρμόζοντας τον «παραδοσιακό» τρόπο μετάδοσης της πληροφορίας θα έπρεπε να πάρουμε μία απόφαση στην ακμή CE: είτε να την χρησιμοποιήσουμε

για να στείλουμε το bit  $x_1$  είτε για το  $x_2$ . Αν για παράδειγμα αποφασίσουμε να στείλουμε το bit  $x_1$ , τότε ο παραλήπτης R1 θα λάβει μόνο το  $x_1$ , ενώ ο R2 θα λάβει τόσο το  $x_1$  όσο και το  $x_2$ .

Με τη μέθοδο της δικτυακής κωδικοποίησης, όπως αναφέραμε και πριν, δίνουμε τη δυνατότητα στους ενδιάμεσους κόμβους να επεξεργαστούν την εισερχόμενη ροή πληροφορίας αντί να την προωθούν μόνο. Ειδικότερα, ο κόμβος C αφού λάβει τα bits  $x_1, x_2$  μπορεί να δημιουργήσει ένα τρίτο bit  $x_3$  που θα είναι γραμμικός συνδυασμός των άλλων δύο ( $x_3 = x_1 + x_2$ ). Για παράδειγμα το  $x_3$  θα μπορούσε να προκύψει από τη λογική πράξη xor μεταξύ των άλλων δύο ( $x_3 = x_1 \text{ xor } x_2$ ). Στη συνέχεια, ο κόμβος C προωθεί το  $x_3$  στον E, ο οποίος με τη σειρά του στέλνει το  $x_3$  στους R1, R2 ταυτόχρονα με μία multicast επικοινωνία (πολυεκπομπή). Έτσι ο R1 παραλαμβάνοντας τα  $\{x_1, x_1 + x_2\}$  και επαναλαμβάνοντας την ίδια πράξη (π.χ.  $x_1 \text{ xor } (x_1 + x_2)$ ) επανακτά το  $x_2$  και έχει πλέον στη διάθεση του και τα δύο bits. Ομοίως συμβαίνει και για τον R2 που έχει παραλάβει τα  $\{x_2, x_1 + x_2\}$ . Η περίπτωση αυτή διακρίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Μετάδοση με network coding

## 1.2 Πλεονεκτήματα της δικτυακής κωδικοποίησης

### 1.2.1 Βελτίωση Ρυθμοαπόδοσης

Ένα αρχικό αποτέλεσμα που προκάλεσε το ενδιαφέρον για την δικτυακή κωδικοποίηση είναι ότι μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα ενός δικτύου για ροές πολυεκπομπής. Υποθέστε ότι έχουμε  $M$  πηγές, κάθε μια από τις οποίες στέλνει τις πληροφορίες με κάποιο δεδομένο ρυθμό, και  $N$  δέκτες και ότι όλοι οι δέκτες ενδιαφέρονται να λάβουν την πληροφορία όλων των πηγών. Με άλλα λόγια, όταν μοιράζονται οι  $N$  δέκτες τους πόρους του δικτύου, κάθε ένας από αυτούς μπορεί να λάβει το μέγιστο ρυθμό που θα ήλπιζε να λάβει αν

χρησιμοποιούσε όλους τους δικτυακούς πόρους για δική του χρήση. Κατά συνέπεια, η δικτυακή κωδικοποίηση μπορεί να βοηθήσει να μοιράζονται καλύτερα οι διαθέσιμοι δικτυακοί πόροι.

Η δικτυακή κωδικοποίηση μπορεί να προσφέρει οφέλη ρυθμοαπόδοσης όχι μόνο για ροές πολυεκπομπής, αλλά και για άλλα σχέδια κυκλοφορίας, όπως για μονοεκπομπή. Για παράδειγμα, υποθέτουμε το δίκτυο πεταλούδας που αναφέρθηκε παραπάνω, όπου οι A και B επιθυμούν να στείλουν πληροφορία και στους δύο κόμβους παραλήπτες D και F. Όλες οι συνδέσεις έχουν χωρητικότητα 1. Με την δικτυακή κωδικοποίηση (εκπέμποντας τα δεδομένα μέσω χορ), οι επιτεύξιμοι ρυθμοί είναι 2 για κάθε πηγή, το ίδιο σαν κάθε δέκτης να χρησιμοποιούσε το δίκτυο για δική του χρήση. Χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση, οι επιτεύξιμοι ρυθμοί είναι μικρότεροι (παραδείγματος χάριν εάν και οι δύο ρυθμοί είναι ίσοι, ο μέγιστος ρυθμός για το δίκτυο είναι 1.5).

Ένα ενδιαφέρον σημείο είναι ότι η δικτυακή κωδικοποίηση επιτυγχάνει τη βέλτιστη ρυθμοαπόδοση όταν χρησιμοποιεί πολυεκπομπή, χρησιμοποιώντας χρονικά πολυωνυμικούς αλγορίθμους. Αντίθετα, η επίτευξη της βέλτιστης ρυθμοαπόδοσης με απλή δρομολόγηση είναι πρόβλημα τάξης NP-complete, όπως προκύπτει από το πρόβλημα Packing Steiner Trees.

### **1.2.2. Βελτίωση Κατανάλωσης Ενέργειας**

Θεωρούμε πως τα οφέλη που προκύπτουν λόγω της βελτιωμένης εκμετάλλευσης των συνδέσεων, οδηγούν και σε εξοικονόμηση περιττής ενέργειας, αφού με την ίδια κάλυψη χωρητικότητας συνδέσεων επιτυγχάνουμε μετάδοση περισσότερης πληροφορίας. Η μόνη επιβάρυνση σε θέματα ενέργειας προκύπτει από τις αυξημένες απαιτήσεις επεξεργασίας στους ενδιάμεσους κόμβους, η οποία είναι συγκριτικά ελάχιστη σε σχέση με το όφελος που προκύπτει από το μειωμένο αριθμό μεταδόσεων.

### **1.2.3. Ανθεκτικότητα και προσαρμοστικότητα**

Τα πιο συναρπαστικά οφέλη της δικτυακής κωδικοποίησης προκύπτουν σε θέματα ανθεκτικότητας και προσαρμοστικότητας. Διαισθητικά, μπορούμε να σκεφτούμε ότι η δικτυακή κωδικοποίηση, όπως και στην παραδοσιακή κωδικοποίηση, παίρνει πακέτα πληροφοριών και παράγει κωδικοποιημένα πακέτα, όπου κάθε κωδικοποιημένο πακέτο είναι «εξίσου σημαντικό». Ως αποτέλεσμα εάν λάβουμε έναν ικανοποιητικό αριθμό κωδικοποιημένων πακέτων, τότε βρισκόμαστε σε θέση να αποκωδικοποιήσουμε. Η νέα ιδέα που φέρνει η δικτυακή κωδικοποίηση, είναι ότι ο γραμμικός συνδυασμός

διαμορφώνεται ευκαιριακά πάνω από όλο το δίκτυο, όχι μόνο στον κόμβο πηγής, και έτσι είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου οι κόμβοι έχουν μόνο ελλιπείς πληροφορίες για τη συνολική κατάσταση του δικτύου.

Για παράδειγμα, υποθέτουμε πάλι το δίκτυο πεταλούδας, όπου οι A και B επιθυμούν να στείλουν πληροφορία και στους δύο κόμβους παραλήπτες D και F. Έστω τώρα πως κάποιος από τους κόμβους παραλήπτες γίνεται προσωρινά ανενεργός, οπότε η συγκεκριμένη μετάδοση, χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση, θα σπαταληθεί αφού ο λήπτης δε θα είναι σε θέση να λάβει. Εντούτοις, εάν ο κόμβος C μεταδώσει έναν τυχαίο γραμμικό συνδυασμό των πακέτων, η μετάδοση θα φέρει τις νέες πληροφορίες σε όλους τους ενεργούς κόμβους.

#### **1.2.4. Δίκτυα ευαίσθητα σε καθυστερήσεις και εφαρμογές υψηλών ρυθμών μετάδοσης**

Εφαρμόζοντας ιδέες δικτυακής κωδικοποίησης σε αυτό το πλαίσιο, δηλαδή επιτρέποντας στους ενδιάμεσους κόμβους να σχηματίζουν επίσης γραμμικούς συνδυασμούς, μπορούμε να επιτύχουμε συγχρόνως και βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης και βέλτιστη καθυστέρηση. Για παράδειγμα, ο κόμβος που αποτελεί το σημείο όπου γίνεται η κωδικοποίηση χρησιμοποιεί πλέον μία μετάδοση για να στείλει όλη την πληροφορία που δρομολογείται προς αυτόν αντί για δύο (ή περισσότερες). Οπότε καταφέρνει να δέχεται και να διαχειρίζεται περισσότερη πληροφορία στην ίδια μονάδα χρόνου, χωρίς να καθυστερεί τους παραλήπτες για παράδειγμα εάν γέμιζαν οι ενταμιευτές αποστολής του, λόγω των υψηλών ρυθμών μετάδοσης από τους αρχικούς αποστολείς.

#### **1.2.5. Παράγοντες που επηρεάζουν τα κέρδη του Network Coding**

Το κέρδος ρυθμοαπόδοσης της δικτυακής κωδικοποίησης εξαρτάται από την ύπαρξη ευκαιριών κωδικοποίησης, οι οποίες εξαρτώνται από τα σχέδια δρομολόγησης. Οι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στα σχέδια δρομολόγησης περιλαμβάνουν :

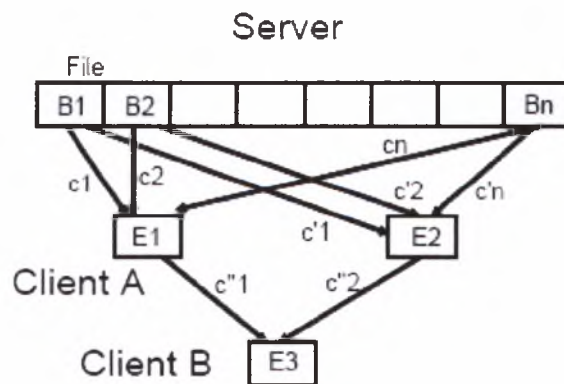
- αριθμό ροών στο δίκτυο
- είδος κίνησης (TCP ή UDP)
- παρεμβολή και θόρυβο
- αναλογία ρυθμών μετάδοσης <<ανεβάσματος>> και <<κατεβάσματος>> πληροφορίας.

## 1.3 Χρήσεις - Εφαρμογές της δικτυακής κωδικοποίησης

### 1.3.1 Peer to peer διανομή αρχείων

Γενικά, στην peer to peer διανομή αρχείων, θεωρούμε έναν πληθυσμό από χρήστες/κόμβους που ενδιαφέρονται να ανακτήσουν ένα αρχείο το οποίο υπάρχει μόνο σε έναν μοναδικό εξυπηρετητή. Επειδή ο εξυπηρετητής δεν έχει την απαιτούμενη χωρητικότητα για να εξυπηρετήσει όλους τους χρήστες ταυτόχρονα, χωρίζει το αρχείο του σε  $k$  τμήματα και τα μοιράζει τυχαία σε διαφορετικούς πελάτες. Οι πελάτες στη συνέχεια συνεργάζονται μεταξύ τους για συγκεντρώσουν και τα  $k$  τμήματα του αρχείου έτσι ώστε να ανακατασκευάσουν το αρχικό αρχείο. Με αυτόν τον τρόπο δουλεύουν συστήματα όπως το γνωστό BitTorrent.

Η πιο ευρέως γνωστή εφαρμογή που χρησιμοποιείται η δικτυακή κωδικοποίηση είναι το *Avalanche*, στο οποίο τα τμήματα που στέλνει ο εξυπηρετητής είναι τυχαίοι γραμμικοί συνδυασμοί των αρχικών γνήσιων τμημάτων. Ομοίως, οι πελάτες στέλνουν αναμεταξύ τους τυχαίους γραμμικούς συνδυασμούς των τμημάτων που έχουν διαθέσιμα. Η λειτουργία αυτού του συστήματος θα κατανοηθεί καλύτερα με το σενάριο της Εικόνας 5. Υποθέτουμε ότι αρχικά όλοι οι χρήστες είναι άδειοι και ότι ο πελάτης *A* επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή για να πάρει ένα τμήμα του αρχείου. Ο εξυπηρετητής θα συνδυάσει όλα τα τμήματα του αρχείου για να δημιουργήσει ένα κωδικοποιημένο μπλοκ *E1*. Πρώτα θα επιλέξει κάποιους τυχαίους συντελεστές  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , μετά θα πολλαπλασιάσει κάθε στοιχείο του τμήματος  $i$  με  $c_i$ , και στο τέλος θα προσθέσει τα αποτελέσματα των πολλαπλασιασμών όλα μαζί.



Εικόνα 5: Η περίπτωση Avalanche

Ο εξυπηρετητής στη συνέχεια θα μεταδώσει στον χρήστη *A* το αποτέλεσμα της πρόσθεσης  $E_1$  και το διάλυσμα συντελεστών. Υποθέτουμε επίσης ότι ο χρήστης *A*



έχει ακόμη ένα τμήμα κωδικοποιημένης πληροφορίας E2, είτε απευθείας από τον εξυπηρετητή είτε από κάποιον άλλο κόμβο/πελάτη με το αντίστοιχο διάνυσμα συντελεστών. Αν ο χρήστης A χρειάζεται να μεταδώσει ένα κωδικοποιημένο μπλοκ E3 στον χρήστη B, παράγει ένα γραμμικό συνδυασμό των δύο τμημάτων που έχει με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν του εξυπηρετητή. Πρώτα θα επιλέξει τους συντελεστές  $c'_{11}$  και  $c'_{12}$ , θα πολλαπλασιάσει κάθε στοιχείο του μπλοκ E1 με τον συντελεστή  $c'_{11}$  και αντίστοιχα και για το E2 και στο τέλος θα προσθέσει τα αποτελέσματα αυτών των πολλαπλασιασμών. Το μπλοκ που θα μεταδοθεί στον πελάτη B, έστω E3, θα είναι ίσο με  $c'_{11} * E1 + c'_{12} * E2$ .

Πρέπει να επισημανθεί ότι ένας κόμβος μπορεί να ανακτήσει το αρχικό αρχείο αφότου λάβει k τμήματα των οποίων οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι γραμμικώς ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Η διαδικασία επαναδημιουργίας του αρχείου είναι παρόμοια με τη λύση ενός συστήματος γραμμικών ισοτήτων.

Το μεγάλο κέρδος στην περίπτωση αυτή είναι ότι εξαιτίας της τυχειότητας στην επιλογή των συντελεστών κάθε φορά παράγεται ένα νέο ξεχωριστό κωδικοποιημένο μπλοκ. Κάθε κόμβος λοιπόν δεν χρειάζεται πλέον να επιλέξει ποιο μπλοκ τον συμφέρει να δεχτεί (όπως θα συνέβαινε στην περίπτωση χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση) λαμβάνοντας υπόψη τη «δημοτικότητα» αυτού. Αντιθέτως, σε κάθε κόμβο δημιουργείται ένας γραμμικός συνδυασμός όλων των διαθέσιμων τμημάτων ο οποίος και προωθείται ως ένα τμήμα πληροφορίας σε άλλον πελάτη. Έτσι, ακόμη και αν κάποια τμήματα που έλαβε ο πελάτης δεν είναι υψηλής «δημοτικότητας», υπάρχει η πιθανότητα αυτά τα τμήματα να χρησιμοποιούνται από γειτονικούς κόμβους οπότε τελικά όλος ο γραμμικός συνδυασμός που ήρθε ως ένα μπλοκ μαζί θα αποδειχθεί χρήσιμος στο 100% των τμημάτων του. Η μοναδική περίπτωση ώστε κάποιο παραγόμενο κωδικοποιημένο μπλοκ να αποδειχθεί «άχρηστο» είναι να έχει παραχθεί ξανά ακριβώς το ίδιο κάπου αλλού στο δίκτυο μας, γεγονός εξαιρετικά απίθανο γιατί καθώς τα διάφορα τμήματα ταξιδεύουν στο δίκτυο συνδυάζονται και ενώνονται συνεχώς με άλλα τμήματα, οπότε τροποποιούνται διαρκώς.

Αν η κωδικοποίηση της πληροφορίας μπορεί να συμβεί μόνο στην πηγή (εξυπηρετητή), τότε αυτό ονομάζεται source coding (κωδικοποίηση πηγής).

### 1.3.2 Αμφίδρομη Επικοινωνία σε Ασύρματα δίκτυα

Η δικτυακή κωδικοποίηση μπορεί να βελτιώσει τη ρυθμοαπόδοση όταν δύο ασύρματοι κόμβοι επικοινωνούν μέσω ενός κοινού σταθμού βάσης. Μπορούμε να επεκτείνουμε στην περίπτωση πολυκατευθυντικής δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα, όπου η κυκλοφορία μεταξύ των δύο κόμβων παραληπτών είναι αμφίδρομη και οι δύο κόμβοι έχουν έναν παρόμοιο αριθμό πακέτων για να

ανταλλάξουν. Μετά από μερικά αρχικά βήματα όλοι οι ενδιαμέσοι δρομολογητές έχουν αποθηκευμένα πακέτα προς μετάδοση, οπότε όταν προκύπτει μια δυνατότητα μετάδοσης, ένας δρομολογητής συνδυάζει δύο πακέτα, ένα για κάθε κατεύθυνση, με ένα απλό χοι και μεταδίδει μέσω πανεκπομπής στους γείτονες του. Κατά συνέπεια, κάθε ραδιοφωνική μετάδοση επιτρέπει σε δύο δρομολογητές να λάβουν ένα νέο πακέτο, διπλασιάζοντας αποτελεσματικά την ικανότητα του συγκεκριμένου μονοπατιού.

### **1.3.3. Δομημένα Ασύρματα Δίκτυα**

Όλες οι μεταδόσεις είναι μεταδόσεις πανεκπομπής και κρυφακούγονται από τους γείτονες. Με αυτό τον τρόπο, η πληροφορία για το ποιοι κόμβοι κρατούν ποια πακέτα κατανέμεται μέσα στη γειτονιά. Ένας κόμβος μπορεί να εφαρμόζει χοι σε πολλαπλά πακέτα για διαφορετικούς γείτονες και να τα στέλνει σε μια ενιαία μετάδοση, εφόσον κάθε γείτονας έχει ήδη τις απαιτούμενες πληροφορίες για να αποκωδικοποιήσει το πακέτο αμέσως.

### **1.3.4. Αδόμητα (ad-hoc) δίκτυα αισθητήρων**

Συγκεκριμένα το όφελος εντοπίζεται στη συλλογή πληροφοριών σε δίκτυα αισθητήρων. Με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να εντοπιστεί το βέλτιστο μονοπάτι μεταξύ των αισθητήρων, ώστε αυτή να δρομολογηθεί προς έναν καταλληλότερο κόμβο τον κόμβο νεροχύτη (sink node). Οι κόμβοι αισθητήρων δεν είναι ικανοί να αποκωδικοποιήσουν, αλλά σε ένα δίκτυο αισθητήρων ο στόχος είναι μόνο να κατασταθούν τα στοιχεία διαθέσιμα στον κόμβο νεροχύτη. Αυτός ο κόμβος μπορεί να αναδημιουργήσει  $N$  πακέτα δεδομένων  $n$  με υψηλή πιθανότητα, ερχόμενος σε επαφή μόνο με  $N$  κόμβους αισθητήρων οπουδήποτε στο δίκτυο.

## 2. Μελέτη υλοποιημένων πρωτοκόλλων

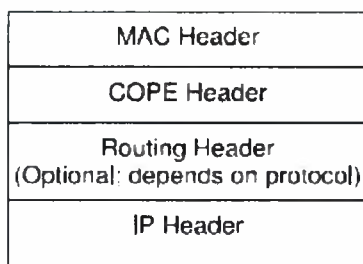
### 2.1 Μελέτη - Ανάλυση της υλοποίησης «COPE»

#### 2.1.1 Γενικά για το COPE

Το COPE αποτελεί μια νέα αρχιτεκτονική για ασύρματα δίκτυα, ο σχεδιασμός του οποίου προέρχεται από τη θεωρία της δικτυακής κωδικοποίησης. Οι προηγούμενες εργασίες-έρευνες που είχαν γίνει ήταν κυρίως θεωρητικές και εστίαζαν στην μετάδοση με πολυεκπομπή (multicast). Το COPE γεφυρώνει ουσιαστικά τη θεωρία με τη πράξη και καταπιάνεται με πρακτικά ζητήματα αντιμετωπίζοντας την ενσωμάτωση της δικτυακής κωδικοποίησης σε ένα υπαρκτό ασύρματο δίκτυο.

Ο σχεδιασμός του COPE βασίζεται και στην παρακάτω αρχή – κλειδί: Απαλλάσσεται από τη λογική της point-to-point (σημείο προς σημείο) διασύνδεσης των κόμβων ενός δικτύου και ενστερνίζεται την broadcast φύση (φύση πανεκπομπής) του ασύρματου καναλιού. Οι σχεδιαστές δικτύων τυπικά θεωρούν το ασύρματο κανάλι ως μια point-to-point σύνδεση και προσαρμόζουν τις τεχνικές προώθησης και δρομολόγησης που έχουν σχεδιασθεί για ενσύρματα δίκτυα στα ασύρματα. Αντιθέτως, το COPE εκμεταλλεύεται την ιδιότητα πανεκπομπής (broadcast) της ασύρματης επικοινωνίας αντί να την «κρύβει» μέσα από μια τεχνητή αφαίρεση.

Περνώντας σε μια πιο αναλυτική επισκόπηση, το COPE όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 6 εισάγει ένα επίπεδο κωδικοποίησης ανάμεσα στο επίπεδο Δικτύου (IP Layer) και στο επίπεδο Ελέγχου Πολλαπλής Πρόσβασης (MAC) - υποεπίπεδο του Επιπέδου Σύνδεσης (Data Link Layer)- το οποίο εντοπίζει τις ευκαιρίες κωδικοποίησης και τις εκμεταλλεύεται για να προωθήσει πολλαπλά πακέτα με μια μοναδική μετάδοση. Το COPE ουσιαστικά ενσωματώνει τρεις βασικές τεχνικές:



Εικόνα 6: COPE header



## 1. Ευκαιριακό άκουσμα (Opportunistic Listening)

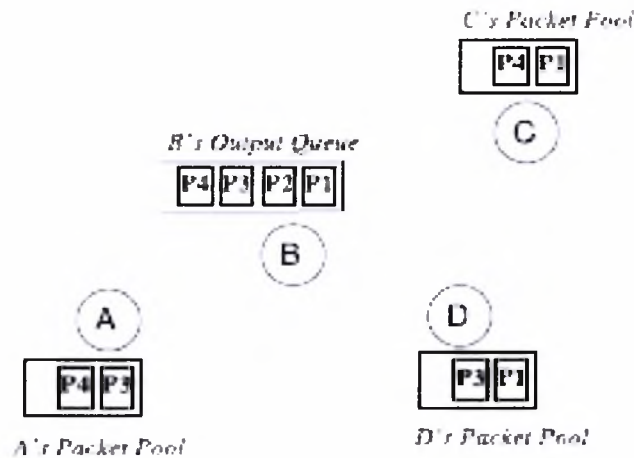
Το ασύρματο μέσο είναι ένα μέσο broadcast μεταδόσεων και έτσι δίνει στους κόμβους πολλές ευκαιρίες να «ακούσουν» κατά τύχη πακέτα εφόσον οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με πολυκατευθυντικές κεραίες. Το COPE θέτει τους κόμβους σε «monitor mode» έτσι ώστε να κατασκοπεύουν όλες τις επικοινωνίες που λαμβάνουν χώρα στο ασύρματο μέσο και να αποθηκεύουν τα πακέτα που έλαβαν κατά τύχη για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Η λειτουργία ενός υπολογιστή με ασύρματη κάρτα δικτύου σε monitor mode δίνει σε αυτόν τη δυνατότητα να παρακολουθεί όλη την κυκλοφορία που παραλαμβάνεται από το ασύρματο δίκτυο.

Επιπλέον, κάθε κόμβος στέλνει με broadcast μετάδοση αναφορές λήψης (reception reports) για να ενημερώσει τους γείτονες του σχετικά με τα πακέτα που έχει αποθηκεύσει. Οι αναφορές λήψης στέλνονται μαζί με τα πακέτα δεδομένων που μεταδίδει ο κάθε κόμβος. Ένας κόμβος που δεν έχει πακέτα δεδομένων προς αποστολή στέλνει περιοδικά τις αναφορές λήψης μέσα σε ειδικά πακέτα ελέγχου.

## 2. Ευκαιριακή κωδικοποίηση (Opportunistic Coding)

Η ερώτηση κλειδί είναι το ποια πακέτα πρέπει να κωδικοποιηθούν μαζί έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η ρυθμοαπόδοση του δικτύου. Ένας κόμβος μπορεί να έχει πολλαπλές επιλογές, αλλά πρέπει να στοχεύει πάντα στην μεγιστοποίηση του αριθμού των μη κωδικοποιημένων πακέτων που παραδίδονται με μια μοναδική μετάδοση, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι κάθε προτιθέμενος επόμενος κόμβος (next-hop) έχει την απαραίτητη πληροφορία για να κωδικοποιήσει το δικό του πακέτο.

Τα παραπάνω μπορούν να επεξηγηθούν καλύτερα με ένα παράδειγμα. Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 7, ο κόμβος B έχει τέσσερα πακέτα στην ουρά εξόδου του  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  και  $p_4$ . Οι γείτονες του όμως έχουν «ακούσει» κάποια από αυτά τα πακέτα (βλέπε Packet Pool των κόμβων).



Εικόνα 7: Στιγμιότυπο παραδείγματος

Ο πίνακας στην Εικόνα 8 δείχνει το επόμενο hop του κάθε πακέτου που βρίσκεται στην ουρά του B. Όταν το επίπεδο MAC επιτρέψει στον B να μεταδώσει, τότε ο B παίρνει το πακέτο  $p_1$  από την κορυφή της ουράς του.

Packets in B's Queue	Next Hop
P1	A
P2	C
P3	C
P4	D

Εικόνα 8: Επόμενα hops των πακέτων στην ουρά του B

Υποθέτοντας ότι ο B γνωρίζει ποια πακέτα έχει κάθε γειτονικός κόμβος, έχει μερικές επιλογές κωδικοποίησης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9. Θα μπορούσε για παράδειγμα να στείλει το « $p_1$  χορ  $p_2$ ». Από τη στιγμή που ο C έχει αποθηκευμένο το  $p_1$ , θα μπορούσε κάνοντας την ίδια πράξη χορ μεταξύ του  $p_1$  και του ( $p_1$  χορ  $p_2$ ) να αποκτήσει το  $p_2$ . Όμως, ο κόμβος A δεν έχει το  $p_2$  οπότε και δε θα μπορέσει να αποκωδικοποιήσει το πακέτο. Έτσι, η αποστολή του « $p_1$  χορ  $p_2$ » θα ήταν μια κακή απόφαση κωδικοποίησης για τον B, καθώς μόνο ένας γείτονας μπορεί να επωφεληθεί από αυτή τη μετάδοση. Η δεύτερη επιλογή της Εικόνας 9 δείχνει μια καλύτερη απόφαση κωδικοποίησης για τον B. Στέλνοντας « $p_1$  χορ  $p_3$ » θα επέτρεπε και στο C αλλά και στον A να αποκωδικοποιήσουν και να αποκτήσουν τα προτιθέμενα πακέτα με μια μοναδική μετάδοση. Η καλύτερη απόφαση κωδικοποίησης για τον B θα ήταν να στείλει το « $p_1$  χορ  $p_2$  χορ  $p_3$ », το

οποίο θα επέτρεπε και στους τρεις γειτονικούς κόμβους να αποκτήσουν τα αντίστοιχα πακέτα με μια και μοναδική μετάδοση (δηλαδή ο A το  $p_1$ , ο C το  $p_3$  και ο D το  $p_4$ ).

<u>Coding Option</u>	<u>Is it good?</u>
$P_1 + P_2$	Bad Coding (C can decode but A can't)
$P_1 + P_3$	Better Coding (Both A and C can decode)
$P_1 + P_3 + P_4$	Best Coding (Nodes A, C, and D can decode)

Εικόνα 9: Πιθανές επιλογές κωδικοποίησης

Ο αλγόριθμος κωδικοποίησης πρέπει να εξασφαλίσει ότι όλα τα επόμενα hops ενός κωδικοποιημένου πακέτου μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα αντίστοιχα πακέτα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τον παρακάτω απλό κανόνα:

*Για να μεταδώσεις  $n$  πακέτα  $p_1, p_2, \dots, p_n$  σε  $n$  επόμενα hops  $r_1, r_2, \dots, r_n$  ένας κόμβος μπορεί να κάνει τη πράξη XOR μεταξύ και των  $n$  πακέτων μαζί μόνο αν κάθε next-hop  $r_i$  έχει και τα  $n-1$  πακέτα  $p_j$  για  $j \neq i$ .*

Αυτός ο κανόνας εξασφαλίζει ότι κάθε επόμενο hop μπορεί να αποκωδικοποιήσει τα XOR-ed πακέτα έτσι ώστε να εξάγει το αρχικό πακέτο που ήταν και ο στόχος. Κάθε φορά που ένας κόμβος έχει ευκαιρία να μεταδώσει ένα πακέτο, επιλέγει το μεγαλύτερο  $n$  που ικανοποιεί τον παραπάνω κανόνα για να μεγιστοποιήσει το κέρδος της κωδικοποίησης.

### 3. Μάθηση γειτονική κατάσταση

Ένα σημαντικό ζήτημα παραμένει ο τρόπος με τον οποίο ένας κόμβος μαθαίνει ποια πακέτα έχουν οι γείτονές του στη διάθεση τους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε κόμβος ανακοινώνει στους γείτονες του τα πακέτα που έχει αποθηκεύσει μέσω των αναφορών λήψης. Παρόλαυτα, σε στιγμές μεγάλης συμφόρησης, οι αναφορές λήψης μπορεί να χαθούν εξαιτίας των συγκρούσεων, ενώ σε στιγμές «χαλαρής» κίνησης, μπορεί να φτάσουν πολύ καθυστερημένα, αφού ο κόμβος έχει ήδη πάρει μια διαφορετική απόφαση κωδικοποίησης από τη βέλτιστη. Επομένως, ένας κόμβος δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στις αναφορές λήψης και ίσως χρειάζεται να μαντεύει αν ένας γείτονας έχει ένα

συγκεκριμένο πακέτο. Το COPE διαθέτει έναν έξυπνο μηχανισμό μέσω του οποίου υπολογίζει την πιθανότητα ένας συγκεκριμένος γείτονας να έχει ένα πακέτο.

Μερικές φορές, ένας κόμβος μπορεί να κάνει μια λανθασμένη πρόβλεψη, το οποίο θα αναγκάσει το κωδικοποιημένο πακέτο να μην αποκωδικοποιηθεί σε κάποιο επόμενο hop. Σε αυτήν την περίπτωση, το σχετικό πακέτο αναμεταδίδεται, κωδικοποιημένο με ένα καινούριο σύνολο μη κωδικοποιημένων πακέτων.

## 2.1.2 Τεχνικά ζητήματα του «COPE»

### Αλγόριθμος κωδικοποίησης πακέτων

Για να δημιουργηθεί αυτό το σχήμα κωδικοποίησης, πάρθηκαν μερικές αποφάσεις όσον αφορά το σχεδιασμό. Πρώτα απ'όλα, το σχήμα βασίστηκε στην αρχή της μη καθυστέρησης των πακέτων. Όταν το ασύρματο κανάλι είναι διαθέσιμο, ο κόμβος παίρνει το πακέτο από την κεφαλή της ουράς, ελέγχει ποια άλλα πακέτα στην ουρά μπορούν να κωδικοποιηθούν με αυτό το πακέτο, κάνει την πράξη XOR μεταξύ των πακέτων και στέλνει με broadcast μετάδοση την XOR-ed έκδοση. Αν δεν υπάρχουν ευκαιρίες κωδικοποίησης, ο κόμβος δεν περιμένει καθόλου για την άφιξη ενός ταιριαστού κωδικοποιήσιμου πακέτου.

Δεύτερον, το COPE δείχνει προτίμηση στην κωδικοποίηση πακέτων που έχουν παρόμοιο μέγεθος, επειδή η πράξη XOR ανάμεσα σε μικρά πακέτα με μεγαλύτερα μειώνει τα αποθέματα χωρητικότητας του δικτύου. Στην περίπτωση που μια τέτοια πράξη (ανάμεσα σε πακέτα διαφορετικού μεγέθους) είναι αναγκαστική τα μικρότερα πακέτα «γεμίζουν» με μηδενικά. Ο παραλήπτης μπορεί πολύ εύκολα να απομακρύνει τα επιπρόσθετα μηδενικά ελέγχοντας το πεδίο με το μέγεθος του πακέτου στο IP header του κάθε πακέτου.

Επίσης, στο COPE ποτέ δεν κωδικοποιούνται μαζί πακέτα που προορίζονται για το ίδιο επόμενο hop, από τη στιγμή που το επόμενο hop δε θα μπορεί μετά να τα αποκωδικοποιήσει.

### Αποκωδικοποίηση πακέτων

Η αποκωδικοποίηση πακέτων αποτελεί απλή διαδικασία. Κάθε κόμβος διαθέτει μια δεξαμενή πακέτων (Packet Pool), στην οποία κρατάει ένα αντίγραφο κάθε μη κωδικοποιημένου πακέτου που έχει λάβει ή στείλει (με το δικό του ID). Όταν

ένας κόμβος λάβει ένα κωδικοποιημένο πακέτο που αποτελείται από  $n$  μη κωδικοποιημένα, τότε ψάχνει τα IDs των πακέτων που βρίσκονται στη δεξαμενή ένα προς ένα και επανακτά το ζητούμενο πακέτο αν είναι δυνατόν. Τελικά, κάνει την πράξη XOR μεταξύ των  $n-1$  πακέτων και του λαμβανόμενου πακέτου για να επανακτήσει το αρχικό πακέτο.

## Ψευδό-broadcast μεταδόσεις

Το 802.11 πρωτόκολλο ρυθμίζεται για να λειτουργεί είτε για unicast (μονοεκπομπή) είτε για broadcast μεταδόσεις. Από τη στιγμή που το COPE στέλνει με broadcast μεταδόσεις τα κωδικοποιημένα πακέτα στα επόμενα hops, η φυσιολογική προσέγγιση θα ήταν να χρησιμοποιηθούν broadcast μεταδόσεις. Δυστυχώς όμως, αυτή δεν είναι τόσο καλή λύση εξαιτίας της χαμηλής αξιοπιστίας που προσφέρει αλλά και της αδυναμίας λειτουργίας του αλγορίθμου «back off».

Ειδικότερα, στο 802.11 unicast mode, τα πακέτα επιβεβαιώνονται αμέσως από τα προτιθέμενα επόμενα hops. Το πρωτόκολλο 802.11 εξασφαλίζει αξιοπιστία μέσω της αναμετάδοσης του πακέτου στο επίπεδο MAC για έναν συγκεκριμένο αριθμό φορών μέχρι να παραληφθεί μια συγχρονισμένη επιβεβαίωση. Η μη άφιξη μιας επιβεβαίωσης ερμηνεύεται ως ένα σήμα σύγκρουσης, στο οποίο ο αποστολέας αντιδρά περιμένοντας για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στους υπόλοιπους κόμβους να μοιραστούν το μέσο (λειτουργία του «back off» αλγορίθμου).

Αντιθέτως, η broadcast επικοινωνία υστερεί τόσο σε αξιοπιστία όσο και στη λειτουργία του «back off» μηχανισμού. Ένα broadcast πακέτο έχει πολλούς προτιθέμενους παραλήπτες οπότε και δεν είναι ξεκάθαρο ποιος πρέπει να στείλει την επιβεβαίωση παραλαβής. Με την απουσία λοιπόν των επιβεβαιώσεων, το broadcast mode δεν προσφέρει αναμεταδόσεις και συνεπώς ούτε αξιοπιστία. Επιπλέον, μια broadcast πηγή δεν μπορεί να ανιχνεύσει συγκρούσεις, κι έτσι δεν μπορεί να κάνει χρήση του «back off» μηχανισμού. Αν πολλοί κόμβοι μοιράζονται το broadcast κανάλι, και καθένας από αυτούς εξακολουθούν να στέλνουν πακέτα με τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό, η ρυθμαπόδοση του δικτύου θα είναι πολύ φτωχή, εξαιτίας των υψηλών ρυθμών συγκρούσεων.

Η λύση που προτείνεται από το COPE είναι οι ψευδό-broadcast μεταδόσεις, οι οποίες βασίζονται στο 802.11 unicast mode και καρπώνονται από αυτό την αξιοπιστία του και τον «back off» μηχανισμό. Στο πεδίο προορισμού του επιπέδου σύνδεσης (link layer) τοποθετείται η MAC διεύθυνση ενός από τους προτιθέμενους παραλήπτες. Μια XOR-επικεφαλίδα προστίθεται μετά την επικεφαλίδα επιπέδου σύνδεσης, περιέχοντας όλα τα επόμενα hops του πακέτου.



Αφού όλοι οι κόμβοι έχουν ρυθμιστεί να λειτουργούν σε monitor mode, μπορούν να ακούσουν κατά τύχη πακέτα που δεν προορίζονται για αυτούς. Όταν ένας κόμβος παραλαμβάνει ένα πακέτο με διαφορετική MAC διεύθυνση από τη δική του, τότε ελέγχει την XOR-επι κεφαλίδα για να δει άμα αποτελεί ένα επόμενο hop. Αν αποτελεί, επεξεργάζεται το πακέτο εκτενέστερα, διαφορετικά αποθηκεύει το πακέτο σε έναν buffer ως ένα τυχαία παρεληφθέν πακέτο. Αφού όλα τα πακέτα στέλνονται χρησιμοποιώντας 802.11 unicast mode, το επίπεδο MAC μπορεί να ανιχνεύει συγκρούσεις και να κάνει κατάλληλη χρήση του «back off» μηχανισμού.

Η ψευδό-broadcast μετάδοση είναι επίσης πιο αξιόπιστη από την απλή broadcast. Το πακέτο αναμεταδίδεται πολλές φορές μέχρι ο επιλεγμένος παραλήπτης να λάβει το πακέτο και να το επιβεβαιώσει ή μέχρι τελικά να ξεπεραστεί ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων προσπαθειών. Ένα επιθυμητό αποτέλεσμα αυτών των αναμεταδόσεων είναι ότι οι κόμβοι (όντας σε monitor mode) έχουν πολύ περισσότερες ευκαιρίες να ακούσουν το πακέτο.

### 2.1.3 Περιβάλλον πειραμάτων – Αποτελέσματα υλοποίησης

Το COPE υλοποιήθηκε με το εργαλείο Click (περισσότερα για το Click σε επόμενη ενότητα). Οι μετρήσεις έγιναν σε περιβάλλον με 20 κόμβους σε δυο ορόφους, διασκορπισμένους σε γραφεία, διαδρόμους κλπ.. Αυτές έδειξαν μια μεγάλη αύξηση της ρυθμιστικής του δικτύου ή οποία βέβαια παρουσίασε μια διακύμανση επηρεαζόμενη από παράγοντες όπως η συμφόρηση του δικτύου και το πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς που χρησιμοποιούνταν (TCP ή UDP).

## 2.2 Μελέτη - Ανάλυση της υλοποίησης «MORE»

### 2.2.1 Εισαγωγή – Ευκαιριακή Δρομολόγηση (Opportunistic Routing)

Το MORE (Multi-path Opportunistic Routing Engine) αποτελεί μια προσέγγιση της δικτυακής κωδικοποίησης στην ευκαιριακή δρομολόγηση. Η ευκαιριακή δρομολόγηση εκμεταλλεύεται τη broadcast φύση του ασύρματου μέσου για να αυξήσει τη ρυθμιστική του δικτύου. Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης αποφασίζουν για το next-hop του πακέτου πριν τη μετάδοση. Όμως το ασύρματο είναι ένα μέσο με δυναμικά χαρακτηριστικά. Κάθε φορά που ένας κόμβος μεταδίδει, ένα διαφορετικό υποσύνολο των κόμβων μπορεί να παραλάβει το πακέτο. Υπάρχει πάντα πιθανότητα ένα πακέτο να «ακουστεί»-ληφθεί από κόμβους αρκετά κοντύτερα στον προορισμό από το προεπιλεγμένο

nexthop του. Ένα παραδοσιακό πρωτόκολλο δρομολόγησης αγνοεί αυτές τις «τυχερές» λήψεις και συνεχίζει να προωθεί το πακέτο hop-by-hop στην επιλεγμένη διαδρομή. Αντιθέτως, με την ευκαιριακή δρομολόγηση ένα πακέτο δεν αποστέλλεται σε ένα συγκεκριμένο nexthop. Ανάμεσα στους κόμβους που θα ακούσουν το πακέτο αυτός που είναι πιο κοντά στον προορισμό θα επιλεγθεί ως το nexthop. Συνεπώς, εκμεταλλεύεται αυτές τις λήψεις και τα πολλαπλά μονοπάτια για να αυξήσει τη ρυθμοαπόδοση του δικτύου.

Το πρώτο κέρδος αυτής της προσέγγισης είναι ότι κάθε μετάδοση έχει πολλές ευκαιρίες να παραληφθεί από έναν κόμβο πλησιέστερα στον προορισμό. Το δεύτερο κέρδος όσον αφορά τη ρυθμοαπόδοση του δικτύου οφείλεται στην ικανότητα της ευκαιριακής δρομολόγησης να χρησιμοποιεί μεγάλες και σχετικά χαμηλής ποιότητας συνδέσεις. Ας θεωρήσουμε το σενάριο της Εικόνας 10, όπου το καλύτερο μονοπάτι ανάμεσα στην πηγή (SRC) και στον προορισμό (DST) είναι SRC – A – B – C – DST. Εξαιτίας της δυναμικής και τυχαίας φύσης του ασύρματου μέσου, κάποιες από τις μεταδόσεις της πηγής μπορεί να παραληφθούν απευθείας από τον κόμβο C ή και από τον προορισμό τον ίδιο. Έτσι, η ευκαιριακή δρομολόγηση εκμεταλλεύεται τέτοια γεγονότα για να παραλείψει κάποια hops, να μειώσει τον αριθμό των μεταδόσεων και να αυξήσει τη ρυθμοαπόδοση του δικτύου.



Εικόνα 10: Opportunistic Routing - ExOR

Το ExOR αποτελεί το πρώτο πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας. Η λειτουργία του μπορεί να περιγραφεί με την τοπολογία της Εικόνας 10. Η πηγή μεταδίδει μια παρτίδα από πακέτα (π.χ. 10-100 πακέτα). Κάθε πακέτο περιέχει ένα header που περιέχει με τη σειρά του όλους τους πιθανούς ενδιάμεσους κόμβους-«διαβιβαστές» ταξινομημένους ανάλογα με την απόστασή τους από τον προορισμό, δηλαδή C, B, A. Η απόσταση μετρείται χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση πιθανότητας παράδοσης των πακέτων. Οι υποψήφιοι ενδιάμεσοι κόμβοι αποθηκεύουν προσωρινά τα πακέτα που λαμβάνουν και περιμένουν το τέλος της παρτίδας των πακέτων. Όταν η πηγή ολοκληρώσει τη μετάδοση της παρτίδας των πακέτων, οι ενδιάμεσοι κόμβοι προωθούν τα πακέτα που έχουν αποθηκεύσει προσωρινά ανάλογα με τη σειρά που έχουν. Στο παράδειγμά μας, ο κόμβος C είναι ο πρώτος που θα μεταδώσει τα πακέτα που έχει λάβει, ακολουθούμενος από τον B και τέλος από τον A. Τα προωθούμενα πακέτα περιέχουν ένα χάρτη της παρτίδας των πακέτων (batch-map) που χρησιμοποιείται από κάθε κόμβο που μεταδίδει για να διαδώσει στους

υπόλοιπους κόμβους τη γνώση του σχετικά με το ποια πακέτα έχουν ληφθεί από ποιους κόμβους. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι χρησιμοποιούν αυτή τη πληροφορία για να αποφύγουν την προώθηση πακέτων που έχουν ήδη ληφθεί από κόμβους πλησιέστερα στον προορισμό.

Ο σχεδιασμός του ExOR απαιτεί στενή συνεργασία των κόμβων. Η συνεργασία επιβάλλεται χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους:

1. Τα «batch-maps» που όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιούνται για ανταλλαγή πληροφορίας σχετικά με το ποιοι κόμβοι έχουν παραλάβει ποια πακέτα.
2. Μια αυστηρή σειρά με την οποία ένας κόμβος μπορεί να προωθεί τα ληφθέντα πακέτα. Όσο ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταδίδει τα πακέτα που έχει λάβει, το μέσο είναι δεσμευμένο και οι άλλοι κόμβοι δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτό.

Αυτού του είδους όμως η συνεργασία οδηγεί στις παρακάτω δυσάρεστες επιπτώσεις:

- Δεν είναι ξεκάθαρο πόσο χρονικό διάστημα πρέπει να περιμένει ο υποψήφιος ενδιάμεσος κόμβος πριν ξεκινήσει να προωθεί τα πακέτα που παρέλαβε. Το ExOR απαιτεί από έναν κόμβο να περιμένει για να μάθει ποια πακέτα έχουν παραληφθεί από τους κόμβους που είναι πλησιέστερα στον προορισμό. Αν οι αποστάσεις στο δίκτυο είναι μεγάλες, πολλοί κόμβοι που είναι κοντά στον προορισμό δεν θα παραλάβουν καθόλου πακέτα και έτσι δε θα δημιουργήσουν και τα αντίστοιχα batch-maps. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ενδιάμεσος κόμβος θα πρέπει να θέσει ένα ανώτατο χρονικό όριο αναμονής (timeout), το οποίο όμως και πάλι είναι δύσκολο να προσεγγιστεί σωστά, λαμβάνοντας υπόψη τον δυναμικό χαρακτήρα που έχει το δίκτυο.
- Ακόμη κι αν ο ενδιάμεσος κόμβος μπορεί να εκτιμήσει ένα λογικό ανώτατο χρονικό όριο αναμονής, αυτός ο χρόνος αποτελεί ουσιαστικά μια επιπλέον καθυστέρηση η οποία και αυξάνει το συνολικό χρόνο μετάδοσης.
- Η επιβολή αυτής της αυστηρής σειράς μετάδοσης στους ενδιάμεσους κόμβους ουσιαστικά τους αποτρέπει από την παράλληλη προώθηση των πακέτων. Αυτό αποτρέπει την επαναχρησιμοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου και μειώνει τη συνολική ρυθμοαπόδοση του δικτύου.

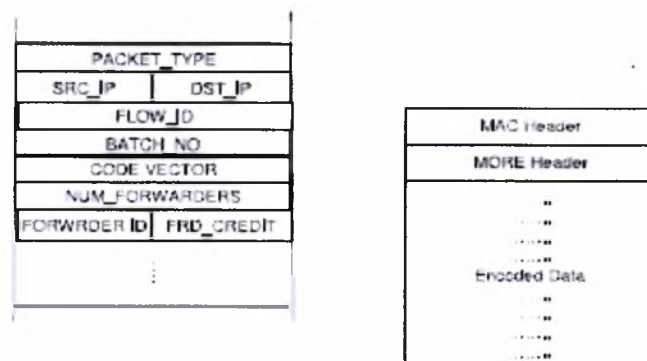


## 2.2.2. Αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης MORE

Το MORE είναι ένα πρωτόκολλο ευκαιριακής δρομολόγησης. Ο σχεδιασμός του βασίζεται στη θεωρία της δικτυακής κωδικοποίησης. Οι δρομολογητές κωδικοποιούν πακέτα που πηγαίνουν στον ίδιο προορισμό μαζί και προωθούν αυτές τις κωδικοποιημένες εκδόσεις. Ο προορισμός αποκωδικοποιεί και ανακτά τα αρχικά πακέτα.

Για λόγους ευκολίας η ανάλυση του πρωτοκόλλου γίνεται χρησιμοποιώντας μια μοναδική ροή. Η περιγραφή φυσικά επεκτείνεται σε πολλαπλές ροές. Παρακάτω, αναλύεται η λειτουργία του κάθε κόμβου που συμμετέχει στο δίκτυο:

1. Ο αποστολέας: Στο MORE, η πηγή στέλνει παρτίδες από K πακέτα, όπου το K διαφέρει από παρτίδα σε παρτίδα. Όταν το 801.11 MAC πρωτόκολλο επιτρέπει, η πηγή δημιουργεί έναν τυχαίο γραμμικό συνδυασμό από K πακέτα της τρέχουσας παρτίδας και στέλνει με broadcast μετάδοση το κωδικοποιημένο πακέτο. Κάθε πακέτο MORE περιέχει (στο MORE Header) το διάλυσμα κωδικοποίησης (code vector) που περιγράφει τα περιεχόμενα του σε σχέση με τα μη κωδικοποιημένα πακέτα, τον αριθμό παρτίδας (batch number), την απόσταση αυτού που μεταδίδει από τον προορισμό και ένα πεδίο με τον τύπο του πακέτου που ξεχωρίζει τα πακέτα δεδομένων από τις επιβεβαιώσεις (βλέπε Εικόνα 11). Ο αποστολέας συνεχίζει να μεταδίδει κωδικοποιημένα πακέτα της τρέχουσας παρτίδας μέχρι να λάβει μια επιβεβαίωση από τον προορισμό ότι αυτός με τη σειρά του έχει λάβει K γραμμικώς ανεξάρτητους συνδυασμούς οπότε μπορεί να αποκωδικοποιήσει τα αρχικά πακέτα της παρτίδας. Τότε ο αποστολέας αρχίζει την ίδια διαδικασία για την επόμενη παρτίδα πακέτων.



Εικόνα 11: Μορφή του MORE header ενός πακέτου

2. Ένας ενδιάμεσος κόμβος: Οι κόμβοι ακούν σε όλες τις μεταδόσεις. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο, ελέγχει αν το πακέτο είναι γραμμικώς ανεξάρτητο από αυτά που έχει λάβει προηγουμένως από αυτή την παρτίδα. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας απλή άλγεβρα. Αν το πακέτο δεν είναι γραμμικώς ανεξάρτητο προφανώς αγνοείται. Διαφορετικά ο κόμβος αποθηκεύει προσωρινά το πακέτο μαζί με αυτά που έχουν ληφθεί προηγουμένως από την ίδια παρτίδα. Στη συνέχεια, ο κόμβος ελέγχει αν είναι πλησιέστερα στον προορισμό από το προηγούμενο hop του ληφθέντος πακέτου. Αν αυτό συμβαίνει, τότε η άφιξη του νέου πακέτου ενεργοποιεί τον κόμβο για να κάνει broadcast μετάδοση ενός γραμμικού συνδυασμού των πακέτων της ίδιας παρτίδας με αυτήν του πρόσφατα ληφθέντος.
3. Ο προορισμός: Για κάθε πακέτο που λαμβάνει, ο προορισμός ελέγχει αν είναι γραμμικώς ανεξάρτητος ή όχι, απορρίπτοντας αυτά που δεν είναι. Όταν ο προορισμός έχει  $K$  γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα, μπορεί να τα αποκωδικοποιήσει και να ανακτήσει τα  $K$  αρχικά πακέτα εφαρμόζοντας την παρακάτω απλή αντιστροφή πινάκων:

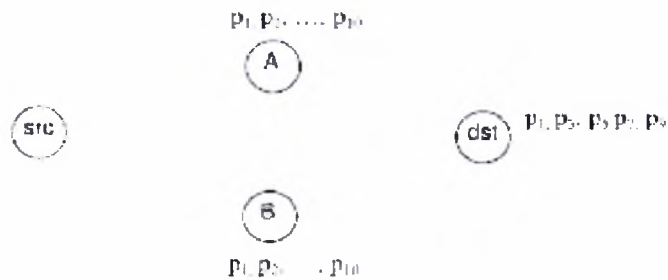
$$\begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{K1} & \dots & c_{KK} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p'_1 \\ \vdots \\ p'_K \end{pmatrix}$$

όπου  $p_i$  είναι ένα αρχικό (μη κωδικοποιημένο) πακέτο,  $p'_i$  είναι ένα κωδικοποιημένο πακέτο του οποίου το διάνυσμα κωδικοποίησης είναι  $(c_{i1}, \dots, c_{iK})$ .

Επιπλέον, όταν ο προορισμός λάβει αρκετά γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα για να αποκωδικοποιήσει την παρτίδα, στέλνει μια επιβεβαίωση στην πηγή κατά μήκος του συντομότερου μονοπατιού. Η επιβεβαίωση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα η πηγή να σταματήσει να στέλνει επιπλέον πακέτα από αυτήν την παρτίδα. Αντίστοιχα, οι ενδιάμεσοι κόμβοι σταματάν να λαμβάνουν γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα από την παρτίδα και συνεπώς σταματάν να μεταδίδουν γραμμικούς συνδυασμούς αυτής της παρτίδας. Τελικά η παρτίδα μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (που έχει οριστεί) θα απομακρυνθεί από τη μνήμη των ενδιάμεσων κόμβων.

## Παράδειγμα

Μετά την αναλυτική περιγραφή τόσο του MORE όσο και της ευκαιριακής δρομολόγησης μπορούμε να δούμε την ακριβή λειτουργία τους στο παράδειγμα της Εικόνας 12, όπου ο στόχος είναι να παραδοθεί ένα αρχείο 10 πακέτων από την πηγή (src) στον προορισμό (dst). Όταν η πηγή μεταδίδει αυτά τα 10 πακέτα, ο προορισμός λαμβάνει κάποια από αυτά (ας υποθέσουμε τα περιττά πακέτα 1,3,5,7,9), τη στιγμή που οι κόμβοι A και B λαμβάνουν όλα τα πακέτα. Χωρίς κωδικοποίηση, οι A και B χρειάζεται να γνωρίζουν ποια πακέτα ο προορισμός έχει ήδη παραλάβει έτσι ώστε να αποφύγουν τη μετάδοση περισσιων πακέτων. Επιπλέον, χρειάζεται να συνεργαστούν μεταξύ τους για να βεβαιωθούν ότι δε θα προωθήσουν τα ίδια πακέτα. Ωστόσο, ένας κόμβος μπορεί να ανακτήσει τα 10 αρχικά πακέτα από οποιουσδήποτε 10 γραμμικώς ανεξάρτητους συνδυασμούς αυτών των πακέτων. Ο προορισμός (dst) στο παράδειγμα μας ήδη έχει 5 από τα αρχικά πακέτα, δηλαδή 5 γραμμικώς ανεξάρτητους συνδυασμούς. Έτσι, μπορεί να ανακτήσει το αρχείο αποκτώντας οποιουσδήποτε επιπλέον 5 γραμμικώς ανεξάρτητους συνδυασμούς. Ως εκ τούτου, στο MORE, ο A και ο B στέλνουν με broadcast μεταδόσεις τυχαίους γραμμικούς συνδυασμούς των πακέτων που λαμβάνουν. Επειδή μάλιστα είναι τυχαία παραγόμενοι, αυτοί οι γραμμικοί συνδυασμοί είναι με μεγάλη πιθανότητα ανεξάρτητοι. Όταν λοιπόν ο προορισμός λάβει 5 επιπλέον τέτοια κωδικοποιημένα πακέτα, ανακτά ολόκληρο το αρχείο εφαρμόζοντας μια απλή αντιστροφή πινάκων (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως). Τότε, επίσης ο προορισμός στέλνει με broadcast μετάδοση την επιβεβαίωση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα οι ενδιαμέσοι κόμβοι να σταματήσουν την προώθηση πακέτων από αυτό το αρχείο.



Εικόνα 12: Παράδειγμα λειτουργίας του MORE

### 2.2.3 Πρακτικά ζητήματα του MORE

Το MORE χρησιμοποιεί κάποιες τεχνικές για να παράγει γρήγορη και αποδοτική κωδικοποίηση και να βεβαιωθεί ότι οι δρομολογητές μπορούν εύκολα να υποστηρίξουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Αναλυτικότερα, το MORE καταρχήν κωδικοποιεί μόνο γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα, αφού ο ενδιάμεσος κόμβος απορρίπτει αυτά που δεν είναι. Έτσι, ο αριθμός  $K$  των πακέτων μιας παρτίδας είναι ουσιαστικά το άνω όριο του αριθμού των πακέτων που αποθηκεύονται προσωρινά στον ενδιάμεσο κόμβο και που συνδυάζονται μαζί για να παράγουν ένα κωδικοποιημένο πακέτο.

Όσον αφορά τον έλεγχο για το αν τα πακέτα είναι γραμμικώς ανεξάρτητα, αυτός γίνεται (από τον ενδιάμεσο κόμβο) μόνο στα διανύσματα κωδικοποίησης. Τα δεδομένα του κάθε πακέτου δεν χρησιμοποιούνται παρά μόνο όταν ο ενδιάμεσος κόμβος χρειαστεί να μεταδώσει ένα γραμμικό συνδυασμό από την παρτίδα.

Επίσης, το MORE εκμεταλλεύεται τον χρόνο που το μέσο δεν είναι διαθέσιμο για να προϋπολογίσει έναν γραμμικό συνδυασμό, έτσι ώστε να είναι έτοιμο το κωδικοποιημένο πακέτο όταν το μέσο γίνει διαθέσιμο. Αυτή η λειτουργία εξοικονομεί αρκετό χρόνο και κάνει την κωδικοποίηση ακόμη πιο αποδοτική.

### 2.2.4 Περιβάλλον πειραμάτων – Αποτελέσματα υλοποίησης

Το MORE υλοποιήθηκε κι αυτό με το εργαλείο Click. Οι μετρήσεις έγιναν σε περιβάλλον με 25 κόμβους διασκορπισμένους σε τρεις ορόφους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ένα μέσο κέρδος της ρυθμαπόδοσης του δικτύου της τάξεως του 60% σε σχέση με κάποιο πρωτόκολλο παραδοσιακής δρομολόγησης. Τέλος, η απόδοση του MORE είναι καλύτερη για μεταδόσεις μεγάλων αρχείων και η χρήση του MORE συνίσταται για αρχεία που αποτελούνται από 16 πακέτα και πάνω.

## 2.3 Το εργαλείο Click

Το εργαλείο Click, με το οποίο όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υλοποιήθηκαν τόσο το COPE όσο και το MORE, είναι μια νέα 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.

## 3. Υλοποίηση πρωτοκόλλου δικτυακής κωδικοποίησης με C Sockets

### 3.1 Ανάλυση του περιβάλλοντος εκτέλεσης

Αρχικά και πριν την ανάλυση του υλοποιημένου πρωτοκόλλου και την τεκμηρίωση όλων των επιλογών περιγράφονται σε θεωρητικό επίπεδο:

- η λειτουργία των ασύρματων καρτών δικτύου
- οι κατηγορίες ασύρματων δικτύων
- ο προγραμματισμός δικτύων με τη χρήση Sockets
- η multicast επικοινωνία (πολυεκπομπή)

#### 3.1.1 Ασύρματες κάρτες δικτύου

Η όλη λειτουργία που αναπτύσσει ένας σταθμός στο δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένος, υλοποιείται μέσω του Οδηγού (Driver) της ασύρματης κάρτας δικτύου (Network Interface Card, NIC) που διαθέτει. Το σύνολο του πρωταρχικού IEEE 802.11 πρωτοκόλλου και των επεκτάσεων του εκτελείται μέσω του driver της κάρτας. Για κάθε κάρτα δικτύου που έχει δημιουργηθεί, υπάρχει και το αντίστοιχο «κοστούμι» που οργανώνει και περιγράφει τις λειτουργίες που πρέπει να υλοποιεί αυτή η κάρτα. Το «κοστούμι» αυτό λέγεται driver και αποτελεί την διεπαφή της κάρτας με τον πυρήνα του Λειτουργικού Συστήματος. Επομένως NIC-driver αποτελούν έναν αδιάσπαστο συνδυασμό που πάντα συνυπάρχουν και το ένα προϋποθέτει το άλλο.

Ο συγκεκριμένος driver δεν είναι ένα σταθερό κομμάτι του λειτουργικού συστήματος. Υπάρχουν driver που αποτελούν πάγιο μέρος του λειτουργικού συστήματος και ξεκινούν να «τρέχουν» μαζί με αυτό. Υπάρχουν όμως και άλλοι σαν αυτόν της ασύρματης κάρτας δικτύου, που «φορτώνονται» και ξεκινούν την λειτουργία τους όταν οι συνθήκες το επιβάλλουν. Για παράδειγμα ο driver της ασύρματης κάρτας δικτύου «φορτώνεται» όταν το σύστημα ανιχνεύσει ότι διαθέτει στους πόρους του και κάποια ασύρματη κάρτα δικτύου. Σ' αυτή την περίπτωση ο driver υλοποιείται με την μορφή ανεξάρτητων υπομονάδων (modules), που έχουν την δυνατότητα να ξεκινούν την εκτέλεση τους αλλά και να την διακόπτουν, χωρίς να προϋποτίθεται η διακοπή της λειτουργίας του συστήματος. Η συμπεριφορά αυτή είναι δικαιολογημένη γιατί η ασύρματη κάρτα δικτύου δεν αποτελεί, τουλάχιστον προς το παρόν, αναπόσπαστο κομμάτι κάθε υπολογιστικού συστήματος. Επομένως, για όλες τις περιπτώσεις που δεν υπάρχει τελικά NIC, αποτελεί κέρδος το να μην αποτελεί επίσης ο αντίστοιχος driver κομμάτι του λειτουργικού συστήματος, καθότι δεν δεσμεύει χώρο μνήμης από την περιορισμένη μνήμη του kernel.



Προφανώς σήμερα στο εμπόριο υπάρχουν αρκετές κάρτες δικτύου με τους αντίστοιχους driver. Η επιλογή μεταξύ αυτών είναι εξίσου ένα δίλλημα. Οι υπάρχουσες επιλογές είναι οι συνδυασμοί HostAP - Intersil, Madwifi - Atheros, Intel I2000 - Centrino, Linkys - Open Source Firmware κλπ. Οι μετρήσεις και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τον συνδυασμό Madwifi – Atheros, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός συνδυασμός.

Open Source Driver	Supported Chipset
HostAP	Intersil Prism
Intel Pro/Wireless	Intel
MadWiFi	Atheros

Εικόνα 13: Συνδυασμοί ασύρματων καρτών και των αντίστοιχων drivers

### 3.1.2. 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*

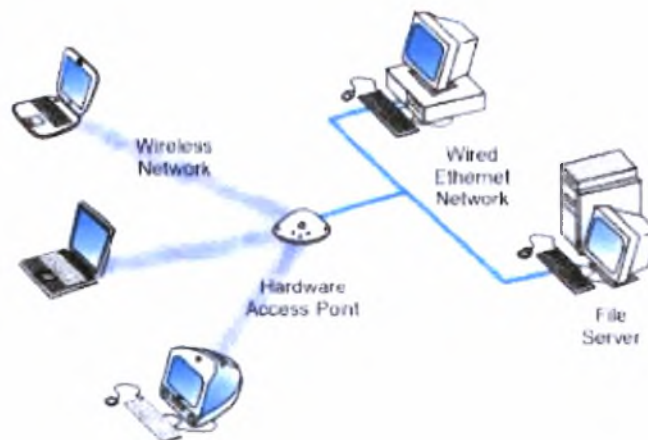
Στα αδόμητα δίκτυα κάθε υπολογιστής μπορεί να επικοινωνήσει απ' ευθείας με οποιονδήποτε άλλο υπολογιστή. Με τον τρόπο αυτό έχουν όλοι πρόσβαση σε κοινούς πόρους όπως εκτυπωτές ή αρχεία. Επιπλέον μπορούν να επικοινωνήσουν με τον έξω κόσμο, αν ένας από τους υπολογιστές του δικτύου είναι συνδεδεμένος με κάποιο ενσύρματο δίκτυο και παίζει έτσι τον ρόλο της Γέφυρας (Bridge) μεταξύ των δύο δικτύων. Ένα παράδειγμα αδόμητου ασύρματου δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Αδόμητο Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο

### *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 15.



Εικόνα 15: Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο με Υποδομή

Τα πειράματα μας πραγματοποιήθηκαν σε ασύρματο τοπικό δίκτυο με υποδομή.



## Ιδιαιτερότητες της Επικοινωνίας στα Ασύρματα Δίκτυα

Στα ασύρματα δίκτυα οι κόμβοι χρησιμοποιούν ράδιο-σήματα για την επικοινωνία τους. Στην κλασσική 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).

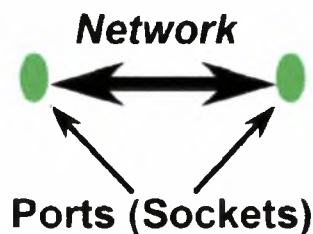
Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα των ασύρματων δικτύων είναι η ύπαρξη εξωτερικής παρεμβολής (interference). Κάποια πηγή εξωτερικής παρεμβολής όπως ένας φούρνος μικροκυμάτων ή ένα άλλο ασύρματο δίκτυο που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα, μπορεί να επηρεάσει έναν κοντινό σ' αυτό κόμβο και να μην του επιτρέψει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

### 3.1.3 Προγραμματισμός Δικτύων με τη χρήση Sockets

Ως socket (υποδοχή) ορίζεται το τελικό σημείο μιας αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ διαδικασιών μέσω ενός δικτύου βασισμένου στο πρωτόκολλο IP, όπως το Διαδίκτυο. Κάθε socket αντιστοιχίζεται στα πλαίσια μιας διεργασίας εφαρμογής ή ενός νήματος και αποτελεί μια διεπαφή μεταξύ μιας διεργασίας εφαρμογής ή ενός νήματος και της στοίβας πρωτοκόλλων TCP/IP που παρέχονται από το λειτουργικό σύστημα.



Εικόνα 16: Αναπαράσταση λειτουργίας Sockets

Ένας απλουστευμένος ορισμός που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ακολουθεί: «Ο συνδυασμός μιας διεύθυνσης IP και ενός αριθμού Θύρας αναφέρεται ως υποδοχή». Μπορείτε επίσης να δείτε το [RFC 147](#) για τον αυθεντικό ορισμό των Sockets όπως αυτός συνδέθηκε με το ARPA Δίκτυο το 1971.

Ένα Socket προσδιορίζεται από το λειτουργικό σύστημα ως μοναδικός συνδυασμός των παρακάτω:

- Πρωτόκολλο (TCP, UDP ή RAW IP)
- Τοπική διεύθυνση IP
- Τοπικός αριθμός Θύρας
- Απομακρυσμένη διεύθυνση IP (μόνο για socket που έχουν ήδη συνδεθεί)
- Απομακρυσμένος αριθμός Θύρας (μόνο για socket που έχουν ήδη συνδεθεί)

Το λειτουργικό σύστημα προωθεί εισερχόμενα IP πακέτα δεδομένων στην αντίστοιχη διεργασία εφαρμογής εξάγοντας την παραπάνω διεύθυνση του Socket από τις επικεφαλίδες των IP, UDP και TCP πρωτοκόλλων.

## Τύποι Sockets

Υπάρχουν τριών ειδών Sockets:

- Datagram Sockets (Υποδοχές Δεδομενογράμματος), τα οποία αφορούν σε ασυνδεδειστροφή sockets και τα οποία κάνουν χρήση του πρωτοκόλλου UDP.
- Stream Sockets (Υποδοχές Ροής), τα οποία αφορούν σε συνδεδειστροφή sockets και τα οποία κάνουν χρήση του πρωτοκόλλου TCP.
- Raw Sockets (ή Raw IP Sockets), τα οποία είναι τυπικά διαθέσιμα σε μεταγωγείς και άλλου είδους δικτυακό εξοπλισμό.

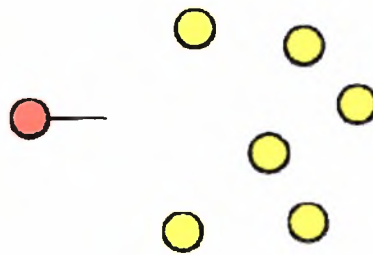
### 3.1.4 Multicast επικοινωνία (πολυεκπομπή)

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.

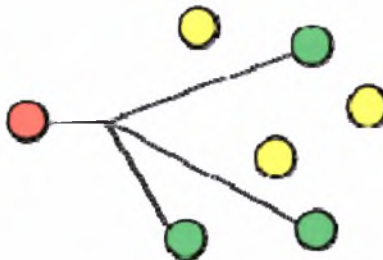
Βασική έννοια στην IP πολυεκπομπή αποτελεί η διεύθυνση IP ομάδας πολυεκπομπής, η οποία χρησιμοποιείται από τους αποστολείς και τους παραλήπτες για την αποστολή και παραλαβή δεδομένων. Οι αποστολείς χρησιμοποιούν τη διεύθυνση ομάδας ως την IP διεύθυνση προορισμού στα πακέτα δεδομένων τους. Οι παραλήπτες 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 17, οι παραλήπτες που προσχώρησαν στην ομάδα του κόκκινου αποστολέα είναι οι πράσινοι κόμβοι (βλέπε Εικόνα 18) 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 17: Γενική εικόνα ενός δικτύου



Εικόνα 18: Εικόνα Δικτύου με επισήμανση του γράφου πολυεκπομπής

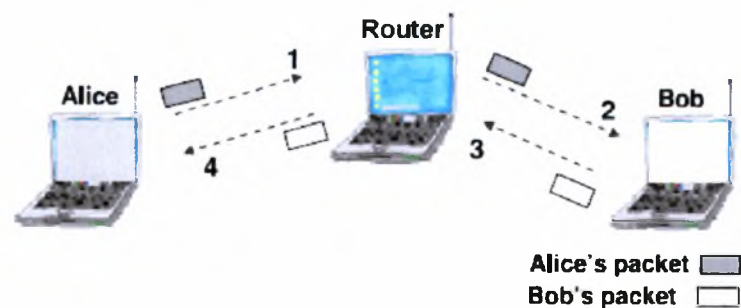
### 3.2 Σχεδιασμός του πρωτοκόλλου – Τεκμηρίωση των επιλογών

Το πρωτόκολλο μας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να λειτουργεί σε ασύρματο δίκτυο με 3 κόμβους (Alice, Bob, Router) αλλά με μερικές τροποποιήσεις του κώδικα μπορεί να υποστηρίξει και δίκτυο με περισσότερους κόμβους. Εφόσον θεωρούμε ότι το υπάρχον τοπικό δίκτυο είναι με υποδομή (βλέπε υποενότητα: Ασύρματα Δίκτυα), ο Router είναι το σημείο πρόσβασης

(Access Point) του δικτύου μέσω του οποίου η Alice και ο Bob ανταλλάσσουν αρχεία μεταξύ τους. Όσον αφορά την τοπικότητα του δικτύου, υποθέτουμε ότι η Alice δεν μπορεί να επικοινωνήσει με τον Bob απευθείας οπότε η μετάδοση των πακέτων γίνεται αναγκαστικά μέσω ενδιάμεσου κόμβου, δηλαδή του Router. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 19, η Alice και ο Bob στέλνουν στον Router τα πακέτα ενός αρχείου που έχουν στην διάθεση τους ο καθένας. Στη συνέχεια ο Router πραγματοποιεί την κωδικοποίηση των δύο πακέτων και στέλνει το εκάστοτε κωδικοποιημένο πακέτο (XOR-ed) με πολυεκπομπή (multicast μετάδοση) στην Alice και στον Bob, οι οποίοι κάνοντας την αποκωδικοποίηση των πακέτων αποκτούν ο ένας το αρχείο του άλλου με 3 μόνο μεταδόσεις. Έτσι, βλέπουμε πριν καν περάσουμε στις μετρήσεις ότι η ανταλλαγή πακέτων με δικτυακή κωδικοποίηση για το σενάριο μας πραγματοποιείται με 1 λιγότερη μετάδοση από την αντίστοιχη ανταλλαγή χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση η οποία απαιτεί 4 μεταδόσεις για την ολοκλήρωσή της (βλέπε Εικόνα 20).



Εικόνα 19: Μετάδοση με δικτυακή κωδικοποίηση



Εικόνα 20: Μετάδοση χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση



Περνώντας σε μια αναλυτικότερη περιγραφή του πρωτοκόλλου, αρχικά η Alice και ο Bob ανταλλάσσουν (μέσω του Router πάλι) επιπρόσθετες πληροφορίες για την ανταλλαγή των αρχείων που πρόκειται να λάβει χώρα. Συγκεκριμένα, οι δύο κόμβοι αλληλοενημερώνονται για το αν προτίθενται να χρησιμοποιήσουν δικτυακή κωδικοποίηση για τη συγκεκριμένη ανταλλαγή των αρχείων. Μόνο αν και οι δύο κόμβοι είναι πρόθυμοι, η μετάδοση θα πραγματοποιηθεί με δικτυακή κωδικοποίηση. Σε διαφορετική περίπτωση, η μετάδοση θα γίνει με τον «παραδοσιακό» τρόπο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20. Επίσης, οι δύο κόμβοι αλληλοενημερώνονται για των αριθμό των πακέτων που θα στείλει ο ένας στον άλλο συνολικά καθώς και για το μέγεθος του τελευταίου πακέτου. Όλη αυτή η πληροφορία περιέχεται στα αρχικά πακέτα που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων, δηλαδή στο πακέτο InfoAlice που δημιουργεί η Alice και στέλνεται μέσω του Router στον κόμβο Bob και αντίστοιχα στο πακέτο InfoBob που δημιουργεί ο Bob και στέλνεται μέσω του Router στον κόμβο Alice. (βλέπε Εικόνα 21).

Μετά τη μετάδοση των πρόσθετων πληροφοριών, οι κόμβοι αρχίζουν τη μετάδοση των αρχείων, πακέτο προς πακέτο. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η Alice και ο Bob στέλνουν στον Router τα πακέτα ενός αρχείου που έχουν στην διάθεση τους ο καθένας. Στη συνέχεια ο Router πραγματοποιεί την κωδικοποίηση των δύο πακέτων και στέλνει το εκάστοτε κωδικοποιημένο πακέτο (XOR-ed) με πολυεκπομπή στην Alice και στον Bob, οι οποίοι αποκωδικοποιούν τα πακέτα. Η όλη διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 21. Στο κάθε πακέτο που μεταδίδεται από τον Router στους άλλους κόμβους προστίθεται στο header του ο αριθμός του πακέτου του συγκεκριμένου αρχείου που μεταδίδεται. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη πρωτίστως για τη σωστή αποκωδικοποίηση των πακέτων. Επειδή το UDP δεν αξιόπιστο πρωτόκολλο, τα κωδικοποιημένα πακέτα μπορούν να παραδοθούν εκτός σωστής σειράς παράδοσης. Έτσι, έχοντας τον αριθμό του πακέτου κάθε φορά, η Alice και ο Bob μπορούν να κάνουν τη σωστή αποκωδικοποίηση με το αντίστοιχο πακέτο του αρχείου που διαθέτει ο καθένας (σε διαφορετική περίπτωση αν υπήρχε παράδοση με λάθος σειρά, θα γινόταν αποκωδικοποίηση-πράξη XOR με λάθος συνδυασμό πακέτων). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε πακέτο ενός αρχείου που μεταδίδεται και σταματάει στο N-οστό πακέτο αν N είναι ο αριθμός των πακέτων του μικρότερου από τα 2 αρχεία που ανταλλάσσονται (περίπτωση άνισων αρχείων) ή και των δύο αρχείων (περίπτωση ίσων αρχείων).

Αν τα αρχεία είναι άνισα, ο κόμβος που στέλνει το μεγαλύτερο αρχείο συνεχίζει την αποστολή του με unicast μεταδόσεις των υπολειπόμενων πακέτων προς τον Router και αυτός απλά τα προωθεί στον κόμβο παραλήπτη. Στην Εικόνα 21, περιγράφουμε γραφικά το πρωτόκολλό θεωρώντας ότι η Alice διαθέτει αρχείο μεγέθους M πακέτων και ο Bob αρχείο μεγέθους N πακέτων, με  $N < M$ . Οι multicast μεταδόσεις συμβολίζονται με διακεκομμένες μπλε γραμμές, ενώ οι

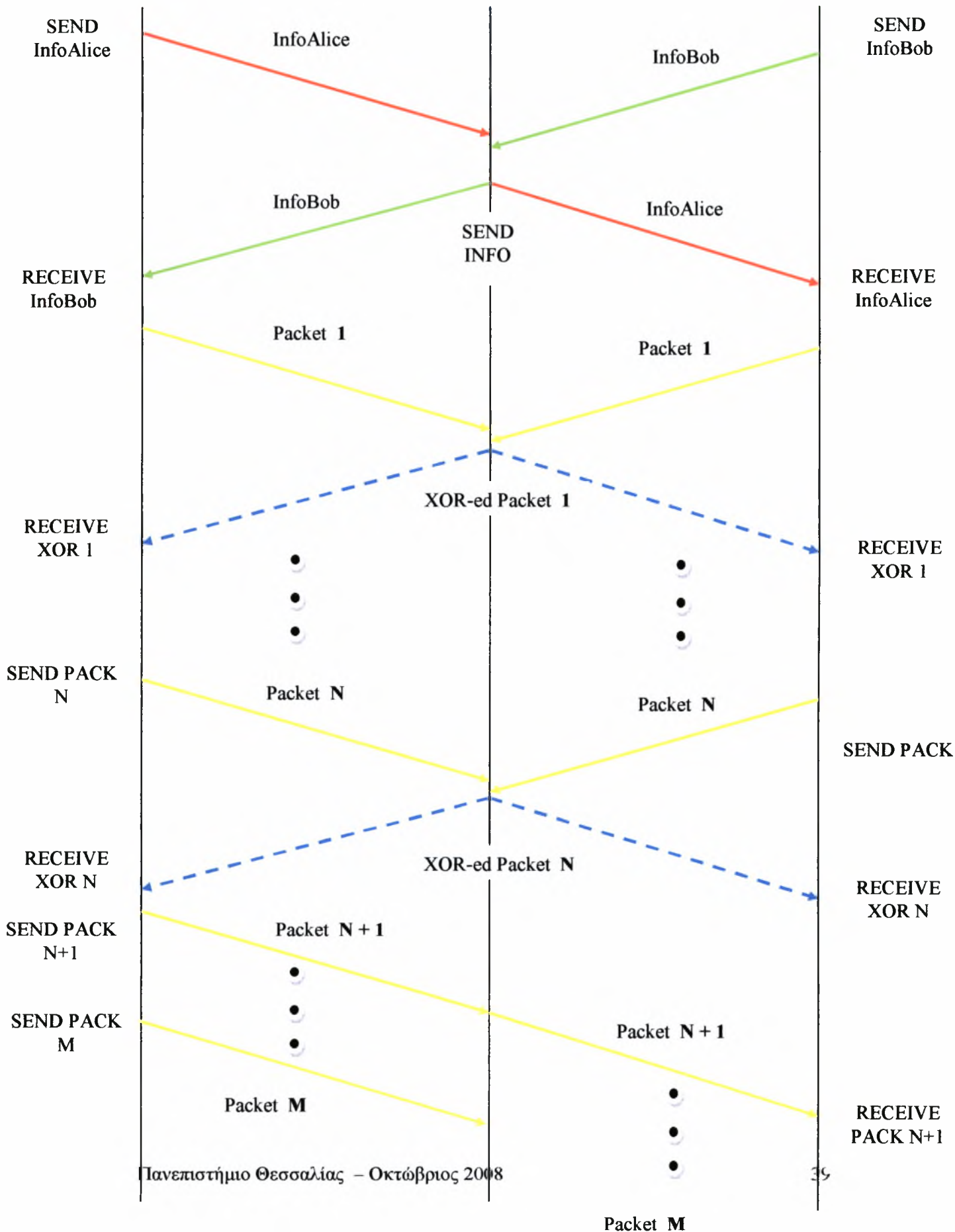
unicast μεταδόσεις των πακέτων του αρχείου συμβολίζονται με κίτρινο χρώμα, συμπεριλαμβάνοντας και τα υπολειπόμενα πακέτα για την περίπτωση των άνισων αρχείων (ακολουθία από το  $N+1$  έως το  $M$ ).

Εικόνα 21: Παρουσίαση του πρωτοκόλλου, χωρίς τη φάση επανεκπομπής χαμένων πακέτων, όπου θεωρούμε πως η Alice διαθέτει αρχείο μεγέθους  $M$  πακέτων και ο Bob αρχείο μεγέθους  $N$  πακέτων, με  $N < M$ .

ALICE

ROUTER

BOB



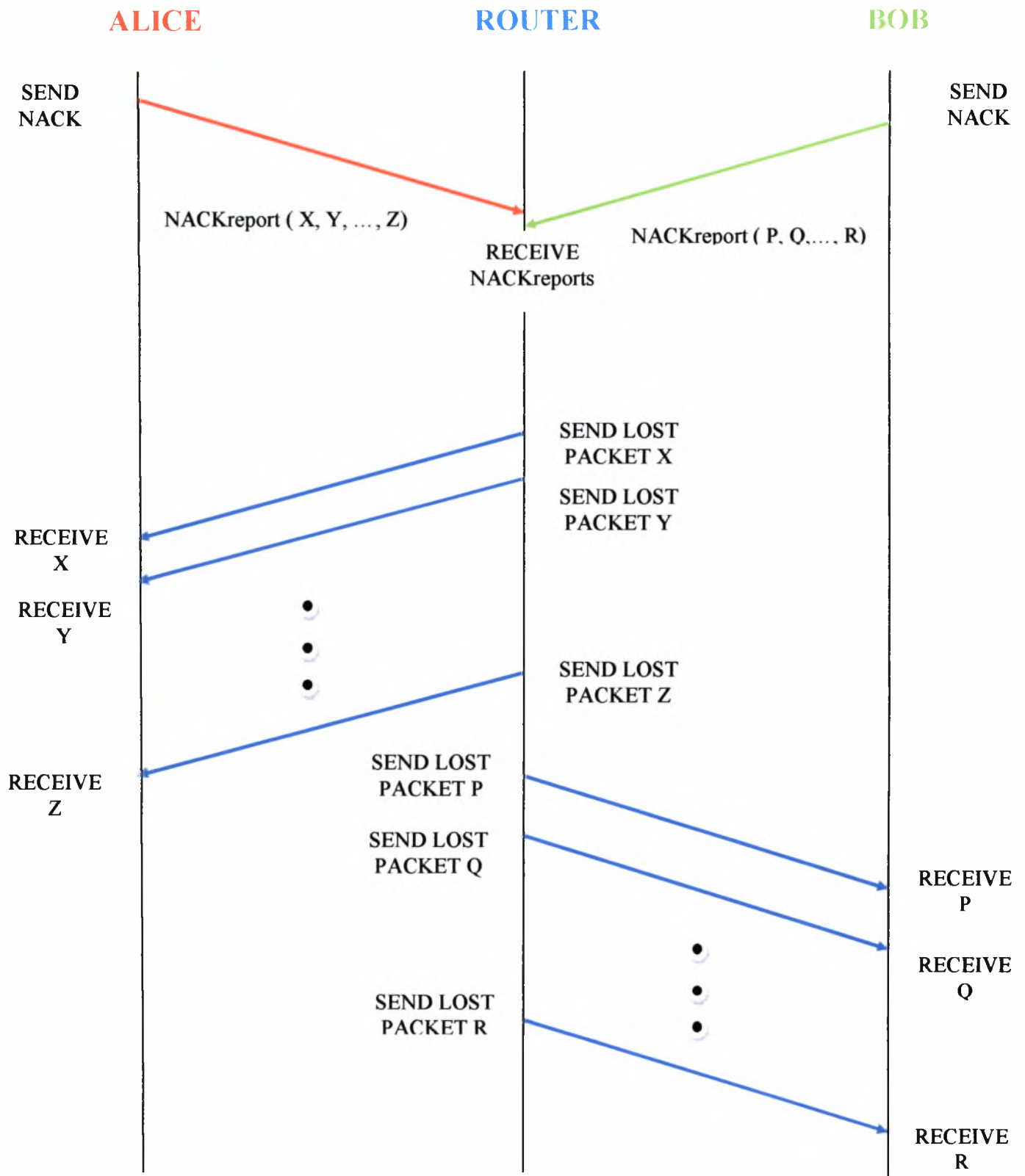


### 3.3 Ανάλυση της υλοποίησης του reliable multicast

Επειδή οι multicast μεταδόσεις γίνονται μέσω UDP το οποίο από τη φύση του δεν είναι αξιόπιστο, τα κωδικοποιημένα πακέτα μπορούν να χαθούν. Το υλοποιημένο πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αποφασίσει εξαρχής αν επιθυμεί όλα αυτά τα πακέτα που χάνονται λόγω της αναξιοπιστίας του UDP να ξαναστέλνονται στους κόμβους με unicast μεταδόσεις. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα αμέσως μετά τις multicast μεταδόσεις από τον Router και πριν την απλή προώθηση των πακέτων του μεγαλύτερου αρχείου στην περίπτωση των άνισων αρχείων. Η Alice και ο Bob έχοντας στη διάθεση τους τη πληροφορία του αριθμού του πακέτου που βρίσκεται στο header κάθε πακέτου μπορούν με ευκολία να ελέγξουν ποια ακριβώς πακέτα χάθηκαν. Έτσι, ελέγχουν ξεχωριστά κάθε πακέτο αν έχει παραληφθεί για να ενημερώσουν αντίστοιχα τον Router. Η αποστολή αρνητικής επιβεβαίωσης (NACKreport) στον Router προτιμήθηκε από την απλή επιβεβαίωση παραλαβής του κάθε πακέτου για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση στο σύστημα. Μάλιστα, με στόχο την μεγαλύτερη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, επιλέχθηκε να μην στέλνεται αρνητική επιβεβαίωση για κάθε πακέτο που χάθηκε ξεχωριστά. Αντιθέτως, αφού έχουν ολοκληρωθεί οι multicast μεταδόσεις, στέλνονται από την Alice και τον Bob στον Router ομαδικές αρνητικές επιβεβαιώσεις (NACKreports) για τα πακέτα που χάθηκαν. Κάθε αρνητική επιβεβαίωση δηλαδή περιλαμβάνει τους αριθμούς πολλών πακέτων που χάθηκαν. Το μέγιστο μέγεθος του πακέτου της αρνητικής επιβεβαίωσης είναι σταθερό (100 bytes) και εφόσον η απαραίτητη πληροφορία που πρέπει να σταλεί (όλοι οι αριθμοί των χαμένων πακέτων) το υπερβαίνει, στέλνονται κι άλλες αρνητικές επιβεβαιώσεις του ίδιου μεγέθους. Στη συνέχεια ο Router λαμβάνοντας αυτή την πληροφορία στέλνει ξεχωριστά στην Alice και στον Bob τα πακέτα που έχασε ο καθένας με unicast μεταδόσεις. Τόσο η αποστολή των αρνητικών επιβεβαιώσεων όσο και η επαναποστολή των χαμένων πακέτων γίνεται μέσω TCP όποτε πλέον οι 2 κόμβοι έχουν με βεβαιότητα τα αρχεία που ήθελαν ολόκληρα και ακέραια. Στα πειράματα μας αυτό ελέγχθηκε και επιβεβαιώθηκε με τη χρήση της εντολής:

- `$ diff transmitted_file decoded_file`

Ο μηχανισμός του reliable multicast αντικατοπτρίζεται γραφικά στην Εικόνα 22, στην παρακάτω σελίδα.



Εικόνα 22: Παρουσίαση του αξιόπιστου μηχανισμού επέκτασης του πρωτοκόλλου, ώστε ο παραλήπτης να λαμβάνει τελικά όσα πακέτα χάθηκαν με την πρώτη φάση της μη αξιόπιστης πολυεκπομπής.

### 3.4 Αποτελέσματα αξιόπιστης και αναξιόπιστης μετάδοσης

Σε αυτό το σημείο παρατίθενται τα αποτελέσματα μετάδοσης ενός αρχείου εικόνας (jpg format) μεγέθους 1.8 Mb αλλά και ενός αρχείου βίντεο (avi format) μεγέθους 4 Mb. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστεί το αποτέλεσμα το οποίο προέκυψε μετά τη φάση της αποκωδικοποίησης στους δύο κόμβους παραλήπτες, τους Alice και Bob, δηλαδή στα αρχεία Decoded of Alice και Decoded of Bob, για τις δύο διαφορετικές επιλογές μετάδοσης, δηλαδή είτε κάνοντας χρήση του Reliable Coding πρωτοκόλλου, είτε του Unreliable Coding πρωτοκόλλου. Στις μεταδόσεις μας δημιουργήσαμε μία συνεχή κίνηση μεταξύ των δύο κόμβων παραληπτών σε ένα περιβάλλον με πολλά τεχνητά εμπόδια (τοίχους, πόρτες κλπ.), ώστε να προκύψει μεγάλη απώλεια πακέτων.

Στην περίπτωση του αξιόπιστου πρωτοκόλλου, η εικόνα που παραλήφθηκε και από τους δύο κόμβους σωστά μετά από τις επανεκπομπές των χαμένων πακέτων ακολουθεί :



Εικόνα 23: Αποτέλεσμα μετάδοσης μέσω του αξιόπιστου πρωτοκόλλου

Στην περίπτωση που η μετάδοση πραγματοποιήθηκε μέσω του μη αξιόπιστου πρωτοκόλλου παρουσιάστηκε απώλεια μεγάλου αριθμού πακέτων, η οποία αντικατοπτρίζεται και στην ποιότητα της εικόνας που παραλήφθηκε.



Εικόνα 24: Μετάδοση μέσω του μη αξιόπιστου πρωτοκόλλου και μορφή αρχείου που παρέλαβε ο κόμβος της Alice



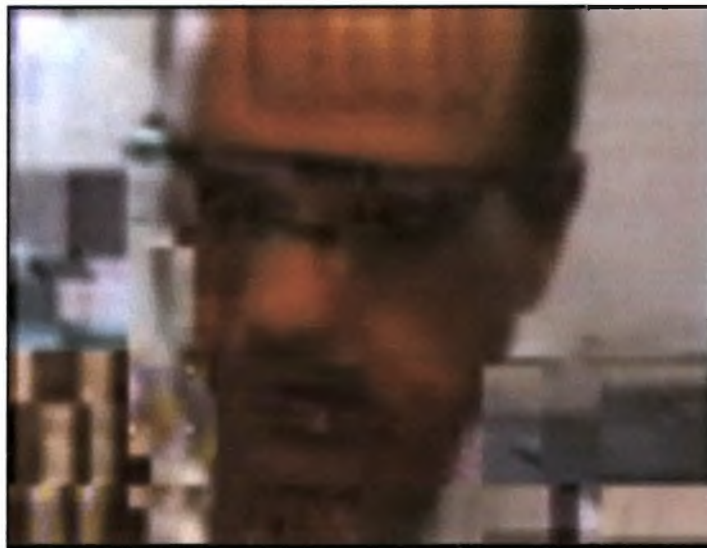
Εικόνα 25: Μετάδοση μέσω του μη αξιόπιστου πρωτοκόλλου και μορφή αρχείου που παρέλαβε ο κόμβος του Bob

Στην περίπτωση μετάδοσης του αρχείου βίντεο, πάλι δημιουργήσαμε σχετική κίνηση μεταξύ των δύο κόμβων παραληπτών με αποτέλεσμα να υπάρξει απώλεια πακέτων της τάξης του 10 % , οπότε είχαμε σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές αλλοίωση στην ποιότητα. Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποια δείγματα από το βίντεο:





Εικόνα 26: Μετάδοση μέσω του αξιόπιστου πρωτοκόλλου και μορφή αρχείου βίντεο που παρέλαβε ο κόμβος του Bob



Εικόνα 27: Μετάδοση μέσω του μη αξιόπιστου πρωτοκόλλου και μορφή αρχείου βίντεο που παρέλαβε ο κόμβος του Bob

Ως συμπέρασμα σχετικά με τη αναγκαιότητα ύπαρξης αξιόπιστου μηχανισμού σε πρωτόκολλα δικτυακής κωδικοποίησης έχουμε να σημειώσουμε πως σε εφαρμογές οι οποίες δεν απαιτούν πιστότητα μετάδοσης είναι περιττή η υλοποίηση του μηχανισμού. Βέβαια πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η επιβάρυνση που προκαλεί ο εκάστοτε μηχανισμός, οπότε ένα πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα θα εξαχθεί παρακάτω στο κείμενο, στο σημείο όπου θα παρουσιάσουμε σε μέτρηση το ποσοστό κατά το οποίο επιβαρύνεται η συνολική μετάδοση εξαιτίας του μηχανισμού.

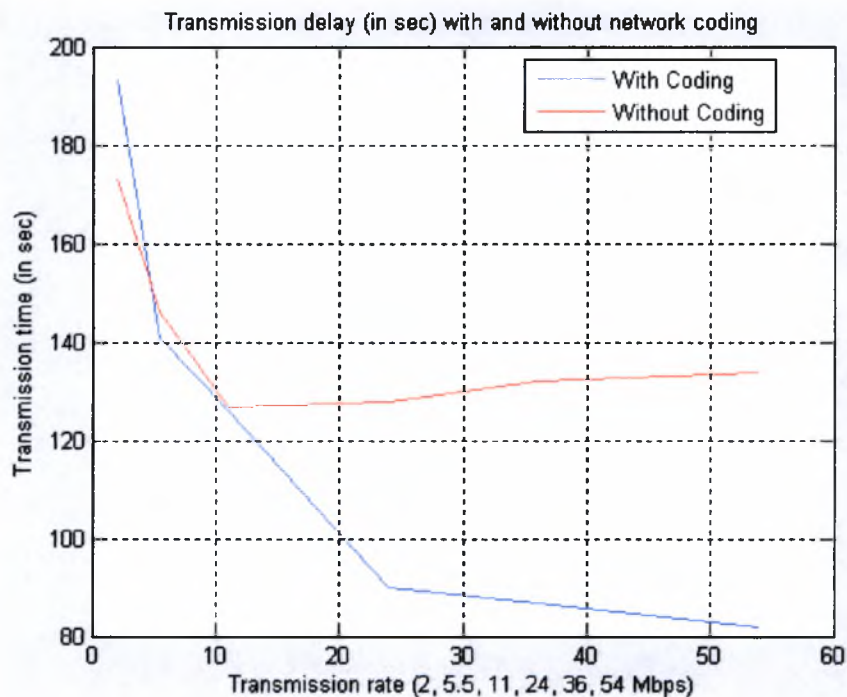
### 3.5 Μετρήσεις – Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Το πρώτο είδος των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν είχε ως στόχο τη σύγκριση της απόδοσης του πρωτοκόλλου μας σε σχέση με την απλή μετάδοση πακέτων μέσω του Router χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση, ως συνάρτηση του μεταβαλλόμενου ρυθμού μετάδοσης των ασύρματων καρτών.

Αναλυτικότερα, προχωρήσαμε στη μετάδοση αρχείων ίσου μεγέθους (5 Megabytes) με δικτυακή κωδικοποίηση και χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση με τους εξής ρυθμούς μετάδοσης στις ασύρματες κάρτες:

2, 5.5, 11, 24, 36, 54 Mbps.

Έτσι, καταγράφηκε η καθυστέρηση μετάδοσης για τα δύο είδη μεταδόσεων (με ή χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση) με τα αποτελέσματα να παριστάνονται στην παρακάτω γραφική παράσταση:

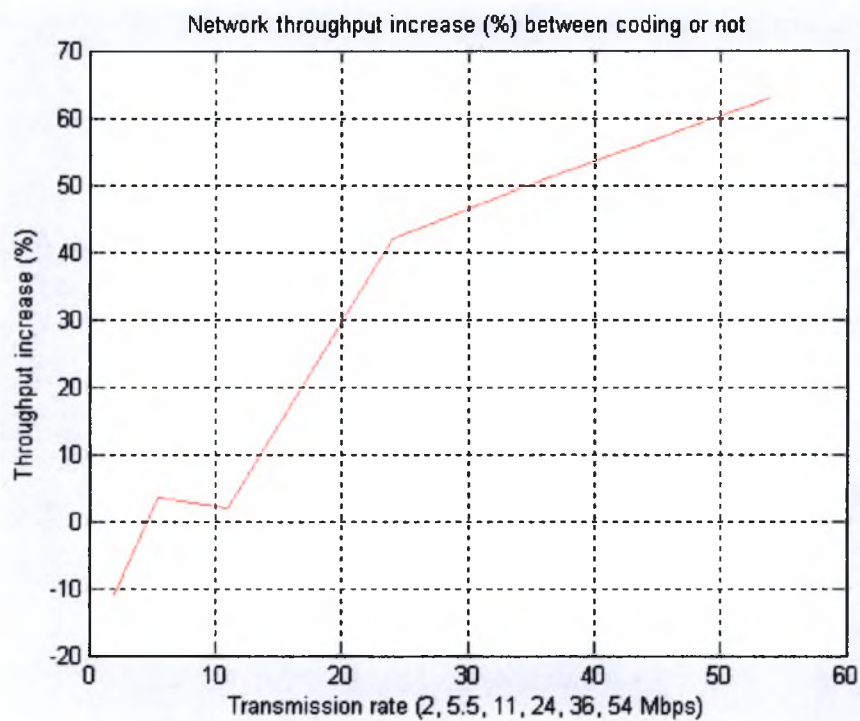


Εικόνα 28: Χρόνος μετάδοσης (σε δευτερόλεπτα) με και χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ποσοστιαίο κέρδος ρυθμοαπόδοσης του δικτύου που προκύπτει με τη χρησιμοποίηση της δικτυακής κωδικοποίησης σε σχέση με τη μη χρησιμοποίηση της για τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης που δοκιμάστηκαν. Τα αποτελέσματα παριστάνονται στον παρακάτω πίνακα και στη γραφική παράσταση:



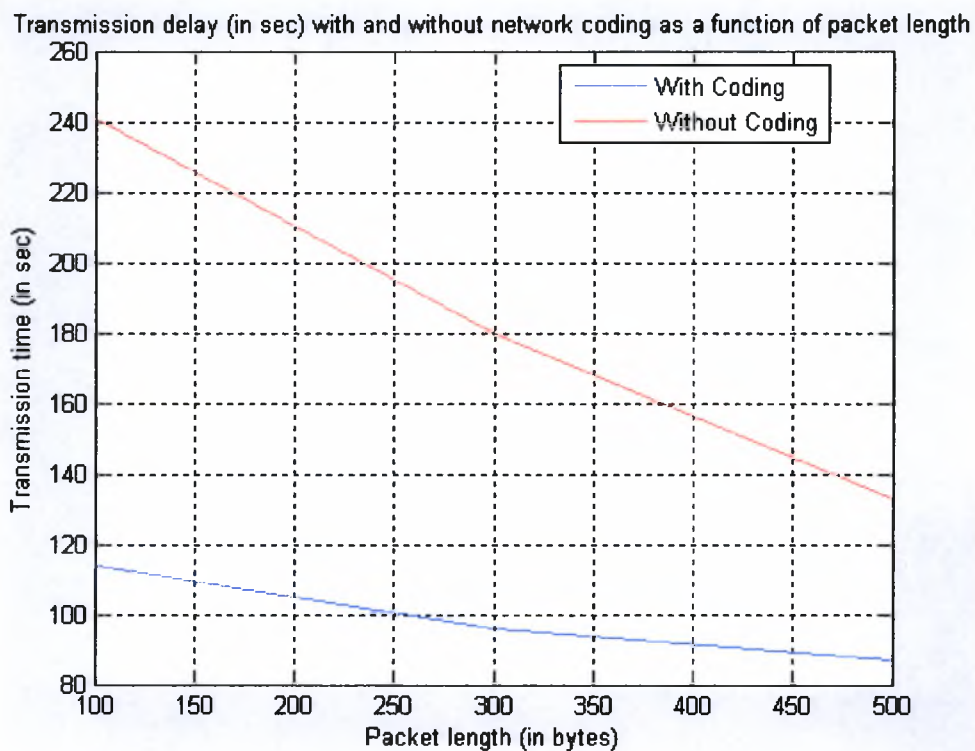
Ρυθμός μετάδοσης	Κέρδος ρυθμοαπόδοσης δικτύου
2 Mbps	-8 (%)
5.5 Mbps	3 (%)
11 Mbps	2 (%)
24 Mbps	33.3 (%)
36 Mbps	51 (%)
54 Mbps	63 (%)



Εικόνα 29: Ποσοστιαίο κέρδος ρυθμοαπόδοσης δικτύου μεταξύ μετάδοσης με και χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης

Οι δύο παραπάνω γραφικές παραστάσεις μαζί με τον αντίστοιχο πίνακα δείχνουν ότι η απόδοση του δικτύου αρχίζει να βελτιώνεται σημαντικά με τη χρησιμοποίηση του πρωτοκόλλου μας έχοντας ρυθμό μετάδοσης 24 Mbps και πάνω, πετυχαίνοντας το μεγαλύτερο κέρδος ρυθμοαπόδοσης (63 %) στα 54 Mbps. (Στα 5.5 και στα 11 Mbps υπάρχει μια μηδαμινή βελτίωση της απόδοσης του δικτύου).

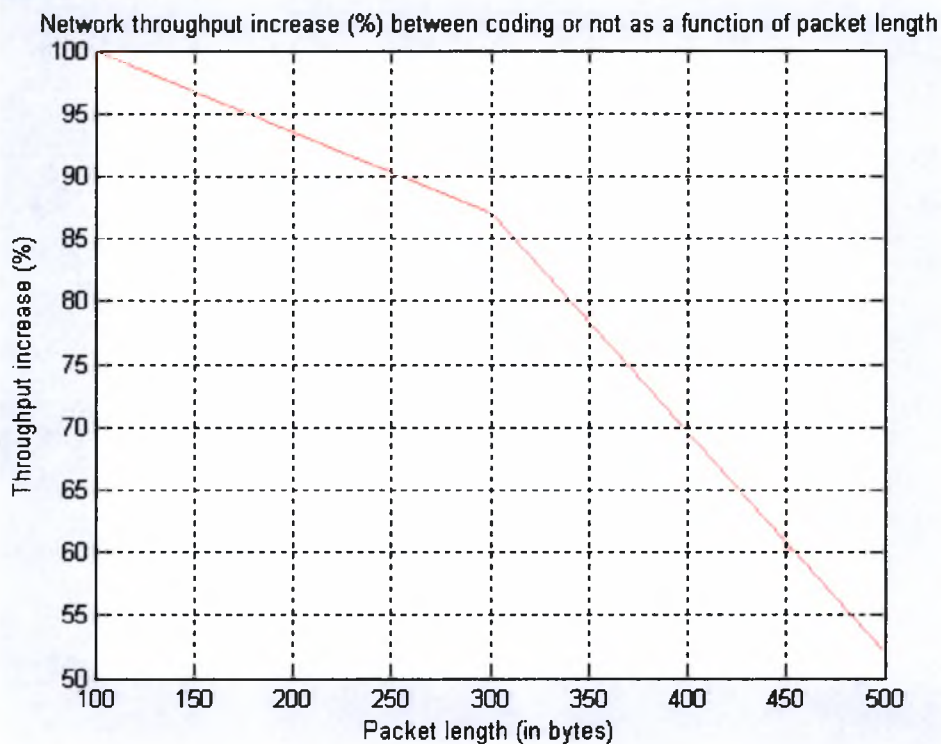
Το δεύτερο είδος των πειραμάτων μας είχε ως στόχο τη σύγκριση του πρωτοκόλλου μας σε σχέση με την χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση μετάδοση έχοντας όμως αυτή τη φορά ως μεταβαλλόμενη παράμετρο το μέγεθος πακέτου με το οποίο μεταδίδαμε τα αρχεία μεταξύ των κόμβων. Αναλυτικότερα, προχωρήσαμε και πάλι στη μετάδοση αρχείων ίσου μεγέθους (5 Megabytes) με δικτυακή κωδικοποίηση και χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση μεταδίδοντας κάθε φορά πακέτα με μέγεθος 100, 300 και 500 bytes αντίστοιχα. Έτσι, καταγράφηκε η καθυστέρηση μετάδοσης για τα δύο είδη μεταδόσεων (με ή χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση) με τα αποτελέσματα να παριστάνονται στην παρακάτω γραφική παράσταση:



Εικόνα 30: Χρόνος μετάδοσης (σε δευτερόλεπτα) με και χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση ως συνάρτηση του μεγέθους πακέτου

Αντίστοιχα, υπολογίσθηκε και εδώ το ποσοστιαίο κέρδος ρυθμοαπόδοσης του δικτύου που προκύπτει με τη χρησιμοποίηση της δικτυακής κωδικοποίησης σε σχέση με τη μη χρησιμοποίηση της για τα μεγέθη πακέτου που δοκιμάστηκαν. Τα αποτελέσματα παριστάνονται στον παρακάτω πίνακα και στη γραφική παράσταση:

Μέγεθος πακέτου	Κέρδος ρυθμοαπόδοσης δικτύου
100 bytes	100 (%)
300 bytes	87 (%)
500 bytes	53 (%)

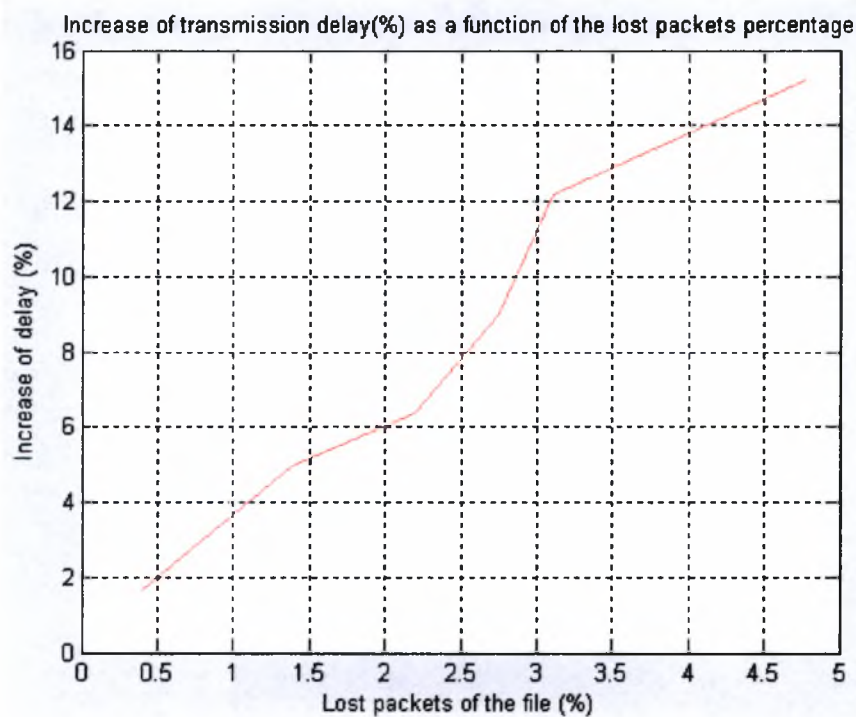


Εικόνα 31: Ποσοστιαίο κέρδος ρυθμοαπόδοσης δικτύου μεταξύ μετάδοσης με και χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση ως συνάρτηση του μεγέθους πακέτου

Οι δύο παραπάνω γραφικές παραστάσεις δείχνουν για το υλοποιημένο πρωτόκολλο πως όσο αυξάνεται το μέγεθος του πακέτου (οπότε έχουμε μείωση του αριθμού των μεταδόσεων), όπως αναμενόταν έχουμε μείωση του χρόνου μετάδοσης, αλλά και μείωση του ποσοστιαίου κέρδους ρυθμοαπόδοσης του δικτύου σε σχέση με τη χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση μετάδοση.

Το τρίτο είδος πειραμάτων είχε ως στόχο τον υπολογισμό της επιβάρυνσης που προκαλεί η επαναποστολή χαμένων πακέτων (λόγω των multicast μεταδόσεων που είναι «αναξιόπιστες») μέσω του πρωτοκόλλου «reliable multicast» που υλοποιήθηκε στο συνολικό χρόνο μετάδοσης ενός αρχείου. Συγκεκριμένα,

δημιουργήσαμε μία συνεχή κίνηση μεταξύ των δύο κόμβων παραληπτών σε ένα περιβάλλον με πολλά τεχνητά εμπόδια (τοιχούς, πόρτες κλπ.), ώστε να προκύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απώλεια πακέτων και για το κάθε σενάριο υπολογίσαμε την ποσοστιαία αύξηση της καθυστέρησης που προκαλεί ο μηχανισμός επαναποστολής χαμένων πακέτων στη συνολική καθυστέρηση ως συνάρτηση του ποσοστού των χαμένων πακέτων του αρχείου. Το σενάριο με τη μεγαλύτερη απώλεια πακέτων στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξε ότι για απώλεια του 5 % των πακέτων ενός αρχείου το σύστημα επιβαρύνεται με 15 % περίπου καθυστέρηση για να επανασταλούν τα χαμένα πακέτα και το αρχείο να παραληφθεί ακέραιο. Τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που έλαβαν χώρα στα πειράματα μας παριστάνονται γραφικά παρακάτω:



Εικόνα 32: Ποσοστιαία αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης λόγω του «reliable multicast» ως συνάρτηση του ποσοστού χαμένων πακέτων του αρχείου

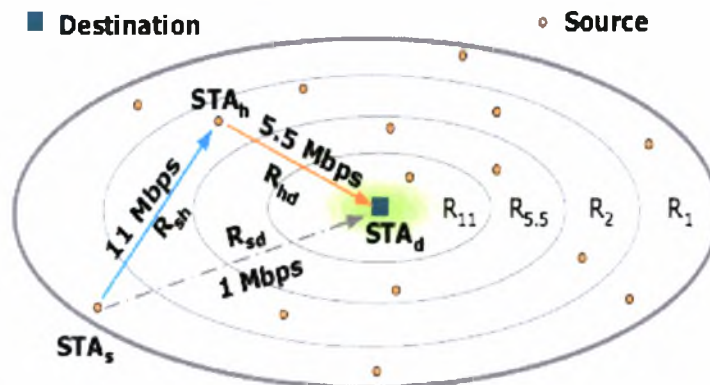
Η επιλογή μεταξύ αξιόπιστου ή αναξιόπιστου multicast μπορεί να γίνεται από το χρήστη της εφαρμογής, λαμβάνοντας υπόψη τις προτεραιότητες του (χρόνος μετάδοσης, ακεραιότητα δεδομένων) αλλά και το είδος των αρχείων που πρόκειται να μεταδοθούν.

## 3.6 Μελλοντικές επεκτάσεις πρωτοκόλλου

### 3.6.1 Επέκταση πρωτοκόλλου – Συνδυασμός COOPMAC με Network Coding

Όπως αναφέρει και ο τίτλος της εργασίας μας αναφερόμαστε σε τεχνικές συνεργασίας κόμβων, όπου ξεχωρίζουμε την περίπτωση της δικτυακής κωδικοποίησης. Πέρα από αυτή την περίπτωση, μπορούμε να θεωρήσουμε και τη γενική περίπτωση συνεργασίας κόμβων, όπως στην περίπτωση του πρωτοκόλλου COOPMAC. Η ιδέα που θα προτείνουμε σε αυτό το σημείο αφορά την επέκταση του πρωτοκόλλου μας κατάλληλα, ώστε να επωφεληθούμε από τα οφέλη των δύο τεχνικών συγχρόνως, σε τοπολογίες που επιτρέπουν των παράλληλη εφαρμογή τους.

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου COOPMAC, συνοψίζεται στην Εικόνα 33, του οποίου η λειτουργία στηρίζεται στην παρατήρηση πως για να μεταδίδουμε μέσω του IEEE 802.11 με ένα αποδεκτό ρυθμό εμφάνισης λάθους ανά πλαίσιο μετάδοσης (frame error rate FER), τα πακέτα μπορούν να μεταδίδονται με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού μας.

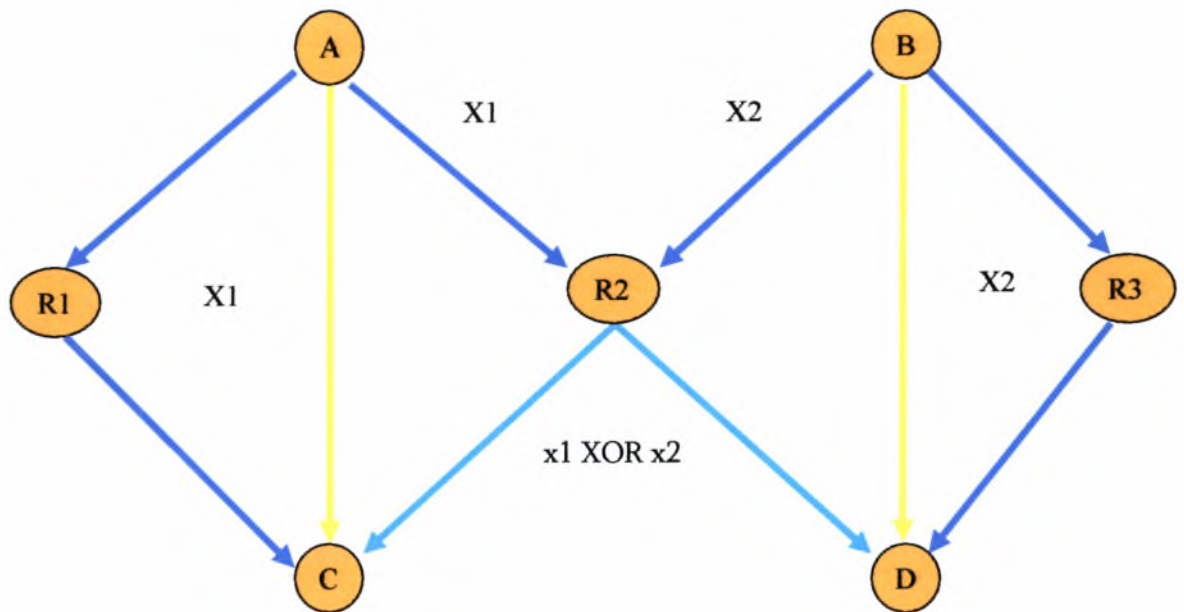


Εικόνα 33: Απεικόνιση του Cooperative MAC Protocol

Στο σχήμα θεωρούμε ότι ένας σταθμός πηγής STAs που είναι μακρινός από τον προορισμό STA<sub>d</sub> μπορεί διαρκώς να δοκιμάζει ένα «φτωχό» ασύρματο κανάλι, με συνέπεια τη χρήση ενός ρυθμού μετάδοσης τόσο χαμηλού όσο R<sub>sd</sub> (π.χ., 1Mbps) για την άμεση μετάδοση κατά τη διάρκεια μιας εκτεταμένης χρονικής περιόδου. Εάν υπάρχει κάποιος γείτονας STA<sub>h</sub> που μπορεί στο μεταξύ να στηρίξει υψηλότερους ρυθμούς R<sub>sh</sub> και R<sub>hd</sub> μετάδοσης (π.χ., 11Mbps και 5.5Mbps) μεταξύ STA<sub>h</sub> και STAs, και μεταξύ STA<sub>h</sub> και STA<sub>d</sub>, αντίστοιχα, τότε ο σταθμός STAs μπορεί να ζητήσει από το γείτονα STA<sub>h</sub> να συνεργαστεί και να διαβιβάσει την κυκλοφορία εξ ονόματός του στον προορισμό, σχήμα που παράγει ένα πολύ υψηλότερο αποτελεσματικό ρυθμό μετάδοσης. Η τοπολογία



που προτείνουμε ως ικανή για να λειτουργήσει το επεκταμένο μας πρωτόκολλο περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 34: Απεικόνιση τοπολογίας επεκταμένου πρωτοκόλλου

Στο παραπάνω σχήμα θεωρούμε πως οι συνδέσεις που σημειώνονται με μπλε και γαλάζιο χρώμα είναι ικανές να αποδώσουν πολλαπλάσιους ρυθμούς μετάδοσης από αυτές που σημειώνονται με κίτρινο χρώμα. Επίσης βασιζόμαστε πάλι στην υπόθεση πως οι διακυμάνσεις στους ρυθμούς μετάδοσης οφείλονται αποκλειστικά στην διαφορετική ποιότητα καναλιού, όπως και στη βασική υπόθεση του COOPMAC.

Σκοπός μας είναι να καταλήξουμε σε κάποιο αλγόριθμο που θα επιλέγει τη βέλτιστη στρατηγική για προώθηση πακέτων συνδυάζοντας κατάλληλες επιλογές δικτυακής κωδικοποίησης και δρομολόγησης πακέτων, ώστε να πετυχαίνει τη βέλτιστη χωρητικότητα του δικτύου σε σχέση με τους δυναμικά μεταβαλλόμενους ρυθμούς μετάδοσης των συνδέσεων.



### 3.6.2 Αλγόριθμος χρόνου εκκίνησης με ή χωρίς δικτυακή κωδικοποίηση

Στο σημείο αυτό προτείνουμε ένα ευριστικό μηχανισμό, ο οποίος παρέχει στο πρωτόκολλο μας τη δυνατότητα ανάκαμψης από βλάβες, αλλά και βελτίωσης επιδόσεων σε περιπτώσεις όπου ο ένας από τους δύο κόμβους αποστολής καθυστερεί υπερβολικά σε σχέση με τον άλλο στην αποστολή των πακέτων του προς το Router. Το σημείο στο οποίο εντοπίζεται το πρόβλημα βρίσκεται στη φάση όπου ο Router, αφού έχει παραλάβει από τον 1<sup>ο</sup> αποστολέα ένα πακέτο το οποίο προορίζεται για XOR- μετάδοση, καθυστερεί υπερβολικά για παραλαβή πακέτου από τον 2<sup>ο</sup> αποστολέα, οπότε καθυστερεί συνολικά η μετάδοση και στις δύο συνδέσεις.

Μία απλοϊκή λύση θα μπορούσε να είναι ο ορισμός ενός ανώτατου κατωφλιού ως όριο χρόνου για την παραλαβή των πακέτων από το δεύτερο αποστολέα, όπου μετά το πέρας του χρόνου αυτού θα το προωθήσει στον τελικό παραλήπτη με unicast αποστολή. Με αυτό τον τρόπο θα ξεπερνιέται το πρόβλημα εμφάνισης προσωρινής βλάβης ενός από τους δύο αποστολείς. Όμως αυτή η επιλογή θα μπορούσε να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση, καθώς αν η προσωρινή βλάβη διαρκέσει αρκετά, ο Router θα είναι αναγκασμένος να περιμένει για χρόνο ίσο με το όριο σε κάθε φάση προώθησης κωδικοποιημένων πακέτων.

Ο μηχανισμός που προτείνουμε αφορά στον τρόπο υπολογισμού αυτού του βελτιωμένου χρόνου αναμονής. Συγκεκριμένα προτείνουμε να χρησιμοποιείται ως χρόνος αναμονής μία τιμή η οποία θα προκύπτει μέσω δυναμικών υπολογισμών κατά την ώρα εκτέλεσης του προγράμματος. Ο υπολογισμός θα γίνεται ως εξής, θα περιμένουμε για τόσο χρόνο ώστε να μην υπερβούμε το χρόνο που μας προσφέρει ως βελτίωση η μετάδοση μέσω κωδικοποίησης ανά πακέτο κατά μέσο όρο. Ο χρόνος θα υπολογίζεται μέσω σύγκρισης στη μετάδοση ενός πακέτου μέσω κωδικοποίησης και χωρίς αυτήν πριν την έναρξη των μεταδόσεων, ώστε να πάρει μια αρχική τιμή, η οποία θα αναπροσαρμόζεται αργότερα με νέες εκτελέσεις του αλγορίθμου υπολογισμού, ώστε να παρακολουθείται τακτικά η δυναμική μεταβολή του συστήματος.

## 4. Βιβλιογραφία

- [1] C. Fragouli, J.-Y. L. Boudec, and J. Widmer, “Network Coding: An Instant Primer,” in ACM SIGCOMM CCR, 2006.
- [2] S. Katti, H. Rahul, D. Katabi, W. H. M. M’edard, and J. Crowcroft. XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding. In ACM SIGCOMM, Pisa, Italy, 2006.
- [3] Ihsan A. Qazi and Pratik Gandhi “Performance Evaluation of Wireless Network Coding under Practical Settings”. University of Pittsburgh
- [4] Chachulski, Szymon; Jennings, Michael; Katti, Sachin; Katabi, Dina. MORE: A Network Coding Approach to Opportunistic Routing. June 2006.
- [5] C. Gkantsidis and P. Rodriguez. Network coding for large scale content distribution. In Infocom, Miami, FL, Mar. 2005.
- [6] Avalanche: File swarming with network coding.  
<http://research.microsoft.com/camsys/avalanche/>
- [7] Z. Li and B. Li. Network coding in undirected networks. CISS, 2004.
- [8] Petrovic, D. Ramchandran, K. Rabaey, J. “Overcoming untuned radios in wireless networks with network coding” Information Theory, IEEE Transactions on June 2006
- [9] Morris, R., Kohler, E., Jannotti, J., and Kaashoek, M. F. 1999. The Click modular router.
- [10] MADWiFi: Multiband Atheros Driver for WiFi.  
<http://madwifi.org>.
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_coding](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_coding)
- [12] R.W. Yeung, S.-Y.R. Li, N. Cai, and Z. Zhang, Network Coding Theory, Foundation and Trends in Communications and Information Theory, 2005
- [13] Jonathan Corbet, Alessandro Rubini, Greg Kroah-Hartman. “Linux Device Drivers”, Third Edition. O’REILLY. 2005

- [14] C. Fragouli, D. Katabi, A. Markopoulou, M. Medard, H. Rahul. Wireless Network Coding: Opportunities & Challenges. MILCOM 2007. IEEE
- [15] Official Website of Cooperative MAC Implementation, <http://eeweb.poly.edu/coopmac/>
- [16] Korakis, T., Narayanan S., Bagri A., Panwar. S.: Implementing a Cooperative MAC Protocol for Wireless LANs. June 2006, IEEE, Los Alamitos (2006)
- [17] Joint Scheduling and Wireless Network Coding
- [18] Brian “Beej Jorgensen” Hall. Beej’s Guide to Network Programming Using Internet Sockets

## Παράρτημα - Οδηγός

Για το «τρέξιμο» του παραδείγματος μας θα χρειαστείτε λειτουργικό σύστημα Linux, μια συμβατή 802.11 a/b/g κάρτα, τον πηγαίο κώδικα Madwifi (εφόσον η ασύρματη κάρτα είναι Atheros), έναν gcc compiler και τον αντίστοιχο κώδικά μας.

### 1. Εγκατάσταση του Madwifi

Αφού κατεβάσετε μια έκδοση του Madwifi (έστω το madwifi-ng, όπου ng: η «next generation» έκδοση) η οποία είναι διαθέσιμη δωρεάν στο <http://madwifi.org> εισέλθετε στον αντίστοιχο φάκελο madwifi-ng. Διαβάστε το αρχείο INSTALL για να βεβαιωθείτε ότι δεν απαιτείται η εγκατάσταση ενός διαφορετικού kernel. Εγκαταστήστε τους drivers, εκτελώντας τις παρακάτω εντολές από το αντίστοιχο shell:

- `$ make all`
- `$ make install`

Στη συνέχεια φορτώστε τους drivers στις ασύρματες κάρτες με την παρακάτω εντολή:

- `$ modprobe ath pci`

### 2. Δημιουργία του ασύρματου δικτύου για το παράδειγμα των 3 κόμβων (Alice – Bob – Router)

Ακολουθούν οι εντολές για τον κάθε κόμβο ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη ότι θα δημιουργηθεί ασύρματο δίκτυο με υποδομή (με access point τον router και stations την Alice και τον Bob).

Για τον Router:

- `$ wlanconfig ath1 destroy`

Η παραπάνω εντολή ακυρώνει την προηγούμενη κατάσταση της κάρτας (όπου ath2 μπορεί αντίστοιχα να χρειάζεται ath0, ath2, ath3)

- `$ wlanconfig ath1 create wlandev wifi0 wlanmode ap`

Ο Router δηλώνεται ως access point του δικτύου.

- `$ ifconfig ath1 192.168.1.1 up`
- `$ iwconfig ath1 essid mine`
- `$ iwconfig ath1 channel 1`

Ο Router αποκτά IP διεύθυνση, id του δικτύου στο οποίο είναι access point και δηλώνει και το κανάλι που πρόκειται να χρησιμοποιήσει.

Για την Alice:

- `$ wlanconfig ath1 destroy`
- `$ wlanconfig ath1 create wlandev wifi0 wlanmode sta`

Η Alice δηλώνεται ως σταθμός του δικτύου.

- `$ ifconfig ath1 192.168.1.2 up`
- `$ iwconfig ath1 essid mine`
- `$ iwconfig ath1 channel 1`

Η Alice αποκτά IP διεύθυνση, το id του δικτύου στο οποίο είναι access point ο Router και το αντίστοιχο κανάλι που έχει δηλώσει ο Router.

Για τον Bob:

- `$ wlanconfig ath1 destroy`
- `$ wlanconfig ath1 create wlandev wifi0 wlanmode sta`

Ο Bob δηλώνεται ως σταθμός του δικτύου.

- `$ ifconfig ath1 192.168.1.3 up`
- `$ iwconfig ath1 essid mine`
- `$ iwconfig ath1 channel 1`

Ο Bob αποκτά IP διεύθυνση, το id του δικτύου στο οποίο είναι access point ο Router και το αντίστοιχο κανάλι που έχει δηλώσει ο Router.

### 3. Απενεργοποίηση των firewalls

Εκτελέστε και στους 3 κόμβους την παρακάτω εντολή για να απενεργοποιήσετε τα firewalls που πιθανόν εμποδίσουν τη μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο:

- `$ service iptables stop`

### 4. Ενεργοποίηση multicast επικοινωνίας

Για να είναι δυνατή η multicast επικοινωνία στον δίκτυο απαιτείται η παρακάτω εντολή για κάθε κόμβο:

- `$ route add -net 224.0.0.0 netmask 224.0.0.0 dev ath1`

Για να ελέγξετε ότι ενεργοποιήθηκε σωστά εκτελέστε την εντολή:

- `$ route -n`

## 5. Εκτέλεση του κώδικα

Σε κάθε κόμβο εισέλθετε στο φάκελο που βρίσκεται ο αντίστοιχος κώδικας μαζί με το αρχείο που πρόκειται να μεταδοθεί .

Για τον Router:

- `$ gcc -o r router.c`
- `$ ./r`

Για την Alice:

- `$ gcc -o a alice.c`
- `$ ./a 192.168.1.1 data_file 1/0`

Το 1 αντιστοιχεί στη μετάδοση με δικτυακή κωδικοποίηση και το 0 στην μετάδοση χωρίς αυτήν.

Για τον Bob:

- `$ gcc -o b bob.c`
- `$ ./b 192.168.1.1 data_file 1/0`

Το 1 αντιστοιχεί στη μετάδοση με δικτυακή κωδικοποίηση και το 0 στην μετάδοση χωρίς αυτήν.

Για την τροποποίηση του ρυθμού μετάδοσης στο δίκτυο εκτελέστε την εντολή:

- `$ iwconfig ath1 rate 2M`

Όπου 2M αντίστοιχα μπορεί να χρησιμοποιηθεί 11M, 36M, 54M κλπ.





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091626