

Τεχνικές Μετάδοσης VoIP με Κωδικοποίηση Δικτύου σε Ασύρματα Δίκτυα Πολλών Αλμάτων

Πέτρος Καραγιαννίδης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ

— ♦ —

Ιωάννινα, Απρίλιος 2010



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE
UNIVERSITY OF IOANNINA



Τεχνικές Μετάδοσης VoIP με Κωδικοποίηση Δικτύου σε
Ασύρματα Δίκτυα Πολλών Αλμάτων

Η ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

υποβάλλεται στην
ορισθείσα από την Γενική Συνέλευση Ειδικής Σύνθεσης
του Τμήματος Πληροφορικής Εξεταστική Επιτροπή

από τον

Καραγιαννίδη Πέτρο

ως μέρος των Υποχρεώσεων για τη λήψη του

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
ΜΕ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ
ΣΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Απρίλιος 2010



ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Στην αγαπημένη μου ξαδέρφη Μαρία



ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



026000321866



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Παπαπέτρου για τις πολύτιμες συμβουλές, την υπομονή και την συμπαράσταση του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Απόστολο Ζάρρα, επίκουρο καθηγητή του Τμ. Πληροφορικής Ιωαννίνων, που με φιλοξένησε στο εργαστήριο του τον τελευταίο ενάμιση χρόνο.

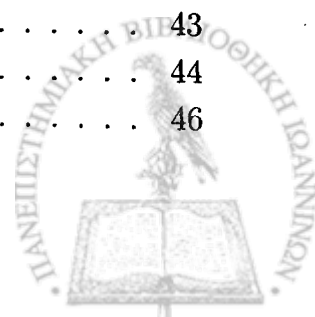
Ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τους γονείς μου (Θεόδωρο και Σοφία) και τα αδέρφια μου (Γιώργο και Νανά) που με στήριξαν και με στηρίζουν ηθικά αλλά και οικονομικά σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Το μεγαλύτερο κομμάτι της ολοκλήρωσης των σπουδών μου οφείλεται σε αυτούς.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συνάδελφους στο εργαστήριο για την συμπαράσταση αλλά και για τα ευχάριστα διαλείμματα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ελένη για την κατανόηση, την υποστήριξη και την υπομονή της κατά την περίοδο συγγραφής της διατριβής αυτής, καθώς επίσης και όλους τους φίλους που έκανα στα Γιάννενα για την ευχάριστη παρέα τους.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	1
1.1	VoIP και Ασύρματη Δικτύωση	1
1.2	Αντικείμενο της Διατριβής	3
1.3	Δομή της Διατριβής	8
2	Βασικές Έννοιες και Σχετική Βιβλιογραφία	9
2.1	Voice Over Internet Protocol	9
2.1.1	Περιγραφή Συστήματος VoIP	10
2.1.2	Κωδικοποιητές Φωνής	12
2.1.3	Παράγοντες Ποιότητας VoIP	13
2.1.4	Μοντέλα Εκτίμησης της Ποιότητας Φωνής	16
2.2	Συνάθροιση Πακέτων	20
2.2.1	Επιμήκυνση RTP Payload ή Source-based Frame Aggregation	21
2.2.2	Συνάθροιση στην ίδια Κλήση (Intra-call)	22
2.2.3	Συνάθροιση σε Διαφορετικές Κλήσεις (Inter-call)	23
2.3	Κωδικοποίηση Δικτύου	25
2.3.1	Βασικά Χαρακτηριστικά	25
2.3.2	Κωδικοποίηση/Αποκωδικοποίηση σε κάθε άλμα	28
3	Ζητήματα και Περιορισμοί των Τεχνικών Συνάθροισης Πακέτων	31
3.1	Ζητήματα των Τεχνικών Συνάθροισης	31
3.1.1	Συλλογή των Πακέτων	32
3.1.2	Επιλογή Τεχνικής Συνάθροισης Πακέτων	33
3.1.3	Τεχνική Μετάδοσης των Πακέτων	34
3.2	Ο Αλγόριθμος Συνάθροισης HHA	36
3.3	Περιορισμοί των Αλγορίθμων Συνάθροισης	40
4	Προτεινόμενοι Αλγόριθμοι	42
4.1	Ενσωμάτωση της Κωδικοποίησης Δικτύου στη Μετάδοση VoIP	42
4.1.1	Κωδικοποίηση και Αποκωδικοποίηση	43
4.1.2	Αποθήκευση Πακέτων	43
4.1.3	Πληροφορίες για την Κατάσταση των Γειτονικών Κόμβων	44
4.2	Ο Αλγόριθμος Network Coding - Aggregation (NCA)	46

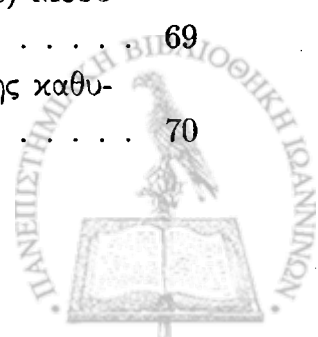


4.2.1	Συνδυασμός Κωδικοποίησης Δικτύου και Συνάθροισης	47
4.2.2	Εύρεση Ευκαιριών Κωδικοποίησης	49
4.2.3	Συνάθροιση Κωδικοποιημένων Πακέτων	51
4.2.4	Δομή Πακέτων	53
4.3	Ο Αλγόριθμος NCA Progressive (NCA-P)	55
4.4	Ο Αλγόριθμος NCA Failure Salvation (NCA-FS)	58
5	Πειραματικά Αποτελέσματα	62
5.1	Περιβάλλον Προσομοίωσης	62
5.1.1	Εργαλείο Προσομοίωσης	63
5.1.2	Μοντέλο Προσομοίωσης	63
5.2	Μεθοδολογία Αξιολόγησης Αλγορίθμων και Μετρικές	65
5.3	Αποτελέσματα και Σχολιασμός	67
5.3.1	Μέρος Πρώτο: Απόδοση Αλγορίθμων σε Διαφορετικές Τοπολογίες .	67
5.3.2	Μέρος Δεύτερο: Απόδοση Αλγορίθμων για Διαφορετικούς Κωδικο- ποιητές	73
5.3.3	Μέρος Τρίτο: Απόδοση των Αλγορίθμων NCA και NCA-P για Δια- φορετικές Τιμές του <code>retry_limit</code>	76
5.3.4	Μέρος Τέταρτο: Απόδοση των Αλγορίθμων NCA, NCA-P και NCA-FS	78
6	Συμπεράσματα	81



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1	Παράδειγμα Ασύρματου Δίκτυου (a) αδόμητο (b) με υποδομή	2
2.1	Επεξεργασία Σημάτων Φωνής σε ένα Σύστημα VoIP	10
2.2	Ενθυλάκωση Πακέτου VoIP	11
2.3	Διακύμανση Καθυστέρησης (Delay Jitter)	15
2.4	Σχέση μεταξύ R-SCORE και MOS [9]	20
2.5	Κωδικοποίηση Δικτύου σε Δίκτυο Πεταλούδας	25
2.6	Αποστολή μηνυμάτων μεταξύ της Alice και του Bob (a) με την παραδοσιακή επικοινωνία (b) με το COPE	28
3.1	Υποψήφια Πακέτα προς Συνάθροιση για τις Τεχνικές intra-call και inter-call aggregation	33
3.2	Μετάδοση συναθροισμένου πακέτου (a) unicast (b) pseudo-broadcast	35
3.3	Παράδειγμα Hop-by-Hop Aggregation	37
3.4	Δομή Συναθροισμένου Πακέτου στον Αλγόριθμο HHA-like	39
4.1	Πρόβλημα Περιορισμού στην Εύρεση Μεγάλου Αριθμού Πακέτων για Κωδικοποίηση	48
4.2	(a) Ευκαιρίες Κωδικοποίησης στην Ουρά ενός Κόμβου (b) Συνάθροιση Πακέτων μετά την Κωδικοποίηση	49
4.3	Διάγραμμα ροής του NCA (a) στον αποστολέα (b) στον παραλήπτη	53
4.4	Δομή Κωδικοποιημένου Πακέτου	54
4.5	Δομή Συναθροισμένου Πακέτου που αποτελείται (a) μόνο από κωδικοποιημένα πακέτα (b) από native και κωδικοποιημένα πακέτα	55
4.6	Ενσωμάτωση χαμένων πακέτων στον αλγόριθμο NCA-FS	59
4.7	Διάγραμμα ροής του NCA-FS (a) στον αποστολέα (b) στον παραλήπτη	61
5.1	Τοπολογίες Δικτύου (a) Line (b) Cross (c) Wheel	64
5.2	Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Line σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	69
5.3	Συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της καθυστέρησης των πακέτων	70



5.4	Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score (d) Μέσο Jitter (e) Throughput ανά κλήση	72
5.5	Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	73
5.6	Κέρδος κωδικοποίησης του NCA στις τοπολογίες Line, Cross και Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων	74
5.7	Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	75
5.8	Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA 4, NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	77
5.9	Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA-FS 1+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	79
6.1	Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Line σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέσο Jitter (b) Throughput ανά κλήση	86
6.2	Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέσο Jitter (b) Throughput ανά κλήση	87
6.3	Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέσο Jitter (b) Throughput ανά κλήση	87
6.4	Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score	88
6.5	Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Line σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score	89



6.6	Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA 4, NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score	90
6.7	Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA 4, NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	91
6.8	Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA-FS 1+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score	91
6.9	Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA-FS 1+2 στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score	92



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

2.1	Βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων κωδικοποιητών	13
2.2	Όρια για την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση σύμφωνα με την ITU-T [10] .	14
2.3	Σύγκριση MOS, ποιότητας και εξασθένισης φωνής [15]	18
2.4	Συσχέτιση μεταξύ R-Score, MOS, %GoB-%PoW και ικανοποίηση χρηστών [9]	19
4.1	Σύγκριση μέσου backoff για 5 προσπάθειες στο 802.11b και στο NCA-P . .	57
5.1	Πίνακας τιμών παραμέτρων προσομοίωσης	65



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

1	Αλγόριθμος Συνάθροισης HHA-like	38
2	Αλγόριθμος Εύρεσης Ευκαιριών Κωδικοποιήσεων	50
3	Αλγόριθμος Κωδικοποίησης και Συνάθροισης Πακέτων	52



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

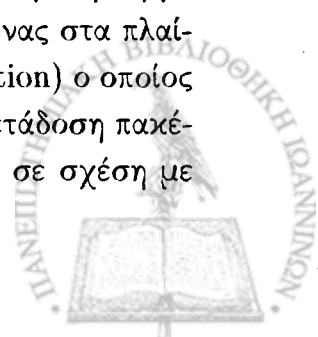
Πέτρος Καραγιαννίδης του Θεοδώρου και της Σοφίας: MSc, Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Απρίλιος, 2010. Τεχνικές Μετάδοσης VoIP με Κωδικοποίηση Δικτύου σε Ασύρματα Δίκτυα Πολλών Αλμάτων.

Επιβλέπων: Ευάγγελος Παπαπέτρου.

Τα τελευταία χρόνια, με την εξάπλωση του Διαδικτύου, η τεχνολογία VoIP τυγχάνει μεγάλης απήχησης για την πραγματοποίηση κλήσεων ομιλίας. Εκτός από τα ενσύρματα δίκτυα, σημαντική είναι και η συμβολή των ασύρματων δικτύων στην μετάδοση VoIP. Η σύγκλιση των δύο αυτών τεχνολογιών δηλαδή η χρησιμοποίηση ασύρματων δικτύων για την μεταφορά VoIP αποφέρει σημαντικά οφέλη (χαμηλό κόστος, ευελιξία) στους παρόχους και τους τελικούς χρήστες.

Η αποδοτικότητα των ασύρματων δικτύων για την μετάδοση VoIP είναι σημαντικά χαμηλή. Για παράδειγμα ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 802.11b μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 10-20 ταυτόχρονες κλήσεις VoIP. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ότι οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου δαπανούν σημαντικό χρόνο για την πρόσβαση στο κοινό μέσο (access delay) παρά για την μετάδοση των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό έχουν υπάρξει διάφορες τεχνικές που έχουν ως στόχο την βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων όταν μεταδίδονται κλήσεις VoIP. Μια από αυτές τις τεχνικές είναι η συνάθροιση πακέτων που μειώνει τον αριθμό των πακέτων που μεταδίδονται συναθροίζοντας πολλά πακέτα φωνής σε ένα. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση σε σχέση με την μετάδοση στο 802.11.

Η βασική προσέγγιση που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της διατριβής αυτής είναι ότι οι δυνατότητες της συνάθροισης πακέτων έχουν εξαντληθεί και επομένως η περαιτέρω βελτίωση των τεχνικών μετάδοσης VoIP μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση τεχνικών που προέρχονται από την Θεωρία της Πληροφορίας. Μια τέτοια τεχνική είναι η κωδικοποίηση δικτύου (network coding) που προδιαγράφει ότι δύο ή περισσότερα πακέτα μπορούν να κωδικοποιηθούν, να μεταδοθούν μέσα από ένα δίκτυο και να αποκωδικοποιηθούν στον παραλήπτη με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση των πόρων του δικτύου. Αποτέλεσμα της έρευνας στα πλαίσια της διατριβής αυτής είναι ο αλγόριθμος NCA (Network Coding - Aggregation) ο οποίος συνδυάζει την κωδικοποίηση δικτύου και την συνάθροιση πακέτων για την μετάδοση πακέτων VoIP. Ο αλγόριθμος NCA επιτυγχάνει σημαντικά βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με



τους αλγόριθμους συνάθροισης. Μία επέκταση του αλγορίθμου NCA που προτείνεται στην διατριβή αυτή είναι ο αλγόριθμος NCA-Progressive (NCA-P) ο οποίος έχει ως στόχο την μείωση της καθυστέρησης αναμετάδοσης των πακέτων φωνής όταν συμβαίνουν συγκρούσεις. Ο αλγόριθμος αυτός επιτυγχάνει περαιτέρω βελτίωση όσον αφορά τον αριθμό των ταυτόχρονων κλήσεων σε ένα ασύρματο δίκτυο. Τέλος, προτείνεται ο αλγόριθμος NCA-Failure Salvation (NCA-FS) που έχει ως στόχο την αύξηση της ποιότητας των κλήσεων φωνής με την αναμετάδοση χαμένων πακέτων φωνής.



EXTENDED ABSTRACT IN ENGLISH

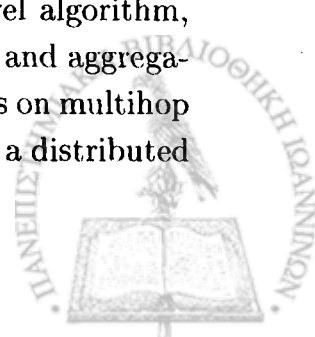
Karagiannidis, Petros, T. MSc, Computer Science Department, University of Ioannina, Greece. April, 2010. Network Coding Based Scheme for VoIP Transmission over Wireless Multihop Networks.

Thesis Supervisor: Evangelos Papapetrou.

Over the last years, VoIP has become one of the hottest applications in the Internet. The steady growth of VoIP has been driven by the unencumbered deployment over existing data infrastructures as well as the cost savings that are related to the integration of services over the Internet. On the other hand, wireless infrastructures such as wireless LANs or wireless Mesh networks are wide-spread components of existing infrastructures.

The bandwidth efficiency of VoIP traffic over an IEEE 802.11 wireless LAN is notoriously low. For example, only 10-20 simultaneous VoIP calls utilizing the G.729 codec can be supported on 802.11b with acceptable QoS. Voice packet aggregation is a way to overcome this inefficiency problem of VoIP. The main goal of packet aggregation is to reduce the number of packet transmissions through VoIP frame aggregation. Algorithms that use frame aggregation have been proved to boost the performance of a wireless network in terms of supporting more simultaneous VoIP calls. However, the improvement introduced by frame aggregation is limited by the maximum transmission unit (MTU) of the wireless network.

The basic approach in this thesis is that voice transmission techniques may be further improved by employing techniques originated from the field of Information Theory. Such a technique is network coding. The concept of network coding implies that intermediate nodes can combine and mix frames rather than just aggregating them. As a result, a node may not only minimize packet transmissions but can also produce packets of smaller size. The later property is of paramount importance in the context of wireless VoIP since it produces smaller delays and at the same time may boost the usefulness of frame aggregation. In this thesis, we adopt the aforementioned observation and propose a novel algorithm, called Network Coding - Aggregation (NCA), that combines network coding and aggregation for transmission of VoIP over multihop wireless infrastructures. We focus on multihop infrastructures in order to prove that network coding can be implemented in a distributed



manner and to illustrate the advantages of combining packets from different VoIP sessions in various network nodes. NCA is proved to improve the performance of VoIP transmission, compared to traditional aggregation techniques, over various network topologies. We then propose an extension of NCA, called NCA-Progressive (NCA-P). NCA-P makes the observation that although packet retransmissions minimize packet losses, the incurred delay may invalidate packet delivery. To this end, NCA-P uses the same overall retransmission limit but utilizes the retransmission mechanism in a progressive manner in order to reduce the backoff delay. Finally, we propose NCA-Failure Salvation (NCA-FS) algorithm which is an extension of NCA-P. NCA-FS aims at enhancing the quality of VoIP sessions. To this end, NCA-FS piggybacks the last lost frame on a new frame that is scheduled to be transmitted. In this way, no additional transmissions are created. Both NCA-P and NCA-FS are proved to further improve the performance of wireless VoIP.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 VoIP και Ασύρματη Δικτύωση

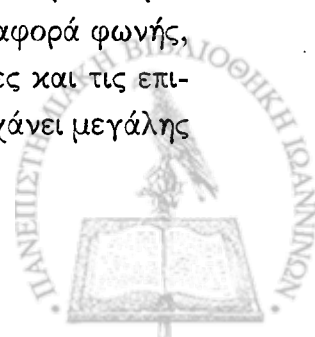
1.2 Αντικείμενο της Διατριβής

1.3 Δομή της Διατριβής

1.1 VoIP και Ασύρματη Δικτύωση

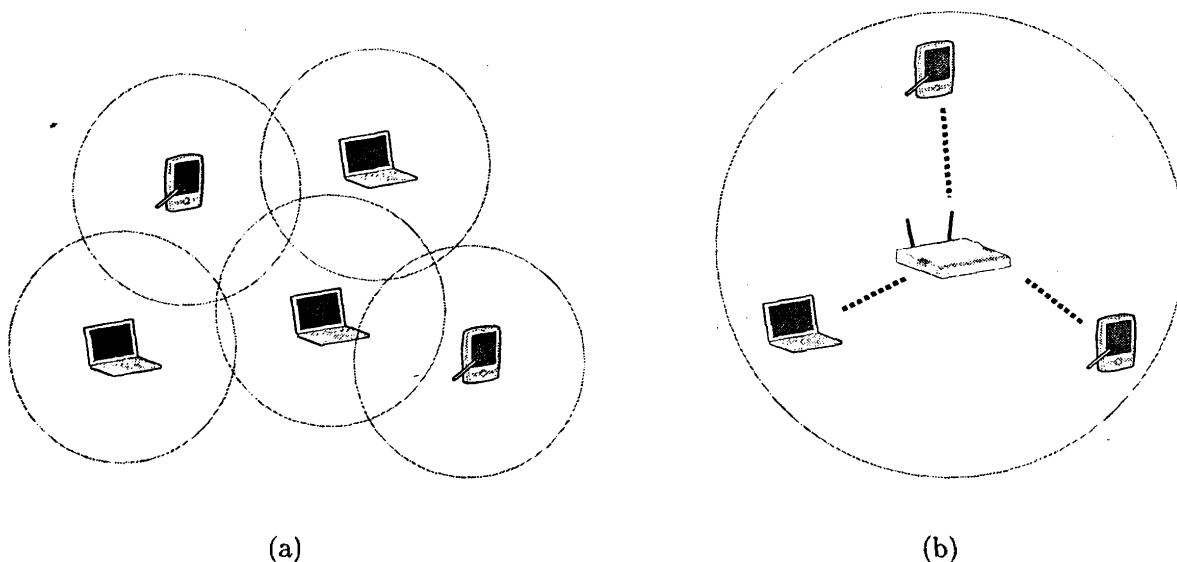
Από την εφεύρεση του τηλεφώνου στα τέλη του 19ου αιώνα, η τηλεφωνική επικοινωνία μέχρι πρόσφατα δεν είχε αλλάξει σημαντικά. Φυσικά, νέες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν όπως τα ψηφιακά κυκλώματα, η αναγνώριση κλήσης και η τεχνολογία DTMF, αλλά το παραδοσιακό δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής (PSTN) είχε καθιερωθεί από τους πάροχους τηλεπικοινωνιών. Με την εξάπλωση των δικτύων υπολογιστών και την έλευση της τεχνολογίας VoIP ξεκίνησε η αποκαθήλωση του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταγωγής και η σταδιακή αντικατάσταση του με δίκτυα δεδομένων και δίκτυα οπτικών ινών.

VoIP (Voice over Internet Protocol) είναι η τεχνολογία για μετάδοση κλήσεων ομιλίας χρησιμοποιώντας δίκτυα που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP. Τα τελευταία χρόνια, με την εξάπλωση του Διαδικτύου, η τεχνολογία VoIP έχει αποσπάσει την προσοχή των περισσότερων τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Η αντικατάσταση του ξεπερασμένου τηλεφωνικού δικτύου και η χρησιμοποίηση δικτύων δεδομένων για τη μετάδοση κλήσεων ομιλίας δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους να προσφέρουν νέες υπηρεσίες (συνδιάσκεψη, βίντεο-κλήσεις) με μειωμένο κόστος. Οι εφαρμογές VoIP, όπως το Skype, είναι πολύ διαδεδομένες μεταξύ των οικιακών χρηστών. Η χρησιμοποίηση ενός μόνο δικτύου για τη μεταφορά φωνής, δεδομένων και βίντεο αλλά και η μείωση του κόστους στους τελικούς χρήστες και τις επιχειρήσεις είναι από τους σημαντικότερους λόγους που η τεχνολογία VoIP τυγχάνει μεγάλης απήχησης.



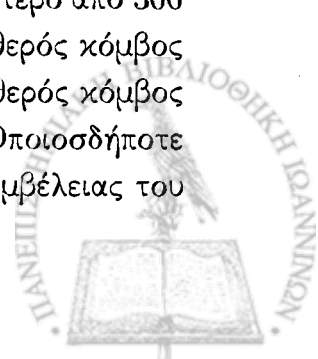
Τα ασύρματα δίκτυα έχουν συντελέσει στην μεγάλη ανάπτυξη του Διαδικτύου. Καθημερινά όλο και περισσότεροι χρήστες χρησιμοποιούν τα τερματικά τους (PCs, PDAs, netbooks) για να έχουν ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Απαιτήσεις όπως η κινητικότητα, η ευκολία δικτύωσης και η επικοινωνία σε υψηλές ταχύτητες είναι οι σημαντικότεροι λόγοι που τα ασύρματα δίκτυα έχουν το δικό τους σημαντικό μερίδιο στη δικτύωση των υπολογιστών. Σημαντικό μερίδιο επίσης έχουν τα ασύρματα δίκτυα για τη μετάδοση VoIP. Οι ασύρματοι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν κλήσεις από οποιοδήποτε σημείο κάλυψης του ασύρματου δικτύου. Παράδειγμα αποτελεί το ασύρματο δίκτυο ενός Πανεπιστημίου. Τα μέλη της κοινότητας του Πανεπιστημίου (φοιτητές, καθηγητές) εκτός από την πρόσβαση σε βασικές υπηρεσίες όπως είναι το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο μπορούν να έχουν υπηρεσία τηλεφωνίας VoIP από οποιοδήποτε σημείο όπου εκτείνεται το ασύρματο δίκτυο.

Ασύρματες ζεύξεις, ωστόσο, χρησιμοποιούνται και από τους πάροχους τηλεπικοινωνιών για τη μεταφορά VoIP κλήσεων. Είτε στα δίκτυα κορμού (backbones), είτε μέχρι τον τελικό χρήστη (last mile) τα ασύρματα δίκτυα συμβάλουν στη μεταφορά VoIP με σκοπό να παρέχουν ευελιξία και χαμηλό κόστος στους παρόχους αλλά και τους τελικούς χρήστες. Η σύγκλιση των δύο αυτών τεχνολογιών, δηλαδή η χρησιμοποίηση ασύρματων δικτύων για τη μετάδοση VoIP κλήσεων έχει προκαλέσει νέα δεδομένα στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα Ασύρματου Δίκτυου (a) αδόμητο (b) με υποδομή

Η διατριβή αυτή εστιάζει στα αδόμητα ασύρματα δίκτυα και κυρίως σε αυτά που υπάρχει επικοινωνία πολλών αλμάτων (multihop). Ένα τοπικό ασύρματο δίκτυο αποτελείται από (κινητούς) κόμβους που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους (λιγότερο από 300 μέτρα). Στα ασύρματα δίκτυα με υποδομή (Infrastructure) υπάρχει ένας σταθερός κόμβος που παίζει τον ρόλο του ρυθμιστή για την επικοινωνία (Access Point). Ο σταθερός κόμβος αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων του ασύρματου δικτύου. Οποιοσδήποτε κόμβος του δικτύου για να επικοινωνήσει θα πρέπει να βρίσκεται εντός της εμβέλειας του



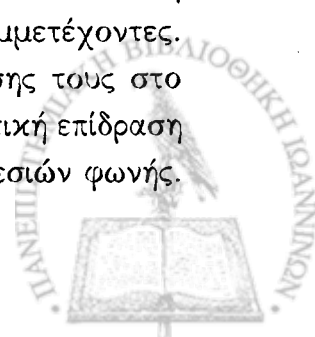
σταθερού κόμβου. Αντίθετα με τα ασύρματα δίκτυα με υποδομή, υπάρχουν και τα δίκτυα που δημιουργούνται με αδόμητο τρόπο (ad-hoc). Σε αυτού του είδους τα ασύρματα δίκτυα ο κάθε κόμβος είναι ισότιμος με τους υπολοίπους. Για την αποστολή ενός μηνύματος από έναν κόμβο πηγή σε έναν κόμβο προορισμό συνήθως απαιτείται η προώθηση του μηνύματος από έναν ή περισσότερους ενδιάμεσους κόμβους. Σε αυτήν την περίπτωση η επικοινωνία αποτελείται από πολλά άλματα (multihop), δηλαδή ένα μήνυμα χρειάζεται να μεταδοθεί πολλές φορές από ενδιάμεσους κόμβους για να φτάσει στον προορισμό του. Στην ειδική περίπτωση που ο κόμβος πηγή έχει στην εμβέλεια του τον κόμβο προορισμό τότε το μήνυμα χρειάζεται να μεταδοθεί μόνο μία φορά (1-hop επικοινωνία). Το βασικό πλεονέκτημα της multihop επικοινωνίας είναι ότι επιτρέπει να αυξηθεί η εμβέλεια ενός τέτοιου δικτύου. Τα multihop ασύρματα δίκτυα είναι ιδιαίτερα σημαντικά λόγω των εφαρμογών τους. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών είναι:

- περιπτώσεις δικτύωσης σε έκτακτη ανάγκη (π.χ. περιπτώσεις καταστροφών)
- ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (π.χ. για τη συλλογή δεδομένων για καιρικά φαινόμενα ή σεισμική δραστηριότητα)
- νομαδική πρόσβαση σε υπηρεσίες σταθερών δικτύων (π.χ. υπηρεσίες δικτύου σε αεροδρόμια, επικοινωνία σε συνεδριακούς χώρους)

Πολλά είναι τα δικτυακά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν στα δίκτυα ad-hoc σε αντίθεσή με τα ενσύρματα δίκτυα. Η έλλειψη υποδομής, συνεπώς και έλλειψη κεντρικοποιημένης διαχείρισης, οδηγεί στην κατανομή της διαχείρισης σε όλους τους κόμβους του δικτύου, γεγονός που αποφέρει αρκετά προβλήματα. Η φύση του ασύρματου μέσου επιφέρει νέα προβλήματα στη μετάδοση των μηνυμάτων όπως ο θόρυβος, οι παρεμβολές, το πρόβλημα του κρυφού τερματικού, κλπ. Το περιορισμένο εύρος ζώνης των ασύρματων δικτύων σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα έχει ως αποτέλεσμα τη συχνή εμφάνιση συμφόρησης στο δίκτυο. Τέλος, οι περιορισμένοι πόροι των κόμβων του δικτύου (υπολογιστική ισχύς, μνήμη, αυτονομία) θέτουν περιορισμούς στη λειτουργία τους. Έτσι κατά τη σχεδίαση αλγορίθμων για τα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα τα παραπάνω ζητήματα.

1.2 Αντικείμενο της Διατριβής

Όπως αναφέρθηκε, η διατριβή αυτή εστιάζει στη μετάδοση VoIP σε ασύρματα multihop ad-hoc δίκτυα. Σημαντικό ρόλο στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως είναι το VoIP, παίζει η ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Μία κλήση ομιλίας με μεγάλη καθυστέρηση και διακοπές στη συνομιλία μπορεί να καταστήσει αδύνατη την επικοινωνία ανάμεσα στους συμμετέχοντες. Όταν τα πακέτα φωνής καθυστερούν ή χάνονται κατά τη διάρκεια μετάδοσης τους στο δίκτυο η ποιότητα της συνομιλίας υποβαθμίζεται. Το γεγονός αυτό έχει αρνητική επίδραση στους χρήστες οι οποίοι επιθυμούν όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών φωνής.



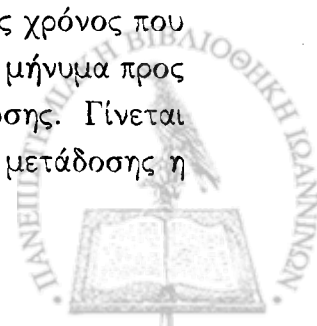
Τα παραπάνω προβλήματα διογκώνονται όταν για τη μετάδοση VoIP χρησιμοποιούνται ασύρματα δίκτυα, λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα αλλά και τα συχνά λάθη κατά τη μετάδοση που έχουν ως αποτέλεσμα απώλειες πακέτων. Επιπλέον, όταν σε ένα ασύρματο δίκτυο εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλές κλήσεις VoIP τα παραπάνω προβλήματα αυξάνονται με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη συμφόρηση. Το γεγονός αυτό επιφέρει μεγάλες καθυστερήσεις και απώλειες πακέτων που συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση της ποιότητας της ομιλίας.

Οι στόχοι της εργασίας αυτής είναι:

- η βελτίωση της ποιότητας της υπηρεσίας VoIP
- η υποστήριξη περισσότερων (ταυτόχρονων) κλήσεων VoIP σε ένα ασύρματο δίκτυο ad-hoc

Όπως είναι γνωστό στα ασύρματα δίκτυα έχει επικρατήσει η γενιά προτύπων IEEE 802.11 [1]. Στο πρότυπο 802.11b το εύρος ζώνης του καναλιού φτάνει στα 11 Mbps. Κάθε ροή της συνομιλίας VoIP απαιτεί συνήθως ένα εύρος ζώνης μικρότερο από 20 Kbps (συμπεριλαμβανομένων και των επικεφαλίδων των πρωτοκόλλων). Υπό ιδανικές συνθήκες και με ένα πρόχειρο υπολογισμό θα μπορούσε κάποιος να πει ότι ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί το πρότυπο αυτό μπορεί να υποστηρίξει περίπου 550 ταυτόχρονες ροές VoIP, που αντιστοιχούν σε 275 αμφίδρομες κλήσεις VoIP. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχθεί σε διάφορες ερευνητικές εργασίες [6], [8], [22] στην πραγματικότητα οι ταυτόχρονες κλήσεις VoIP περιορίζονται σε μερικές δεκάδες (10-20 κλήσεις). Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη λειτουργία του μηχανισμού πρόσβασης των κόμβων στο κοινό μέσο ο οποίος καθορίζεται στη γενιά προτύπων 802.11.

Συγκεκριμένα, το πρότυπο ορίζει ένα μηχανισμό ανταγωνισμού με ακρόαση φέροντος. Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να μεταδώσει θα πρέπει πρώτα να αποκτήσει πρόσβαση στο κοινό μέσο. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να ανταγωνιστεί με τους υπόλοιπους κόμβους που βρίσκονται στην εμβέλεια του και επιθυμούν επίσης να μεταδώσουν. Ένας μόνο κόμβος κάθε φορά μπορεί να κατέχει το κανάλι επικοινωνίας και να μεταδίδει. Ο χρόνος που περνάει όσο οι κόμβοι ανταγωνίζονται για το κοινό μέσο είναι πολύτιμος επειδή το μέσο παραμένει αδρανές. Ο χρόνος που χρειάζεται ένας κόμβος για να αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι επικοινωνίας ονομάζεται *χρόνος πρόσβασης στο κοινό μέσο (access delay)*. Ο χρόνος πρόσβασης ενός κόμβου εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των γειτονικών κόμβων που επιθυμούν να μεταδώσουν μία συγκεκριμένη στιγμή. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός, τόσο μεγαλώνει ο χρόνος πρόσβασης. Ο χρόνος μετάδοσης ενός μηνύματος είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένας κόμβος για τη μετάδοση του μηνύματος αυτού (αφού προηγουμένως αποκτήσει πρόσβαση στο κοινό μέσο). Προφανώς, ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται ένας κόμβος για να μεταδώσει ένα μήνυμα (από τη στιγμή που έχει μήνυμα προς μετάδοση) είναι το άθροισμα του χρόνου πρόσβασης και του χρόνου μετάδοσης. Γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλώνει ο χρόνος πρόσβασης σε σχέση με τον χρόνο μετάδοσης η



απόδοση (ρυθμαπόδοση) του δικτύου μειώνεται καθώς μόνο κατά τον χρόνο μετάδοσης ο κόμβος μεταδίδει δεδομένα στο δίκτυο. Με άλλα λόγια, περισσότερος χρόνος σπαταλάται μέχρι να συμφωνήσουν οι κόμβοι για το ποιος θα μεταδώσει παρά για τη μετάδοση των δεδομένων. Όταν σε ένα ασύρματο δίκτυο διακινούνται πολλά πακέτα οι κόμβοι χρειάζεται να ανταγωνισθούν για την πρόσβαση στο κανάλι επικοινωνίας κατά μέσο όρο περισσότερες φορές. Επίσης, όσο περισσότεροι είναι οι κόμβοι που επιθυμούν να μεταδώσουν τόσο ο χρόνος πρόσβασης ενός κόμβου αυξάνεται. Επιπροσθέτως, όταν τα πακέτα που μεταδίδονται έχουν μικρό μέγεθος, ο χρόνος πρόσβασης σε σχέση με τον χρόνο μετάδοσης γίνεται αρκετά μεγάλος. Αυτό παρατηρείται συνήθως σε ένα δίκτυο που μεταδίδονται πακέτα VoIP. Το χαρακτηριστικό της κίνησης VoIP είναι ότι η φωνή τεμαχίζεται σε πολλά μικρά σε μέγεθος πακέτα τα οποία μεταδίδονται στο δίκτυο ώσπου να φτάσουν στον προορισμό τους και να επανασυνδεθούν. Επίσης, οι εφαρμογές VoIP είναι ευάλωτες στην καθυστέρηση και στην απώλεια πακέτων. Όσο περισσότερες ταυτόχρονες κλήσεις VoIP υπάρχουν στο δίκτυο τόσο ο χρόνος πρόσβασης των κόμβων μεγαλώνει με αποτέλεσμα η συνολική καθυστέρηση στο δίκτυο να αυξάνεται. Η καθυστέρηση εισάγει συμφόρηση στους κόμβους του δικτύου που με την σειρά της οδηγεί σε πιθανή απώλεια πακέτων. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ρυθμαπόδοση και η χωρητικότητα του δικτύου σε κλήσεις VoIP μειώνονται, όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου.

Μεταξύ πολλών τεχνικών, η συνάθροιση πακέτων (packet aggregation) έχει προταθεί για τη βελτίωση της μετάδοσης VoIP πάνω από ασύρματα δίκτυα. Η ιδέα σε αυτήν την τεχνική είναι η συνάθροιση πολλών πακέτων που έχουν μικρό μέγεθος σε ένα μεγαλύτερο και η αποστολή του πακέτου αυτού. Στόχος είναι η μείωση των συνολικών μεταδόσεων στο ασύρματο δίκτυο. Η μείωση των μεταδόσεων σημαίνει και μείωση στον συνολικό χρόνο πρόσβασης στο κανάλι αφού οι κόμβοι χρειάζεται να ανταγωνιστούν για το κανάλι κατά μέσο όρο λιγότερες φορές. Με την μείωση του χρόνου ανταγωνισμού περισσότερος χρόνος είναι διαθέσιμος για την μετάδοση των πακέτων αυξάνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου. Η τεχνική αυτή βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή στο VoIP [19], [23], [29], [31], [33] όπου το μέγεθος των πακέτων είναι αρκετά μικρό. Με την συνάθροιση πολλών πακέτων ο χρόνος πρόσβασης στο κοινό μέσο ανά πακέτο μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας καθώς και την αύξηση της χωρητικότητας σε κλήσεις VoIP (περισσότερες ταυτόχρονες κλήσεις). Όσο περισσότερα πακέτα συναθροίζονται τόσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος. Οι κόμβοι κατα μέσο όρο ξοδεύουν λιγότερο χρόνο για την πρόσβαση στο κανάλι έχοντας παράλληλα περισσότερο διαθέσιμο χρόνο για την μετάδοση των πακέτων. Βέβαια ο μέγιστος αριθμός των πακέτων που μπορούν να συναθροιστούν εξαρτάται από το μέγιστο μέγεθος πακέτου (MTU) που ορίζεται στο πρωτόκολλο 802.11b και φυσικά από το μέγεθος των πακέτων VoIP.

Μειονέκτημα της τεχνικής συνάθροισης πακέτων είναι ότι το μέγεθος του συναθροισμένου πακέτου μεγαλώνει όσο περισσότερα πακέτα συναθροίζονται. Αυτό δημιουργεί δύο σημαντικά προβλήματα:

1. ο χρόνος μετάδοσης ενός συναθροισμένου πακέτου γίνεται αρκετά μεγάλος με αποτέλεσμα η πιθανότητα σφάλματος να είναι μεγάλη



2. όταν ένας κόμβος μεταδίδει ένα συναθροισμένο πακέτο κατέχει το κανάλι για μεγάλο χρονικό διάστημα, με συνέπεια να καθυστερεί την μετάδοση των υπολοίπων κόμβων (στην εμβέλεια του)

Επιπρόσθετα, για να επιφέρει μεγάλα κέρδη η τεχνική συνάθροισης πακέτων θα πρέπει τα πακέτα που συναθροίζονται να έχουν μικρό μέγεθος (payload) έτσι ώστε η συνάθροιση να αφορά μεγαλύτερο αριθμό πακέτων. Όμως το μικρό μέγεθος πακέτου σημαίνει χαμηλή ποιότητα φωνής. Συνεπώς, η συνάθροιση πακέτων δεν αποδίδει ικανοποιητικά σε συστήματα VoIP όπου χρησιμοποιείται μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου δηλαδή καλύτεροι σε ποιότητα κωδικοποιητές (codec).

Με κίνητρο τη βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές. Μία νέα τεχνική υπό τον όρο Πρακτική Κωδικοποίηση Δικτύου (Practical Network Coding) [2] έχει βρει πρακτική εφαρμογή στα ασύρματα δίκτυα, προσφέροντας λύσεις σε διάφορα προβλήματα. Η τεχνική αυτή είναι δανεισμένη από την Θεωρία της Πληροφορίας. Η βασική ιδέα της κωδικοποίησης δικτύου στηρίζεται στην δημιουργία ενός πακέτου από τον συνδυασμό πολλών άλλων και μετάδοση μονάχα αυτού του πακέτου. Η βασική διαφορά της κωδικοποίησης δικτύου από την συνάθροιση πακέτων, η οποία είναι χρήσιμη για την μετάδοση VoIP, είναι ότι στην συνάθροιση δύο ή περισσότερων πακέτων το νέο πακέτο έχει μέγεθος ίσο με το άθροισμα των επιμέρους πακέτων. Αντίθετα, στην κωδικοποίηση δικτύου η κωδικοποίηση δύο ή περισσότερων πακέτων που έχουν το ίδιο μέγεθος παράγει ένα νέο πακέτο που έχει μέγεθος ίσο με το μέγεθος του ενός πακέτου. Στην χειρότερη περίπτωση όπου τα πακέτα που κωδικοποιούνται έχουν διαφορετικό μέγεθος, το μέγεθος του νέου πακέτου έχει μέγεθος ίσο με το μέγεθος του μεγαλύτερου από τα πακέτα που κωδικοποιούνται. Συνεπώς, σημαντική ιδιότητα της κωδικοποίησης δικτύου είναι ότι το μέγεθος του νέου (κωδικοποιημένου) πακέτου δεν αυξάνεται¹ όσο περισσότερα πακέτα κωδικοποιούνται. Ανάμεσα στις δυο τεχνικές, σημαντική είναι και η διαφορά στο είδος των πακέτων που δημιουργούν. Στην συνάθροιση πακέτων τα πακέτα που συνενώνονται δημιουργούν ένα μεγαλύτερο πακέτο που ωστόσο αυτό διατηρεί τα επιμέρους πακέτα αυτούσια. Αντίθετα, στην κωδικοποίηση δικτύου η κωδικοποίηση των πακέτων έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός εντελώς νέου πακέτου, που δεν περιέχει αυτούσια τα επιμέρους πακέτα. Το κωδικοποιημένο πακέτο δεν μπορεί να “αναγνωστεί” αν πρώτα δεν αποκωδικοποιηθεί.

Η βασική πρόταση αυτής της διατριβής είναι ο συνδυασμός της τεχνικής συνάθροισης πακέτων με την τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου. Αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτού είναι ο αλγόριθμος NCA (Network Coding - Aggregation). Στόχος του αλγόριθμου NCA είναι η εκμετάλλευση των κυριότερων πλεονεκτημάτων των δύο παραπάνω τεχνικών. Στην κωδικοποίηση δικτύου το σημαντικότερο χαρακτηριστικό είναι ότι δεν υπάρχει περιορισμός για το πλήθος των πακέτων που μπορούν να κωδικοποιηθούν εφόσον το μέγεθος του πακέτου

¹ Στην πραγματικότητα υπάρχει μία μικρή αύξηση λόγω της προσθήκης του διανύσματος κωδικοποίησης. Το μέγεθος του διανύσματος κωδικοποίησης είναι σημαντικά μικρότερο από το μέγεθος των πακέτων. Λεπτομέρειες περί του ζητήματος αυτού θα δοθούν στη συνέχεια.



δεν αυξάνεται. Ωστόσο, η εύρεση πολλών κατάλληλων πακέτων για την κωδικοποίηση είναι μια δύσκολη διαδικασία επειδή τα πακέτα που κωδικοποιούνται πρέπει να πληρούν κάποιες απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε να είναι δυνατή η αποκωδικοποίηση. Στην συνάθροιση πακέτων, τα πακέτα που συναθροίζονται δεν χρειάζεται να πληρούν κάποια κριτήρια. Ο μόνος περιορισμός σε αυτήν την τεχνική είναι στο πλήθος των πακέτων που συναθροίζονται αφού το συνολικό μέγεθος τους δεν πρέπει να ξεπερνάει το μέγιστο επιτρεπτό μέγεθος πακέτου.

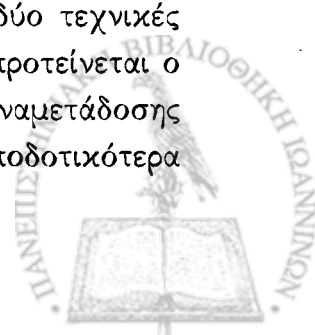
Ο συνδυασμός των σημαντικότερων χαρακτηριστικών των δύο παραπάνω τεχνικών σε ένα ασύρματο δίκτυο που δρομολογεί κίνηση VoIP αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως:

1. μικρότερο μέγεθος πακέτου με την κωδικοποίηση των πακέτων
2. μικρότερο χρόνο κατοχής του καναλιού από έναν κόμβο που μεταδίδει ένα κωδικοποιημένο πακέτο
3. δυνατότητα συνδυασμού περισσότερων πακέτων με τον συνδυασμό της συνάθροισης και της κωδικοποίησης

Ο αλγόριθμος NCA σε σχέση με τους αλγόριθμους συνάθροισης πακέτων δεν αυξάνει (σημαντικά) το μέγεθος του πακέτου. Αυτό αποφέρει μικρότερο χρόνο μετάδοσης των πακέτων στο δίκτυο, που με την σειρά του συμβάλει στην καλύτερη ποιότητα της συνομιλίας. Επιπλέον, η δυνατότητα συνδυασμού περισσότερων πακέτων καθιστά ικανό τον αλγόριθμο NCA να αντεπεξέρχεται σε συνθήκες συμφόρησης. Όταν υπάρχουν πολλά πακέτα στο δίκτυο, δηλαδή πολλές κλήσεις VoIP, η δυνατότητα του NCA να συνδυάζει περισσότερα πακέτα σε σχέση με τους αλγόριθμους συνάθροισης πακέτων αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου.

Από την άλλη η κωδικοποίηση δικτύου, αν και επιτρέπει την κωδικοποίηση των πακέτων χωρίς να αυξάνει το μέγεθος του, η εύρεση όσο το δυνατόν περισσότερων πακέτων ώστε να αυξηθεί το κέρδος από την κωδικοποίηση είναι μία δύσκολη διαδικασία. Ο μέγιστος αριθμός πακέτων που μπορούν να κωδικοποιηθούν εξαρτάται από διάφορους παράγοντες του δικτύου όπως είναι η τοπολογία του, ο αριθμός των κόμβων, ο αριθμός των γειτόνων ενός κόμβου, κ.α. Ωστόσο ο αλγόριθμος NCA με τον συνδυασμό της συνάθροισης και της κωδικοποίησης των πακέτων αυξάνει σημαντικά τον μέγιστο αριθμό πακέτων που μπορούν να συνδυαστούν. Αυτό επιτυγχάνεται με την συνάθροιση κωδικοποιημένων πακέτων. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος NCA συναθροίζει πακέτα τα οποία προηγουμένως έχει κωδικοποιήσει. Με αυτόν τον τρόπο ξεπερνάει τον περιορισμό των αλγορίθμων κωδικοποίησης δικτύου όσον αφορά την δυσκολία εύρεσης μεγάλου αριθμού πακέτων για κωδικοποίηση.

Σε αυτήν την διατριβή κατ' επέκταση του αλγόριθμου NCA προτείνονται δύο τεχνικές που στοχεύουν στην περαιτέρω βελτίωση του βασικού αλγόριθμου. Αρχικά προτείνεται ο αλγόριθμος NCA-P ο οποίος έχει ως στόχο την μείωση της καθυστέρησης αναμετάδοσης των πακέτων όταν υπάρχουν συγκρούσεις στο δίκτυο. Ο NCA-P αξιοποιεί αποδοτικότερα



το υποεπίπεδο MAC μειώνοντας την μέση καθυστέρηση αναμετάδοσης των πακέτων φωνής. Τέλος, προτείνεται ο αλγόριθμος NCA-FS, ο οποίος αποτελεί επέκταση του NCA-P και εισάγει μία νέα τεχνική διάσωσης των χαμένων πακέτων απαλλαγμένη από την ανάγκη για νέες μεταδόσεις. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται την προγραμματισμένη μετάδοση ενός πακέτου για να ενσωματώσει σε αυτό (piggyback) πακέτα τα οποία έχουν αποτύχει να αποσταλούν σε προηγούμενες προσπάθειες μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερο ποσοστό αξιοπιστίας όσον αφορά τις απώλειες πακέτων.

1.3 Δομή της Διατριβής

Η διατριβή έχει την ακόλουθη διάρθρωση. Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται τα βασικότερα συστατικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα VoIP. Επίσης, περιγράφεται η τεχνική συνάθροισης πακέτων με παράλληλη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και τέλος γίνεται μία εισαγωγή στην πρακτική κωδικοποίηση δικτύου. Το Κεφάλαιο 3, παρουσιάζει τα βασικότερα ζητήματα υλοποίησης που αφορούν τη σχεδίαση αλγορίθμων που χρησιμοποιούν την τεχνική συνάθροισης πακέτων. Επίσης, γίνεται μία αναλυτική περιγραφή του αλγόριθμου HHA, ο οποίος είναι ο αποδοτικότερος αλγόριθμος που χρησιμοποιεί την τεχνική της συνάθροισης σε ad-hoc δίκτυα πολλών αλμάτων. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι προτεινόμενες λύσεις για το πρόβλημα μετάδοσης VoIP σε ασύρματα δίκτυα πολλών αλμάτων. Αρχικά γίνεται η απαραίτητη αναφορά στα ζητήματα ενσωμάτωσης της κωδικοποίησης δικτύου σε αλγορίθμους μετάδοσης VoIP. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τρεις νέοι αλγόριθμοι, NCA, NCA-P και NCA-FS και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Στο Κεφάλαιο 5, αρχικά παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης πάνω στο οποίο βασίζεται η αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων. Ακολουθεί η περιγραφή των παραμέτρων και των μετρικών που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και ο απαραίτητος σχολιασμός της απόδοσης των αλγορίθμων. Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Voice Over Internet Protocol

2.2 Συνάθροιση Πακέτων

2.3 Κωδικοποίηση Δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μία περιγραφή των απαραίτητων στοιχείων ενός συστήματος VoIP. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η τεχνική της συνάθροισης πακέτων με παράλληλη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου για την κατανόηση της κωδικοποίησης δικτύου περιγράφονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της τεχνικής αυτής και παρουσιάζεται η υλοποίηση της στα πλαίσια ενός πρωτοκόλλου δικτύωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλο COPE [18] που είναι το πρώτο πρωτόκολλο δρομολόγησης που ενσωμάτωσε την κωδικοποίηση δικτύου.

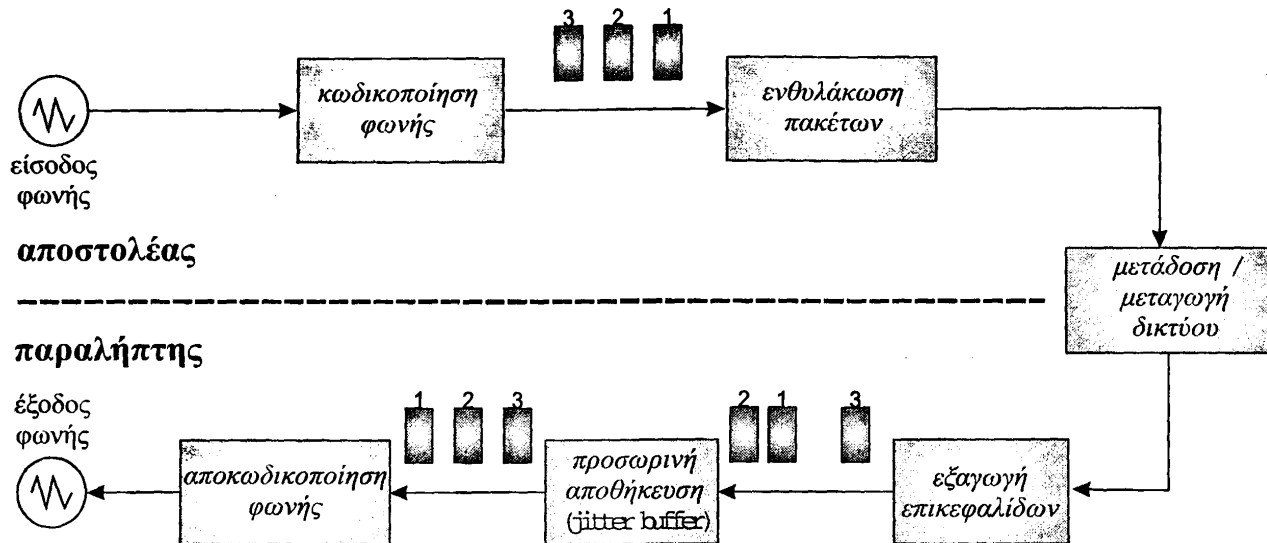
2.1 Voice Over Internet Protocol

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι σημαντικότερες λειτουργίες ενός συστήματος VoIP. Αρχικά γίνεται μία περιγραφή των σημαντικότερων στοιχείων που αποτελούν ένα σύστημα VoIP, στην συνέχεια περιγράφεται ο ρόλος των κωδικοποιητών φωνής και τέλος γίνεται μία αναφορά στα διάφορα μοντέλα εκτίμησης της ποιότητας φωνής.



2.1.1 Περιγραφή Συστήματος VoIP

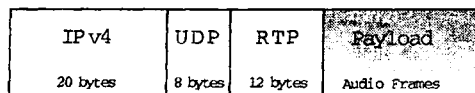
Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε την διαδικασία που ακολουθείται σε ένα σύστημα VoIP για την μετάδοση της φωνής από τον αποστολέα ως τον παραλήπτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Επεξεργασία Σημάτων Φωνής σε ένα Σύστημα VoIP

Η διαδικασία στον αποστολέα περιλαμβάνει την μετατροπή της αναλογικής φωνής σε ψηφιακή και την ενθυλάκωση της σε πακέτα IP. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η κωδικοποίηση της φωνής σε μορφή που μπορεί να μεταδοθεί πάνω από ένα δίκτυο δεδομένων. Η κωδικοποίηση γίνεται από τους κωδικοποιητές (codecs). Οι κωδικοποιητές εκτός από την μετατροπή της φωνής σε ψηφιακή χρησιμοποιούν και κάποιον αλγόριθμο συμπίεσης. Αποτέλεσμα των κωδικοποιητών είναι η φωνή να τεμαχίζεται σε μικρά πακέτα (το μέγεθος τους εξαρτάται από το είδος του κωδικοποιητή που χρησιμοποιείται όπως θα περιγράψουμε στην επόμενη ενότητα). Τα πακέτα αυτά αποτελούν το ωφέλιμο φορτίο της φωνής (payload). Μαζί με το payload, σε ένα πακέτο εισάγονται και οι απαραίτητες επικεφαλίδες πρωτοκόλλων για την μετάδοση του. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται είναι το RTP, το UDP και το IP. Το RTP είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως είναι το VoIP. Η επικεφαλίδα RTP έχει μέγεθος 12 bytes και τα βασικότερα πεδία που περιέχει είναι η χρονοσφραγίδα (timestamp) και ένας αριθμός ακολουθίας (sequence number). Το πεδίο timestamp περιέχει τον χρόνο που δημιουργήθηκε το πακέτο και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της καθυστέρησης. Ο αριθμός ακολουθίας είναι απαραίτητος για την επανατοποθέτηση των πακέτων στην σωστή σειρά στον παραλήπτη. Το πρωτόκολλο RTP χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο μεταφοράς UDP. Το UDP είναι ένα μη αξιόπιστο πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση (connectionless). Ωστόσο, χρησιμοποιείται στο VoIP γιατί δεν εισάγει μεγάλη καθυστέρηση σε αντίθεση με το πρωτόκολλο TCP. Η επικεφαλίδα UDP έχει μέγεθος 8 bytes και περιέχει το source και το destination port, το length και το πεδίο checksum του πακέτου. Τέλος, εισάγεται στο πακέτο

η επικεφαλίδα IP η οποία έχει μέγεθος 20 bytes και τα βασικότερα πεδία που περιέχει είναι η διεύθυνση του αποστολέα και του παραλήπτη. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ενθυλάκωσης τα πακέτα δρομολογούνται στο δίκτυο μέχρι να φτάσουν στον παραλήπτη.



Σχήμα 2.2: Ενθυλάκωση Πακέτου VoIP

Κατά την δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο από τον αποστολέα μέχρι τον παραλήπτη είναι δυνατόν τα πακέτα να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές. Συνεπώς μπορεί να φτάσουν στον παραλήπτη με διαφορετική καθυστέρηση και με διαφορετική σειρά σε σχέση με την σειρά που δημιουργήθηκαν στον αποστολέα. Στην χειρότερη περίπτωση μερικά πακέτα μπορεί να χαθούν λόγω της συμφόρησης ή λαθών κατά την μετάδοση.

Στον παραλήπτη η διαδικασία περιλαμβάνει την αντίστροφη λειτουργία. Αρχικά πραγματοποιείται η εξαγωγή των επικεφαλίδων IP και UDP. Επειδή τα πακέτα όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να φτάσουν με διαφορετική σειρά είναι απαραίτητη η ταξινόμηση τους στην σειρά με την οποία δημιουργήθηκαν στον αποστολέα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης στον παραλήπτη (jitter buffer) με την βοήθεια των πεδίων sequence number και timestamp της επικεφαλίδας RTP. Εκεί τα πακέτα αποθηκεύονται για ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι να δοθούν την κατάλληλη στιγμή για αποκωδικοποίηση. Είναι σημαντικό ένα πακέτο να μην φτάσει στον παραλήπτη τη στιγμή που ένα επόμενο πακέτο (με βάση την σειρά δημιουργίας στον αποστολέα) έχει δοθεί για την αναπαραγωγή της φωνής. Σε αυτήν την περίπτωση το πακέτο που καθυστέρησε αρκετά απορρίπτεται. Τέλος, η αποκωδικοποίηση εκτελείται από τους κωδικοποιητές με τον αντίστροφο τρόπο από την κωδικοποίηση.

Σε ένα σύστημα VoIP, είναι σημαντικό και το πρωτόκολλο σηματοδοσίας που χρησιμοποιείται (π.χ. SIP, H.323, SCCP). Τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας είναι υπεύθυνα για την εγκαθίδρυση μιας κλήσης VoIP. Καθορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας των συμμετεχόντων σε μία σύνοδο και παρέχουν όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για την δημιουργία και τον τερματισμό των κλήσεων. Σε αυτήν την διατριβή τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας δεν θα εξεταστούν περαιτέρω.

2.1.2 Κωδικοποίητες Φωνές

Για την μεταφορά των αναλογικών σημάτων φωνής σε ένα ψηφιακό δίκτυο είναι απαραίτητη η μετατροπή τους σε ψηφιακή μορφή. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αυτό γίνεται με την βοήθεια των αλγορίθμων κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης της φωνής που καλούνται κωδικοποιητές (COder/DECOder). Ένας κωδικοποιητής παίρνει ως είσοδο το αναλογικό σήμα της φωνής και το κωδικοποιεί δημιουργώντας πλαίσια (frames) που έχουν το ίδιο μέγεθος. Ένα ή περισσότερα πλαίσια συνδυάζονται για να αποτελέσουν το payload ενός πακέτου. Εκτός από την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση ένας κωδικοποιητής χρησιμοποιεί τεχνικές συμπίεσης/αποσυμπίεσης της φωνής, με σκοπό να μειωθεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης για την μεταφορά της. Όσο μεγαλύτερη συμπίεση πραγματοποιείται, τόσο λιγότερο εύρος ζώνης χρησιμοποιείται με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα της συνομιλίας. Υπάρχουν διάφοροι κωδικοποιητές που χρησιμοποιούνται οι οποίοι διαφέρουν στον αλγόριθμο κωδικοποίησης, στο απαιτούμενο εύρος ζώνης, στην ποιότητα της φωνής και στην πολυπλοκότητα. Μερικοί κωδικοποιητές υποστηρίζουν επίσης την τεχνική ανίχνευσης δραστηριότητας φωνής (voice activity detection). Όταν δεν υπάρχει δραστηριότητα φωνής από τον ομιλητή δεν πραγματοποιείται κωδικοποίηση και δεν μεταφέρονται πακέτα στο δίκτυο. Με αυτήν την τεχνική γίνεται εξοικονόμηση του εύρους ζώνης του δικτύου.

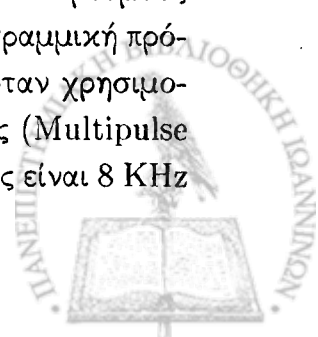
Στην συνέχεια περιγράφονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των δημοφιλέστερων κωδικοποιητών.

G.711

Ένας από τους παλαιότερους κωδικοποιητές είναι και ο ITU-T G.711 [11]. Ο κωδικοποιητής αυτός έχει δύο εκδόσεις, την μ -Law, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στην Β.Αμερική και την Ιαπωνία, και την A-Law η οποία χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο. Για την κωδικοποίηση των αναλογικών σημάτων χρησιμοποιεί την παλμοκωδική διαμόρφωση (PCM) με συχνότητα δειγματοληψίας 8 KHz. Το κάθε δείγμα αναπαρίσταται με 8 bit με αποτέλεσμα ο G.711 να έχει ένα ρυθμό μετάδοσης των 64 kbps. Κάθε πακέτο που δημιουργεί αποτελείται από ένα πλαίσιο το οποίο περιέχει δείγματα διάρκειας 20 ms. Συνεπώς, το ωφέλιμο φορτίο του κάθε πακέτου που δημιουργεί κάθε 20 ms είναι 160 Byte. Γενικά, ο G.711 έχει αυξημένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, μικρή καθυστέρηση αλλά πολύ καλή ποιότητα φωνής.

G.723.1

Ένας άλλος κωδικοποιητής που δημιουργήθηκε από την ITU-T είναι ο G.723.1 [12]. Είναι διαφορετικός από τον G.723, ο οποίος είναι ξεπερασμένος. Υποστηρίζει δύο ρυθμούς μετάδοσης 5.3 και 6.3 kbps όταν χρησιμοποιεί την τεχνική κωδικοποίησης με γραμμική πρόβλεψη αλγεβρικού κώδικα (Algebraic-Code-Excited Linear-Prediction) και όταν χρησιμοποιεί την τεχνική κωδικοποίησης πολυπαλμική χβάντιση μέγιστης πιθανότητας (Multipulse Maximum Likelihood Quantization) αντίστοιχα. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8 KHz



και το κάθε πλαίσιο περιέχει δείγματα διάρκειας 30 ms και στις δύο περιπτώσεις. Το ωφέλιμο φορτίο ενός πακέτου (κάθε πακέτο περιέχει ένα πλαίσιο) είναι 20 Bytes με τον ρυθμό 5.3 kbps και 24 Bytes με τον ρυθμό 6.3 kbps. Ο κωδικοποιητής G.723.1, λόγω του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, έχει χειρότερη ποιότητα φωνής συγκριτικά με τον κωδικοποιητή G.711.

G.726-32

Ο κωδικοποιητής G.726 [13] έχει πολλές εκδόσεις που λειτουργούν σε διαφορετικούς ρυθμούς 16-24-32 και 40 kbps. Η πιο διαδεδομένη έκδοση που χρησιμοποιείται είναι αυτή με ρυθμό 32 kbps (G.726-32). Ο κωδικοποιητής αυτός χρησιμοποιεί την τεχνική κωδικοποίησης Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM) με συχνότητα δειγματοληψίας 8 KHz. Για την αναπαράσταση ενός δείγματος χρησιμοποιεί 4 bit. Το κάθε πλαίσιο αποτελείται από δείγματα διάρκειας 20 ms και το ωφέλιμο φορτίο ενός πακέτου, το οποίο αποτελείται από ένα πλαίσιο, έχει μέγεθος 80 Bytes.

G.729a

Ο κωδικοποιητής G.729a είναι μία επέκταση του G.729 [14] με λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Χρησιμοποιεί την τεχνική κωδικοποίησης Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear-Prediction (CS-ACELP) με συχνότητα δειγματοληψίας 8 KHz και η αναπαράσταση κάθε δείγματος γίνεται με 1 bit. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 8 kbps και το κάθε πλαίσιο περιέχει δείγματα διάρκειας 10 ms. Ο κωδικοποιητής G.729a συνδυάζει δύο πλαίσια για την δημιουργία ενός πακέτου κάθε 20 ms. Το ωφέλιμο φορτίο ενός πακέτου έχει μέγεθος 20 Bytes. Παράγει πολύ καλή ποιότητα φωνής σε σχέση με το χαμηλό εύρος ζώνης που απαιτεί και γι' αυτό χρησιμοποιείται συχνά σε πολλές VoIP εφαρμογές.

Στον Πίνακα 2.1 συγκεντρώνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων κωδικοποιητών.

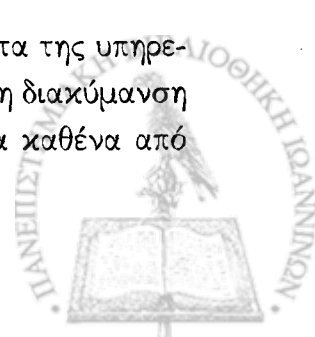
Πίνακας 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων κωδικοποιητών

Codec	Bitrate (kbps)	Framing Interval (ms)	Payload Size (bytes)	Packets/sec
G.711	64	20	160	50
G.723.1	5.3/6.3	30	20/24	33
G.726-32	32	20	80	50
G.729a	8	10	20	50*

*στον κωδικοποιητή G.729a ένα πακέτο αποτελείται από δύο πλαίσια

2.1.3 Παράγοντες Ποιότητας VoIP

Τρία είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της υπηρεσίας σε ένα σύστημα VoIP. Αυτά είναι η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων και η διακύμανση της καθυστέρησης. Παρακάτω θα περιγράψουμε με περισσότερη λεπτομέρεια καθένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά.



Καθυστέρηση

Καθυστέρηση είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταφερθεί ένα πακέτο φωνής από την πηγή ως τον παραλήπτη. Η ITU-T ορίζει αυτό το χρονικό διάστημα ως καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay), ωστόσο μπορεί να το συναντήσουμε και ως mouth-to-ear delay ή one-way delay. Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι το σύνολο των καθυστερήσεων που εισάγεται από τον αποστολέα, το δίκτυο και τον παραλήπτη.

Στον αποστολέα η καθυστέρηση δημιουργείται από την κωδικοποίηση (encoding delay) και την πακετοποίηση της φωνής (packetization delay). Ο χρόνος που χρειάζεται για την κωδικοποίηση και την συμπίεση των σημάτων φωνής ονομάζεται καθυστέρηση κωδικοποίησης. Ο χρόνος για την δημιουργία των πακέτων από τα κωδικοποιημένα πλαίσια ονομάζεται καθυστέρηση πακετοποίησης. Και οι δύο καθυστερήσεις εξαρτώνται από τον κωδικοποιητή που χρησιμοποιείται.

Η καθυστέρηση που εισάγεται από το δίκτυο είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα πακέτο να μεταδοθεί από τον αποστολέα ως τον παραλήπτη. Η καθυστέρηση αυτή προκύπτει από το άθροισμα τριών καθυστερήσεων: την καθυστέρηση μετάδοσης (transmission delay), την καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) και την καθυστέρηση της αναμονής των πακέτων στις ουρές των κόμβων.

Στον παραλήπτη η καθυστέρηση εισάγεται από τον προσωρινό χώρο αποθήκευσης (jitter buffer), ο οποίος χρησιμοποιείται για να θέσει στην σωστή σειρά πακέτα από την ίδια συνομιλία, καθώς και από τον χρόνο που χρειάζεται για την εξαγωγή της φωνής από τα πακέτα και την αποκωδικοποίηση της.

Η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση για μια κλήση VoIP είναι διαφορετική για κάθε κατεύθυνση της συνομιλίας επειδή τα πακέτα μπορεί να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές. Η ITU-T προτείνει μέγιστη από άκρο σε άκρο καθυστέρηση 150ms [10]. Καθυστέρηση μεγαλύτερη από 150ms είναι αισθητή στους χρήστες και μεγαλύτερη από 400ms καθιστά την συνομιλία κακής ποιότητας.

Πίνακας 2.2: Όρια για την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση σύμφωνα με την ITU-T [10]

End-To-End Delay (ms)	Quality
0-150	Acceptable for most users
150-400	Acceptable but has impact
> 400	Unacceptable



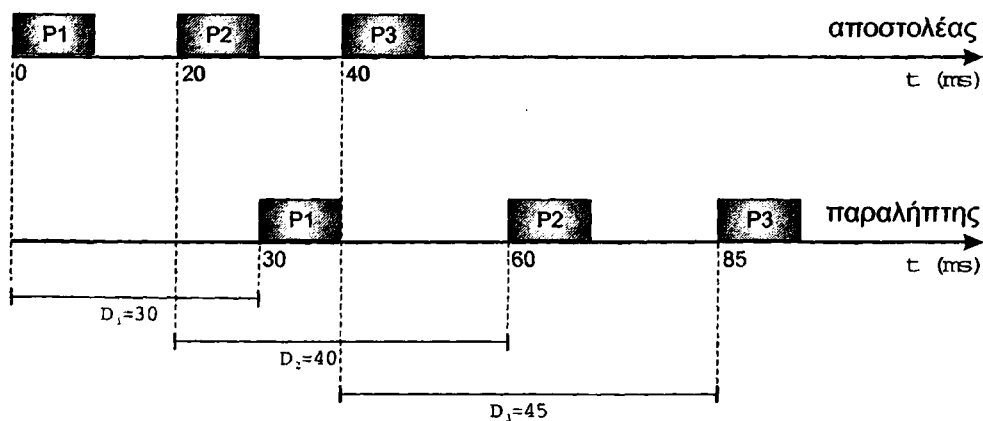
Απώλεια Πακέτων

Κατά την μετάδοση των πακέτων φωνής πάνω από ένα δίκτυο IP τα πακέτα μπορεί να χαθούν. Οι λόγοι που οδηγούν σε απώλεια πακέτων είναι συνήθως η συμφόρηση του δικτύου και τα σφάλματα κατά την μετάδοση. Ωστόσο, υπάρχουν τεχνικές διαχείρισης της ουράς των κόμβων που απορρίπτουν σκοπίμως πακέτα τα οποία βρίσκονται στην ουρά και έχουν ξεπεράσει ένα όριο καθυστέρησης ώστε να μειωθεί η συμφόρηση στο δίκτυο [3]. Λόγω της κρίσιμότητας της καθυστέρησης οι τεχνικές επαναμετάδοσης των χαμένων πακέτων (retransmission) δεν χρησιμοποιούνται συχνά σε VoIP εφαρμογές. Αντίθετα, τεχνικές αντικατάστασης των χαμένων πακέτων (packet loss concealment) έχουν προταθεί [25]. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο αποκωδικοποιητής προσπαθεί να αναπληρώσει τα κενά που αφήνουν τα χαμένα πακέτα είτε με την απλή επανάληψη του τελευταίου πακέτου που έχει ληφθεί σωστά είτε με τον υπολογισμό του χαμένου πακέτου με βάση τα κοντινότερα πακέτα.

Ως ποσοστό των χαμένων πακέτων ορίζεται ο λόγος του αριθμού των χαμένων πακέτων προς τον αριθμό των πακέτων που στάλθηκαν. Ένα πακέτο θεωρείται επίσης χαμένο όταν φθάσει στον προορισμό του αλλά δεν μπορεί να αναπαραχθεί λόγω της μεγάλης καθυστέρησης. Το αποδεκτό ποσοστό των χαμένων πακέτων εξαρτάται από τον κωδικοποιητή και το μέγεθος του payload που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, στην μετάδοση της φωνής η απώλεια N συνεχόμενων πακέτων έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην ποιότητα της από την απώλεια N μη συνεχόμενων πακέτων. Γι' αυτό τον λόγο, μερικές φορές γίνεται διαχωρισμός μεταξύ της απώλειας πακέτων και των ριπών απωλειών πακέτων (bursty packet loss).

Διακύμανση της Καθυστέρησης (Delay Jitter)

Σε μία κλήση φωνής τα πακέτα στον αποστολέα δημιουργούνται από τον κωδικοποιητή με σταθερό ρυθμό. Κατά την δρομολόγηση τους στο δίκτυο τα πακέτα μπορεί να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές μέχρι να φτάσουν στον παραλήπτη. Συνεπώς, η καθυστέρηση διαφέρει συνήθως από πακέτο σε πακέτο. Η μεταβλητότητα της καθυστέρησης συνεχόμενων πακέτων τα οποία αποστέλλονται με σταθερό ρυθμό ονομάζεται delay jitter.



Σχήμα 2.3: Διακύμανση Καθυστέρησης (Delay Jitter)



Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η μετάδοση τριών πακέτων με σταθερό ρυθμό (κάθε $T = 20ms$). Τα πακέτα $P1$, $P2$ και $P3$ αποστέλλονται τις χρονικές στιγμές 0, 20, 40 ms αντίστοιχα και μετά την δρομολόγησή τους στο δίκτυο φθάνουν στον παραλήπτη τις χρονικές στιγμές 30, 60 και 85 ms αντίστοιχα. Η καθυστέρηση του πακέτου $P1$ είναι $D_1 = 30ms$, του $P2$ είναι $D_2 = 40ms$ και του $P3$ είναι $D_3 = 45ms$. Το πρώτο δείγμα jitter υπολογίζεται ως εξής: $J_1 = |D_2 - D_1| = 10ms$. Αντίστοιχα το δεύτερο δείγμα jitter είναι ίσο με $J_2 = |D_3 - D_2| = 15ms$.

Όταν το jitter είναι μεγάλο επηρεάζει την ορθή αναπαραγωγή της φωνής στην πλευρά του παραλήπτη. Όταν ένα πακέτο καθυστερήσει σημαντικά περισσότερο ή λιγότερο σε σχέση με τα προηγούμενα πακέτα τότε αυτό το πακέτο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή της φωνής. Γι' αυτό στην πλευρά του παραλήπτη χρησιμοποιείται ένας προσωρινός χώρος αποθήκευσης των πακέτων (jitter buffer). Με την προσωρινή αποθήκευση των πακέτων ομαλοποιείται η διακύμανση της καθυστέρησης για τα πακέτα που φθάνουν πιο αργά ή πιο νωρίς σε σχέση με την χρονική στιγμή που πρέπει να αναπαραχθούν. Όσο μεγαλύτερο μέγεθος έχει ο jitter buffer τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγιστο αποδεκτό jitter σε ένα δίκτυο. Το μέγεθος του προσωρινού χώρου αποθήκευσης είναι συνήθως 2-4 πακέτα. Όταν σε ένα σύστημα VoIP το jitter είναι πολύ μεγάλο και ο jitter buffer δεν μπορεί να διαχειριστεί τα πακέτα που λαμβάνει, τότε πολλά πακέτα απορρίπτονται με αποτέλεσμα την μείωση της ποιότητας της φωνής. Συνεπώς, σε ένα σύστημα VoIP εκτός από την καθυστέρηση είναι σημαντική και η διακύμανσή της.

2.1.4 Μοντέλα Εκτίμησης της Ποιότητας Φωνής

Στο VoIP σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα της φωνής κατά την διάρκεια μιας συνομιλίας. Πολλοί είναι οι παράγοντες που συμβάλουν στην υποβάθμιση της φωνής. Η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων, το φαινόμενο της ηχούς (echo effects) ακόμη και η γλώσσα των συνομιλητών είναι από τους παράγοντες που συμβάλλουν, άλλοι περισσότερο και άλλοι λιγότερο, στην υποβάθμιση της συνομιλίας. Για τον λόγο αυτό έχουν υπάρξει διάφορα μοντέλα εκτίμησης της ποιότητας της φωνής. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο κυρίαρχες προσεγγίσεις: η υποκειμενική και η αντικειμενική.

Στην υποκειμενική προσέγγιση το κριτήριο για την βαθμολόγηση της ποιότητας είναι η αντίληψη των ανθρώπων για την υποβάθμιση της ποιότητας της φωνής. Συγκεκριμένα στις προσεγγίσεις αυτές οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε μία σειρά από τεστ που πραγματοποιούνται σε ένα σύνολο από ανθρώπους (target group). Σε αυτά τα τεστ ζητείται από τα άτομα που υποβάλλονται στην διαδικασία να βαθμολογήσουν την ποιότητα ενός συνόλου από δοκιμαστικές κλήσεις (test calls). Ύστερα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων εξάγεται συνήθως ένας αριθμητικός παράγοντας που δηλώνει την ποιότητα της φωνής. Οι μετρήσεις αυτές είναι αρκετά δαπανηρές και δεν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά επειδή χρειάζεται μεγάλος αριθμός ατόμων και μεγάλος αριθμός επαναλήψεων των δοκιμασιών για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.



Στην αντικειμενική προσέγγιση χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος (μοντέλο) που λαμβάνει υπόψιν όλους τους πιθανούς παράγοντες που συντελούν στην μείωση της ποιότητας της φωνής. Η είσοδος του μοντέλου είναι οι παράγοντες υποβάθμισης όπως η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση, η ηχώ (voice echo), κλπ. Σε αυτό το μοντέλο όλοι οι παραπάνω παράγοντες θεωρείται ότι συμβάλλουν προσθετικά στην υποβάθμιση της ποιότητας της φωνής. Το αποτέλεσμα των μεθόδων αυτών είναι συνήθως ένας αριθμητικός παράγοντας που βαθμολογεί την ποιότητα. Οι αντικειμενικές μέθοδοι χωρίζονται περαιτέρω σε *intrusive* και *non-intrusive*. Στις *intrusive* μεθόδους για την μέτρηση της ποιότητας χρησιμοποιούνται δύο σήματα φωνής, το αρχικό σήμα εισόδου στο δίκτυο (μη-αλλοιωμένο σήμα) και το σήμα που παράγεται ύστερα από την μεταφορά του πάνω από το δίκτυο (αλλοιωμένο σήμα). Η σύγκριση των δύο αυτών σημάτων παράγει μία μετρική της ποιότητας της φωνής στο δίκτυο. Στις *non-intrusive* μεθόδους η μέτρηση της ποιότητας πραγματοποιείται με την βοήθεια μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο στο δίκτυο κατά την διάρκεια των κλήσεων φωνής. Τέτοιες μετρήσεις είναι συνήθως η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης. Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις, υπολογίζεται ένας αριθμητικός παράγοντας που αντιπροσωπεύει την ποιότητα της φωνής.

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τις πιο γνωστές και συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Για μία ολοκληρωμένη σύνοψη όλων των μεθόδων για την εκτίμηση της ποιότητας της φωνής ο αναγνώστης παραπέμπεται στην εργασία [26].

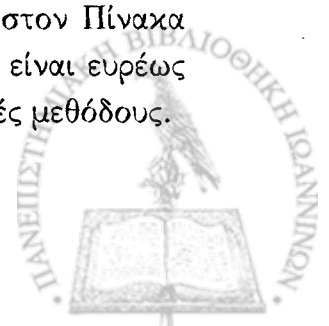
Υποκειμενικές Μέθοδοι (Subjective Methods)

Loss/Noise Grade Model (%GoB %PoW)

Μία πολύ απλή μέθοδος για την μέτρηση της ποιότητας της φωνής είναι το μοντέλο *loss/noise grade* που δημιουργήθηκε από την AT&T [7]. Σε αυτήν την μέθοδο ζητείται από τους υποψήφιους χρήστες να βαθμολογήσουν την ποιότητα ενός συνόλου από δείγματα κλήσεων φωνής σε κατηγορίες (Good or Better, Poor or Worst). Η μέθοδος αυτή είναι πολύ παλιά και ξεπερασμένη.

Mean Opinion Score (MOS)

Το 1996 η ITU-T όρισε μία μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ποιότητας της φωνής [15]. Η μέθοδος αυτή έχει ως σκοπό να παρέχει έναν γενικό κανόνα για κάθε πιθανό παράγοντα υποβάθμισης της φωνής (απώλειες, θόρυβος κυκλώματος, λάθη κατά την μετάδοση, θόρυβος από το περιβάλλον κλπ). Η διαδικασία αξιολόγησης βασίζεται στη γνώμη των χρηστών για την ποιότητα ενός συνόλου από δείγματα φωνής. Τα άτομα που λαμβάνουν μέρος στο τεστ βαθμολογούν την ποιότητα φωνής στην κλίμακα από 1 ως 5 όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3. Ο μέσος όρος των βαθμολογιών είναι η μετρική MOS. Η μετρική MOS είναι ευρέως διαδεδομένη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά από τις υποκειμενικές μεθόδους.



Πίνακας 2.3: Σύγκριση MOS, ποιότητας και εξασθένησης φωνής [15]

MOS	Quality	Impairment
5	Excellent	Imperceptible
4	Good	Perceptible but not Annoying
3	Fair	Slightly Annoying
2	Poor	Annoying
1	Bad	Very Annoying

Αντικειμενικές Μέθοδοι (Objective Methods)

E-Model

Ένα χρήσιμο εργαλείο για την μέτρηση της ποιότητας της φωνής είναι το E-Model [9]. Το E-Model είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο που είναι χρήσιμο στους σχεδιαστές συστημάτων μετάδοσης VoIP. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει όλους τους παράγοντες εξασθένησης της φωνής (impairment parameters) αθροιστικά σε έναν συνολικό παράγοντα αξιολόγησης της ποιότητας. Ο παράγοντας αυτός είναι το R-score και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = R_0 - I_S - I_d - I_e + A \quad (2.1)$$

όπου

- R_0 : αντιπροσωπεύει τον βασικό λόγο σήματος προς θόρυβο (basic signal/noise ratio) που συμπεριλαμβάνει πηγές θορύβου που προέρχονται από το κύκλωμα (αγωγοί) και από τον περιβάλλον
- I_S : είναι το άθροισμα όλων των εξασθενίσεων που εμφανίζονται λίγο πολύ ταυτόχρονα κατά την μετατροπή του σήματος της φωνής σε ψηφιακή μορφή
- I_d : είναι η μείωση της ποιότητας που προκαλείται από την καθυστέρηση (delay) των πακέτων
- I_e : είναι ο παράγοντας υποβάθμισης της ποιότητας λόγω της ποιότητας φωνής που παράγουν οι κωδικοποιητές με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης (low bit rate codecs)
- A : ο παράγοντας αυτός δρα μόνο αυξητικά στον υπολογισμό του R και αντιπροσωπεύει την επίδραση που έχει στον χρήστη η δυνατότητα χρησιμοποίησης της υπηρεσίας τηλεφωνίας σε δύσκολες περιστάσεις (π.χ. ο χρήστης μπορεί να δείξει κατανόηση για την ποιότητα της φωνής όταν χρησιμοποιεί το τηλέφωνο του κινούμενος μέσα σε ένα κτίριο, κινούμενος με κάποιο όχημα ή όταν βρίσκεται σε δύσκολες γεωγραφικά περιοχές



Οι συγγραφείς του [4] θέλοντας να απλοποιήσουν τον υπολογισμό του R-score και να σταθούν στην εξασθένηση που προκαλεί η καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων αντικατέστησαν όλους του παράγοντες (εκτός της καθυστέρησης και την εξασθένηση λόγω απώλειας πακέτων) σύμφωνα με τις προκαθορισμένες τιμές που δίνονται στο πρότυπο της ITU-T [9]. Συγκεκριμένα, ύστερα από μία σειρά παραδοχών και απλοποιήσεων, κατέληξαν ότι για τον κωδικοποιητή G.729a ο παράγοντας R δίνεται από την σχέση:

$$R = 94.2 - 0.024d - 0.11(d - 177.3)H(d - 177.3) - 11 - 40\ln(1 + 10e) \quad (2.2)$$

και για τον κωδικοποιητή G.711 από την σχέση:

$$R = 94.2 - 0.024d - 0.11(d - 177.3)H(d - 177.3) - 30\ln(1 + 15e) \quad (2.3)$$

όπου d είναι η καθυστέρηση (σε ms), e είναι η συνολική πιθανότητα απώλειας πακέτων (στην κλίμακα από 0 ως 1) και H είναι η συνάρτηση βήματος.

Η έξοδος του E-Model, δηλαδή το R-score, μπορεί να μετατραπεί εύκολα στην κλίμακα MOS χρησιμοποιώντας την παρακάτω φόρμουλα:

$$\begin{aligned} \text{για } R < 0 & : MOS = 1 \\ \text{για } 0 \leq R \leq 100 & : MOS = 1 + 0.035 \cdot R + R \cdot (R - 60) \cdot (100 - R) \cdot 7 \cdot 10^{-6} \\ \text{για } R > 100 & : MOS = 4.5 \end{aligned} \quad (2.4)$$

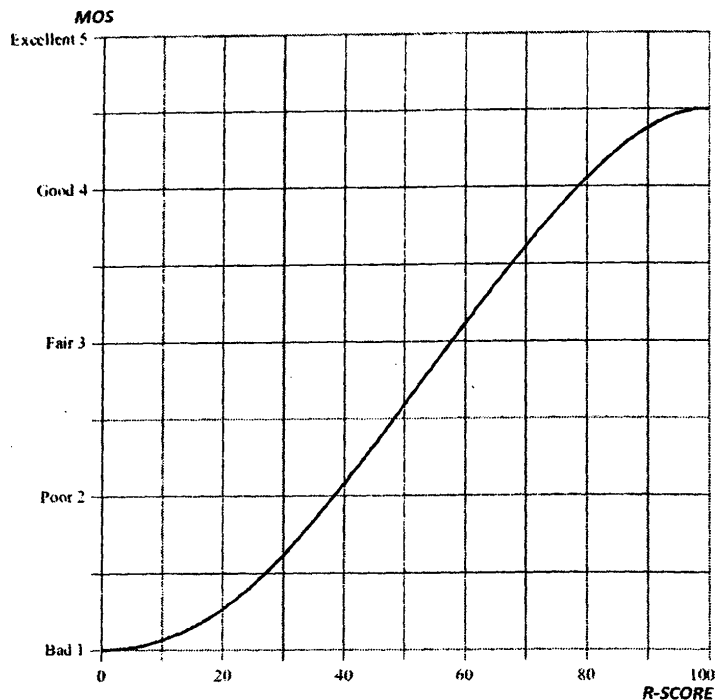
Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η σχέση μεταξύ MOS και R-Score.

Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών R-Score, MOS και %GoB-%PoW φαίνεται στον Πίνακα 2.4

Πίνακας 2.4: Συσχέτιση μεταξύ R-Score, MOS, %GoB-%PoW και ικανοποίηση χρηστών [9]

R-Score (lower limit)	MOS (lower limit)	GoB % (lower limit)	PoW % (lower limit)	User Satisfaction
90	4.34	97	0	Very Satisfied
80	4.03	89	0	Satisfied
70	3.60	73	6	Some Users Dissatisfied
60	3.10	50	17	Many Users Dissatisfied
50	2.58	27	38	Nearly All Users Dissatisfied





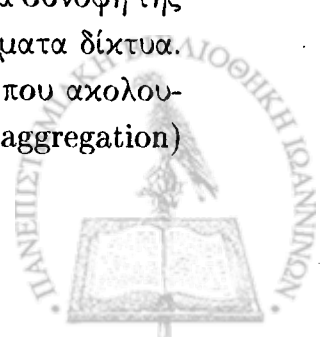
Σχήμα 2.4: Σχέση μεταξύ R-SCORE και MOS [9]

Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)

Το 2001 η ITU-T όρισε την μεθοδολογία Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) [17]. Το PESQ συνδυάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά από δύο προηγούμενα μοντέλα, το PSQM (Perceptual Speech Quality Measure) [16] και το PAMS (Perceptual Analysis/Measurement System). Το PESQ είναι μία intrusive μέθοδος, δηλαδή για τον υπολογισμό του PESQ-score χρειάζεται και το αρχικό και το υποβαθμισμένο σήμα της φωνής. Το μοντέλο αυτό, σε αντίθεση με το μοντέλο PSQM, λαμβάνει υπόψιν την καθυστέρηση, την παραμόρφωση από την κωδικοποίηση του σήματος και τα λάθη του καναλιού μετάδοσης. Σε αντίθεση με το E-model δεν χρειάζεται κάποια γνώση σχετικά με το δίκτυο καθώς χρησιμοποιεί μόνο το αρχικό και το υποβαθμισμένο σήμα της φωνής για τον υπολογισμό του PESQ-score.

2.2 Συνάθροιση Πακέτων

Όπως αναφέρθηκε η συνάθροιση πακέτων αποτελεί ένα σημαντικό μηχανισμό για την βελτίωση της ποιότητας των κλήσεων VoIP. Σε αυτήν την ενότητα ακολουθεί μία σύνοψη της βιβλιογραφίας σχετικά με τις μεθόδους συνάθροισης πακέτων φωνής σε ασύρματα δίκτυα. Οι τεχνικές αυτές διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση τη φιλοσοφία που ακολουθούν: i) επιμήκυνση RTP payload, ii) συνάθροιση στην ίδια κλήση (intra-call aggregation) και iii) συνάθροιση σε διαφορετικές κλήσεις (inter-call aggregation).



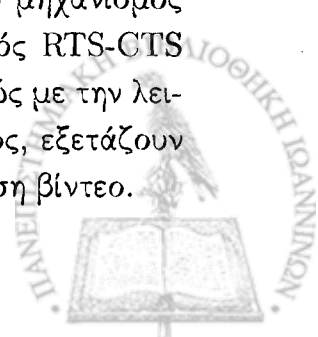
2.2.1 Επιμήκυνση RTP Payload ή Source-based Frame Aggregation

Η λογική αυτής της τεχνικής είναι η επιμήκυνση του audio payload του RTP πακέτου κατά την διαδικασία πακετοποίησης των πλαισίων φωνής στον αποστολέα. Με την επιμήκυνση των πακέτων μεταδίδονται λιγότερα αλλά μεγαλύτερα σε μέγεθος πακέτα. Το πλεονέκτημα είναι ότι οι επιβαρύνσεις (overheads) από τις επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων IP/UDP/RTP αλλά και οι καθυστερήσεις που εισάγει το επίπεδο MAC (contention, backoff, retransmissions) μοιράζονται σε ένα μόνο πακέτο (το οποίο περιέχει πλαίσια που χωρίς την τεχνική της επιμήκυνσης θα χωρίζονταν σε διαφορετικά πακέτα). Η επιμήκυνση του payload των πακέτων είναι μία απλή διαδικασία επειδή μπορεί να πραγματοποιηθεί στις πηγές των κλήσεων VoIP.

Στην εργασία τους οι Garg και Karpes [6] πρώτα αποδεικνύουν με ένα πείραμα ότι ένα ασύρματο δίκτυο με σταθμό βάσης (access point) μπορεί να υποστηρίξει περιορισμένο αριθμό VoIP κλήσεων. Στην συνέχεια προτείνουν την τεχνική επιμήκυνσης του payload των πακέτων στον κωδικοποιητή. Συγκεκριμένα, με την χρησιμοποίηση μεγαλύτερου μεγέθους payload ανά πακέτο στις πηγές των κλήσεων VoIP επιτυγχάνεται αύξηση των ταυτόχρονων κλήσεων στο ασύρματο δίκτυο. Ωστόσο, η επιλογή αρκετά μεγάλου μεγέθους payload έχει σημαντική επίδραση στην συνολική καθυστέρηση, την απώλεια πακέτων και την διακύμανση της καθυστέρησης. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που δεν εξετάζεται από τους συγγραφείς.

Οι Hole και Tobagi [8] με την ίδια τεχνική όπως στην εργασία [6] υπολογίζουν την χωρητικότητα των κλήσεων σε ένα μεγαλύτερο εύρος σεναρίων και περιορισμών. Σε αντίθεση με την εργασία [6] υπολογίζουν την μέγιστη χωρητικότητα κλήσεων με την χρησιμοποίηση προσομοίωσης. Επιπλέον, μετρούν την ποιότητα των κλήσεων με την μετρική MOS και υπολογίζουν την χωρητικότητα κλήσεων σε συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας. Επίσης, δείχνουν ότι η χωρητικότητα των κλήσεων είναι αρκετά ευαίσθητη στην καθυστέρηση μετάδοσης στο ασύρματο δίκτυο.

Η τεχνική της επιμήκυνσης του payload χρησιμοποιείται και στην εργασία [22] για την αύξηση της χωρητικότητας των κλήσεων VoIP. Οι συγγραφείς υπολογίζουν την μέγιστη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με αυτού του είδους την τεχνική και αποδεικνύουν παράλληλα ότι τα πρωτόκολλα με υψηλό εύρος ζώνης όπως τα 802.11a και 802.11g βελτιώνουν κατά 4 φορές τη χωρητικότητα σε σχέση με τα πρωτόκολλα 802.11b και 802.11g. Επίσης, εξετάζουν την μειωμένη απόδοση που επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός RTS-CTS για την εξάλειψη των συγκρούσεων. Συγκεκριμένα, ο μηχανισμός RTS-CTS έχει μεγάλη επίδραση στην αύξηση της καθυστέρησης των πακέτων και συνεπώς με την λειτουργία του μηχανισμού αυτού μειώνεται η χωρητικότητα του δικτύου. Τέλος, εξετάζουν την απόδοση του δικτύου όταν ταυτόχρονα με κίνηση VoIP υπάρχει και κίνηση βίντεο.

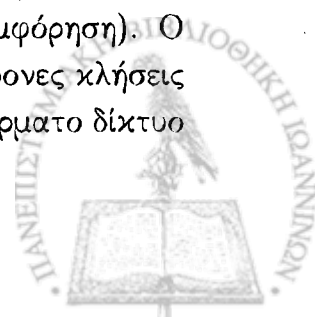


Όλες οι παραπάνω εργασίες στηρίζονται στην επιμήκυνση του audio payload των πακέτων. Το σημαντικότερο πρόβλημα στην τεχνική αυτή είναι η εύρεση του ιδανικού μεγέθους του πακέτου για κάθε δίκτυο. Το πολύ μεγάλο μέγεθος επιφέρει μεγάλη καθυστέρηση στις πηγές των κλήσεων, γεγονός που έχει επίπτωση στην ποιότητα των κλήσεων VoIP. Ωστόσο, μία τέτοια τεχνική αποτελεί μία εύκολη λύση επειδή το μόνο που χρειάζεται είναι η αλλαγή στο μέγεθος του πακέτου που χρησιμοποιούν οι κωδικοποιητές.

2.2.2 Συνάθροιση στην ίδια Κλήση (Intra-call)

Μια βασική ιδέα στις τεχνικές συνάθροισης πακέτων είναι η συνάθροιση πακέτων φωνής να γίνεται όχι μόνο στις πηγές αλλά και στους ενδιάμεσους κόμβους ενός ασύρματου δικτύου. Η λογική της intra-call τεχνικής είναι η συνάθροιση πακέτων που ανήκουν στην ίδια κλήση VoIP ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Έτσι κάθε κόμβος του δικτύου έχει την δυνατότητα να συναθροίζει πακέτα από την ίδια κλήση φωνής και να τα αποστέλλει με μια μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο αριθμός των μεταδόσεων στο δίκτυο όπως επίσης και οι επιβαρύνσεις για κάθε πακέτο φωνής. Τα πακέτα που συναθροίζονται μοιράζονται τις επιβαρύνσεις ενός πακέτου με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής καθυστέρησης.

Στην εργασία τους οι Yun, Kim, Lee και Kang [33] προτείνουν μία intra-call τεχνική για την βελτίωση της χωρητικότητας σε ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή (access point). Αποτέλεσμα της εργασία αυτής είναι ο αλγόριθμος V100+. Η λογική αυτού του αλγόριθμου είναι η συνάθροιση πακέτων της ίδια κλήσης κατά την downlink μετάδοση (aggregation στο σταθμό βάσης) αλλά και κατά την uplink μετάδοση (aggregation στα τερματικά). Στόχος του αλγόριθμου V100+ είναι η αύξηση της χωρητικότητας σε κλήσεις VoIP με την μείωση του αριθμού των πακέτων που μεταδίδονται. Για την συγκέντρωση ικανοποιητικού αριθμού πακέτων σε έναν κόμβο του δικτύου, με σκοπό την συνάθροιση, πολλές τεχνικές προτείνουν την σκόπιμη καθυστέρηση των πακέτων. Ωστόσο, στην εργασία [33] ακολουθείται διαφορετική προσέγγιση καθώς η συνάθροιση των πακέτων πραγματοποιείται μόνο όταν υπάρχει ανάγκη δηλαδή σε κάθε ευκαιρία μετάδοσης (opportunistic aggregation). Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι δεν εισάγει επιπλέον καθυστέρηση στα πακέτα φωνής αφού όπως έχει τονιστεί η καθυστέρηση είναι σημαντική σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο αλγόριθμος V100+ εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι όταν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο συγκεντρώνονται πολλά πακέτα στις ουρές των κόμβων του. Όταν ένας κόμβος αποκτήσει το κανάλι επικοινωνίας για την μετάδοση του πρώτου πακέτου που βρίσκεται στην ουρά εξόδου (output MAC queue) τότε ο αλγόριθμος V100+ εξετάζει εάν υπάρχουν ταυτόχρονα στην ουρά άλλα πακέτα της ίδιας κλήσης. Σε περίπτωση που υπάρχουν, ο αλγόριθμος συναθροίζει όλα τα πακέτα από την ίδια κλήση και τα αποστέλλει με μία μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται εύρος ζώνης μόνο όταν υπάρχει έλλειψη (δηλ. συμφόρηση). Ο αλγόριθμος V100+ καταφέρνει να υποστηρίξει περισσότερες από 100 ταυτόχρονες κλήσεις κάτω από συγκεκριμένα όρια καθυστέρησης και απώλειας πακέτων σε ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 802.11b.



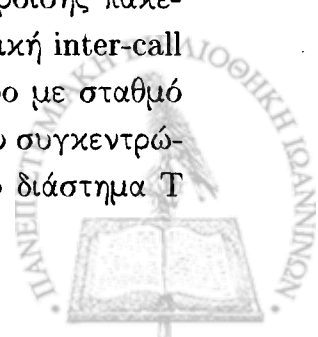
Μία δεύτερη εργασία που ακολουθεί την προσέγγιση intra-call aggregation είναι η [24]. Σε αυτήν την εργασία ακολουθείται η ίδια λογική όπως στην εργασία [33] όπου η συνάθροιση των πακέτων γίνεται όταν υπάρχει ευκαιρία, δηλαδή όταν υπάρχουν διαθέσιμα πακέτα στην ουρά εξόδου των κόμβων. Ωστόσο, όταν υπάρχει διαθέσιμος χρόνος για περαιτέρω καθυστέρηση ενός πακέτου τότε αυτό κρατείται σκόπιμα για ένα μικρό χρονικό διάστημα ώστε να γίνει συλλογή πολλών πακέτων της ίδιας κλήσης και να αποσταλούν με την μέθοδο της συνάθροισης. Η σκόπιμη καθυστέρηση ενός πακέτου γίνεται στις πηγές των κλήσεων και όχι σε ενδιάμεσους κόμβους και μόνο όταν εξασφαλιστεί ότι η επιπλέον καθυστέρηση δεν θα μειώσει την ποιότητα της συνομιλίας. Ο διαθέσιμος χρόνος που ένα πακέτο μπορεί να καθυστερήσει υπολογίζεται με την παρακολούθηση του δικτύου και την μέτρηση της μέσης καθυστέρησης.

Σε όλες τις intra-call τεχνικές συνάθροισης πακέτων το βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν επιτυγχάνουν μεγάλο κέρδος συνάθροισης. Αυτό το γεγονός οφείλεται στον περιορισμό που έχει να κάνει με τα υποψήφια πακέτα προς συνάθροιση. Τα πακέτα που συναθροίζονται κάθε φορά πρέπει να ανήκουν στην ίδια κλήση VoIP. Αυτός ο περιορισμός έχει ως αποτέλεσμα το μικρό κέρδος συνάθροισης και την αδυναμία της τεχνικής να ανταπεξέρχεται σε συνθήκες όπου το δίκτυο είναι αρκετά φορτωμένο. Ειδικότερα, όταν πολλές διαφορετικές κλήσεις διασχίζουν έναν κόμβο τότε στον κόμβο αυτό υπάρχουν πολλά πακέτα από διαφορετικές κλήσεις με αποτέλεσμα η τεχνική της συνάθροισης να μην χρησιμοποιείται αποτελεσματικά. Γι' αυτό το λόγο έχει προταθεί η τεχνική inter-call aggregation που περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα.

2.2.3 Συνάθροιση σε Διαφορετικές Κλήσεις (Inter-call)

Η τεχνική inter-call aggregation έχει προταθεί για την αποτελεσματικότερη συνάθροιση των πακέτων φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο. Στην τεχνική αυτή η συνάθροιση πραγματοποιείται σε πακέτα όχι μόνο της ίδιας κλήσης αλλά και πακέτα που ανήκουν σε διαφορετικές κλήσεις. Σε αντίθεση με την τεχνική intra-call, η τεχνική αυτή επιτυγχάνει μεγαλύτερο κέρδος συνάθροισης βελτιώνοντας ακόμη περισσότερο την αποδοτικότητα και την χωρητικότητα του δικτύου. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή συνήθως χρησιμοποιούν συνδυαστικά την τεχνική της εκπομπής (layer-2 broadcast) για την μετάδοση των πακέτων η οποία είναι αρκετά επιρρεπής σε απώλειες πακέτων. Το παραπάνω είναι ένα σημαντικό ζήτημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την τεχνική inter-call. Στη συνέχεια, περιγράφονται διάφοροι αλγόριθμοι που κάνουν χρήση της τεχνικής αυτής με διαφορετικούς τρόπους.

Στην εργασία τους οι Wang και Liew [29] προτείνουν τον αλγόριθμο συνάθροισης πακέτων M-M (Multiplex-Multicast). Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί την τεχνική inter-call aggregation για την συνάθροιση των πακέτων φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο με σταθμό βάσης. Η συνάθροιση των πακέτων πραγματοποιείται στον σταθμό βάσης όπου συγκεντρώνονται πακέτα από διαφορετικές κλήσεις. Ο αλγόριθμος M-M κάθε χρονικό διάστημα T



ms συναθροίζει πακέτα που βρίσκονται στον σταθμό βάσης είτε από την ίδια είτε από διαφορετικές κλήσεις και τα αποστέλλει με εκπομπή (broadcast) στους ασύρματους σταθμούς (clients stations). Κάθε ασύρματος σταθμός λαμβάνει τα πακέτα που προορίζονται για αυτόν. Για την uplink μετάδοση, δηλαδή την μετάδοση των πακέτων από τους ασύρματους κόμβους προς τον σταθμό βάσης, δεν χρησιμοποιείται τεχνική συνάθροισης. Τα πακέτα αποστέλλονται κανονικά με unicast μετάδοση. Κατά την downlink μετάδοση, στην οποία χρησιμοποιείται η τεχνική broadcast, οι συγγραφείς τονίζουν ότι η έλλειψη αναμεταδόσεων δημιουργεί μεγάλη πιθανότητα απώλειας πακέτων λόγω συγκρούσεων (υπενθυμίζουμε ότι στην μετάδοση broadcast δεν χρησιμοποιείται η τεχνική αναμετάδοσης, συνεπώς εάν σε ένα πακέτο υπάρξει σύγκρουση τότε το πακέτο αυτό χάνεται). Για την βελτίωση του ποσοστού των απωλειών πακέτων προτείνουν μία μικρή τροποποίηση του επιπέδου MAC στον σταθμό βάσης που δίνει προτεραιότητα κατά την διαδικασία του ανταγωνισμού στα πακέτα που είναι συναθροισμένα έναντι εκείνων των πακέτων που μεταδίδονται unicast (uplink traffic). Η λύση που προτείνουν είναι ο αλγόριθμος MMP (MAC-layer Multicast Priority) που μειώνει σημαντικά το ποσοστό των χαμένων πακέτων.

Στην εργασία [19] οι Lee et al. προτείνουν με την σειρά τους έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί την τεχνική inter-call για την συνάθροιση πακέτων VoIP σε ένα multihop ασύρματο δίκτυο, ο οποίος ονομάζεται HHA (Hop-by-Hop Aggregation). Ο αλγόριθμος HHA εκτελεί συνάθροιση πακέτων από διαφορετικές κλήσεις σε κάθε hop ενός multihop δικτύου. Σε αντίθεση με την εργασία [29], ο αλγόριθμος HHA εκτελεί συνάθροιση πακέτων μόνο όταν υπάρχει ευκαιρία μετάδοσης ενός κόμβου (opportunistic aggregation). Συγκεκριμένα, όταν ένας κόμβος αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι για να μεταδώσει το πρώτο πακέτο που βρίσκεται στην ουρά εξόδου, ο αλγόριθμος HHA συναθροίζει το συγκεκριμένο πακέτο με τα υπόλοιπα πακέτα που περιμένουν εκείνη τη στιγμή στην ουρά. Τα πακέτα που συναθροίζονται μπορεί να είναι είτε από την ίδια είτε από διαφορετικές κλήσεις. Για την αποστολή του συναθροισμένου πακέτου χρησιμοποιείται η τεχνική pseudo-broadcast. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί unicast μετάδοση για την αποστολή του συναθροισμένου πακέτου σε διαφορετικούς προορισμούς. Οι κόμβοι-προορισμοί των πακέτων παραλαμβάνουν το συναθροισμένο πακέτο όντας σε λειτουργία promiscuous. Κάθε κόμβος που παραλαμβάνει το(α) πακέτο(α) που προορίζεται(ονται) γι' αυτόν, επιβεβαιώνει την λήψη του(ς) με ένα μήνυμα ACK. Εάν μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα ο αποστολέας λάβει από κάθε προορισμό μήνυμα ACK τότε διαγράφει από την ουρά του τα πακέτα που μόλις έστειλε. Εάν μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα δεν λάβει ένα ή περισσότερα μηνύματα ACKs για κάποια από τα πακέτα που απέστειλε με το συναθροισμένο πακέτο, τότε αυτά τα πακέτα παραμένουν στην ουρά του. Στην επόμενη ευκαιρία μετάδοσης τα πακέτα που παρέμειναν στην ουρά του κόμβου θα συναθροιστούν με νέα πακέτα που πιθανόν να έχουν φτάσει στον κόμβο. Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου HHA που αποδεικνύεται μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ότι πετυχαίνει να υποστηρίξει μέχρι 7 φορές περισσότερες ταυτόχρονες κλήσεις VoIP συγκριτικά με το απλό πρωτόκολλο IEEE 802.11 σε διάφορες τοπολογίες δικτύου.

Ο αλγόριθμος HHA είναι από τους αποδοτικότερους αλγορίθμους μετάδοσης VoIP που έχουν προταθεί έως τώρα και από τους ελάχιστους που έχουν προταθεί για επικοινωνία



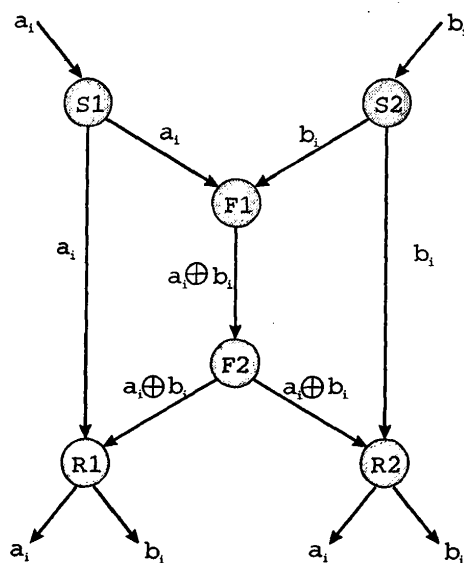
πολλών αλμάτων. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί σημείο αναφοράς για την έρευνα στα πλαίσια της διατριβής αυτής και για τον λόγο αυτό θα ακολουθήσει αναλυτική περιγραφή του στο Κεφάλαιο 3.

2.3 Κωδικοποίηση Δικτύου

Η θεωρία της κωδικοποίησης δικτύου εισήχθη στην καινοτόμα εργασία των Ahlswede et al. [2] το 2000. Γρήγορα προσέλκυσε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών λόγω των σημαντικών ωφελειών του στην εξοικονόμηση πόρων. Σημαντικοί πόροι όπως το εύρος ζώνης ενός δικτύου αλλά και η ενέργεια των κόμβων εξοικονομούνται με την τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου. Στην συνέχεια της ενότητας αυτής παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της κωδικοποίησης δικτύου καθώς και το πως αυτή εφαρμόζεται στην πράξη στα ασύρματα δίκτυα.

2.3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Στην παραδοσιακή μετάδοση κάθε κόμβος που λειτουργεί ως δρομολογητής λαμβάνει, αποθηκεύει και προωθεί πακέτα χωρίς κάποια επεξεργασία. Με την κωδικοποίηση δικτύου κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει συνδυασμούς πακέτων (coded packets) εφαρμόζοντας μια τεχνική κωδικοποίησης στα πακέτα που έλαβε. Η διαδικασία συνδυασμού πακέτων με σκοπό την μετάδοση τους ονομάζεται κωδικοποίηση. Με το Σχήμα 2.5 παρουσιάστηκε στην εργασία [2] η ιδέα της κωδικοποίησης δικτύου με το γνωστό παράδειγμα του δικτύου πεταλούδας.



Σχήμα 2.5: Κωδικοποίηση Δικτύου σε Δίκτυο Πεταλούδας



Στο παράδειγμα αυτό ο κόμβος $S1$ θέλει να παραδώσει την ροή πακέτων a_i στους κόμβους $R1$ και $R2$ και ο κόμβος $S2$ θέλει να παραδώσει την ροή πακέτων b_i στους ίδιους κόμβους. Υποτίθεται ότι όλες οι συνδέσεις έχουν χωρητικότητα ενός μηνύματος ανά μονάδα χρόνου. Εάν οι ενδιάμεσοι κόμβοι $F1$ και $F2$ απλά προωθούν τα πακέτα που λαμβάνουν, η μεσαία σύνδεση θα αποτελέσει σημείο συμφόρησης καθώς σε κάθε μονάδα χρόνου μπορεί να παραδώσει είτε το a_i είτε το b_i στον $F2$. Αντίθετα, αν οι ενδιάμεσοι κόμβοι $F1$ και $F2$ στείλουν τον συνδυασμό των πακέτων a_i και b_i ($a_i \oplus b_i$), όπως φαίνεται στο σχήμα, τότε και οι δύο παραλήπτες λαμβάνουν και τα δύο μηνύματα σε μία μονάδα χρόνου. Για παράδειγμα ο κόμβος $R1$ λαμβάνει το μήνυμα a_i από τον $S1$ και το μήνυμα b_i από τον ενδιάμεσο κόμβο $F2$. Συνεπώς, η κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου (εύρος ζώνης).

Βασικό ρόλο έχει ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κωδικοποίηση. Για την κωδικοποίηση των πακέτων έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες διαφέρουν στον χρόνο κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης, το πλήθος των πακέτων που κωδικοποιούνται καθώς και στον αριθμό των κωδικοποιημένων πακέτων που είναι αναγκαία για την αποκωδικοποίηση. Μία τεχνική κωδικοποίησης που έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες είναι ο γραμμικός συνδυασμός πακέτων. Με την γραμμική κωδικοποίηση δικτύου τα πακέτα που δημιουργεί και στέλνει ένας κόμβος είναι γραμμικός συνδυασμός των μη κωδικοποιημένων πακέτων (native¹). Ας υποθέσουμε ότι κάθε native πακέτο αποτελείται από L bits. Αν μετατρέψουμε s διαδοχικά bits ενός πακέτου σε ένα σύμβολο πάνω στο πεπερασμένο πεδίο F_2 , (Galois Field) κάθε πακέτο θα αποτελείται από ένα διάνυσμα από L/s σύμβολα που καλούνται συντελεστές. Το κωδικοποιημένο πακέτο είναι αποτέλεσμα γραμμικού συνδυασμού των native πακέτων όπου η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός εκτελούνται πάνω στο πεδίο F_2 . Ας υποθέσουμε έναν αριθμό $M^1, M^2, \dots, M^n$ μη κωδικοποιημένων πακέτων. Κάθε κωδικοποιημένο πακέτο είναι της μορφής:

$$X = \sum_{i=1}^n g_i M^i \quad (2.5)$$

όπου $g_i \in F_2$. Κάθε κωδικοποιημένο πακέτο περιέχει το διάνυσμα κωδικοποίησης (encoding vector) καθώς και τα κωδικοποιημένα δεδομένα (information vector). Στη Σχέση 2.5 οι συντελεστές $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ αποτελούν το διάνυσμα κωδικοποίησης και το X αποτελεί τα κωδικοποιημένα δεδομένα. Εάν γίνει γραμμικός συνδυασμός πακέτων μεγέθους L , το κωδικοποιημένο πακέτο που προκύπτει έχει επίσης μέγεθος L . Σκοπός στην κωδικοποίηση δικτύου με γραμμικό συνδυασμό είναι να κωδικοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα πακέτα και να διαδοθούν στο δίκτυο. Για την αποκωδικοποίηση ο παραλήπτης πρέπει να χρησιμοποιήσει το διάνυσμα κωδικοποίησης από κάθε κωδικοποιημένο πακέτο ώστε να λύσει ένα γραμμικό σύστημα με n αγνώστους (πακέτα). Ο παραλήπτης πρέπει να συλλέξει έναν επαρκή αριθμό m γραμμικά συνδυασμένων πακέτων. Ο αριθμός αυτός θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με τα n αρχικά πακέτα. Ωστόσο, η συνθήκη $m \geq n$ δεν είναι αρκετή

¹στο υπόλοιπο της διατριβής όταν απαιτείται τα απλά πακέτα θα αναφέρονται ως native για καλύτερη σαφήνεια

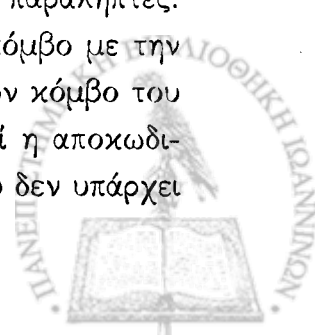


για την αποκωδικοποίηση επειδή μερικοί συνδυασμοί μπορεί να είναι γραμμικά εξαρτημένοι. Ειδική περίπτωση γραμμικού συνδυασμού αποτελεί η κωδικοποίηση με την πράξη XOR. Το κωδικοποιημένο πακέτο είναι αποτέλεσμα της εκτέλεσης XOR μεταξύ των native πακέτων. Ειδικότερα αν η πράξη εκτελεστεί σε κάθε bit των πακέτων (bitwise XOR) οι συντελεστές του γραμμικού συνδυασμού έχουν πάντα την τιμή 1. Σε αυτήν την περίπτωση, το διάνυσμα κωδικοποίησης περιέχει μόνο τα αναγνωριστικά (id) των πακέτων που κωδικοποιούνται.

Αρχικά οι πρώτες ερευνητικές εργασίες που ασχολήθηκαν με την κωδικοποίηση δικτύου ήταν σε θεωρητικό επίπεδο. Οι περισσότερες από αυτές είχαν ως στόχο να επιτύχουν μέγιστη χωρητικότητα πολυδιανομής σε ενσύρματα δίκτυα με την χρησιμοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου. Στην συνέχεια αρκετές εργασίες εστίασαν στην πρακτική εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου σε ασύρματα δίκτυα. Οι εργασίες αυτές ασχολήθηκαν κυρίως με την βελτίωση ζητημάτων όπως είναι η δρομολόγηση, η ευρεία εκπομπή και η βελτίωση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου. Στις εργασίες αυτές χρησιμοποιείται η κωδικοποίηση δικτύου με δύο διαφορετικές κυρίαρχες προσεγγίσεις. Οι αλγόριθμοι που ακολουθούν την πρώτη προσέγγιση εφαρμόζουν την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των πακέτων από άκρο-σε-άκρο του δικτύου και οι αλγόριθμοι που ακολουθούν την δεύτερη προσέγγιση εφαρμόζουν κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση σε κάθε άλμα.

Στην κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση από άκρο σε άκρο η φιλοσοφία της τεχνικής βασίζεται στην εξάπλωση όσο το δυνατόν περισσότερων κωδικοποιημένων πακέτων σε όλο το δίκτυο με στόχο την παράδοση στους ενδεχόμενους παραλήπτες όσο το δυνατόν περισσότερων κωδικοποιημένων πακέτων. Βασική υπόθεση της προσέγγισης αυτής αποτελεί ότι ο καθένας παραλήπτης με τη συγκέντρωση επαρκούς αριθμού κωδικοποιημένων πακέτων θα είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει τα αρχικά πακέτα που προορίζονται γι' αυτόν. Σ' αυτού του είδους τις τεχνικές επιτρέπεται η περαιτέρω κωδικοποίηση ήδη κωδικοποιημένων πακέτων στους ενδιάμεσους κόμβους με σκοπό την αύξηση του κέρδους από την κωδικοποίηση. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που έχουν προταθεί με κωδικοποίηση από άκρο σε άκρο στηρίζονται στην γνώση της τοπολογίας του δικτύου για την λειτουργία τους. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την τεχνική αυτή δύσκολα εφαρμόσιμη σε ασύρματα δίκτυα όπου υπάρχει κινητικότητα (MANETs). Σε τέτοιου είδους δίκτυα χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνική κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης σε κάθε άλμα.

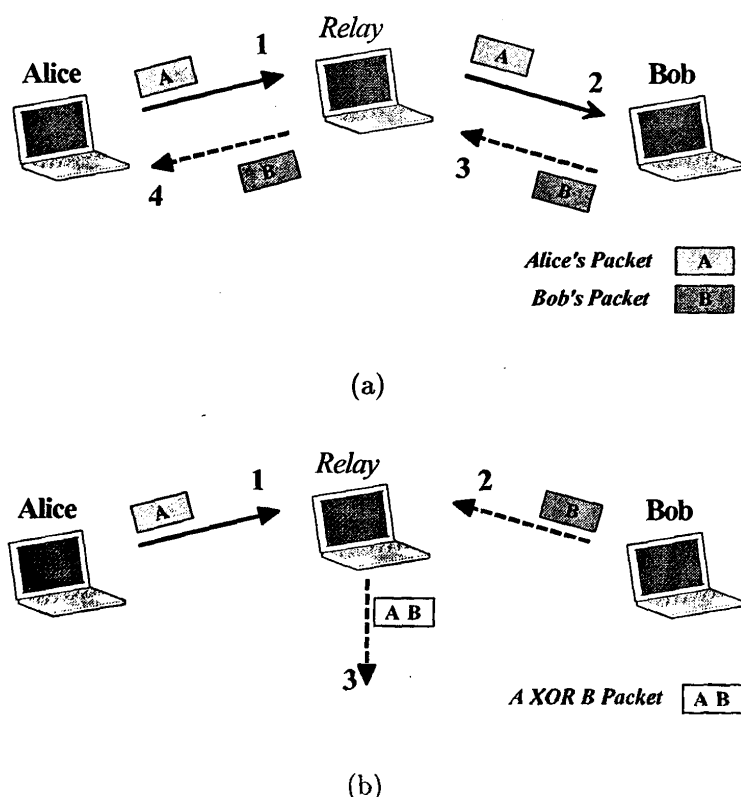
Η τεχνική κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης σε κάθε άλμα βασίζεται στην απαίτηση κάθε κωδικοποιημένο πακέτο να μεταδίδεται μόνο για ένα άλμα. Ωστόσο, η αποκωδικοποίηση σε αυτό το άλμα θα πρέπει να είναι εγγυημένη για όλους τους επόμενους κόμβους. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος του δικτύου όταν αποκωδικοποιήσει τα πακέτα σωστά μπορεί να δημιουργήσει νέες κωδικοποιήσεις πακέτων ενός άλματος. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ύπαρξη πολλαπλών ροών πακέτων σε ενδιάμεσους κόμβους με διαφορετικούς παραλήπτες. Πακέτα των ροών αυτών μπορεί να κωδικοποιηθούν σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο με την προϋπόθεση ότι είναι διαφορετικά τα μονοπάτια τους στο επόμενο άλμα. Στον κόμβο του επόμενου άλματος είναι αναγκαία η αποκωδικοποίηση τους. Εάν δεν συμβεί η αποκωδικοποίηση υπάρχει η πιθανότητα προώθησης πακέτων σε μέρη του δικτύου που δεν υπάρχει



ενδιαφερόμενος παραλήπτης, σπαταλώντας άσκοπα το εύρος ζώνης του δικτύου. Στην τεχνική κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης σε κάθε άλμα στηρίζεται και ο αλγόριθμος COPE [18]. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ο πρώτος που ενσωμάτωσε την κωδικοποίηση δικτύου για βελτίωση της δρομολόγησης σε ένα MANET. Στη συνέχεια γίνεται μία λεπτομερής περιγραφή του αλγόριθμου αυτού και του τρόπου με τον οποίο υλοποιεί την κωδικοποίηση δικτύου.

2.3.2 Κωδικοποίηση/Αποκωδικοποίηση σε κάθε άλμα

Η εργασία [18] είναι από τις πρώτες εργασίες που επιδίωξαν να μεταφέρουν την κωδικοποίηση δικτύου από την θεωρία στην πράξη στα ασύρματα δίκτυα. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή στοχεύει στην μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης ενός ασύρματου δικτύου. Αυτό το καταφέρνει χρησιμοποιώντας την κωδικοποίηση των πακέτων στους κόμβους του δικτύου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6. Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα επικοινωνίας δύο κόμβων ανταλλάσσοντας πακέτα με την βοήθεια ενός ενδιάμεσου δρομολογητή.



Σχήμα 2.6: Αποστολή μηνυμάτων μεταξύ της Alice και του Bob (a) με την παραδοσιακή επικοινωνία (b) με το COPE

Στην παραδοσιακή επικοινωνία, Σχήμα 2.6(a), η Alice στέλνει το πακέτο της στον δρομολογητή, ο οποίος το προωθεί στον Bob. Ο Bob με την σειρά του στέλνει το πακέτο του

στον δρομολογητή, ο οποίος το προωθεί στην Alice. Για την ολοκλήρωση της επικοινωνίας απαιτούνται τέσσερις ξεχωριστές μεταδόσεις. Ας θεωρήσουμε τώρα την προσέγγιση με την χρήση της κωδικοποίησης δικτύου όπως το Σχήμα 2.6(b). Η Alice και ο Bob στέλνουν σε ξεχωριστές μεταδόσεις ο καθένας το πακέτο του στον δρομολογητή. Ο δρομολογητής με την σειρά του συνδυάζει τα πακέτα με την πράξη XOR και στη συνέχεια στέλνει με broadcast μετάδοση το κωδικοποιημένο πακέτο $A \oplus B$. Η Alice και ο Bob αποκτούν τα πακέτα που προορίζονται για αυτούς χρησιμοποιώντας την πράξη XOR στο κωδικοποιημένο και το δικό τους πακέτο. Σε αυτήν την περίπτωση οι μεταδόσεις που χρειάζονται είναι τρεις. Οι μεταδόσεις που εξοικονομούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποστολή νέων πακέτων, αυξάνοντας έτσι την ρυθμαπόδοση του ασύρματου δικτύου. Ο αλγόριθμος COPE χρησιμοποιεί την τεχνική συνδυασμού πακέτων bitwise XOR. Επίσης ενσωματώνει τρεις βασικές τεχνικές για την λειτουργία του, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

Opportunistic Listening: Λόγω τη φύσης του κοινού μέσου κάθε κόμβος έχει την ευκαιρία να κρυφακούει πακέτα που μεταδίδονται στο δίκτυο. Το COPE θέτει τους κόμβους σε λειτουργία promiscuous, όπου ο κάθε κόμβος ακούει πακέτα που μεταδίδονται μεταξύ των κόμβων στην εμβέλεια του. Τα πακέτα αυτά αποθηκεύονται για ένα μικρό χρονικό διάστημα ($T=0.5$ s). Σκοπός είναι κάθε κόμβος να συλλέξει αρκετά πακέτα ώστε να μεγιστοποιήσει την δυνατότητα αποκωδικοποίησης ενός πακέτου. Επιπλέον κάθε κόμβος μεταδίδει σε όλους τους γείτονες του μία σύνοψη των πακέτων που έχει καταγράψει (reception reports). Τα reception reports αποστέλλονται είτε με την χρησιμοποίηση κανονικών πακέτων (piggyback) είτε με την χρήση περιοδικών μηνυμάτων ελέγχου.

Opportunistic Coding: Το ζητούμενο κατά την κωδικοποίηση είναι η εύρεση των πακέτων που πρέπει να συνδυαστούν ώστε να μεγιστοποιηθεί η ρυθμαπόδοση. Ένας κόμβος μπορεί να έχει πολλαπλές επιλογές συνδυασμού πακέτων. Ωστόσο, θα πρέπει να στοχεύει στην μεγιστοποίηση του αριθμού των απλών (native) πακέτων που κωδικοποιούνται εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι κάθε κόμβος παραλήπτης έχει επαρκή πληροφορία για την αποκωδικοποίηση. Ο αλγόριθμος κωδικοποίησης θα πρέπει να εγγυάται ότι όλοι οι κόμβοι που είναι παραλήπτες κάποιου από τα πακέτα που περιέχονται στο κωδικοποιημένο πακέτο μπορούν να αποκωδικοποιήσουν και να ανακτήσουν το πακέτο που τους ενδιαφέρει. Αυτό επιτυγχάνεται ακολουθώντας τον παρακάτω απλό κανόνα:

Για να μεταδοθούν n πακέτα, $p_1, \dots, p_n$, σε n nexthops, $r_1, \dots, r_n$, ένας κόμβος μπορεί να συνδυάσει μαζί τα n πακέτα με XOR, μόνο αν κάθε nexthop r_i γνωρίζει όλα τα $n - 1$ πακέτα p_j με $j \neq i$.

Γίνεται φανερό ότι κάθε φορά που ένας κόμβος έχει την ευκαιρία για μετάδοση, στόχος του είναι η εύρεση του μεγαλύτερου n που ικανοποιεί τον παραπάνω κανόνα ώστε να μεγιστοποιήσει το όφελος από την κωδικοποίηση.



Learning Neighbor State: Είναι φανερό ότι για την κωδικοποίηση των πακέτων, ένας κόμβος θα πρέπει να γνωρίζει τα πακέτα που έχουν καταγράψει οι γείτονες του. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτό γίνεται με την μετάδοση μηνυμάτων reception reports. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο τα μηνύματα αυτά μπορεί να χαθούν λόγω των συγκρούσεων ενώ σε περιπτώσεις όπου στο δίκτυο υπάρχει ελάχιστος φόρτος δικτύου, τα μηνύματα αυτά μπορεί να φτάσουν πολύ αργά δηλαδή όταν ένας κόμβος έχει πάρει ήδη μία απόφαση κωδικοποίησης, η οποία δεν είναι η καλύτερη. Γι' αυτό το λόγο οι κόμβοι δεν πρέπει να βασίζονται εξολοκλήρου στα reception reports αλλά χρειάζεται να προβλέπουν εάν ένας γείτονας τους γνωρίζει κάποιο συγκεκριμένο πακέτο. Για την πραγματοποίηση αυτής της πρόβλεψης με έξυπνο τρόπο χρησιμοποιούνται πληροφορίες από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Συγκεκριμένα, το COPE υπολογίζει την πιθανότητα ένας γείτονας ενός κόμβου να έχει ένα πακέτο ως την πιθανότητα παράδοσης του συνδέσμου (link) μεταξύ του προηγούμενου κόμβου του πακέτου και του γειτονικού κόμβου. Αυτή η πιθανότητα υπολογίζεται και χρησιμοποιείται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης για κάθε link μετάδοσης στο ασύρματο δίκτυο. Μερικές φορές ένας κόμβος μπορεί να πραγματοποιήσει μία λάθος υπόθεση η οποία μπορεί να προκαλέσει μία αποτυχία αποκωδικοποίησης σε κάποιον ενδιαμέσο κόμβο. Σε αυτές τις περιπτώσεις το native πακέτο επαναμεταδίδεται πιθανόν κωδικοποιημένο με ένα νέο σύνολο πακέτων.

Κατά τη λειτουργία του αλγόριθμου κωδικοποίησης στο COPE ακολουθούνται μερικές βασικές σχεδιαστικές αρχές. Καταρχήν, η κωδικοποίηση στηρίζεται στην παραδοχή ότι ποτέ τα πακέτα δεν καθυστερούνται σκόπιμα. Όταν ένας κόμβος κατέχει το δικαίωμα εκπομπής παίρνει το πρώτο πακέτο από την ουρά εξόδου. Στην συνέχεια ελέγχει ποια άλλα πακέτα μπορούν να κωδικοποιηθούν με αυτό το πακέτο και όταν γίνει η κατάλληλη επιλογή τα πακέτα αυτά κωδικοποιούνται με XOR. Εάν δεν υπάρχουν ευκαιρίες κωδικοποίησης ή δεν υπάρχουν διαθέσιμα πακέτα στην ουρά εξόδου ο κόμβος δεν περιμένει για την άφιξη νέων πακέτων με σκοπό την κωδικοποίηση. Δεύτερο, το COPE δείχνει προτίμηση στην κωδικοποίηση πακέτων με ίδιο ή παρόμοιο μέγεθος έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το όφελος από την κωδικοποίηση. Τέλος, το COPE δεν κωδικοποιεί μαζί πακέτα τα οποία προορίζονται στον ίδιο κόμβο του επόμενου άλματος επειδή ο κόμβος αυτός δεν θα μπορεί να πραγματοποιήσει την αποκωδικοποίηση αυτών των πακέτων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ

3.1 Ζητήματα των Τεχνικών Συνάθροισης Πακέτων

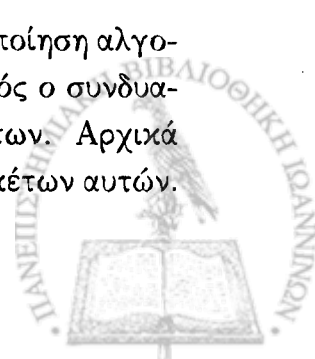
3.2 Ο Αλγόριθμος Συνάθροισης ΗΗΑ

3.3 Περιορισμοί των Αλγορίθμων Συνάθροισης

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μία παρουσίαση των ζητημάτων υλοποίησης που αφορούν τη σχεδίαση αλγορίθμων που χρησιμοποιούν την τεχνική συνάθροισης πακέτων φωνής. Ωστόσο, τέτοια ζητήματα χρήζουν αντιμετώπισης όχι μόνο στους παραπάνω αλγόριθμους αλλά και σε οποιοδήποτε είδος αλγορίθμων που βασίζονται στον συνδυασμό πακέτων για την λειτουργία τους (π.χ. αλγόριθμοι κωδικοποίησης δικτύου). Παρόλα αυτά στο συγκεκριμένο κεφάλαιο τα ζητήματα αυτά παρουσιάζονται στο πλαίσιο των αλγορίθμων συνάθροισης. Στη συνέχεια, περιγράφεται η λειτουργία ενός από τους αποδοτικότερους αλγορίθμους συνάθροισης πακέτων. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται ΗΗΑ και αντιμετωπίζει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα μετάδοσης φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο. Τέλος, παρουσιάζονται οι περιορισμοί του ΗΗΑ και οι λόγοι που μας οδήγησαν στη συνδυασμένη χρήση της κωδικοποίησης δικτύου και της συνάθροισης πακέτων.

3.1 Ζητήματα των Τεχνικών Συνάθροισης

Τα σημαντικότερα ζητήματα τα οποία πρέπει να αντιμετωπισθούν κατά την υλοποίηση αλγορίθμων συνάθροισης παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα. Για να είναι εφικτός ο συνδυασμός πακέτων πρέπει πρώτα να γίνει συλλογή ικανοποιητικού αριθμού πακέτων. Αρχικά παρουσιάζονται μερικοί τρόποι με τους οποίους γίνεται η συγκέντρωση των πακέτων αυτών.



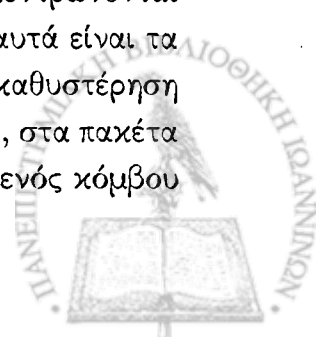
Κατόπιν, πρέπει να προσδιοριστεί η τεχνική η οποία θα ακολουθηθεί για τον συνδυασμό των πακέτων αυτών από τον εκάστοτε αλγόριθμο. Τέλος, πρέπει να γίνει επιλογή της τεχνικής μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για την εγγυημένη παράδοση των πακέτων στους κόμβους του δικτύου.

3.1.1 Συλλογή των Πακέτων

Σημαντικό κομμάτι των τεχνικών συνάθροισης πακέτων αποτελεί η ύπαρξη αριθμού πακέτων προς αποστολή. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο περισσότερα πακέτα μπορούν να συναθροιστούν μεταξύ τους. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για τη συλλογή των πακέτων με σκοπό τη συνάθροιση. Ωστόσο, υπάρχουν δύο κυρίαρχες προσεγγίσεις.

Η πρώτη προσέγγιση προτείνει την διατήρηση των πακέτων φωνής σε κάποια συγκεκριμένη δομή αποθήκευσης στους κόμβους του δικτύου για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Σκοπός αυτής της ενέργειας είναι η συγκέντρωση όσο το δυνατόν περισσότερων πακέτων φωνής ώστε να πραγματοποιηθεί συνάθροιση μεταξύ τους. Έτσι, κάθε φορά που εκτελείται ο αλγόριθμος συνάθροισης υπάρχει επαρκής αριθμός πακέτων που συναθροίζονται και δημιουργούν ένα μεγαλύτερο. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πακέτων φωνής που συναθροίζονται τόσο αυξάνεται το κέρδος της συνάθροισης. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή έχει σημαντικά μειονεκτήματα. Η διατήρηση των πακέτων στους κόμβους για κάποιο χρονικό διάστημα εισάγει επιπρόσθετη καθυστέρηση. Η καθυστέρηση αυτή προστίθεται στη συνολική από άκρο σε άκρο καθυστέρηση των πακέτων φωνής. Στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως είναι το VoIP η μεγάλη καθυστέρηση των πακέτων μειώνει την ποιότητα της υπηρεσίας. Συνεπώς, η επιλογή για διατήρηση των πακέτων φωνής στους κόμβους ενός δικτύου με σκοπό τη συνάθροιση μειώνει την ποιότητα της συνομιλίας. Μια εναλλακτική στρατηγική είναι η διατήρηση των πακέτων φωνής μόνο όταν η συνολική καθυστέρηση το επιτρέπει. Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητη η γνώση από κάθε κόμβο για τις συνθήκες (π.χ. συμφόρηση) που επικρατούν στο ασύρματο δίκτυο. Τέλος, σημαντικό είναι και το γεγονός ότι όταν σε ένα δίκτυο υπάρχει ελάχιστη κίνηση πακέτων (δηλαδή δεν υπάρχει συμφόρηση) η επιλογή της διατήρησης των πακέτων για ένα χρονικό διάστημα προκαλεί συμφόρηση στους κόμβους του δικτύου. Συνεπώς, σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ανάγκη για εξοικονόμηση εύρους ζώνης στο δίκτυο η επιλογή για διατήρηση των πακέτων με σκοπό τη συνάθροιση δεν είναι προφανής επιλογή.

Ο δεύτερος τρόπος προσέγγισης του ζητήματος υποστηρίζει ότι η συνάθροιση πρέπει να πραγματοποιείται μεταξύ των πακέτων που βρίσκονται στην εξερχόμενη ουρά ενός κόμβου. Όταν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, στην εξερχόμενη ουρά των κόμβων συγκεντρώνονται πολλά πακέτα φωνής τα οποία αναμένουν για την μετάδοσή τους. Τα πακέτα αυτά είναι τα υποψήφια προς συνάθροιση. Η προσέγγιση αυτή εκμεταλλεύεται τη φυσική καθυστέρηση που υφίστανται τα πακέτα φωνής στην εξερχόμενη ουρά κάθε κόμβου. Συνεπώς, στα πακέτα φωνής δεν εισάγεται επιπλέον καθυστέρηση. Στην περίπτωση όπου στην ουρά ενός κόμβου



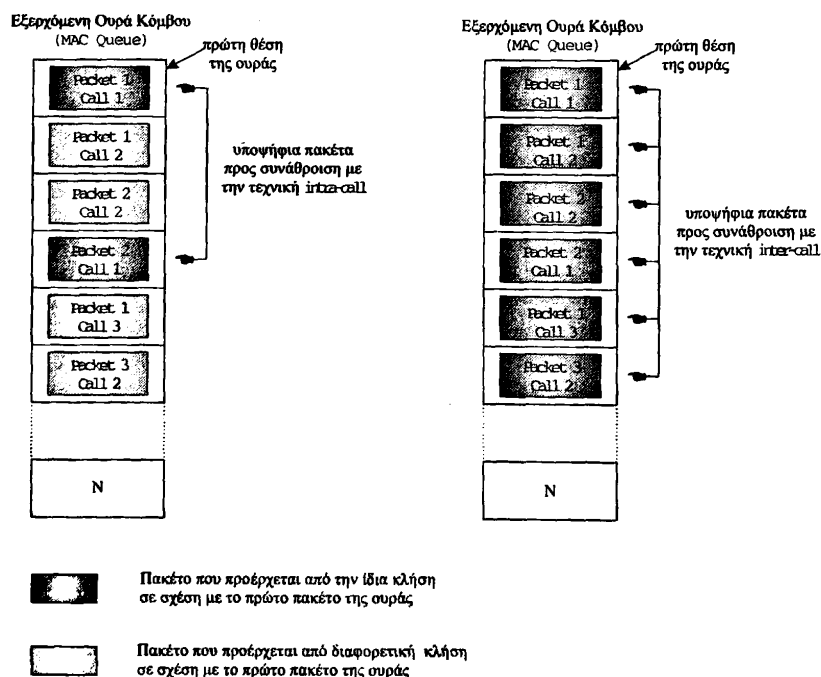
δεν υπάρχουν πακέτα προς αποστολή τότε δεν πραγματοποιείται συνάθροιση. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος συνάθροισης προσαρμόζεται ανάλογα με τη συμφόρηση στο δίκτυο και την ανάγκη για εύρος ζώνης. Στην προσέγγιση αυτή βασικός στόχος δεν είναι η συνάθροιση αλλά η μείωση της καθυστέρησης των πακέτων.

Η προσέγγιση αυτή, δηλαδή η επιλογή να μην διατηρούνται τα πακέτα φωνής σε ξεχωριστή δομή αλλά να επιλέγονται για συνάθροιση τα πακέτα που βρίσκονται στην εξερχόμενη ουρά των κόμβων ακολουθείται στον αλγόριθμο HHA που παρουσιάζεται παρακάτω. Επίσης η ίδια λογική ακολουθείται και στους αλγόριθμους που προτείνονται στην παρούσα διατριβή.

3.1.2 Επιλογή Τεχνικής Συνάθροισης Πακέτων

Εφόσον καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η συλλογή των πακέτων φωνής για συνάθροιση πρέπει να απαντηθεί το ερώτημα ποια από τα πακέτα που έχουν συγκεντρωθεί είναι υποψήφια για να συναθροιστούν. Προς αυτήν την κατεύθυνση υπάρχουν δύο επικρατέστερες τεχνικές.

Στην πρώτη τεχνική (intra-call), τα υποψήφια πακέτα προς συνάθροιση είναι τα πακέτα που ανήκουν στην ίδια κλήση φωνής. Για παράδειγμα, αν τα πακέτα διατηρούνται στην εξερχόμενη ουρά των κόμβων, τα υποψήφια πακέτα προς συνάθροιση είναι όλα τα πακέτα που προέρχονται από την ίδια κλήση φωνής με την κλήση του πακέτου που βρίσκεται στην πρώτη θέση της ουράς.



Σχήμα 3.1: Υποψήφια Πακέτα προς Συνάθροιση για τις Τεχνικές intra-call και inter-call aggregation



Όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 3.1, στην εξερχόμενη ουρά ενός κόμβου υπάρχουν 6 πακέτα φωνής τα οποία ανήκουν σε 3 διαφορετικές κλήσεις. Το πρώτο πακέτο της ουράς ανήκει στην κλήση 1. Με την τεχνική intra-call, τα υποψήφια πακέτα προς συνάθροιση είναι αυτά που προέρχονται από την κλήση 1 δηλαδή μόνο το πακέτο που βρίσκεται στην τέταρτη θέση της ουράς. Το μέγιστο πλήθος των πακέτων που μπορούν να συναθροιστούν σε αυτήν την περίπτωση είναι μόλις δύο.

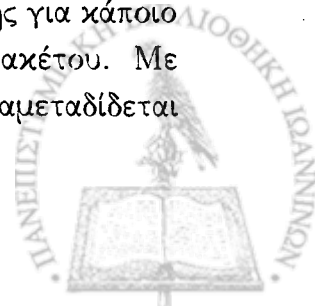
Στη δεύτερη τεχνική (inter-call), την οποία ακολουθεί ο αλγόριθμος ΗΗΑ, τα πακέτα που συναθροίζονται μπορεί να ανήκουν είτε στην ίδια είτε σε διαφορετικές κλήσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 με την inter-call τεχνική τα υποψήφια προς συνάθροιση πακέτα είναι όλα τα πακέτα που βρίσκονται στην ουρά ανεξάρτητα σε ποια κλήση ανήκουν. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το μέγιστο πλήθος των πακέτων που μπορούν να συναθροιστούν είναι έξι.

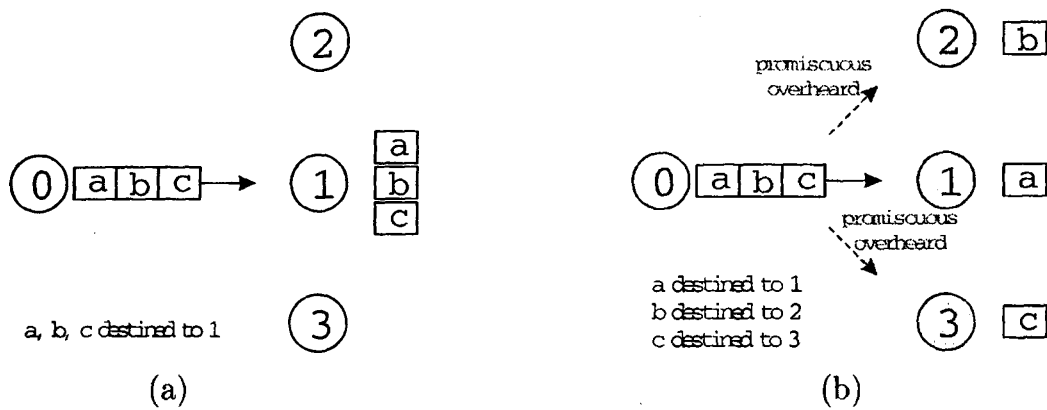
Το σημαντικότερο μειονέκτημα της intra-call τεχνικής συνάθροισης όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2 και φαίνεται και στο παραπάνω παράδειγμα είναι ότι η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από μειωμένη απόδοση. Η εύρεση πολλών πακέτων που προέρχονται από την ίδια κλήση φωνής σε έναν κόμβο που προωθεί πακέτα από πολλές διαφορετικές κλήσεις είναι ασυνήθιστη περίπτωση. Συνεπώς, οι αλγόριθμοι που εφαρμόζουν την τεχνική intra-call δεν καταφέρνουν να συγκεντρώσουν αρκετά πακέτα της ίδιας κλήσης με αποτέλεσμα το κέρδος από τη συνάθροιση να είναι περιορισμένο. Αντίθετα, στην τεχνική inter-call το κέρδος από τη συνάθροιση είναι μεγαλύτερο γεγονός που την καθιστά επικρατέστερη κατά τη σχεδίαση αλγορίθμων για τη βελτίωση των εφαρμογών μετάδοσης VoIP. Ωστόσο, το σημαντικότερο ζήτημα στην τεχνική αυτή αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η αποστολή των πακέτων φωνής σε πολλαπλούς αποδέκτες.

3.1.3 Τεχνική Μετάδοσης των Πακέτων

Η τεχνική μετάδοσης ενός συναθροισμένου πακέτου εξαρτάται από τα native πακέτα που αυτό περιέχει.

Στην τεχνική συνάθροισης intra-call κάθε συναθροισμένο πακέτο αποτελείται από native πακέτα της ίδιας κλήσης. Συνεπώς, η unicast μετάδοση των συναθροισμένων πακέτων είναι αρκετή για να παραδώσει όλα τα native πακέτα στον ίδιο κόμβο προορισμό (Σχήμα 3.2 (α)). Στην unicast μετάδοση η αποστολή του πακέτου γίνεται σε έναν μόνο γειτονικό κόμβο παραλήπτη ο οποίος καθορίζεται στην επικεφαλίδα MAC. Έτσι ο παραλήπτης μπορεί να λάβει με το συναθροισμένο πακέτο όλα τα native πακέτα και να τα επεξεργαστεί. Στην μετάδοση unicast ο παραλήπτης επιβεβαιώνει την ορθή λήψη κάθε πακέτου με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης (ACK). Με αυτόν τον τρόπο κάθε αποστολέας γνωρίζει για τη σωστή μετάδοση ενός πακέτου. Στην περίπτωση που ο αποστολέας δεν λάβει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης για κάποιο πακέτο τότε ενεργοποιεί τον μηχανισμό αναμετάδοσης του συγκεκριμένου πακέτου. Με τον μηχανισμό αυτό μειώνονται οι απώλειες πακέτων αφού κάθε πακέτο αναμεταδίδεται μέχρι ένα μέγιστο αριθμό προσπαθειών.





Σχήμα 3.2: Μετάδοση συναθροισμένου πακέτου (a) unicast (b) pseudo-broadcast

Ωστόσο, στην τεχνική συνάθροισης inter-call ένα συναθροισμένο πακέτο μπορεί να περιέχει native πακέτα τα οποία ανήκουν σε διαφορετικές κλήσεις και έχουν διαφορετικό κόμβο προορισμό. Σε αυτήν την περίπτωση η unicast μετάδοση δεν είναι αρκετή για την παράδοση ενός συναθροισμένου πακέτου σε όλους τους ενδεχόμενους παραλήπτες. Μία τεχνική μετάδοσης που είναι ικανή να παραδώσει ένα πακέτο σε πολλαπλούς παραλήπτες είναι η εκπομπή (layer-2 broadcast). Στην εκπομπή κάθε πακέτο που μεταδίδεται έχει ως παραλήπτες όλους τους κόμβους που βρίσκονται στην εμβέλεια του αποστολέα. Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η παράδοση του συναθροισμένου πακέτου σε κάθε ενδιαφερόμενο παραλήπτη, ο οποίος μπορεί να εξάγει από το πακέτο αυτό όλα τα native πακέτα για τα οποία έχει οριστεί ως επόμενος κόμβος. Όμως η τεχνική της εκπομπής είναι επιρρεπής σε συγχρούσεις και απώλειες πακέτων. Στην τεχνική αυτή δεν παρέχεται κάποιος μηχανισμός επιβεβαίωσης και αναμετάδοσης όπως γίνεται στην τεχνική unicast. Για τον λόγο αυτό η τεχνική της εκπομπής δεν χρησιμοποιείται συχνά σε αλγόριθμους όπου οι απώλειες πακέτων έχουν σημαντική επίπτωση στην απόδοσή τους (π.χ. εφαρμογές VoIP).

Μία τεχνική για την παράδοση ενός πακέτου σε διαφορετικούς παραλήπτες είναι η τεχνική pseudo-broadcast (Σχήμα 3.2 (b)). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί μετάδοση unicast για να παραδώσει ένα πακέτο σε πολλαπλούς παραλήπτες. Προϋποθέτει ωστόσο την τοποθέτηση κάθε κόμβου σε μία ειδική κατάσταση λειτουργίας (promiscuous operation). Με τη συγκεκριμένη λειτουργία κάθε κόμβος έχει την δυνατότητα να καταγράφει όλα τα πακέτα που εκπέμπονται στην εμβέλεια του. Έτσι κατά την αποστολή ενός συναθροισμένου πακέτου με την τεχνική unicast σε έναν γειτονικό κόμβο κάθε κόμβος που βρίσκεται στην εμβέλεια του αποστολέα μπορεί να καταγράψει την μετάδοση αυτή. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος μπορεί να επεξεργαστεί και να εξάγει τα πακέτα που τον ενδιαφέρουν από το συναθροισμένο πακέτο. Επειδή για την αποστολή ενός συναθροισμένου πακέτου χρησιμοποιείται η μετάδοση unicast ο κόμβος που επιβεβαιώνει τη σωστή λήψη του πακέτου είναι ο κόμβος που έχει οριστεί στην επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου MAC. Σε περίπτωση σύγκρουσης ή απώλειας ενός πακέτου ο αποστολέας ενεργοποιεί τον μηχανισμό αναμεταδόσεων. Με αυτόν τον τρόπο, σε αντίθεση με την τεχνική broadcast, οι απώλειες πακέτων μειώνονται σημαντικά. Ωστόσο, ο αποστολέας είναι σε θέση να γνωρίζει για τη σωστή ή λανθασμένη μετάδοση του πακέτου μόνο για τον συγκεκριμένο παραλήπτη. Οι υπόλοιποι γειτονικοί

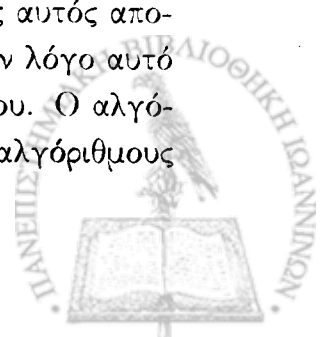
κόμβοι δεν επιβεβαιώνουν τη σωστή λήψη του πακέτου. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει δύο ζητήματα που περιγράφονται παρακάτω:

- το πρώτο ζήτημα προκύπτει όταν κατά την μετάδοση ενός συναθροισμένου πακέτου ο κόμβος παραλήπτης που έχει καθοριστεί στην επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου MAC δεν καταφέρει να το λάβει, ενώ κάποιοι από τους υπόλοιπους γείτονες έχουν καταφέρει να καταγράψουν το πακέτο και κάποιοι όχι. Στην περίπτωση αυτή, ο αποστολέας αναμεταδίδει το συναθροισμένο πακέτο. Οι κόμβοι που δεν κατάφεραν να λάβουν το πακέτο από την πρώτη μετάδοση έχουν μία δεύτερη ευκαιρία να το παραλάβουν. Όμως, υπάρχει η πιθανότητα οι κόμβοι που έχουν ήδη παραλάβει το πακέτο από την πρώτη μετάδοση να λάβουν ένα διπλότυπο. Για το λόγο αυτό υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης ενός μηχανισμού αναγνώρισης των διπλότυπων έτσι ώστε να αποτραπεί η προώθηση διπλότυπων πακέτων στο δίκτυο. Το πρόβλημα των διπλοτύπων μπορεί εύκολα να επιλυθεί αν κάθε κόμβος απορρίπτει πακέτα τα οποία έχει ακούσει στο παρελθόν από τον ίδιο κόμβο αποστολέα.
- το δεύτερο ζήτημα, που είναι και πιο σημαντικό, προκύπτει όταν η αποστολή του συναθροισμένου πακέτου είναι επιτυχής στον κόμβο παραλήπτη που έχει καθοριστεί στην επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου MAC, ενώ μερικοί από τους υπολοίπους γείτονες δεν κατάφεραν να το καταγράψουν. Σε αυτήν την περίπτωση, επειδή το συναθροισμένο πακέτο δεν θα αναμεταδοθεί ξανά, οι κόμβοι που δεν έλαβαν το πακέτο δεν θα έχουν άλλη ευκαιρία να το παραλάβουν. Συνεπώς, οι απώλειες πακέτων στους κόμβους που λειτουργούν καταγράφοντας πακέτα δεν είναι δυνατόν να ανιχνευθούν. Έτσι τα native πακέτα από το συναθροισμένο πακέτο που δεν κατάφεραν οι κόμβοι αυτοί να τα παραλάβουν θα χαθούν.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η τεχνική μετάδοσης pseudo-broadcast σε σχέση με την εκπομπή παρέχει μεγαλύτερη προστασία από τις απώλειες πακέτων αφού χρησιμοποιεί unicast μετάδοση για την αποστολή των πακέτων. Για το λόγο αυτό η τεχνική pseudo-broadcast είναι επικρατέστερη για την μετάδοση πακέτων φωνής σε διαφορετικούς παραλήπτες. Ωστόσο, όπως φάνηκε προηγουμένως με την τεχνική αυτή δεν λύνεται ολοκληρωτικά το πρόβλημα των απωλειών πακέτων.

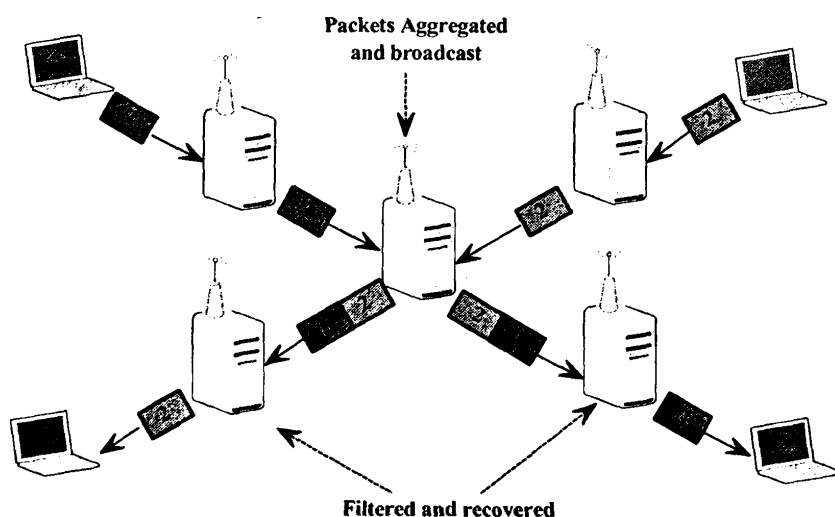
3.2 Ο Αλγόριθμος Συνάθροισης ΗΗΑ

Στην παρούσα διατριβή και στα πλαίσια της μελέτης των τεχνικών συνάθροισης πακέτων χρησιμοποιήθηκε ως αλγόριθμος αναφοράς ο αλγόριθμος ΗΗΑ. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί την αφετηρία για την έρευνα στα πλαίσια της διατριβής αυτής και για τον λόγο αυτό σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα σημαντικότερα τεχνικά ζητήματα του. Ο αλγόριθμος ΗΗΑ αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και αποδοτικότερους αλγόριθμους



που έχουν προταθεί στην κατηγορία των αλγορίθμων συνάθροισης και ο πρώτος που χρησιμοποιήθηκε σε δίκτυα πολλών αλμάτων. Στο πειραματικό μέρος της διατριβής αυτής και επειδή στην δημοσίευση [19] υπάρχουν μερικά αδιευκρίνιστα ζητήματα, ο αλγόριθμος HHA υλοποιήθηκε με κάποιες παραδοχές πάνω στα ζητήματα αυτά. Για τον λόγο αυτό, η έκδοση του αλγορίθμου HHA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή ονομάζεται HHA-like.

Ο αλγόριθμος HHA συνδυάζει την τεχνική inter-call συνάθροισης πακέτων με την τεχνική μετάδοσης pseudo-broadcast. Η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου HHA μπορεί να περιγραφεί με το παράδειγμα του Σχήματος 3.3. Το σχήμα αυτό απεικονίζει ένα ασύρματο multi-hop δίκτυο στο οποίο υπάρχουν δύο ροές πακέτων VoIP (ροές 1 και 2). Ο κεντρικός κόμβος όπου οι δύο ροές διασταυρώνονται, έχει την αρμοδιότητα να εξυπηρετεί τα πακέτα που προέρχονται και από τις δύο ροές. Με τον αλγόριθμο HHA ο κόμβος αυτός έχει την δυνατότητα να συναθροίζει ένα ή περισσότερα πακέτα φωνής από την κάθε ροή με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πακέτου. Το πακέτο αυτό αποτελεί το συναθροισμένο πακέτο, το οποίο αποστέλλει με την χρησιμοποίηση της τεχνικής μετάδοσης pseudo-broadcast ώστε να το λάβουν και οι δύο κόμβοι παραλήπτες. Κάθε παραλήπτης του συναθροισμένου πακέτου εξάγει το εσωτερικό (native) πακέτο που προορίζεται γι' αυτόν με σκοπό την περαιτέρω προώθηση του. Όπως φαίνεται στο παράδειγμα αυτό η συνάθροιση εκτελείται μόνο για ένα άλμα. Κάθε κόμβος παραλήπτης του συναθροισμένου πακέτου πρέπει να ελέγξει αν υπάρχουν native πακέτα που προορίζονται για αυτόν. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το πλήθος των πακέτων που συναθροίζονται είναι δύο, ωστόσο συνήθως το πλήθος των πακέτων είναι μεγαλύτερο. Όμως το συνολικό μέγεθος των πακέτων που συναθροίζονται δεν πρέπει να ξεπερνά την μέγιστη μονάδα μεταφοράς (MTU) του δικτύου αφού όπως είναι γνωστό πακέτα που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από την τιμή αυτή διασπώνται σε μικρότερα πακέτα (fragmentation). Σε αυτήν την περίπτωση η συνάθροιση πακέτων που ξεπερνούν συνολικά σε μέγεθος την τιμή του MTU δεν έχει κανένα απολύτως νόημα.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα Hop-by-Hop Aggregation

Η συνάθροιση στον αλγόριθμο HHA πραγματοποιείται στους κόμβους του δικτύου όπου υπάρχει συμφόρηση. Οι κόμβοι που πραγματοποιούν τη συνάθροιση μπορεί να είναι είτε ενδιάμεσοι κόμβοι (όπως στο Σχήμα 3.3) είτε κόμβοι πηγές μιας κλήσης. Η συνάθροιση εκτελείται σε κάθε ευκαιρία μετάδοσης ενός κόμβου. Στον Αλγόριθμο 1 παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθούνται από τη στιγμή που ένας κόμβος κερδίσει το δικαίωμα εκπομπής και το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) ζητήσει από την εξερχόμενη ουρά το πρώτο της πακέτο. Για λόγους σαφήνειας γίνεται η υπόθεση ότι η ουρά του κόμβου περιέχει μόνο πακέτα φωνής. Ωστόσο, σε περίπτωση που στην ουρά υπάρχουν εκτός από πακέτα φωνής και πακέτα δεδομένων ο αλγόριθμος μπορεί να ξεχωρίσει τα πακέτα φωνής με έναν έλεγχο στον τύπο των πακέτων.

```

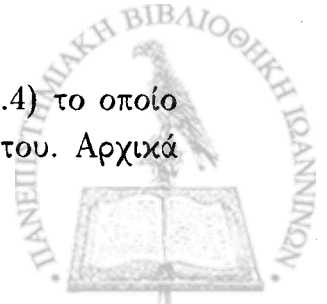
if  $Q.size() > 1$  then
    Create Aggregate Packet ap;
    Dequeue Packet p from the Head of the Output Queue;
    add p to ap;
     $size(ap) += size(p) + size(HHA\_Headers);$ 
    for  $i = 1, i < Q.size(), i ++;$  do
         $p' \leftarrow Q(i)$ 
        if  $size(ap) + size(p') + size(HHA\_Headers) < MTU$  then
            Dequeue p' from the i-th Position of the Output Queue
            add p' to ap;
             $size(ap) += size(p') + size(HHA\_Headers);$ 
             $i --;$ 
        else
            break;
        end if
    end for
end if
return  $ap$ 

```

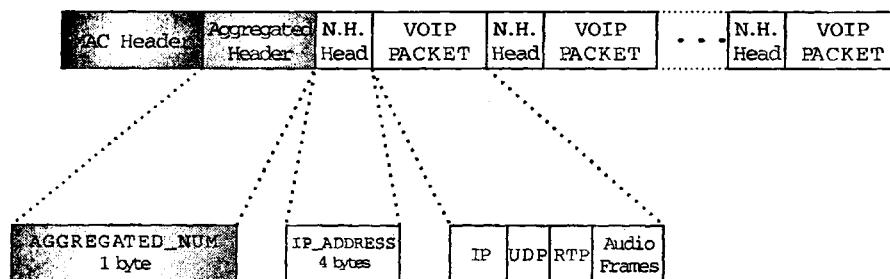
Αλγόριθμος 1: Αλγόριθμος Συνάθροισης HHA-like

Τη στιγμή που ο κόμβος εξάγει το πρώτο πακέτο της ουράς, ο αλγόριθμος ελέγχει αν υπάρχουν άλλα πακέτα. Αν συμβαίνει αυτό τότε ξεκινάει η δημιουργία του συναθροισμένου πακέτου αρχικά με το πρώτο πακέτο της ουράς. Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος εξάγει με τη σειρά ένα ένα τα πακέτα που ακολουθούν προσθέτοντας τα στο συναθροισμένο πακέτο. Σε κάθε επανάληψη εκτός από το πακέτο προστίθενται και οι απαραίτητες επικεφαλίδες για κάθε πακέτο. Ο αλγόριθμος σταματά όταν η ουρά αδειάσει ή όταν δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος στο συναθροισμένο πακέτο.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η δομή ενός συναθροισμένου πακέτου (Σχήμα 3.4) το οποίο περιέχει τις επιπρόσθετες επικεφαλίδες που είναι αναγκαίες για την μετάδοσή του. Αρχικά



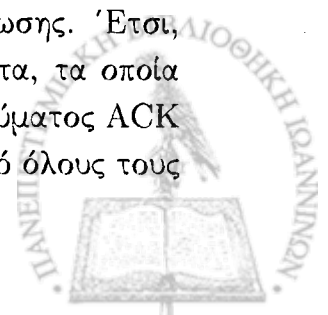
για κάθε native πακέτο που έχει επιλέξει ο αλγόριθμος για συνάθροιση εισάγεται μία επικεφαλίδα NextHop η οποία περιέχει την IP διεύθυνση του επόμενου κόμβου του πακέτου αυτού. Η επικεφαλίδα αυτή χρησιμοποιείται για να δείξει στους ενδεχόμενους κόμβους παραλήπτες ποια είναι τα native πακέτα που προορίζονται για τον καθένα. Κάθε παραλήπτης του συναθροισμένου πακέτου, ελέγχει όλες τις επικεφαλίδες NextHop. Αν η διεύθυνση IP του παραλήπτη υπάρχει σε μία ή περισσότερες επικεφαλίδες τότε ο παραλήπτης εξάγει τα αντίστοιχα native πακέτα. Με αυτόν τον τρόπο κάθε παραλήπτης μπορεί να λάβει τα πακέτα που προορίζονται για αυτόν.



Σχήμα 3.4: Δομή Συναθροισμένου Πακέτου στον Αλγόριθμο HHA-like

Αφού πραγματοποιηθεί η εισαγωγή των επικεφαλίδων NextHop, εισάγεται μία επιπλέον επικεφαλίδα στο συναθροισμένο πακέτο (Aggregated Header). Η επικεφαλίδα αυτή έχει μέγεθος 1 byte και υποδηλώνει τον αριθμό των native πακέτων (AGGREGATED_NUM) που περιέχονται. Τέλος, στο συναθροισμένο πακέτο εισάγεται η επικεφαλίδα MAC από το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου. Η επικεφαλίδα αυτή εκτός των άλλων περιέχει την διεύθυνση του επόμενου κόμβου του πρώτου native πακέτου του συναθροισμένου πακέτου (που βρισκόταν στην πρώτη θέση της ουράς). Η αποστολή του συναθροισμένου πακέτου γίνεται με την μετάδοση unicast στον κόμβο που δηλώθηκε στην επικεφαλίδα MAC. Οι υπόλοιποι γείτονες του αποστολέα παραλαμβάνουν το συναθροισμένο πακέτο όντας σε λειτουργία promiscuous. Ο κάθε παραλήπτης του συναθροισμένου πακέτου ελέγχει κάθε μία από τις επικεφαλίδες NextHop των native πακέτων έτσι ώστε να εξάγει τα πακέτα που περιέχουν την δική του διεύθυνση στην αντίστοιχη επικεφαλίδα NextHop. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος είναι σε θέση να εξάγει τα native πακέτα που τον αφορούν προωθώντας καθένα από αυτά ξεχωριστά στα ανώτερα επίπεδα για περαιτέρω επεξεργασία.

Είναι κατανοητό ότι ο αλγόριθμος HHA πρέπει να χρησιμοποιήσει pseudo-broadcast μετάδοση για τα συναθροισμένα πακέτα. Όπως αναφέρθηκε η τεχνική αυτή δεν λύνει ολοκληρωτικά το πρόβλημα των απωλειών πακέτων. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται από τους συγγραφείς του αλγόριθμου HHA τροποποιώντας τον μηχανισμό αναμεταδόσεων του επιπέδου MAC. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος HHA υποχρεώνει κάθε κόμβο που παραλαμβάνει ένα ή περισσότερα native πακέτα να αποστέλλει ένα μήνυμα θετικής επιβεβαίωσης. Έτσι, κατά την αποστολή ενός συναθροισμένου πακέτου που περιέχει native πακέτα, τα οποία προορίζονται σε n γειτονικούς κόμβους, ο αποστολέας αναμένει την λήψη μηνύματος ACK όχι μόνο από τον κόμβο που έχει καθοριστεί στην επικεφαλίδα MAC αλλά από όλους τους



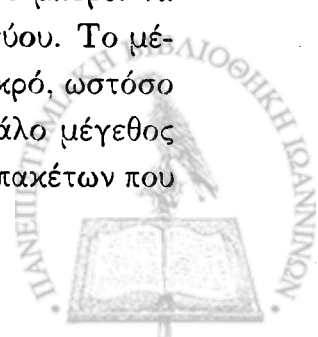
κόμβους προορισμούς των πακέτων αυτών. Συνεπώς, αν η αποστολή του συναθροισμένου πακέτου είναι επιτυχής, ο αποστολέας πρέπει να λάβει τόσα μηνύματα επιβεβαίωσης όσο είναι το πλήθος των Next Hop's των πακέτων (στην χειρότερη περίπτωση n) μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Κάθε μήνυμα επιβεβαίωσης σηματοδοτεί την διαγραφή του(ων) native πακέτου(ων) που επιβεβαιώνεται από την εξερχόμενη ουρά του αποστολέα. Αν ένα ή περισσότερα μηνύματα επιβεβαίωσης δεν ληφθούν μέσα στο σύντομο χρονικό διάστημα τότε τα αντίστοιχα native πακέτα, για τα οποία δεν έχει ληφθεί κάποιο μήνυμα επιβεβαίωσης παραμένουν στην ουρά του κόμβου. Η αποστολή αυτών των πακέτων γίνεται στην επόμενη ευκαιρία μετάδοσης του κόμβου πιθανόν συναθροισμένα με νέα πακέτα που ενδεχομένως έχουν φτάσει στην ουρά.

Ο μηχανισμός αναμεταδόσεων που μόλις περιγράφηκε δεν υλοποιήθηκε στην έκδοση του αλγόριθμου HHA-like. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την απόφαση είναι οι εξής:

- κατά την παρουσίαση του μηχανισμού επαναμεταδόσεων στην εργασία [19] υπάρχουν αδιευκρίνιστα ζητήματα, όπως είναι ο καθορισμός του τρόπου συγχρονισμού των κόμβων που στέλνουν μηνύματα επιβεβαίωσης (ACKs), ο οποίος είναι σημαντικός για τη σωστή λειτουργία του
- η αναμονή για μηνύματα επιβεβαίωσης δημιουργεί καθυστέρηση στο δίκτυο. Ο χρόνος αναμονής στον αποστολέα για μηνύματα επιβεβαίωσης εξαρτάται από τον αριθμό των γειτονικών κόμβων στους οποίους προορίζονται τα native πακέτα. Όταν αυτός ο αριθμός είναι αρκετά μεγάλος ο χρόνος αναμονής στον αποστολέα μεγαλώνει αρκετά με αποτέλεσμα την αύξηση της καθυστέρησης των πακέτων.
- η αποστολή μηνυμάτων επιβεβαίωσης από όλους τους γειτονικούς κόμβους ενός αποστολέα προκαλεί συμφόρηση στο δίκτυο. Τα μηνύματα ACK καταναλώνουν από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου, το οποίο είναι σημαντικό όταν στο δίκτυο υπάρχει μεγάλος φόρτος.

3.3 Περιορισμοί των Αλγορίθμων Συνάθροισης

Οι αλγόριθμοι συνάθροισης αντιμετωπίζουν με επιτυχία το πρόβλημα της μετάδοσης VoIP πάνω από ένα ασύρματο δίκτυο. Συγκεκριμένα, καταφέρνουν να αυξήσουν τον αριθμό των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων κλήσεων VoIP κατά ένα μεγάλο ποσοστό. Ωστόσο, το σημαντικότερο μειονέκτημα των αλγορίθμων αυτών είναι η αύξηση στο μέγεθος των πακέτων που δημιουργούν. Είναι γεγονός ότι στις τεχνικές συνάθροισης το μέγεθος των πακέτων αυξάνεται όσο περισσότερα πακέτα συναθροίζονται. Το ανώτερο μέγεθος που μπορεί να έχει ένα συναθροισμένο πακέτο δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή MTU του δικτύου. Το μέγεθος των πακέτων φωνής που δημιουργούν οι κωδικοποιητές συνήθως είναι μικρό, ωστόσο υπάρχουν κωδικοποιητές οι οποίοι παράγουν υψηλής ποιότητας φωνή με μεγάλο μέγεθος πακέτου. Το κέρδος της συνάθροισης μεγαλώνει όσο αυξάνεται ο αριθμός των πακέτων που



συναθροίζονται. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι ο μέγιστος αριθμός πακέτων φωνής που μπορούν να συναθροιστούν εξαρτάται από το μέγεθος τους και τη μέγιστη μονάδα μετάδοσης στο δίκτυο (MTU).

Στον αλγόριθμο HHA-Like ο μέγιστος αριθμός των πακέτων φωνής που μπορεί να περιέχει ένα συναθροισμένο πακέτο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Max_Aggr_Packets = \left\lfloor \frac{MTU - MAC_Hdr_Len - Aggregated_Hdr_Len}{NHop_Hdr_Len + IP_UDP_RTP_Len + Payload_Len} \right\rfloor \quad (3.1)$$

όπου MTU είναι η μέγιστη μονάδα μεταφοράς στο δίκτυο, MAC_Hdr_Len είναι το μέγεθος της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου MAC, $Aggregated_Hdr_Len$ είναι το μέγεθος της επικεφαλίδας $Aggregated_Header$ που εισάγεται σε κάθε συναθροισμένο πακέτο, $NHop_Hdr_Len$ το μέγεθος της επικεφαλίδας $Next_Hop$ που εισάγεται σε κάθε πακέτο φωνής στο συναθροισμένο πακέτο, $IP_UDP_RTP_Len$ είναι το μέγεθος των επικεφαλίδων των πρωτοκόλλων IP, UDP, RTP κάθε πακέτου φωνής και τέλος $Payload_Len$ το μέγεθος του Payload κάθε πακέτου φωνής.

Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο δίκτυο 802.11b η μέγιστη μονάδα μεταφοράς είναι 2.304^1 bytes. Επομένως, ο μέγιστος αριθμός πακέτων φωνής που ο αλγόριθμος HHA-like μπορεί να συναθροίσει όταν χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής G.729 (20 byte payload) είναι 35. Όταν χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής G.726-32 ο μέγιστος αριθμός πακέτων μειώνεται σε 27, ενώ όταν χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής G.711, ο οποίος παράγει υψηλή ποιότητα φωνής, ο αριθμός αυτός μειώνεται σε μόλις 14 πακέτα.

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος ενός πακέτου τόσο αυξάνεται η διάρκεια μετάδοσής του. Το μεγάλο μέγεθος των συναθροισμένων πακέτων αυξάνει την διάρκεια μετάδοσης τους με συνέπεια την μεταγαλύτερη καθυστέρηση. Η καθυστέρηση αυτή επιβαρύνει το δίκτυο ενώ προστίθεται στη συνολική καθυστέρηση των πακέτων φωνής.

Οι παραπάνω περιορισμοί οδηγούν στην αναζήτηση διαφορετικών τεχνικών για τον συνδυασμό και την μετάδοση πακέτων VoIP. Βασική παρατήρηση στα πλαίσια της διατριβής αυτής είναι ότι η τεχνική κωδικοποίησης δικτύου επιτρέπει τον συνδυασμό πακέτων χωρίς να αυξάνει το μέγεθός τους σημαντικά. Επομένως, ο περιορισμός των τεχνικών συνάθροισης αναφορικά με το μέγιστο αριθμό πακέτων που μπορούν να συναθροιστούν μπορεί να ξεπεραστεί. Βασική ιδέα της διατριβής αυτής είναι η ενσωμάτωση της κωδικοποίησης δικτύου στην μετάδοση VoIP. Συγκεκριμένα, γίνεται συνδυασμός της κωδικοποίησης δικτύου και της συνάθροισης πακέτων με στόχο τη βελτίωση της μετάδοσης VoIP πάνω από ασύρματα δίκτυα πολλών αλμάτων. Ο συνδυασμός αυτός αποφέρει πολλαπλά κέρδη όσον αφορά την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου αλλά και τη βελτίωση της ποιότητας των κλήσεων φωνής.

¹ στην τιμή MTU δεν υπολογίζεται η επικεφαλίδα που εισάγει το υποεπίπεδο MAC, συνεπώς η τιμή αυτή αναφέρεται στην μέγιστη μονάδα μετάδοσης που μπορεί να επεξεργαστεί το υποεπίπεδο αυτό



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1 Ενσωμάτωση της Κωδικοποίησης Δικτύου στη Μετάδοση VoIP

4.2 Ο Αλγόριθμος Network Coding - Aggregation (NCA)

4.3 Ο Αλγόριθμος NCA Progressive (NCA-P)

4.4 Ο Αλγόριθμος NCA Failure Salvation (NCA-FS)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι προτάσεις της παρούσας διατριβής σχετικά με την μετάδοση VoIP σε ασύρματα δίκτυα. Αρχικά γίνεται μία αναφορά στα ζητήματα ενσωμάτωσης και υλοποίησης της κωδικοποίησης δικτύου στην μετάδοση VoIP. Στην συνέχεια, περιγράφεται η βασική πρόταση της διατριβής που ονομάζεται αλγόριθμος NCA. Βασική ιδέα του NCA είναι ο συνδυασμός της κωδικοποίησης δικτύου και της συνάθροισης πακέτων. Τέλος, προτείνονται δύο τροποποιήσεις του παραπάνω αλγορίθμου, (οι αλγόριθμοι NCA-P και NCA-FS), που έχουν ως στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου NCA.

4.1 Ενσωμάτωση της Κωδικοποίησης Δικτύου στη Μετάδοση VoIP

Για την ενσωμάτωση της κωδικοποίησης δικτύου στην μετάδοση VoIP υπάρχουν πολλά ζητήματα τα οποία χρήζουν αντιμετώπισης. Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στην ανάλυση αυτών των ζητημάτων και την περιγραφή αποδοτικών τεχνικών που τα επιλύουν στο πλαίσιο της μετάδοσης VoIP σε ένα ασύρματο δίκτυο.



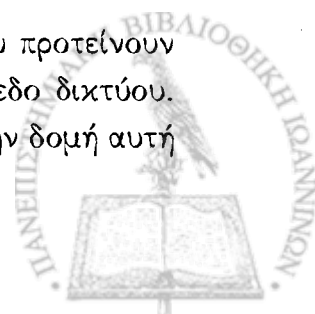
4.1.1 Κωδικοποίηση και Αποκωδικοποίηση

Το πρώτο ζήτημα αφορά τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση των πακέτων φωνής. Για να πραγματοποιηθεί η κωδικοποίηση είναι απαραίτητη η ύπαρξη πακέτων φωνής στην πλευρά του αποστολέα. Ο αποστολέας συνδυάζει δυο ή περισσότερα πακέτα δημιουργώντας ένα κωδικοποιημένο το οποίο και αποστέλλει. Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε ως τεχνική κωδικοποίησης πακέτων το bitwise XOR, λόγω της απλότητας και της καλύτερης απόδοσης του όσον αφορά την σπατάλη πόρων μνήμης, υπολογιστικής ισχύος και ενέργειας σε σύγκριση με άλλες τεχνικές. Κάθε κωδικοποιημένο πακέτο περιέχει τα κωδικοποιημένα δεδομένα και το διάνυσμα κωδικοποίησης. Τα κωδικοποιημένα δεδομένα είναι αποτέλεσμα της κωδικοποίησης του ωφέλιμου φορτίου των πακέτων φωνής (audio payload) αλλά και των επικεφαλίδων τους (IP/UDP/RTP). Το διάνυσμα κωδικοποίησης περιλαμβάνει τα αναγνωριστικά των πακέτων που συνθέτουν το κωδικοποιημένο πακέτο. Σημειώνεται ότι επειδή η κωδικοποίηση γίνεται με την πράξη XOR, το διάνυσμα κωδικοποίησης δεν χρειάζεται να περιέχει τους συντελεστές του γραμμικού συνδυασμού (οι συντελεστές είναι πάντα 1) και για τον λόγο αυτό έχει μικρότερο μέγεθος. Η μετάδοση ενός κωδικοποιημένου πακέτου πραγματοποιείται μόνο για ένα άλμα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος παραλήπτης ενός κωδικοποιημένου πακέτου πρέπει να πραγματοποιήσει την αποκωδικοποίηση. Ο λόγος της επιλογής αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι ο παραλήπτης δεν χρειάζεται να περιμένει ώστε να συγκεντρώσει επαρκή αριθμό κωδικοποιημένων πακέτων για να πραγματοποιήσει την αποκωδικοποίηση. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της επιλογής αυτής είναι η μικρότερη καθυστέρηση η οποία είναι αρκετά σημαντική για τη μετάδοση VoIP. Κάθε παραλήπτης ενός κωδικοποιημένου πακέτου για να καταφέρει να το αποκωδικοποιήσει θα πρέπει να διαθέτει αντίστοιχα πακέτα φωνής. Για να πραγματοποιηθεί η αποκωδικοποίηση πρέπει ο καθένας από αυτούς να διαπιστώσει ποια από τα πακέτα του διανύσματος κωδικοποίησης γνωρίζει. Για την επιτυχή αποκωδικοποίηση, αν υποθέσουμε ότι ο αριθμός των αρχικών πακέτων που περιέχει ένα κωδικοποιημένο πακέτο είναι n , ο παραλήπτης πρέπει να γνωρίζει τα $n - 1$ από αυτά. Σε αυτήν την περίπτωση είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει το πακέτο εκτελώντας $n - 1$ πράξεις XOR ανάμεσα στο κωδικοποιημένο πακέτο και τα ήδη γνωστά πακέτα. Αν ο παραλήπτης δεν γνωρίζει δύο ή περισσότερα πακέτα από τα n τότε δεν είναι σε θέση να κάνει την αποκωδικοποίηση.

4.1.2 Αποθήκευση Πακέτων

Για την αποθήκευση των πακέτων φωνής είτε στον αποστολέα για την κωδικοποίηση είτε στον παραλήπτη για την αντίστροφη διαδικασία είναι απαραίτητη η ύπαρξη δομών αποθήκευσης. Παρακάτω γίνεται η περιγραφή αυτών των δομών.

Οι περισσότερες εργασίες που χρησιμοποιούν πρακτική κωδικοποίηση δικτύου προτείνουν τη διατήρηση των πακέτων προς αποστολή σε μία ξεχωριστή δομή στο επίπεδο δικτύου. Τα πακέτα προς αποστολή αποθηκεύονται για ένα μικρό χρονικό διάστημα στην δομή αυτή

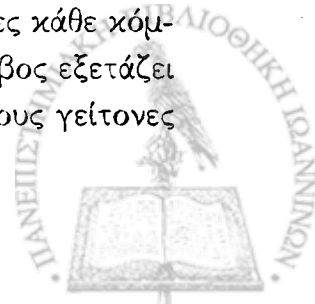


με σκοπό την συγκέντρωση ενός σημαντικού αριθμού. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι πιθανότητες εύρεσης ευκαιριών κωδικοποίησης μεταξύ των πακέτων στην δομή. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι της παρούσας διατριβής δεν χρησιμοποιούν ξεχωριστή δομή για την αποθήκευση των πακέτων προς αποστολή. Η εύρεση ευκαιριών κωδικοποίησης γίνεται ανάμεσα στα πακέτα που είναι αποθηκευμένα στην εξερχόμενη ουρά του υποεπιπέδου ελέγχου λογικής σύνδεσης (LL) κάθε κόμβου. Ο λόγος της επιλογής αυτής είναι ότι με αυτόν τον τρόπο δεν εισάγεται επιπλέον καθυστέρηση στα πακέτα φωνής. Η συγκέντρωση τους στην ουρά κάθε κόμβου και η καθυστέρηση που εισάγεται από την αναμονή τους μέχρι να εξυπηρετηθούν επιτρέπει την εύρεση κωδικοποιήσεων ανάμεσα στα πακέτα αυτά. Συνεπώς, ανάλογα με την συμφόρηση που υπάρχει σε κάθε κόμβο του δικτύου προσαρμόζεται και η κωδικοποίηση των πακέτων. Για παράδειγμα, όταν η εξερχόμενη ουρά είναι άδεια (ή περιέχει μόνο ένα πακέτο) δεν πραγματοποιείται κωδικοποίηση ενώ αντίθετα όσο περισσότερα πακέτα υπάρχουν στην ουρά τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα εύρεσης κωδικοποιήσεων μεταξύ των πακέτων αυτών.

Αντίθετα στην πλευρά του παραλήπτη υπάρχει η ανάγκη για αποθήκευση πακέτων με σκοπό τη χρησιμοποίησή τους αργότερα σε περιπτώσεις αποκωδικοποίησης. Για τον λόγο αυτό, κάθε κόμβος διατηρεί μία δομή που είναι γνωστή ως Packet Pool [18], στην οποία αποθηκεύει ένα αντίγραφο από κάθε πακέτο φωνής το οποίο έχει λάβει ή έχει αποστείλει. Τα πακέτα αποθηκεύονται με την βοήθεια ενός πίνακα κατακερματισμού χρησιμοποιώντας το μοναδικό αναγνωριστικό (ο συνδυασμός του sequence number και του SSRC της πηγής της επικεφαλίδας RTP) κάθε πακέτου ως κλειδί. Μ'αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η γρήγορη προσπέλαση του πίνακα κατά την αναζήτηση ενός αποθηκευμένου πακέτου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει αναφορά και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διαγραφή πακέτων από την δομή αυτή. Η εργασία [18] προτείνει την διατήρηση των πακέτων στο Packet Pool για κάποιο χρονικό διάστημα T . Κάθε αποθηκευμένο πακέτο μετά την λήξη του χρονικού διαστήματος απομακρύνεται από την συγκεκριμένη δομή ώστε να απελευθερωθεί χώρος στην μνήμη κάθε κόμβου. Ωστόσο, μία τέτοια λύση έχει σημαντική επίπτωση στην αύξηση του μεγέθους της απαιτούμενης μνήμης σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλη κίνηση πακέτων στο δίκτυο και επομένως ο ρυθμός εισαγωγής των πακέτων στο Packet Pool είναι μεγάλος. Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η επιλογή ενός άνω ορίου στο μέγεθος του Packet Pool έτσι ώστε να αντιμετωπίζονται οι παραπάνω περιπτώσεις. Όταν κατά την εισαγωγή ενός πακέτου στο Packet Pool το μέγεθος του ξεπερνά το καθορισμένο όριο τότε διαγράφονται εκείνα τα πακέτα με τη μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής.

4.1.3 Πληροφορίες για την Κατάσταση των Γειτονικών Κόμβων

Ένα σημαντικό ζήτημα της τεχνικής κωδικοποίησης δικτύου αποτελεί ο τρόπος συλλογής και αποθήκευσης πληροφοριών σχετικά με τα πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονες κάθε κόμβου στο δίκτυο. Οι πληροφορίες αυτές είναι χρήσιμες τη στιγμή που κάθε κόμβος εξετάζει για ευκαιρίες κωδικοποίησης για την αποστολή κωδικοποιημένων πακέτων στους γείτονες

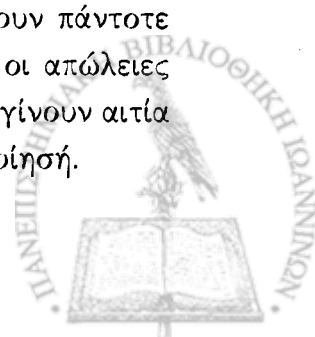


του. Για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η συλλογή αυτών των πληροφοριών, έχουν προταθεί διάφορες πρακτικές. Ένας τρόπος συλλογής πληροφοριών για πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονες είναι η αποστολή περιοδικών μηνυμάτων (reception reports) από κάθε κόμβο στους γείτονές του σχετικά με τα πακέτα που γνωρίζει κάθε στιγμή. Ωστόσο, μία τέτοια προσέγγιση επιβαρύνει σημαντικά το δίκτυο με μεταδόσεις. Για τον λόγο αυτό έχει προταθεί μία τεχνική που ονομάζεται *Opportunistic Listening* [18]. Σύμφωνα με αυτή, κάθε κόμβος ακούει το κοινό μέσο και μπορεί να καταγράψει και να επεξεργαστεί όλα τα πακέτα που μεταδίδονται στην εμβέλεια του συμπεριλαμβάνοντας και αυτά που δεν έχουν ως παραλήπτη τον ίδιο. Χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή μπορεί να γίνουν γνωστές σε κάθε κόμβο πληροφορίες σχετικά με τα πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονές του.

Η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα πακέτα που έχει λάβει ο κάθε κόμβος γίνεται σε δύο περιπτώσεις. Πιο αναλυτικά:

- κάθε κόμβος μπορεί να υποθέσει τα πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονές του με την τεχνική *opportunistic listening*. Η ικανότητα κάθε κόμβου να καταγράφει και να επεξεργάζεται πακέτα τα οποία δεν προορίζονται για τον ίδιο προϋποθέτει ότι ο κόμβος θα λειτουργεί σε *promiscuous mode*. Κατά την λήψη ενός πακέτου κάθε παραλήπτης υποθέτει ότι οι κόμβοι που βρίσκονται στην εμβέλεια του αποστολέα έχουν λάβει το πακέτο αυτό (η υπόθεση ότι και ο αποστολέας γνωρίζει το πακέτο είναι αυτονόητη). Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσει κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο είναι η εύρεση των γειτόνων του οι οποίοι είναι παράλληλα γείτονες του κόμβου αποστολέα. Απαραίτητη προϋπόθεση για να το πραγματοποιήσει αυτό είναι να διατηρεί εκτός από τη γειτονιά του και τη γειτονιά όλων των γειτόνων του. Στην περίπτωση λήψης κωδικοποιημένου πακέτου γίνεται η υπόθεση ότι μόνο οι γείτονες του αποστολέα για τους οποίους προορίζεται το πακέτο αυτό έχουν αποκωδικοποιήσει και είναι ενήμεροι για όλα τα πακέτα που περιέχονται σε αυτό.
- κάθε κόμβος συλλέγει πληροφορίες σχετικά με πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονες του κατά την αποστολή ενός πακέτου. Συγκεκριμένα, με δεδομένο ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου βρίσκονται σε λειτουργία *promiscuous*, κάθε κόμβος που αποστέλλει ένα πακέτο μπορεί να υποθέσει ότι όλοι οι γείτονες ενός άλματος θα λάβουν το πακέτο αυτό. Στην περίπτωση αποστολής κωδικοποιημένου πακέτου, γίνεται η υπόθεση ότι μόνο οι κόμβοι για τους οποίους προορίζεται το κωδικοποιημένο πακέτο ενημερώνονται για όλα τα πακέτα που περιέχει. Με λίγα λόγια οι κόμβοι αυτοί είναι οι κόμβοι *next hops* των *native* πακέτων που αποτελούν το κωδικοποιημένο.

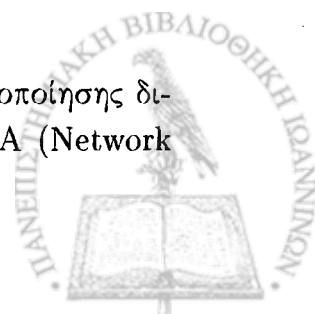
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω τρόποι με τους οποίους γίνεται η απόκτηση πληροφοριών για πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονες δεν απεικονίζουν πάντοτε σωστά την κατάσταση των γειτόνων. Περιπτώσεις όπως οι συγκρούσεις και οι απώλειες πακέτων συμβάλουν στην διατήρηση λανθασμένων πληροφοριών που μπορεί να γίνουν αιτία για την κωδικοποίηση πακέτων των οποίων δεν θα είναι δυνατή η αποκωδικοποίησή.



Από την στιγμή που θα πραγματοποιηθεί η συλλογή των παραπάνω πληροφοριών γίνεται αναγκαία η ύπαρξη μιας δομής για την αποθήκευσή τους. Η δομή αυτή πρέπει να διατηρεί τις πληροφορίες ώστε να είναι διαθέσιμες τη στιγμή που ένας κόμβος θα αποφασίσει για την κωδικοποίηση πακέτων. Η δομή αυτή μπορεί να έχει την μορφή ενός πίνακα (*Πίνακας Αποδοχής*), ο οποίος διατηρείται σε κάθε κόμβο του δικτύου για κάθε γείτονα. Ένας τρόπος για την διατήρηση των πληροφοριών είναι η αποθήκευση του μοναδικού αναγνωριστικού κάθε πακέτου που γνωρίζει ο εκάστοτε γείτονας. Συνεπώς, κάθε εγγραφή του πίνακα περιέχει το μοναδικό αναγνωριστικό ενός πακέτου και υποδηλώνει την ύπαρξη του συγκεκριμένου πακέτου σε κάποιον γείτονα. Η κάθε εγγραφή του πίνακα διατηρείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Όταν ο χρόνος μιας εγγραφής λήξει σηματοδοτεί την διαγραφή της συγκεκριμένης εγγραφής. Με αυτόν τον τρόπο απομακρύνονται παλιές πληροφορίες που ενδεχομένως είναι άχρηστες. Με όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος του πίνακα αποδοχής δεν είναι σταθερό. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που διατηρείται μία εγγραφή αλλά και από τον ρυθμό αποστολής και λήψης πακέτων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα της αναπαράστασης του πίνακα αποδοχής με τον παραπάνω τρόπο είναι ότι όταν ο ρυθμός των πακέτων είναι πολύ μεγάλος τότε το μέγεθος του πίνακα αυξάνεται σημαντικά. Το γεγονός αυτό έχει επίπτωση στον χρόνο αναζήτησης μιας εγγραφής αλλά και στον αποθηκευτικό χώρο που δαπανάται. Γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει ανάγκη για έναν αποδοτικότερο τρόπο αναπαράστασης των πληροφοριών για τους γείτονες. Στην παρούσα διατριβή η αναπαράσταση του πίνακα αποδοχής γίνεται με τη χρήση ενός Bitmap για κάθε γειτονικό κόμβο. Ένα Bitmap αποτελεί τον αποδοτικότερο τρόπο αναπαράστασης με άμεση διευθυνσιοδότηση. Για την διευθυνσιοδότηση του πίνακα χρησιμοποιείται το μοναδικό αναγνωριστικό των πακέτων (συνδυασμός sequence number και SSRC της επικεφαλίδας RTP). Μία 1-προς-1 συνάρτηση μετασχηματίζει το αναγνωριστικό αυτό σε μία θέση του Bitmap. Κάθε θέση του πίνακα περιέχει 1 bit το οποίο όταν έχει την τιμή 1 υποδηλώνει την ύπαρξη του συγκεκριμένου πακέτου στον αντίστοιχο γείτονα ενώ αντίθετα η τιμή 0 υποδηλώνει την έλλειψη αυτού. Επίσης, ορίζεται ένα άνω όριο στο μέγεθος του πίνακα το οποίο λύνει το πρόβλημα του υπερβολικού μεγέθους που παρατηρείται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Για την απάντηση στο ερώτημα αν κάποιος γείτονας είναι ενήμερος για ένα πακέτο ο κόμβος το μόνο που έχει να κάνει είναι να ελέγξει την τιμή του πίνακα για τον συγκεκριμένο γείτονα στην θέση του μοναδικού αναγνωριστικού του συγκεκριμένου πακέτου. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τρόπου αναπαράστασης των πληροφοριών είναι ότι η ανάγνωση και η ενημέρωση του Bitmap γίνεται με στοιχειώδεις λειτουργίες (dictionary operations - εισαγωγή, αναζήτηση και διαγραφή στοιχείων), η εκτέλεση των οποίων γίνεται σε χρόνο $O(1)$.

4.2 Ο Αλγόριθμος Network Coding - Aggregation (NCA)

Μετά την ανάλυση των βασικότερων ζητημάτων για την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου, στην ενότητα αυτή εισάγεται ένας νέος αλγόριθμος με το όνομα NCA (Network



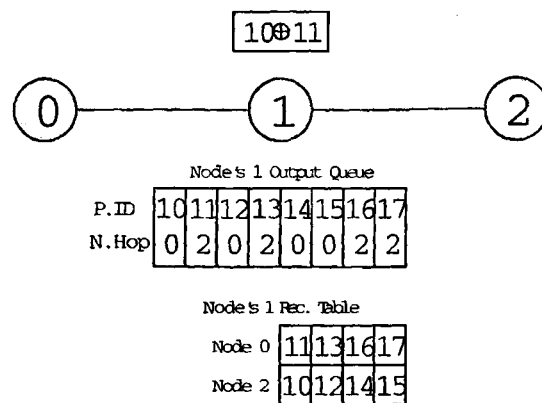
Coding - Aggregation) που χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση δικτύου για μετάδοση πακέτων VoIP. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ο βασικός αλγόριθμος που προτείνεται σε αυτήν την διατριβή και εφαρμόζει την κωδικοποίηση δικτύου για τη βελτίωση του προβλήματος μετάδοσης φωνής σε ασύρματα δίκτυα.

4.2.1 Συνδυασμός Κωδικοποίησης Δικτύου και Συνάθροισης

Ο αλγόριθμος NCA ενσωματώνει την τεχνική κωδικοποίηση δικτύου για την μετάδοση VoIP. Όπως έχει αναφερθεί πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι δεν αυξάνεται σημαντικά το μέγεθος των πακέτων που κωδικοποιούνται. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού περισσότερων πακέτων μέσα στα όρια του μέγιστου μεγέθους πλαισίου ενός δικτύου. Ωστόσο, όπως θα δούμε παρακάτω, η εύρεση πολλών ευκαιριών κωδικοποίησης είναι μία δύσκολη διαδικασία. Κάθε κόμβος για την κωδικοποίηση των πακέτων στηρίζεται στη γνώση που έχει για πακέτα που γνωρίζουν οι γείτονες του. Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.1.1 για την επιτυχή αποκωδικοποίηση ενός κωδικοποιημένου πακέτου που είναι αποτέλεσμα κωδικοποίησης n αρχικών πακέτων φωνής, ο παραλήπτης πρέπει να γνωρίζει τα $n - 1$ από αυτά. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι καθένα από τα πακέτα που συνθέτουν το κωδικοποιημένο πακέτο πρέπει να έχει διαφορετικό προορισμό (επόμενο κόμβο). Η παρατήρηση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι ένας παραλήπτης δεν μπορεί να γνωρίζει τα πακέτα που πρόκειται να του στείλει κάποιος αποστολέας. Έτσι η περίπτωση κωδικοποίησης δύο ή περισσότερων πακέτων που έχουν τον ίδιο επόμενο κόμβο παραλήπτη καθιστά αδύνατη την αποκωδικοποίηση (ο παραλήπτης δεν γνωρίζει τουλάχιστον δύο από τα πακέτα που συνθέτουν το κωδικοποιημένο πακέτο). Συνεπώς, ένα κωδικοποιημένο πακέτο που αποτελείται από n απλά πακέτα προορίζεται πάντα σε n διαφορετικούς κόμβους παραλήπτες καθέναν από τους οποίους πρέπει να το αποκωδικοποιήσει και να εξάγει το πακέτο που τον ενδιαφέρει. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την εξάρτηση που υπάρχει ανάμεσα στον αριθμό των γειτόνων για τους οποίους ένας κόμβος έχει πακέτα προς αποστολή και τον μέγιστο αριθμό πακέτων που είναι δυνατόν να κωδικοποιηθούν. Για παράδειγμα, αν ένας κόμβος διαθέτει ένα σύνολο πακέτων τα οποία προορίζονται σε τρεις γείτονες, ο μέγιστος αριθμός πακέτων που μπορούν να κωδικοποιηθούν είναι τρία. Υπό ιδανικές συνθήκες αν ένας κόμβος έχει m γείτονες μπορεί να συνδυάσει το πολύ τόσα πακέτα όσοι είναι και οι γείτονες του (ένα πακέτο για κάθε γείτονα). Η εξάρτηση αυτή έχει άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση της κωδικοποίησης. Όταν ένας κόμβος έχει σχετικά μικρό αριθμό γειτόνων ή τα πακέτα στην ουρά του προορίζονται σε λίγους διαφορετικούς παραλήπτες τότε το κέρδος από την κωδικοποίηση των πακέτων αυτών είναι περιορισμένο.

Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα που βοηθά στην κατανόηση του παραπάνω προβλήματος. Στο σχήμα αυτό υπάρχουν δύο ασύρματοι κόμβοι, οι 0 και 2, που ανταλλάσσουν πακέτα φωνής μέσω του ενδιάμεσου κόμβου 1. Ας υποθέσουμε ότι κάποια χρονική στιγμή ο ενδιάμεσος κόμβος έχει στην ουρά εξόδου του έναν αριθμό πακέτων προς αποστολή. Παράλληλα, στον πίνακα αποδοχής διατηρεί πληροφορίες σχετικά με τα πακέτα που γνωρίζουν





Σχήμα 4.1: Πρόβλημα Περιορισμού στην Εύρεση Μεγάλου Αριθμού Πακέτων για Κωδικοποίηση

οι γείτονες του. Σε κάθε προσπάθεια εκπομπής ο ενδιαμέσος κόμβος ελέγχει για ευκαιρίες κωδικοποίησης. Τη στιγμή που ο κόμβος είναι σε θέση να στείλει το πρώτο πακέτο της ουράς, το πακέτο 10, ο αλγόριθμος αναζητά πιθανές ευκαιρίες κωδικοποίησης με τα υπόλοιπα πακέτα. Η τελική επιλογή για κωδικοποίηση θα είναι τα πακέτα 10 και 11 τα οποία έχουν ως προορισμό τους κόμβους 0 και 2 αντίστοιχα. Κάθε άλλη κωδικοποίηση τριών ή περισσότερων πακέτων που συμπεριλαμβάνουν τα δύο αυτά πακέτα καθιστά αδύνατη την αποκωδικοποίηση στους παραλήπτες. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός των πακέτων $10 \oplus 11 \oplus 12$, καθιστά αδύνατη την αποκωδικοποίηση του πακέτου στον κόμβο 0 εφόσον ο κόμβος αυτός δεν γνωρίζει τα δύο (10, 12) από τα τρία κωδικοποιημένα πακέτα. Το συμπέρασμα του παραδείγματος είναι ότι ο μέγιστος αριθμός πακέτων που μπορεί να κωδικοποιήσει ο ενδιαμέσος κόμβος είναι δύο, όσοι είναι και οι γείτονες για τους οποίους ο κόμβος αυτός έχει πακέτα προς μετάδοση.

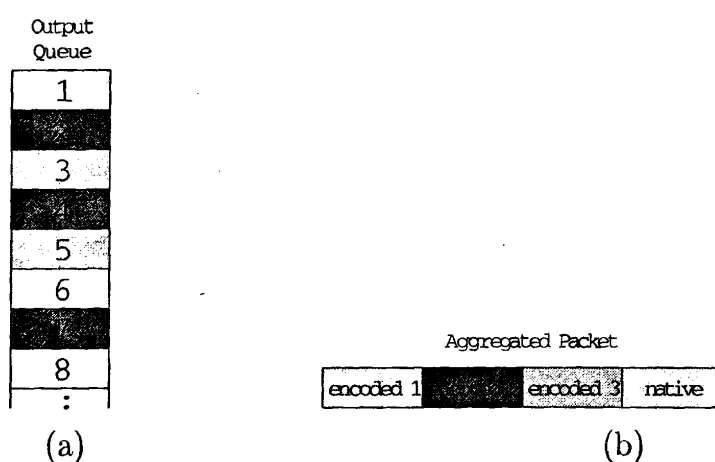
Ο παραπάνω περιορισμός αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση της τεχνικής συνάθροισης πακέτων. Για την συνάθροιση δύο ή περισσότερων πακέτων φωνής δεν χρειάζεται τα πακέτα αυτά να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις (όπως στην κωδικοποίηση δικτύου). Η συνάθροιση πακέτων που προορίζονται στον ίδιο κόμβο παραλήπτη είναι δυνατή, αφού ο παραλήπτης μπορεί να εύκολα να εξάγει τα αρχικά πακέτα χωρίς να υπάρχει ανάγκη να γνωρίζει κάποια από τα πακέτα αυτά.

Με όλα τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι και οι δύο τεχνικές, δηλαδή η κωδικοποίηση δικτύου και η συνάθροιση πακέτων, είναι απαραίτητες για την αποδοτικότερη μετάδοση της φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο. Ο αλγόριθμος NCA συνδυάζει τις δύο αυτές τεχνικές για την μετάδοση πακέτων φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο πολλών αλμάτων. Για την συνύπαρξη των δύο τεχνικών ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να καθοριστεί είναι η προτεραιότητα ανάμεσα στις τεχνικές αυτές. Με λίγα λόγια πρέπει να απαντηθεί το ερώτημα ποια από τις δύο τεχνικές έχει προτεραιότητα έναντι της άλλης.

Στον αλγόριθμο NCA δίνεται προτεραιότητα στην κωδικοποίηση δικτύου. Σε κάθε ευκαιρία μετάδοσης ενός κόμβου γίνεται πρώτα η αναζήτηση για πιθανές ευκαιρίες κωδικοποίησης



μεταξύ των πακέτων που βρίσκονται στην ουρά. Αφού πραγματοποιηθεί η κωδικοποίηση εκτελείται η συνάθροιση των πακέτων κωδικοποιημένων και μη. Το Σχήμα 4.2(a) δείχνει ένα παράδειγμα με πακέτα που υπάρχουν σε μία ουρά ενός κόμβου. Έστω ότι οι ευκαιρίες κωδικοποίησης που υπάρχουν μεταξύ των πακέτων είναι αυτές που φαίνονται με διαφορετικό χρωματισμό, δηλαδή το πακέτο 1 μπορεί να κωδικοποιηθεί με το πακέτο 6, το πακέτο 2 με τα πακέτα 4 και 7, το πακέτο 3 με το πακέτο 5 ενώ το πακέτο 8 δεν μπορεί να κωδικοποιηθεί με κανένα πακέτο. Αν υποθέσουμε ότι σε ένα πακέτο μπορούν να συναθροιστούν μέχρι 4 πακέτα φωνής τότε αν εφαρμοστεί πρώτα η συνάθροιση πακέτων ο αριθμός των πακέτων που θα περιέχει το συναθροισμένο πακέτο θα είναι 4 (τα πακέτα 1, 2, 3 και 4). Όπως παρατηρούμε για τα υπόλοιπα πακέτα στην ουρά (πακέτα 5, 6, 7 και 8) οι ευκαιρίες κωδικοποίησης που απομένουν είναι μόλις μία, δηλαδή μεταξύ των πακέτων 4 και 7. Με λίγα λόγια δίνοντας προτεραιότητα στην συνάθροιση πακέτων οι ευκαιρίες κωδικοποίησης που υπάρχουν μεταξύ των πακέτων μειώνονται σημαντικά. Αν εφαρμοστεί πρώτα η κωδικοποίηση των πακέτων και μετά η συνάθροιση τους είναι δυνατή η αποστολή και των 8 πακέτων που βρίσκονται στην ουρά σε ένα. Εκτελώντας κωδικοποίηση των πακέτων σύμφωνα με τις ευκαιρίες κωδικοποίησης που προαναφέραμε προκύπτουν 3 κωδικοποιημένα πακέτα και απομένει το πακέτο 8 για το οποίο δεν υπάρχει ευκαιρία κωδικοποίησης. Έπειτα αν εκτελεστεί η συνάθροιση των τεσσάρων αυτών πακέτων (τριών κωδικοποιημένων και του πακέτου 8), Σχήμα 4.2(b), τότε είναι δυνατή η αποστολή όλων των πακέτων της ουράς με μία μετάδοση.



Σχήμα 4.2: (a) Ευκαιρίες Κωδικοποίησης στην Ουρά ενός Κόμβου (b) Συνάθροιση Πακέτων μετά την Κωδικοποίηση

4.2.2 Εύρεση Ευκαιριών Κωδικοποίησης

Η λειτουργία του αλγορίθμου NCA προϋποθέτει τη γνώση από κάθε κόμβο της τοπικής εικόνας του δικτύου. Επομένως, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός πίνακα γειτνίασης στον οποίο διατηρούνται πληροφορίες σχετικά με τους γείτονες ενός και δύο αλμάτων κάθε κόμβου. Σχετικά με τις ανάγκες για εύρεση κωδικοποιήσεων είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση

του πίνακα αποδοχής που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τέλος, για την αποκωδικοποίηση γίνεται χρήση των πακέτων που βρίσκονται αποθηκευμένα στην Packet Pool κάθε κόμβου.

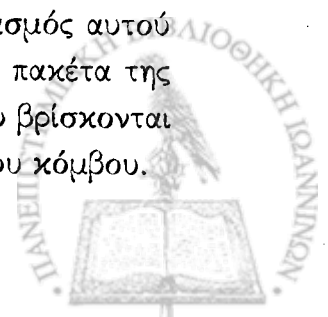
```

1: if  $Q.size() > 1$  then
2:    $p = Q.dequeueHead()$ ;
3:    $count = 1$ ;
4:   for  $i = 0, i < Q.size, i++$ ; do
5:      $q \leftarrow Q(i)$ 
6:     if  $codingOpportunity(p, q)$  then
7:        $q = Q.dequeue(i)$ ;
8:        $p \leftarrow p \oplus q$ ;
9:        $i--$ ;
10:       $count++$ ;
11:      if  $count == num\_of\_neighbors$  then
12:        break;
13:      end if
14:    end if
15:  end for
16:  return  $p$ ;
17: end if

```

Αλγόριθμος 2: Αλγόριθμος Εύρεσης Ευκαιριών Κωδικοποιήσεων

Όταν ένας κόμβος του ασύρματου δικτύου αποκτήσει το δικαίωμα εκπομπής, το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου ζητά το πακέτο που βρίσκεται στην πρώτη θέση της εξερχόμενης ουράς. Εκείνη τη στιγμή είναι δυνατή η αναζήτηση για εύρεση κωδικοποιήσεων ανάμεσα στα πακέτα που βρίσκονται αποθηκευμένα στην ουρά. Ο Αλγόριθμος 2 σκιαγραφεί τα βήματα που ακολουθούνται κατά την αναζήτηση ευκαιριών κωδικοποίησης μεταξύ των πακέτων αυτών. Η αναζήτηση προϋποθέτει την ύπαρξη δύο ή περισσότερων πακέτων στην εξερχόμενη ουρά του κόμβου. Αρχικά, ο αλγόριθμος εξάγει από την ουρά το πρώτο κατά σειρά πακέτο που είναι αποθηκευμένο. Στην συνέχεια, για κάθε πακέτο που απομένει ο αλγόριθμος εξετάζει αν μπορεί να προστεθεί στην κωδικοποίηση. Σε περίπτωση εύρεσης ευκαιρίας κωδικοποίησης, ο αλγόριθμος συνεχίζει για την εύρεση ενός τρίτου ή και περισσότερων πακέτων. Σε κάθε επανάληψη της αναζήτησης για εύρεση πιθανών κωδικοποιήσεων ο αλγόριθμος ελέγχει τον πίνακα αποδοχής των γειτόνων ενός άλματος που αποτελούν τον επόμενο κόμβο του εκάστοτε πακέτου. Η δυνατότητα συνδυασμού n πακέτων που προορίζονται σε n διαφορετικούς γειτονικούς κόμβους προϋποθέτει τη γνώση $n - 1$ πακέτων από καθένα από τους κόμβους αυτούς. Στην περίπτωση εξέτασης του n -οστού πακέτου αν τουλάχιστον ένας κόμβος γνωρίζει λιγότερα από $n - 1$ πακέτα τότε ο συνδυασμός αυτού με τα υπόλοιπα δεν είναι εφικτός και η αναζήτηση συνεχίζεται με τα επόμενα πακέτα της ουράς. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν γίνει ο έλεγχος όλων των πακέτων που βρίσκονται στην ουρά ή όταν έχουν βρεθεί τόσες κωδικοποιήσεις όσοι είναι οι γείτονες του κόμβου.

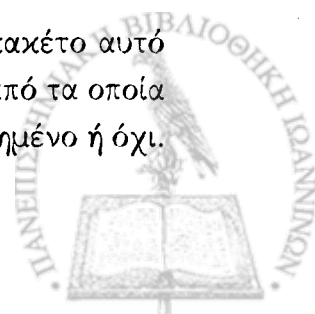


4.2.3 Συνάθροιση Κωδικοποιημένων Πακέτων

Όπως είδαμε στην προηγούμενη υποενότητα ο αλγόριθμος εύρεσης κωδικοποιήσεων τερματίζεται μετά τον έλεγχο όλων των πακέτων της ουράς. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι η δημιουργία ενός κωδικοποιημένου πακέτου. Όπως αναφέρθηκε, ο αριθμός των πακέτων που κωδικοποιούνται μπορεί να είναι μικρός με αποτέλεσμα το χαμηλό κέρδος κωδικοποίησης. Για το σκοπό αυτό ο αλγόριθμος NCA χρησιμοποιεί την τεχνική συνάθροισης σε συνδυασμό με την κωδικοποίηση δικτύου για την αύξηση του κέρδους κωδικοποίησης. Η ιδέα αυτή έχει ως στόχο την δημιουργία πολλών διαφορετικών κωδικοποιημένων πακέτων και την συνάθροιση τους σε ένα πακέτο. Συγκεκριμένα, η αναζήτηση πακέτων για ευκαιρίες κωδικοποίησης στην εξερχόμενη ουρά ενός κόμβου δεν σταματά με τον έλεγχο όλων των πακέτων και την δημιουργία ενός κωδικοποιημένου πακέτου. Αντιθέτως, μετά τη δημιουργία ενός κωδικοποιημένου πακέτου, ο αλγόριθμος εύρεσης ευκαιριών κωδικοποιήσεων εκτελείται ξανά μεταξύ των πακέτων που απομένουν στην ουρά. Μετά την δημιουργία διαφορετικών κωδικοποιημένων πακέτων εκτελείται η συνάθροιση μεταξύ των πακέτων αυτών. Η συνάθροιση επιτρέπει την αποστολή όλων των κωδικοποιημένων πακέτων με μία μετάδοση. Ο Αλγόριθμος 3 σχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται κωδικοποιημένα πακέτα και συναθροίζονται. Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί επαναληπτικά και σε κάθε επανάληψη δημιουργεί ένα κωδικοποιημένο πακέτο. Στην συνέχεια, τα πακέτα που δημιουργεί τα συνενώνει με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός συναθροισμένου πακέτου, το οποίο είναι αυτό που θα αποσταλεί. Ο αλγόριθμος αυτός τερματίζει είτε όταν δεν υπάρχουν άλλα πακέτα στην εξερχόμενη ουρά του κόμβου είτε όταν το μέγεθος του συναθροισμένου πακέτου προσεγγίζει την μέγιστη μονάδα μεταφοράς (MTU). Επισημαίνεται ότι υπάρχει το ενδεχόμενο σε κάποια επανάληψη του αλγορίθμου για εύρεση κωδικοποιήσεων για κάποιο πακέτο να μην βρεθεί ευκαιρία κωδικοποίησης με κανένα άλλο πακέτο που βρίσκεται στην ουρά. Στην περίπτωση αυτή το συγκεκριμένο πακέτο συναθροίζεται ως έχει (native)

Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του αλγορίθμου NCA. Στην πλευρά του αποστολέα (Σχήμα 4.3(a)), όταν το υποεπίπεδο MAC ζητά ένα πακέτο για μετάδοση ο κόμβος παίρνει το πρώτο πακέτο της εξερχόμενης ουράς και εκτελεί τον αλγόριθμο για εύρεση κωδικοποιήσεων. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ο κόμβος δημιουργεί ένα κωδικοποιημένο πακέτο το οποίο συναθροίζει με τα υπόλοιπα που έχει δημιουργήσει. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν δεν υπάρχουν άλλα διαθέσιμα πακέτα στην εξερχόμενη ουρά ή όταν το μέγεθος του συναθροισμένου πακέτου προσεγγίζει την τιμή του MTU. Στο τέλος ο κόμβος εισάγει τις απαραίτητες επικεφαλίδες για την μετάδοση του συναθροισμένου πακέτου. Πριν την αποστολή του συναθροισμένου πακέτου ο κόμβος ενημερώνει τον πίνακα αποδοχής για κάθε γείτονα όπως έχει περιγραφεί στην υποενότητα 4.1.3. Τέλος, παραδίδει το πακέτο στο υποεπίπεδο MAC για αποστολή.

Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο (Σχήμα 4.3(b)) ελέγχει πρώτα αν το πακέτο αυτό είναι συναθροισμένο. Αν συμβαίνει αυτό τότε ο κόμβος το χωρίζει στα πακέτα από τα οποία αποτελείται. Στην συνέχεια, για κάθε τέτοιο πακέτο ελέγχει αν είναι κωδικοποιημένο ή όχι.



```

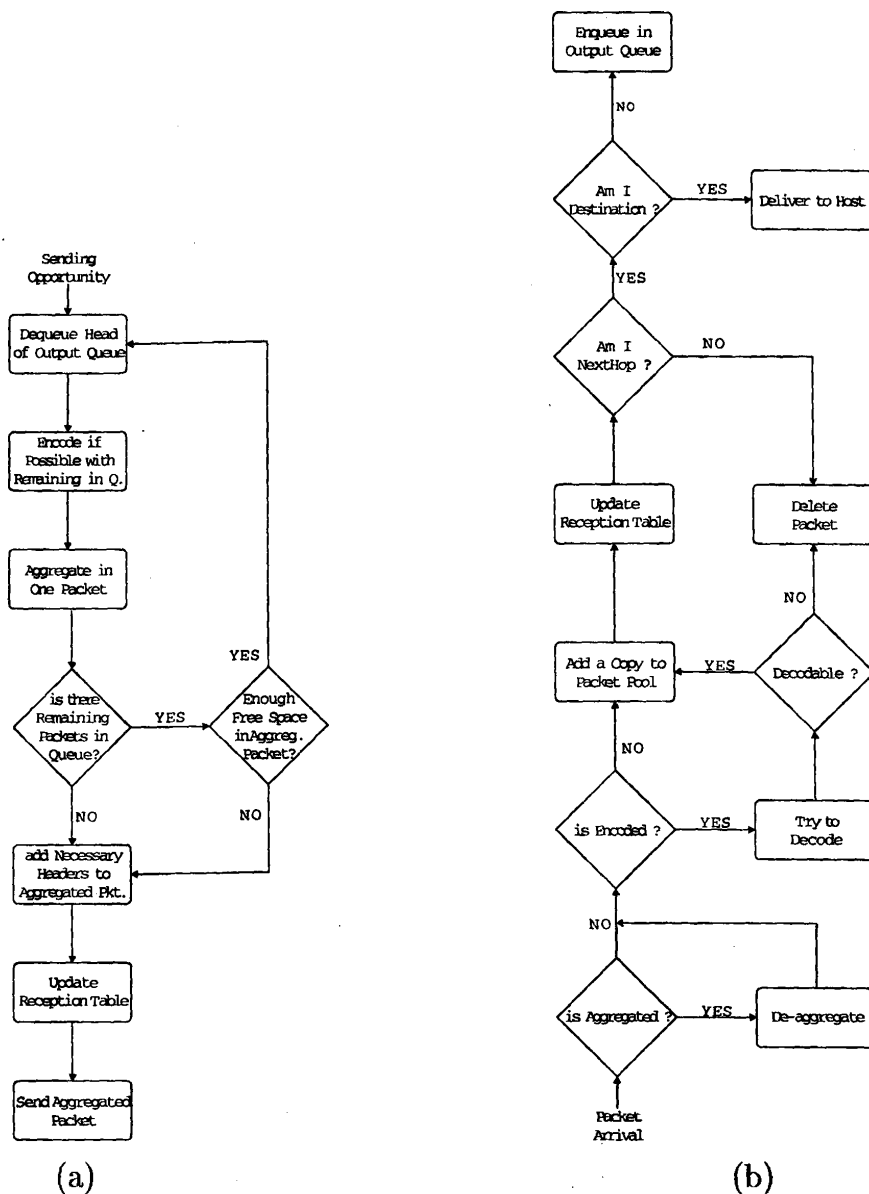
1: aggr_p = NULL;
2: while aggr_p has enough free space AND Q.size() > 0 do
3:   p = Q.dequeHead();
4:   count = 1;
5:   for i = 0, i < Q.size(), i ++; do
6:     q ← Q(i);
7:     if codingOpportunity(p, q) then
8:       q = Q.deque(i);
9:       p ← p ⊕ q;
10:      i − −;
11:      if count == num_of_neighbors then
12:        break;
13:      end if
14:    end if
15:  end for
16:  add headers to p;
17:  aggregate(aggr_p, p);
18: end while
19: add headers to aggr_p;
20: return aggr_p;

```

. Αλγόριθμος 3: Αλγόριθμος Κωδικοποίησης και Συνάθροισης Πακέτων

Στην περίπτωση κωδικοποιημένου πακέτου ο κόμβος προσπαθεί να το αποκωδικοποιήσει εκτελώντας τις κατάλληλες πράξεις XOR με τα αντίστοιχα πακέτα που έχει αποθηκευμένα στο Packet Pool. Αν δεν είναι δυνατή η αποκωδικοποίηση κάποιου πακέτου τότε αυτό διαγράφεται. Στην περίπτωση που γίνει σωστά η αποκωδικοποίηση τότε εισάγει ένα αντίγραφο του πακέτου που αποκωδικοποίησε στο Packet Pool. Έπειτα, ο κόμβος ενημερώνει τον πίνακα αποδοχής των γειτόνων που υποθέτει ότι έχουν λάβει το πακέτο αυτό. Στην συνέχεια, ελέγχει αν ο ίδιος είναι ο επόμενος κόμβος του πακέτου. Στην περίπτωση που ο έλεγχος αυτός είναι αρνητικός τότε το διαγράφει. Σε διαφορετική περίπτωση ελέγχει επίσης για το αν είναι ο τελικός προορισμός του πακέτου αυτού. Αν αυτό συμβαίνει τότε το παραδίδει στα υψηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Αν ο κόμβος δεν είναι ο τελικός προορισμός τότε εισάγει το πακέτο στην ουρά εξόδου για προώθηση.



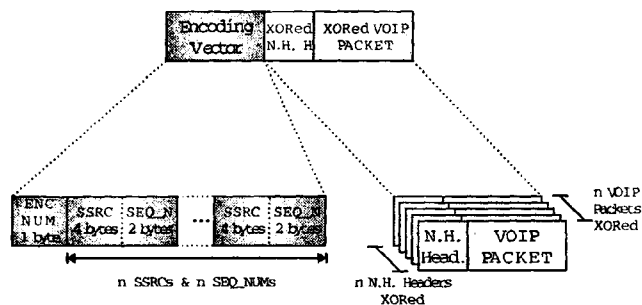


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής του NCA (a) στον αποστολέα (b) στον παραλήπτη

4.2.4 Δομή Πακέτων

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητη η περιγραφή της δομής των πακέτων που δημιουργεί ο αλγόριθμος NCA. Αρχικά αναλύεται η μορφή που έχει ένα κωδικοποιημένο πακέτο. Το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει την δομή ενός κωδικοποιημένου πακέτου που έχει δημιουργηθεί από τον συνδυασμό n native πακέτων. Το πακέτο αυτό αποτελείται από τα κωδικοποιημένα δεδομένα, μία επικεφαλίδα Next Hop και το διάνυσμα κωδικοποίησης. Τα κωδικοποιημένα δεδομένα είναι αποτέλεσμα της πράξης XOR μεταξύ των n πακέτων φωνής. Τα πακέτα φωνής κωδικοποιούνται μαζί με τις επικεφαλίδες IP/UDP/RTP. Μπροστά από τα κωδικοποιημένα δεδομένα υπάρχει η επικεφαλίδα Next Hop. Η επικεφαλίδα αυτή είναι αποτέλεσμα από την κωδικοποίηση των διευθύνσεων IP των κόμβων που έχουν οριστεί ως Next Hop για καθένα από τα n πακέτα. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται για να δείξει μετά την αποκωδικοποίηση σε κάθε παραλήπτη αν είναι ο Next Hop για κάποιο από τα n αρχικά πακέτα.

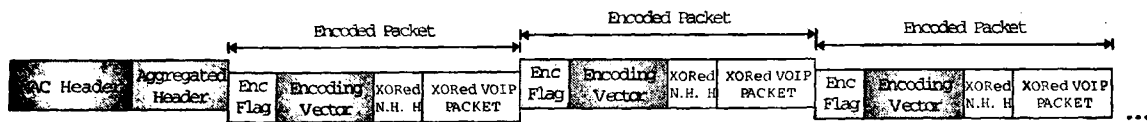
Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος παραλήπτης αποκωδικοποιεί αρχικά την επικεφαλίδα αυτή και ελέγχει την IP διεύθυνσή του με την IP διεύθυνση που αποκωδικοποίησε. Με αυτόν τον τρόπο ο παραλήπτης γνωρίζει αν ο ίδιος είναι ο επόμενος κόμβος ενός από τα n πακέτα ώστε να προχωρήσει στην αποκωδικοποίηση και τη περαιτέρω επεξεργασία. Τέλος, το διάνυσμα κωδικοποίησης περιέχει έναν αριθμό (ENC_NUM) που υποδηλώνει πόσα είναι τα αρχικά (native) πακέτα που έχουν συνδυαστεί (στην συγκεκριμένη περίπτωση περιέχει τον αριθμό n) καθώς και το μοναδικό αναγνωριστικό για καθένα από τα πακέτα αυτά. Το μοναδικό αναγνωριστικό ενός native πακέτου είναι ο συνδυασμός των αριθμών Synchronization Source (SSRC) και Sequence Number (SN) που περιέχει η επικεφαλίδα RTP. Ο συνδυασμός αυτός είναι μοναδικός για κάθε πακέτο που μεταδίδεται σε ένα δίκτυο.



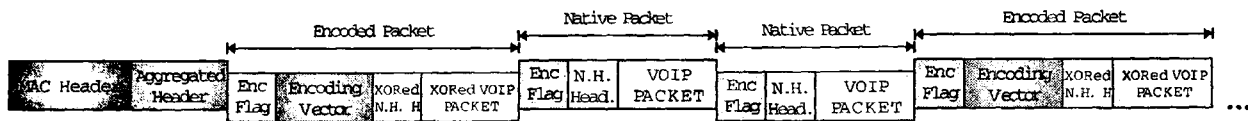
Σχήμα 4.4: Δομή Κωδικοποιημένου Πακέτου

Στην συνέχεια περιγράφεται η δομή που έχει ένα συναθροισμένο πακέτο, το οποίο είναι αποτέλεσμα από την συνένωση πολλών διαφορετικών πακέτων. Στο Σχήμα 4.5(a) παρουσιάζεται η δομή που έχει ένα συναθροισμένο πακέτο που αποτελείται μόνο από κωδικοποιημένα πακέτα ενώ στο Σχήμα 4.5(b) το συναθροισμένο πακέτο αποτελείται είτε από κωδικοποιημένα είτε από native πακέτα. Όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα κάθε πακέτο που συναθροίζεται περιέχει μία επικεφαλίδα (Enc_Flag) με μέγεθος 1 bit το οποίο δηλώνει το είδος του πακέτου που ακολουθεί. Η τιμή 0 υποδηλώνει ότι το πακέτο που ακολουθεί είναι native ενώ η τιμή 1 ότι είναι κωδικοποιημένο. Επίσης, σε κάθε συναθροισμένο πακέτο εισάγεται η επικεφαλίδα Aggregated Header, η οποία περιέχει τον αριθμό των πακέτων που περιλαμβάνονται συναθροισμένα στο πακέτο αυτό. Για παράδειγμα, αν ένα συναθροισμένο πακέτο περιλαμβάνει ένα native και ένα κωδικοποιημένο πακέτο τότε η επικεφαλίδα αυτή έχει την τιμή 2. Τέλος, στο υποεπίπεδο MAC εισάγεται η αντίστοιχη επικεφαλίδα η οποία είναι απαραίτητη για την μετάδοση του συναθροισμένου πακέτου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει αναφορά και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η αποστολή των πακέτων που δημιουργεί ο αλγόριθμος NCA. Το υποεπίπεδο MAC του πρωτοκόλλου 802.11 έχει δύο μεθόδους αποστολής: unicast και broadcast. Επειδή ο NCA πρέπει να παραδώσει τα κωδικοποιημένα πακέτα σε διαφορετικούς κόμβους next hops, η λογική προσέγγιση θα ήταν η χρησιμοποίηση broadcast μετάδοσης. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή έχει το σημαντικό πρόβλημα της χαμηλής αξιοπιστίας. Το πρωτόκολλο 802.11 εξασφαλίζει αξιοπιστία με την αναμετάδοση των πακέτων στο υποεπίπεδο MAC για ένα ορισμένο αριθμό



(a)



(b)

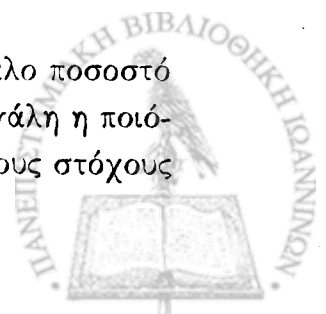
Σχήμα 4.5: Δομή Συναθροισμένου Πακέτου που αποτελείται (a) μόνο από κωδικοποιημένα πακέτα (b) από native και κωδικοποιημένα πακέτα

προσπαθειών μέχρι την λήψη μηνύματος θετικής επιβεβαίωσης (ACK). Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι δυνατός στην broadcast μετάδοση. Αντιθέτως, με την μετάδοση unicast κάθε πακέτο επιβεβαιώνεται αμέσως από τον παραλήπτη.

Για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό, ο αλγόριθμος NCA χρησιμοποιεί την pseudo-broadcast τεχνική για την αποστολή των πακέτων. Με την pseudo-broadcast τεχνική τα πακέτα που μεταδίδονται προορίζονται σε πολλούς παραλήπτες καθέναν από τους οποίους πρέπει να βρίσκεται σε λειτουργία promiscuous για να καταφέρει να ακούσει την μετάδοση. Σε κάθε πακέτο ορίζεται η διεύθυνση ενός από τους παραλήπτες στο πεδίο destination της επικεφαλίδας MAC. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο και η διεύθυνση MAC είναι διαφορετική από την δική του, ελέγχει όλες τις επικεφαλίδες Next Hop που περιέχονται σε αυτό και εντοπίζει εκείνα τα πακέτα που προορίζονται για τον ίδιο. Εφόσον όλα τα πακέτα στέλνονται με τη χρησιμοποίηση unicast το MAC εντοπίζει τις συγκρούσεις και εκτελεί κατάλληλα τον μηχανισμό αναμετάδοσης. Το pseudo-broadcast είναι επίσης πιο αξιόπιστο από την απλή μετάδοση broadcast. Κάθε πακέτο αναμεταδίδεται πολλές φορές μέχρι ο παραλήπτης που έχει οριστεί στην διεύθυνση MAC να το λάβει ή ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός προσπαθειών να ξεπεραστεί. Ένα επιθυμητό αποτέλεσμα αυτών των επαναμεταδόσεων είναι ότι οι υπόλοιποι κόμβοι που ακούν και καταγράφουν αυτό το πακέτο έχουν περισσότερες ευκαιρίες να το ακούσουν. Ωστόσο, με το pseudo-broadcast δεν λύνεται εξολοκλήρου το πρόβλημα της αξιοπιστίας.

4.3 Ο Αλγόριθμος NCA Progressive (NCA-P)

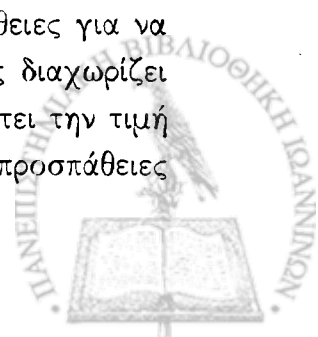
Η απόδοση κάθε αλγορίθμου για την μετάδοση VoIP εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την συνολική καθυστέρηση των πακέτων. Όταν η καθυστέρηση είναι μεγάλη η ποιότητα της συνομιλίας υποβαθμίζεται σημαντικά. Για τον λόγο αυτό ένας από τους στόχους



είναι η διατήρηση της μέσης καθυστέρησης σε χαμηλά επίπεδα. Ο αλγόριθμος NCA που μόλις περιγράφηκε μειώνει σε μεγάλο βαθμό τις μεταδόσεις σε ένα ασύρματο δίκτυο με αποτέλεσμα τη βελτίωση της καθυστέρησης πρόσβασης (access delay) των κόμβων. Ωστόσο, εκτός από την καθυστέρηση πρόσβασης σημαντική είναι και η καθυστέρηση αναμετάδοσης των χαμένων πακέτων. Προς την κατεύθυνση για την μείωση της καθυστέρησης του μηχανισμού αναμεταδόσεων του πρωτοκόλλου CSMA/CA προτείνεται στην παρούσα διατριβή μία επέκταση του αλγορίθμου NCA, ο αλγόριθμος NCA-P (NCA-Progressive). Ο αλγόριθμος αυτός στοχεύει στην αποδοτικότερη αξιοποίηση του επιπέδου MAC του πρωτοκόλλου 802.11.

Όπως είναι γνωστό το πρωτόκολλο 802.11 χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό αναμεταδόσεων για τη βελτίωση της αξιοπιστίας. Κατά την μετάδοση ενός πακέτου σε περίπτωση σύγκρουσης ή απώλειας ο αποστολέας επαναλαμβάνει την μετάδοση μέχρι να λάβει ένα μήνυμα θετικής επιβεβαίωσης από τον παραλήπτη. Ο μέγιστος αριθμός προσπαθειών για την αναμετάδοση ενός πακέτου ορίζεται στο υποεπίπεδο MAC (Retry_Limit). Όταν ο αριθμός αναμεταδόσεων ενός πακέτου ξεπεραστεί τότε το πακέτο αυτό απορρίπτεται. Το πρωτόκολλο CSMA/CA ορίζει έναν μηχανισμό για την αποφυγή των συγκρούσεων κατά την επανάληψη μιας μετάδοσης. Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό κάθε κόμβος πρέπει να περιμένει ένα χρονικό διάστημα πριν ξεκινήσει την επανάληψη μιας μετάδοσης (backoff delay). Κάθε κόμβος επιλέγει το χρονικό διάστημα αυτό τυχαία μεταξύ $0 - CW$ (ο ακέραιος αριθμός που επιλέγεται αντιστοιχεί σε χρονοθυρίδες προκαθορισμένης διάρκειας). Σε περίπτωση επιλογής ίδιου τυχαίου αριθμού από δύο ή περισσότερους κόμβους υπάρχει σύγκρουση. Σε κάθε νέα αναμετάδοση ενός πακέτου κάθε κόμβος διπλασιάζει την τιμή του CW και ξαναεπιλέγει τυχαία το χρονικό διάστημα αναμονής πριν την αναμετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η πιθανότητα να συμβεί νέα σύγκρουση μεταξύ των κόμβων που επιθυμούν να μεταδώσουν. Ωστόσο, σε κάθε προσπάθεια αναμετάδοσης ο μέσος χρόνος backoff αυξάνεται εκθετικά με αποτέλεσμα την αύξηση της καθυστέρησης αναμετάδοσης. Για παράδειγμα, στο πρωτόκολλο 802.11b το CW κατά την πρώτη προσπάθεια μετάδοσης έχει την τιμή $CW_{min} = 2^5 - 1 = 31$, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι ο μέσος χρόνος backoff στην προσπάθεια αυτή είναι $\frac{32}{2} = 16$ χρονοθυρίδες (η επιλογή του τυχαίου αριθμού γίνεται ομοιόμορφα). Σε περίπτωση σύγκρουσης στη δεύτερη προσπάθεια μετάδοσης ο μέσος χρόνος backoff θα είναι $\frac{64}{2} = 32$ και σε μία πιθανή τρίτη προσπάθεια θα είναι $\frac{128}{2} = 64$. Η τιμή CW μηδενίζεται ύστερα από μία επιτυχημένη μετάδοση ή όταν ο μέγιστος αριθμός αναμεταδόσεων (Retry_Limit) ενός πακέτου ξεπεραστεί.

Για την μείωση του χρόνου backoff ο αλγόριθμος NCA-P ακολουθεί ένα προοδευτικό τρόπο για την πραγματοποίηση των αναμεταδόσεων. Για παράδειγμα, έστω ότι ο μέγιστος αριθμός αναμεταδόσεων που έχει οριστεί σε ένα δίκτυο είναι R . Για κάθε πακέτο κατά την unicast μετάδοση ο αποστολέας προσπαθεί το πολύ μέχρι $Retry_Limit = R$ προσπάθειες για να το μεταδώσει πριν το απορρίψει. Στον αλγόριθμο NCA-P κάθε αποστολέας διαχωρίζει τις προσπάθειες μετάδοσης ενός πακέτου ως εξής: στην πρώτη προσπάθεια θέτει την τιμή $Retry_Limit = R_1$ με $R_1 < R$. Σε περίπτωση αποτυχίας ύστερα από R_1 προσπάθειες



ο αποστολέας ξαναστέλνει το ίδιο πακέτο αυτή τη φορά με $Retry_Limit = R_2 (R_1 + R_2 = R)$. Με αυτόν τον τρόπο σε κάθε μία από τις R_2 προσπάθειες ο χρόνος αναμονής (backoff) είναι μικρότερος σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιείται $Retry_Limit = R$. Στον Πίνακα 4.1 ακολουθεί ένα παράδειγμα το οποίο δείχνει το μέσο χρόνο backoff (σε χρονοθυρίδες) που χρειάζεται ένας κόμβος όταν αναμεταδίδει 5 φορές ένα πακέτο στο πρωτόκολλο 802.11b και στον αλγόριθμο NCA-P.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση μέσου backoff για 5 προσπάθειες στο 802.11b και στο NCA-P

# of trials	802.11 $R = 5$	NCA-P $R_1 = 3, R_2 = 2$
1	16	16
2	32	32
3	64	64
4	128	16
5	256	32
SUM	496	160

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι για την υλοποίηση του αλγορίθμου NCA-P δεν απαιτείται η τροποποίηση του υποεπιπέδου MAC κάθε κόμβου. Κάθε αποστολέας ενός πακέτου διατηρεί μαζί με το πακέτο που απέστειλε και έναν αριθμό (retry) ο οποίος δείχνει πόσες ξεχωριστές μεταδόσεις έχουν γίνει για το πακέτο αυτό. Όταν η μετάδοση του πακέτου είναι επιτυχής τότε ο κόμβος διαγράφει το συγκεκριμένο πακέτο και επαναφέρει την τιμή (retry) στην τιμή 0. Πριν από κάθε ξεχωριστή μετάδοση ο κόμβος θέτει την τιμή $Retry_Limit$ ανάλογα με την επιλογή που έχει γίνει. Για παράδειγμα, αν ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός αναμεταδόσεων στο δίκτυο είναι ίσος με $R = 4$ και ο αλγόριθμος NCA-P ακολουθεί μία στρατηγική $R_1 = 3$ και $R_2 = 1$ τότε κατά την πρώτη μετάδοση του πακέτου η τιμή $Retry_Limit$ τίθεται ίση με 3. Αν υπάρξει αποτυχία στην μετάδοση μετά από τρεις προσπάθειες τότε ο αλγόριθμος NCA-P θέτει την τιμή $Retry_Limit$ ίση με 1 και αναμεταδίδει το πακέτο.

Με την παραπάνω επιλογή τροποποίησης του μηχανισμού αναμεταδόσεων ο αλγόριθμος NCA-P αναμένεται να έχει έχει μικρότερη μέση καθυστέρηση των πακέτων που αναμεταδίδονται από τον NCA. Ωστόσο, ο NCA-P με την ελάττωση του χρόνου backoff είναι πιθανό να παρουσιάζει μία μικρή άνοδο στο ποσοστό των χαμένων πακέτων λόγω περισσότερων συγκρούσεων. Στην επόμενη ενότητα εισάγεται ένας νέος αλγόριθμος που ως στόχο έχει τη βελτίωση της αξιοπιστίας όσον αφορά το ποσοστό των χαμένων πακέτων.



4.4 Ο Αλγόριθμος NCA Failure Salvation (NCA-FS)

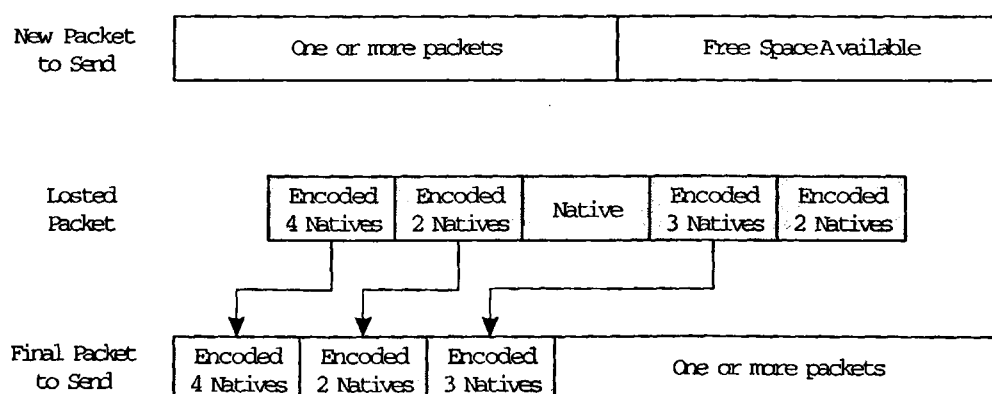
Ένα σημαντικό θέμα στην απόδοση των αλγορίθμων για την μετάδοση της φωνής είναι οι απώλειες πακέτων. Μεγαλύτερη προσοχή στο ζήτημα αυτό πρέπει να δοθεί κατά την σχεδίαση αλγορίθμων που στόχο έχουν τον συνδυασμό πολλών πακέτων όπως είναι οι αλγόριθμοι συνάθροισης και κωδικοποίησης δικτύου. Ο λόγος είναι ότι η απώλεια ενός πακέτου το οποίο είναι συνδυασμός πολλών πακέτων προκαλεί την απώλεια όλων αυτών των πακέτων. Το γεγονός αυτό συμβάλλει σημαντικά στην μείωση της απόδοσης των αλγορίθμων αυτών και ειδικότερα στην υποβάθμιση της φωνής αν πρόκειται για αλγόριθμους μετάδοσης VoIP. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η αναμετάδοση των πακέτων τα οποία δεν έχουν παραδοθεί σωστά. Ωστόσο, μία τέτοια στρατηγική απαιτεί κάθε κόμβος να έχει γνώση των πακέτων που δεν παραδόθηκαν σωστά ώστε να τα επανεκπέμψει. Ένας τρόπος που δίνει λύση στο πρόβλημα αυτό όταν πρόκειται για μετάδοση pseudo-broadcast είναι η αποστολή μηνυμάτων επιβεβαίωσης (ACK) για την σωστή λήψη ενός πακέτου όχι μόνο από τον καθορισμένο παραλήπτη (MAC destination) αλλά και από τους υπόλοιπους ενδεχόμενους παραλήπτες. Κάτι τέτοιο όμως σημαίνει επιπλέον κόστος αφού κάθε μετάδοση ενός πακέτου θα έχει ως συνέπεια την αποστολή πολλαπλών μηνυμάτων επιβεβαίωσης. Επίσης, η αναμετάδοση των πακέτων που δεν παραδόθηκαν σωστά απαιτεί επιπλέον κόστος κάτι που επιβαρύνει ακόμη πιο πολύ το δίκτυο. Επιπροσθέτως, μία τέτοια λύση έχει ως συνέπεια την αύξηση της καθυστέρησης στο δίκτυο εφόσον κάθε κόμβος μετά από κάθε αποστολή πρέπει να περιμένει για την λήψη επιβεβαιώσεων. Συνεπώς, μία τέτοια στρατηγική για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος μπορεί από την μια να εγγυάται μείωση στο ποσοστό απωλειών πακέτων αλλά από την άλλη το κόστος για τις επιπλέον μεταδόσεις που απαιτεί σε συνδυασμό με την αύξηση της καθυστέρησης καθιστά αυτή την λύση μη εφαρμόσιμη στους αλγόριθμους μετάδοσης φωνής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι απαιτείται ένας διαφορετικός τρόπος για την πραγματοποίηση αναμεταδόσεων που θα είναι απαλλαγμένος από επιπλέον επιβαρύνσεις. Μία λύση προς αυτήν την κατεύθυνση δίνει ο αλγόριθμος NCA Failure Salvation (NCA-FS). Ο αλγόριθμος αυτός είναι μία επέκταση των αλγορίθμων NCA και NCA-P. Σύμφωνα με τον NCA-FS κατά την αποστολή ενός πακέτου δίνεται η δυνατότητα για συνάθροιση πακέτων τα οποία έχουν αποτύχει να παραδοθούν σε κάποια προηγούμενη προσπάθεια αποστολής. Με αυτόν τον τρόπο προσφέρονται περισσότερες ευκαιρίες στους κόμβους του δικτύου να λάβουν πακέτα που αρχικά δεν παραδόθηκαν. Η αποστολή των πακέτων δεν εισάγει επιπλέον κόστος από την άποψη ότι δεν απαιτούνται νέες μεταδόσεις. Αυτό γιατί η αποστολή των πακέτων που αναμεταδίδονται γίνεται μόνο αν έχει σχεδιαστεί μία μετάδοση. Επιπλέον δεν απαιτείται η αποστολή επιπλέον μηνυμάτων επιβεβαίωσης. Η μόνη επιβάρυνση που εισάγει η ενσωμάτωση επιπλέον πακέτων είναι η αύξηση στο μέσο μέγεθος του μεταδιδόμενου πακέτου, γεγονός το οποίο έχει επίπτωση μόνο στον χρόνο μετάδοσής του. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό ο χρόνος για την μετάδοση ενός πακέτου δεν είναι τόσο κρίσιμος και μία μικρή αύξηση του δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα.



Για την υλοποίηση της τεχνικής αναμετάδοσης είναι απαραίτητη η μελέτη μερικών ζητημάτων που προκύπτουν. Αρχικά πρέπει να γίνει αναφορά στις επιπλέον δομές που απαιτούνται σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να είναι εφικτή η αναμετάδοση των πακέτων που απέτυχαν να παραδοθούν θα πρέπει κάθε κόμβος να διατηρεί αυτά τα πακέτα έτσι ώστε όταν του δοθεί η ευκαιρία να τα προσθέσει σε κάποιο πακέτο που είναι προς αποστολή. Μία σχεδιαστική απόφαση που πρέπει να παρθεί είναι πόσα τέτοια πακέτα πρέπει κάθε κόμβος να διατηρεί. Στην υλοποίηση του NCA-FS κάθε κόμβος διατηρεί το τελευταίο πακέτο που δεν κατάφερε να μεταδώσει σωστά ύστερα από το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό αναμεταδόσεων. Ο λόγος για την απόφαση αυτή είναι ότι τα πακέτα που αναμεταδίδονται δεν πρέπει να καθυστερούν σημαντικά δεδομένου ότι πρόκειται για πακέτα φωνής. Επιπλέον, ορίζεται και ένα μέγιστο χρονικό διάστημα για κάθε πακέτο μέσα στο οποίο πρέπει να γίνει η αναμετάδοσή του. Αν για κάποιο λόγο δεν καταστεί δυνατό να αναμεταδοθεί μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα τότε το πακέτο αυτό απορρίπτεται.

Κάθε πακέτο που έχει αποτύχει να μεταδοθεί σωστά μπορεί να είναι ένα απλό (native), κωδικοποιημένο ή ένα συναθροισμένο πακέτο που αποτελείται από κωδικοποιημένα και απλά πακέτα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι όσα περιγράφονται παρακάτω αναφέρονται στην περίπτωση ενός συναθροισμένου πακέτου, ωστόσο ισχύουν και για τις άλλες δύο μορφές πακέτων. Έστω λοιπόν ένα συναθροισμένο πακέτο που αναμένει την ενσωμάτωσή του με κάποιο πακέτο που είναι σε θέση να αποστείλει ένας κόμβος. Η ενσωμάτωση γίνεται με την τεχνική της συνάθροισης μόνο σε περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμος χώρος στο πακέτο που βρίσκεται προς αποστολή. Με λίγα λόγια ο αλγόριθμος NCA-FS συνενώνει το πακέτο που είναι προς αποστολή με το πακέτο που περιμένει την αναμετάδοση. Ωστόσο, αυτό πρέπει να γίνει εφόσον το συνολικό μέγεθος των δύο αυτών πακέτων δεν ξεπερνάει το MTU. Σε περίπτωση που ο διαθέσιμος χώρος στο πακέτο προς αποστολή δεν επαρκεί για την ενσωμάτωση ολόκληρου του προς αναμετάδοση πακέτου τότε επιλέγονται από αυτό ορισμένα από τα πακέτα που περιέχει ως συναθροισμένα. Για την επιλογή αυτών των πακέτων ένας τρόπος είναι η επιλογή με προτίμηση στα πακέτα που έχουν μεγαλύτερη κωδικοποίηση (περιέχουν περισσότερα native πακέτα). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο αριθμός των native πακέτων που αναμεταδίδονται.

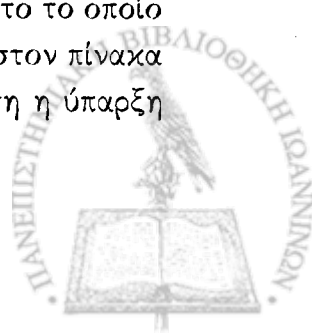


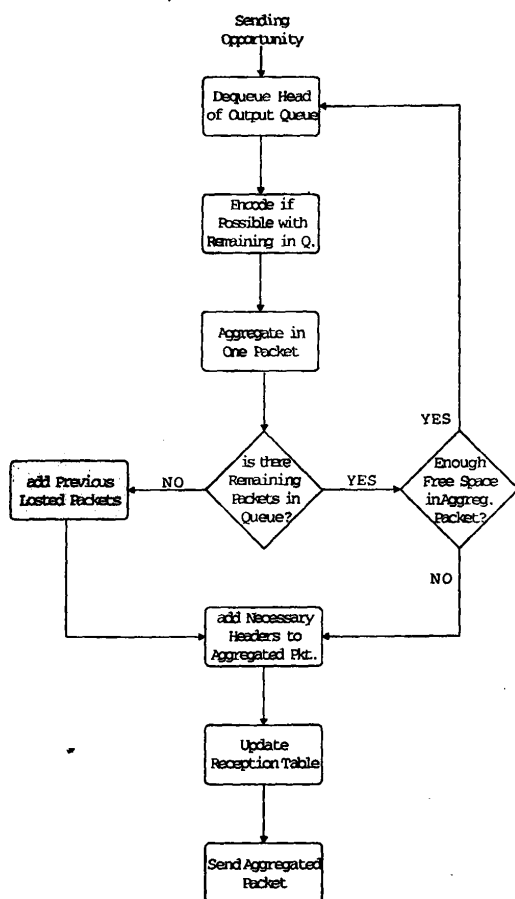
Σχήμα 4.6: Ενσωμάτωση χαμένων πακέτων στον αλγόριθμο NCA-FS

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6 η ενσωμάτωση των πακέτων για αποστολή γίνεται στην αρχή του πακέτου. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι ότι κάθε παραλήπτης πρέπει να επεξεργαστεί πρώτα τα πακέτα που αναμεταδίδονται ώστε να μην παραδίδονται τα πακέτα εκτός σειράς. Όπως φαίνεται στο σχήμα, επειδή δεν υπάρχει αρκετός ελεύθερος χώρος στο πακέτο που είναι προς αποστολή ώστε να ενσωματωθεί ολόκληρο το πακέτο που είναι προς αναμετάδοση, ο αλγόριθμος επιλέγει εκείνα τα πακέτα που έχουν μεγαλύτερο βάθος κωδικοποίησης. Αρχικά επιλέγει το πακέτο που είναι αποτέλεσμα κωδικοποίησης τεσσάρων native πακέτων, έπειτα αυτό που αποτελείται από τρία native πακέτα και τέλος το πρώτο από τα πακέτα που είναι αποτέλεσμα κωδικοποίησης δύο native πακέτων. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν άλλα κωδικοποιημένα πακέτα ο αλγόριθμος επιλέγει native πακέτα.

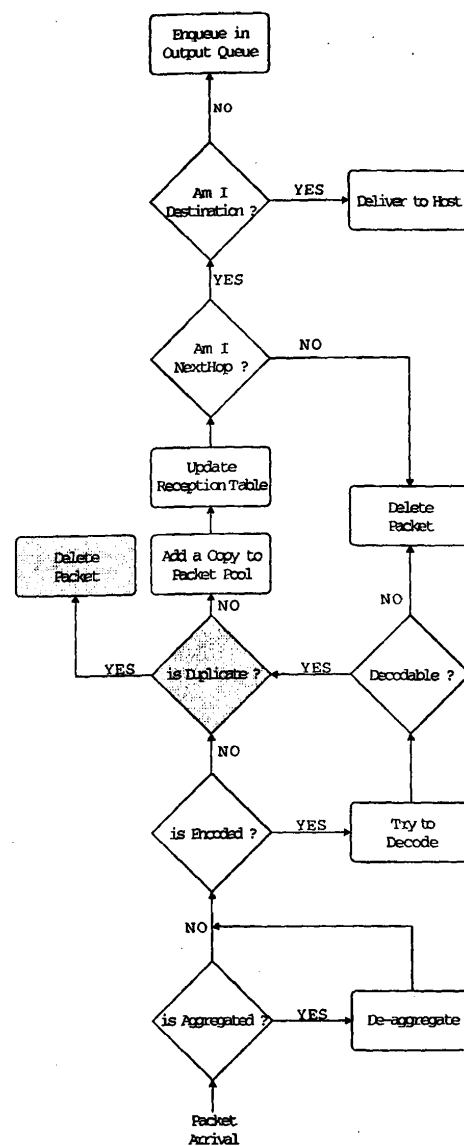
Προηγούμενα είδαμε ότι η ενσωμάτωση των πακέτων προς αναμετάδοση γίνεται με την τεχνική της συνάθροισης. Μία λογική σκέψη θα ήταν η ενσωμάτωση πακέτων να γίνει με κωδικοποίηση. Πιο συγκεκριμένα κατά την ενσωμάτωση ενός native πακέτου θα έπρεπε να εκτελεστεί ο αλγόριθμος εύρεσης ευκαιριών κωδικοποιήσεων ανάμεσα στο πακέτο αυτό και τα ήδη προγραμματισμένα πακέτα προς αποστολή. Ωστόσο, μία τέτοια αναζήτηση για εύρεση κωδικοποιήσεων για το πακέτο που θα αναμεταδοθεί θα ήταν εντελώς λανθασμένη. Ο λόγος είναι ότι η εικόνα που υπάρχει στον πίνακα αποδοχής για το πακέτο αυτό είναι λανθασμένη επειδή κατά την αποτυχημένη μετάδοση του πακέτου αυτού έχει ενημερωθεί ο πίνακας αποδοχής υποθέτοντας ότι το πακέτο αυτό το έχουν λάβει όλοι οι ενδεχόμενοι παραλήπτες. Ωστόσο, ο αποστολέας δεν μπορεί να ξέρει ποιοι κόμβοι έχουν λάβει το πακέτο και ποιοι όχι. Για το μοναδικό κόμβο που μπορεί να γνωρίζει ότι δεν έχει λάβει το πακέτο είναι ο παραλήπτης που έχει οριστεί στο πεδίο destination της επικεφαλίδας MAC. Συνεπώς, ο αποστολέας δεν μπορεί να συμπεριλάβει το πακέτο αυτό σε κάποια κωδικοποίηση. Για το λόγο αυτό μία τέτοια στρατηγική δεν μπορεί να ακολουθηθεί.

Όπως έχει αναφερθεί, ο αποστολέας γνωρίζει την επιτυχημένη ή αποτυχημένη λήψη ενός πακέτου μόνο για τον παραλήπτη που έχει οριστεί στην επικεφαλίδα MAC. Για τους υπόλοιπους κόμβους που βρίσκονται σε λειτουργία promiscuous και καταγράφουν πακέτα ο αποστολέας δεν γνωρίζει αν η μετάδοση ήταν επιτυχής ή όχι. Για τον λόγο αυτό κατά την αναμετάδοση ενός πακέτου όσοι κόμβοι το είχαν λάβει από την πρώτη μετάδοση θα λάβουν ένα διπλότυπο αυτού του πακέτου. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός μηχανισμού για την αποφυγή λήψης και προώθησης διπλοτύπων πακέτων. Κάθε κόμβος διατηρεί μία δομή η οποία έχει την μορφή πίνακα και ονομάζεται *Πίνακας Διπλοτύπων*. Στον πίνακα αυτό διατηρούνται πληροφορίες σχετικά με τα πακέτα που έχει λάβει στο παρελθόν κάθε κόμβος. Έτσι κατά την λήψη ενός πακέτου κάθε κόμβος ελέγχει τον πίνακα διπλοτύπων και αν το πακέτο αυτό έχει ληφθεί προηγουμένως τότε το απορρίπτει. Σε διαφορετική περίπτωση το επεξεργάζεται κανονικά. Ο πίνακας αυτός έχει την ίδια μορφή που έχει ο πίνακας αποδοχής, δηλαδή είναι ένας πίνακας bitmap που διατηρεί ένα bit για κάθε πακέτο το οποίο υποδεικνύει αν το πακέτο αυτό έχει ληφθεί κατά το παρελθόν ή όχι. Όπως και στον πίνακα αποδοχής έτσι και στην περίπτωση του πίνακα διπλοτύπων κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός άνω ορίου για το μέγεθος του πίνακα αυτού.





(a)



(b)

Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής του NCA-FS (a) στον αποστολέα (b) στον παραλήπτη

Το Σχήμα 4.7 παρουσιάζει τα διαγράμματα ροής του αλγόριθμου NCA-FS κατά την αποστολή και την λήψη ενός πακέτου. Κατά την αποστολή ενός πακέτου πρέπει να γίνει ο έλεγχος για την δυνατότητα ενσωμάτωσης πακέτων που έχουν αποτύχει να παραδοθούν σε κάποια προηγούμενη προσπάθεια αποστολής. Στην πλευρά του παραλήπτη για κάθε πακέτο γίνεται έλεγχος ώστε να αποκλειστούν διπλότυπα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης

5.2 Μεθοδολογία Αξιολόγησης Αλγορίθμων και Μετρικές

5.3 Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Η θεωρητική ανάλυση των αλγορίθμων δικτύωσης των ασύρματων δικτύων είναι εξαιρετικά δύσκολη και ίσως ανέφικτη λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζεται στην μοντελοποίηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Για το λόγο αυτό, η τεχνική της προσομοίωσης χρησιμοποιείται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα για την αξιολόγηση του τρόπου λειτουργίας και της απόδοσης των αλγορίθμων δικτύωσης. Η προσομοίωση είναι σε θέση να δημιουργήσει ρεαλιστικές συνθήκες δικτύου και επιπλέον παρέχει την δυνατότητα σύγκρισης των νέων αλγορίθμων με άλλους που ήδη έχουν προταθεί. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής πραγματοποιήθηκε μία προσομοιωτική μελέτη των προτεινόμενων αλγορίθμων και σύγκρισή τους με τον αλγόριθμο HHA, ο οποίος είναι από τους αποδοτικότερους αλγορίθμους για την μετάδοση VoIP σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων. Στην αρχή αυτού του κεφαλαίου περιγράφεται το εργαλείο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε καθώς και το μοντέλο δικτύου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις. Στην συνέχεια περιγράφονται οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων. Τέλος, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία συνοδεύονται από τον απαραίτητο σχολιασμό.

5.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το εργαλείο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε καθώς και το μοντέλο δικτύου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις.



5.1.1 Εργαλείο Προσομοίωσης

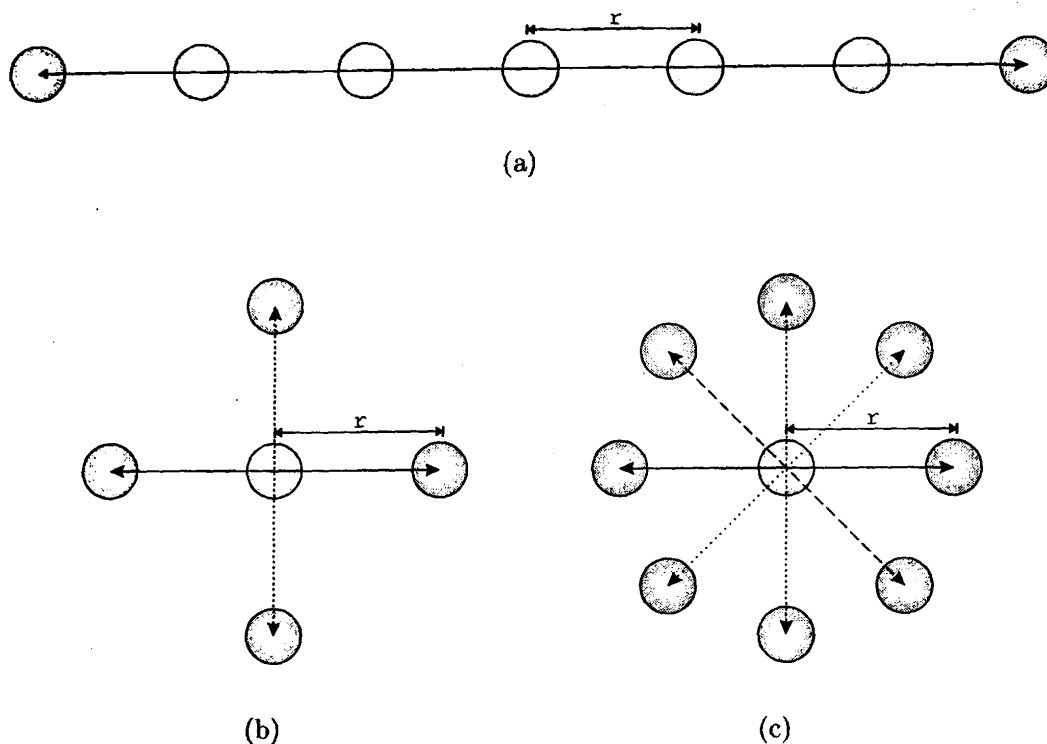
Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί αρκετοί προσομοιωτές εκ των οποίων ο *ns2* (Network Simulator) [21] είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο στην έρευνα για δίκτυα κάθε είδους. Ο *ns2* έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνει με λεπτομέρεια όλα τα πρωτόκολλα των διαφόρων επιπέδων κατά *OSI*. Για τον λόγο αυτό ο *ns2* καταφέρνει να πετύχει υψηλό βαθμό ρεαλισμού στην προσομοίωση συνθηκών ενός πραγματικού δικτύου. Ο προσομοιωτής *ns2* είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μελέτη των αλγορίθμων κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Για την προσομοίωση των ασύρματων δικτύων χρησιμοποιήθηκε η επέκταση *CMU* [28] του *ns2*. Η επέκταση *CMU* έχει σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνει τις διαδικασίες που απαιτούνται προκειμένου να είναι δυνατή η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου. Για παράδειγμα, για την διάδοση του σήματος στο κοινό μέσο έχει υλοποιηθεί το μοντέλο *Two ray Ground* [20] για τις μακρινές αποστάσεις και το μοντέλο *Friss* [30] για τις κοντινές αποστάσεις. Επίσης για το δεύτερο επίπεδο κατά *OSI* χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IEEE 802.11 [1]. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία της επέκτασης *CMU* υπάρχουν στο [28].

5.1.2 Μοντέλο Προσομοίωσης

Οι τοπολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αλγορίθμων αποτελούνται από ένα σύνολο σταθερών ασύρματων κόμβων όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1. Στο Σχήμα 5.1(a) φαίνεται η τοπολογία *Line* η οποία αποτελείται από επτά κόμβους οι οποίοι βρίσκονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα δίκτυο έξι αλμάτων. Η απόσταση r μεταξύ των κόμβων είναι $r = 50m$ ενώ κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από ακτίνα επικοινωνίας R με $R = 2r - l$ όπου $l \ll r$. Ένα σύνολο από διαφορετικές κλήσεις φωνής τοποθετούνται μεταξύ των δύο ακριανών κόμβων ενώ οι ενδιάμεσοι κόμβοι προωθούν τα πακέτα φωνής. Στην τοπολογία *Cross* (Σχήμα 5.1(b)), ένα σύνολο από κλήσεις φωνής τοποθετούνται οριζόντια και κάθετα μεταξύ των ακριανών κόμβων και διασχίζουν τον κεντρικό κόμβο. Για παράδειγμα, όταν υπάρχουν 30 κλήσεις στο δίκτυο, αυτό αντιστοιχεί σε 15 “οριζόντιες” και 15 “κάθετες” κλήσεις που δημιουργούνται μεταξύ των ακριανών κόμβων. Επισημαίνεται ότι ο κεντρικός κόμβος έχει στην εμβέλεια του όλους τους υπόλοιπους κόμβους ενώ κάθε άλλος κόμβος έχει στην εμβέλεια του όλους τους κόμβους του δικτύου εκτός από τον κόμβο που βρίσκεται στο αντιδιαμετρικό σημείο από τον ίδιο. Τέλος, στο Σχήμα 5.1(c) φαίνεται η τοπολογία *Wheel* στην οποία οι κλήσεις εκτός από οριζόντια και κάθετα τοποθετούνται και κατα μήκος των δύο διαγωνίων. Ο κεντρικός κόμβος επίσης έχει όλους τους υπόλοιπους κόμβους στην εμβέλεια του, ενώ κάθε άλλος κόμβος έχει στην εμβέλειά του όλους τους κόμβους εκτός από τον κόμβο που βρίσκεται διαμετρικά αντίθετα από αυτόν.





Σχήμα 5.1: Τοπολογίες Δικτύου (a) Line (b) Cross (c) Wheel

Για την μοντελοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης VoIP χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CBR (Constant Bit Rate), το οποίο δημιουργεί πακέτα φωνής με σταθερό ρυθμό. Για κάθε κλήση ομιλίας δημιουργούνται δύο αμφίδρομες ροές μεταξύ δύο ασύρματων κόμβων. Ο ρυθμός δημιουργίας πακέτων φωνής για κάθε κλήση ορίζεται κάθε φορά με βάση τον κωδικοποιητή που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, ο κωδικοποιητής G.711 παράγει πακέτα φωνής κάθε χρονικό διάστημα $interval = 20ms$ δημιουργώντας έτσι έναν ρυθμό $\lambda = 50 \text{ pkts/sec}$. Συνεπώς, κάθε κλήση ομιλίας παράγει και στις δύο κατευθύνσεις έναν αριθμό πακέτων ίσο με $2\lambda \text{ pkts/sec}$. Το μέγεθος των πακέτων που δημιουργεί ο συγκεκριμένος κωδικοποιητής είναι ίσο με 160 Bytes .

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης ορίζεται σε 900 sec ενώ κάθε πείραμα επαναλαμβάνεται 10 φορές. Οι τιμές που παρουσιάζονται έχουν υπολογιστεί ως μέσοι όροι από τις 10 επαναλήψεις. Στον Πίνακα 5.1 συγκεντρώνονται οι τιμές αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις παραμέτρους κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Οι τιμές που αναγράφονται αντιστοιχούν στις περιπτώσεις που η παράμετρος δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια ενός πειράματος και ισχύουν εκτός και αν αναφερθεί κάτι διαφορετικό.

Πίνακας 5.1: Πίνακας τιμών παραμέτρων προσομοίωσης

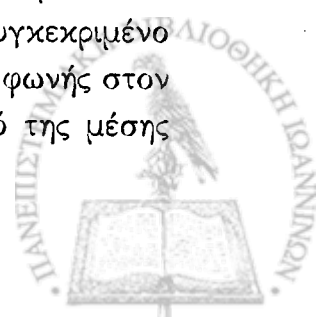
Παράμετρος	Τιμή
Χρόνος Προσομοίωσης (Simulation Time T)	900 sec
Αριθμός Επαναλήψεων (Number of Trials)	10
Απόσταση μεταξύ των κόμβων (r)	50 m
Ακτίνα Εμβέλειας (Transmission Range R)	95 m
Εύρος Ζώνης	11 Mb/sec
RTS/CTS	Disabled
MTU	2304 Bytes
Αριθμός Αναμεταδόσεων Υποεπιπέδου MAC (Retry Limit)	3
Μέγεθος Εξερχόμενης Ουράς (Queue Size)	5000 pkts
Μέγεθος Λίστας Αποδοχής (Reception Table Size)	5000 pkts
Μέγεθος Packet Pool (Packet Pool Size)	3000 pkts

5.2 Μεθοδολογία Αξιολόγησης Αλγορίθμων και Μετρικές

Η διαδικασία της προσομοίωσης προσφέρει την δυνατότητα επιλογής διαφόρων κριτηρίων για την αξιολόγηση της απόδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων. Τα κριτήρια αυτά είναι γνωστά ως μετρικές αξιολόγησης και η επιλογή τους έχει μεγάλη σημασία στην μέτρηση της απόδοσης των αλγορίθμων. Ακολουθεί η περιγραφή ενός συνόλου μετρικών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων και την σύγκριση αυτών με τις υπάρχουσες τεχνικές.

Μέση Καθυστέρηση (Mean Delay)

Η μέση καθυστέρηση ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που απαιτείται ώστε να φτάσει ένα πακέτο φωνής από την πηγή ως τον προορισμό. Η καθυστέρηση των πακέτων φωνής υπολογίζεται ανεξάρτητα για κάθε μία κατεύθυνση μιας κλήσης. Επιπλέον, η μέση καθυστέρηση του δικτύου υπολογίζεται από τον μέσο όρο των καθυστερήσεων όλων των κλήσεων φωνής. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2, η μέγιστη από άκρο σε άκρο καθυστέρηση δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 400 ms. Σε ένα σύστημα VoIP υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που συμβάλλουν στην καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων φωνής. Μερικοί από τους παράγοντες αυτούς είναι η καθυστέρηση κωδικοποίησης της φωνής (encoding), καθυστέρηση πακετοποίησης (packetization), καθυστέρηση στον jitter buffer (playout), καθυστέρηση υλικού (hardware I/O), κ.λπ. Στη διατριβή αυτή γίνεται η υπόθεση ότι το σύνολο όλων αυτών των καθυστερήσεων είναι 300 ms, αφήνοντας ένα ποσό μεγέθους 100 ms για την ασύρματη μετάδοση των πακέτων. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ορίζεται ένα άνω όριο καθυστέρησης $Delay_Threshold = 100ms$. Τα πακέτα φωνής που ξεπερνούν το συγκεκριμένο όριο θεωρείται ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαραγωγή της φωνής στον παραλήπτη. Ωστόσο, τα πακέτα αυτά συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης.



Ποσοστό Απώλειας Πακέτων (Loss)

Ως ποσοστό των χαμένων πακέτων ενός αλγορίθμου ορίζεται το ποσοστό των πακέτων που είτε δεν φτάνουν είτε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον παραλήπτη. Λόγοι που συντελούν στην απώλεια πακέτων είναι συνήθως οι συγκρούσεις, η συμφόρηση και τα λάθη κατά την μετάδοση. Ωστόσο, στην μετάδοση VoIP, πακέτα τα οποία καθυστερούν σημαντικά και φθάνουν στον παραλήπτη με μεγάλη καθυστέρηση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αναπαραγωγή της φωνής. Συνεπώς, τα πακέτα που καθυστερούν περισσότερο από το επιτρεπτό όριο θεωρείται ότι έχουν χαθεί. Στην παρούσα διατριβή το ποσοστό των χαμένων πακέτων υπολογίζεται από τα πακέτα που δεν κατάφεραν να φτάσουν στον παραλήπτη καθώς και από τα πακέτα που αφίχθησαν στον παραλήπτη καθυστερημένα (*delay loss*) (καθυστέρηση μεγαλύτερη από το *Delay_Threshold*). Έτσι, ένας αλγόριθμος μετάδοσης VoIP καλείται να αντιμετωπίσει απώλειες πακέτων όχι μόνο από συγκρούσεις και υπερχείλιση των ουρών αναμονής αλλά και από την υπερβολική καθυστέρηση άφιξης των πακέτων στον παραλήπτη.

Μέση Διακύμανση της Καθυστέρησης (Delay Jitter)

Εκτός από την καθυστέρηση σε μία κλήση VoIP, σημαντική είναι και η διακύμανση της καθυστέρησης. Συνεπώς, κάθε αλγόριθμος μετάδοσης VoIP εκτός από την έγκαιρη παράδοση των πακέτων φωνής πρέπει να παραδίδει τα πακέτα αυτά με μικρή μεταβλητότητα στην καθυστέρηση ώστε ο jitter buffer να καταφέρει να τα αναπαράγει σωστά. Για τον λόγο αυτό υπολογίζεται και η μέση διακύμανση της καθυστέρησης. Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του Jitter είναι συνήθως ίση με το χρόνο δημιουργίας 2-3 πακέτων φωνής. Δηλαδή αν για παράδειγμα κάθε πακέτο περιέχει πλαίσια φωνής διάρκειας 20 ms τότε το μέγιστο επιτρεπτό jitter είναι 60 ms.

R-Score

Μία μετρική που χρησιμοποιείται για την υπολογισμό της ποιότητας σε ένα σύστημα VoIP είναι το R-Score. Η μετρική αυτή συνδυάζει ένα σύνολο από παράγοντες που συμβάλλουν αθροιστικά στην ποιότητα των κλήσεων φωνής. Από τους σημαντικότερους παράγοντες που συμβάλλουν στον υπολογισμό του R-Score είναι η καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής ο υπολογισμός του R-Score γίνεται σύμφωνα με το μοντέλο της εργασίας [4]. Επίσης, ορίζεται ένα κάτω όριο στην τιμή του R-Score που είναι ίσο με 70. Σύμφωνα με το [9], η ποιότητα των κλήσεων φωνής με R-Score πάνω από το συγκεκριμένο όριο είναι αποδεκτή από τους συνομιλητές. Για την εύρεση της χωρητικότητας σε ταυτόχρονες κλήσεις VoIP μιας συγκεκριμένης τοπολογίας δικτύου υπολογίζεται το μέσο R-Score όλων των κλήσεων. Για παράδειγμα, αν 30 ταυτόχρονες κλήσεις VoIP πραγματοποιούνται σε ένα δίκτυο και το μέσο R-Score των κλήσεων αυτών είναι ίσο με 70 τότε η χωρητικότητα του δικτύου αυτού είναι 30 κλήσεις.



Κέρδος Κωδικοποίησης (Coding Gain)

Η μετρική αυτή, όπως δηλώνει και το όνομά της, αποσκοπεί στην αξιολόγηση του κέρδους που επιφέρει η χρήση της κωδικοποίησης δικτύου. Ορίζεται ως το πηλίκο του αριθμού των μεταδόσεων που πραγματοποιούνται όταν χρησιμοποιείται μια τεχνική χωρίς κωδικοποίηση δικτύου προς τον αντίστοιχο αριθμό όταν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση δικτύου. Σημειώνεται ότι το αποτέλεσμα αυτό είναι πάντοτε μεγαλύτερο της μονάδας. Για παράδειγμα, κέρδος κωδικοποίησης ίσο με 1.3 ενός αλγορίθμου με κωδικοποίηση δικτύου σε σχέση με έναν αλγόριθμο χωρίς κωδικοποίηση δικτύου σημαίνει ότι ο αλγόριθμος χωρίς κωδικοποίηση απαιτεί 30% περισσότερες μεταδόσεις από αυτόν με κωδικοποίηση. Στην παρούσα διατριβή, επειδή χρησιμοποιείται συνδυαστικά η συνάρθρωση και η κωδικοποίηση πακέτων, το κέρδος από την μείωση των μεταδόσεων υπολογίζεται μόνο από την κωδικοποίηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια αυτής της διατριβής το κέρδος κωδικοποίησης των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν κωδικοποίηση υπολογίζεται με βάση τον απλό αλγόριθμο που δεν χρησιμοποιεί κωδικοποίηση. Για παράδειγμα, ο απλός αλγόριθμος IEEE 802.11 διαιρείται με τον αλγόριθμο NCA που χρησιμοποιεί κωδικοποίηση.

Ρυθμαπόδοση (Throughput)

Ρυθμαπόδοση ενός δικτύου καλούμε τον ρυθμό με τον οποίο μεταδίδονται δεδομένα. Στην παρούσα διατριβή η ρυθμαπόδοση του δικτύου ως το άθροισμα της ρυθμαπόδοσης των κλήσεων VoIP που μεταδίδονται σε αυτό. Ο υπολογισμός της ρυθμαπόδοσης για κάθε κλήση γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

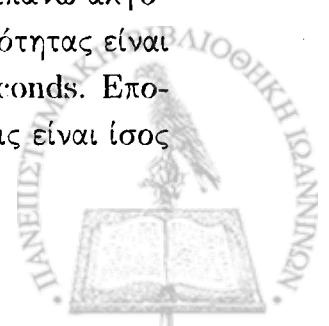
$$\text{Throughput} = \frac{\# \text{ of received pkts from a call} * \text{payload_size}}{\text{call_duration}} \quad (5.1)$$

5.3 Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων μετάδοσης VoIP. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων χωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Συμπληρωματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στο Παράρτημα.

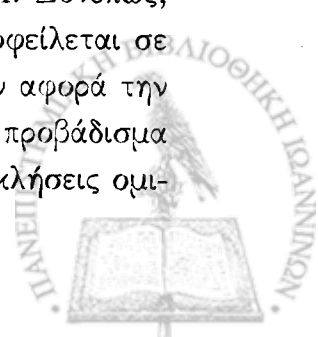
5.3.1 Μέρος Πρώτο: Απόδοση Αλγορίθμων σε Διαφορετικές Τοπολογίες

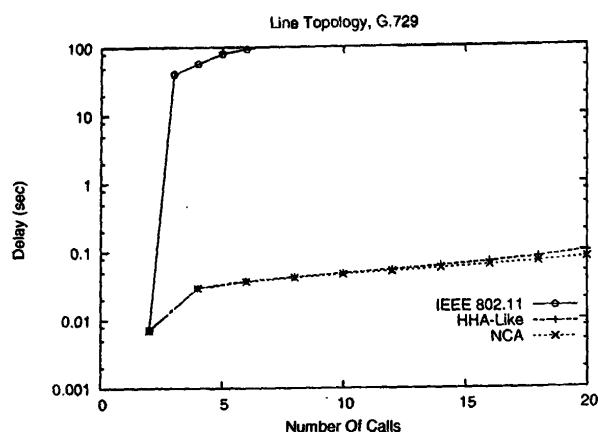
Στο μέρος αυτό γίνεται σύγκριση της απόδοσης ενός δικτύου που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IEEE 802.11b με τους αλγόριθμους HHA-Like και NCA. Στο πείραμα αυτό ο αριθμός ταυτόχρονων κλήσεων VoIP μεταβάλλεται με σκοπό την αξιολόγηση των παραπάνω αλγορίθμων. Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται στα πειράματα αυτής της υποενότητας είναι ο G.729, ο οποίος δημιουργεί πακέτα φωνής μεγέθους 20 Bytes κάθε 20 milliseconds. Επομένως, ο ρυθμός δημιουργίας πακέτων για μια κλήση και στις δύο κατευθύνσεις είναι ίσος με 100 pkts/sec.



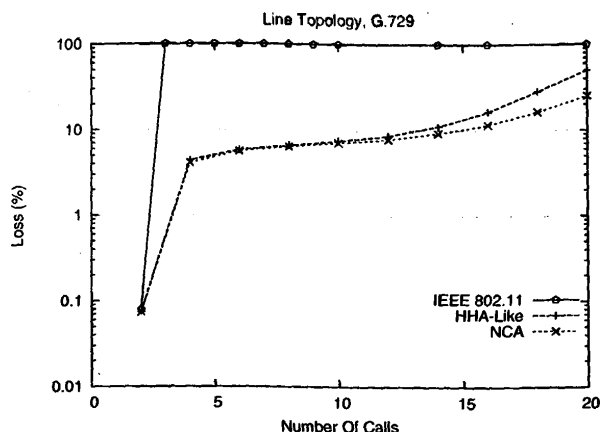
Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αλγορίθμων για την τοπολογία Line. Στην τοπολογία αυτή οι κλήσεις VoIP πραγματοποιούνται μεταξύ των δύο ακριανών κόμβων. Οι υπόλοιποι κόμβοι προωθούν κάθε πακέτο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνονται οι κλήσεις φωνής, η μέση καθυστέρηση και οι απώλειες πακέτων αυξάνονται. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύεται το πρόβλημα που υπάρχει στην μετάδοση φωνής σε ένα ασύρματο δίκτυο. Ο αλγόριθμος 802.11 καταρρέει όταν οι ταυτόχρονες κλήσεις VoIP είναι περισσότερες από δύο αδυνατώντας να εξυπηρετήσει τον συγκεκριμένο φόρτο δικτύου. Ο ανταγωνισμός για το κοινό μέσο αυξάνεται όσο πληθαίνουν τα πακέτα που δημιουργούν οι κλήσεις VoIP δημιουργώντας συμφόρηση στο δίκτυο. Επιπλέον, στις ουρές των κόμβων συγκεντρώνονται όλο και περισσότερα πακέτα με αποτέλεσμα όταν αυτές γεμίζουν να τα απορρίπτουν (σχ. 5.2(b)). Τα πακέτα που δεν απορρίπτονται αναμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στην ουρά ενός κόμβου μέχρι να εξυπηρετηθούν με αποτέλεσμα η μέση καθυστέρηση να φτάνει μέχρι μερικά δευτερόλεπτα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2(a) (σημειώνεται ότι στον υπολογισμό της καθυστέρησης συμπεριλαμβάνονται τα πακέτα που ξεπερνούν το Delay_Threshold). Συνεπώς, η μέγιστη χωρητικότητα που μπορεί να επιτύχει ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί το 802.11 στην τοπολογία Line είναι 2 κλήσεις.

Το παραπάνω πρόβλημα φαίνεται ότι βελτιώνουν αισθητά οι αλγόριθμοι HHA-Like και NCA, οι οποίοι επιτρέπουν τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων πακέτων σε ένα με σκοπό να μειωθεί η συμφόρηση στο δίκτυο. Η μέση καθυστέρηση των πακέτων και στους δύο αλγόριθμους είναι χαμηλότερη από 100 ms ακόμη και όταν οι κλήσεις φτάνουν τον αριθμό 20. Όσο οι ταυτόχρονες κλήσεις VoIP αυξάνονται, ο αλγόριθμος NCA επιτυγχάνει μικρότερη μέση καθυστέρηση πακέτων. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος NCA με την κωδικοποίηση δικτύου καταφέρνει να συνδυάσει περισσότερα πακέτα σε σχέση με τον αλγόριθμο HHA-Like. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνει να εξυπηρετήσει έναν μεγαλύτερο ρυθμό πακέτων, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο χρόνο αναμονής των πακέτων στις ουρές των κόμβων. Σχετικά με το ποσοστό απώλειας πακέτων οι αλγόριθμοι NCA και HHA-Like μειώνουν το ποσοστό από σχεδόν 100% που έχει το 802.11 για 4 κλήσεις σε περίπου 4%. Όσο αυξάνονται οι κλήσεις το ποσοστό απώλειας πακέτων μεγαλώνει για να ξεπεράσει το 10% στις 13 και 15 κλήσεις για τον αλγόριθμο HHA-Like και τον NCA αντίστοιχα. Οι απώλειες πακέτων στην συγκεκριμένη τοπολογία οφείλονται περισσότερο στο φαινόμενο του κρυμμένου τερματικού (Hidden Terminal), καθώς ο μηχανισμός RTS/CTS είναι απενεργοποιημένος και λιγότερο σε απώλειες λόγω καθυστέρησης (delay loss). Αυτό επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 5.3 το οποίο δείχνει την συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής της καθυστέρησης των πακέτων φωνής. Για 14 κλήσεις το ποσοστό των πακέτων που καθυστερούν περισσότερο από 100ms (Delay_Threshold) είναι περίπου 99.9% για το 802.11, 2.6% για τον HHA-Like και 1.2% για τον NCA. Συνεπώς, το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών πακέτων που φαίνεται στο Σχήμα 5.2(b) οφείλεται σε απώλειες λόγω συγκρούσεων και όχι λόγω καθυστέρησης (delay loss). Όσον αφορά την ποιότητα των κλήσεων (σχ. 5.2(c)) ο αλγόριθμος NCA έχει σχετικά ένα μικρό προβάδισμα ωστόσο και για τους δύο αλγόριθμους η ποιότητα μειώνεται αισθητά όταν οι κλήσεις ομι-

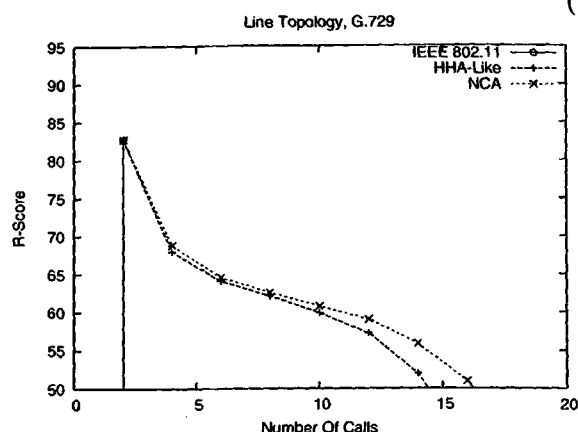




(a)



(b)

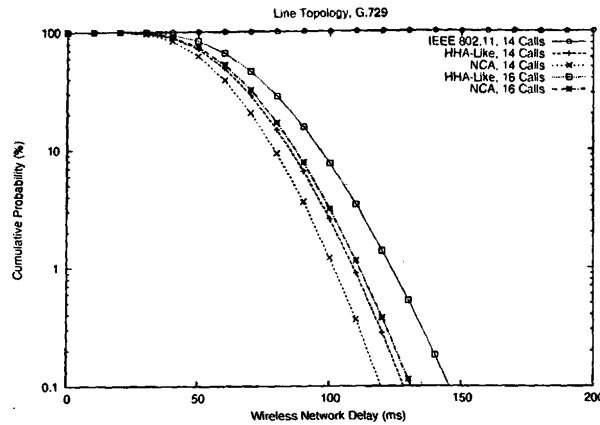


(c)

Σχήμα 5.2: Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Line σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

λίας είναι περισσότερες από 4. Η επίδραση του κρυμμένου τερματικού δημιουργεί πρόβλημα στους αλγόριθμους (συγκρούσεις) και για τον λόγο αυτό ο NCA δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση. Επίσης, το γεγονός ότι στην τοπολογία Line κάθε κόμβος έχει το πολύ δύο γείτονες ο αλγόριθμος NCA δεν έχει σημαντικό κέρδος σε σχέση με τον αλγόριθμο HHA-Like.

Στη συνέχεια γίνεται αξιολόγηση των αλγορίθμων στην τοπολογία Cross (σχ. 5.4). Οι ταυτόχρονες κλήσεις ομιλίας πραγματοποιούνται οριζόντια και κάθετα μεταξύ των ακριανών κόμβων. Ο ενδιάμεσος κόμβος εξυπηρετεί τα πακέτα από όλες τις κλήσεις. Συνεπώς, ο κόμβος αυτός αποτελεί το σημείο συμφόρησης του δικτύου. Από την άποψη της καθυστέρησης (σχ. 5.4(a)) στο 802.11 παρατηρείται μία απότομη αύξηση από τις 7 κλήσεις και πάνω. Ο ενδιάμεσος κόμβος μη μπορώντας να εξυπηρετήσει τον ρυθμό των πακέτων που δέχεται, αποθηκεύει τα πακέτα στην ουρά του. Οι ουρές των κόμβων γίνονται όλο και μεγαλύτερες με αποτέλεσμα κάθε πακέτο να αναμένει αρκετό χρόνο μέχρι να εξυπηρετηθεί. Ο αλγόριθμος HHA-Like μέχρι τις 56 περίπου κλήσεις καταφέρνει να κρατήσει την μέση



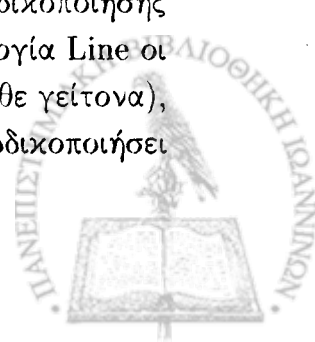
Σχήμα 5.3: Συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της καθυστέρησης των πακέτων

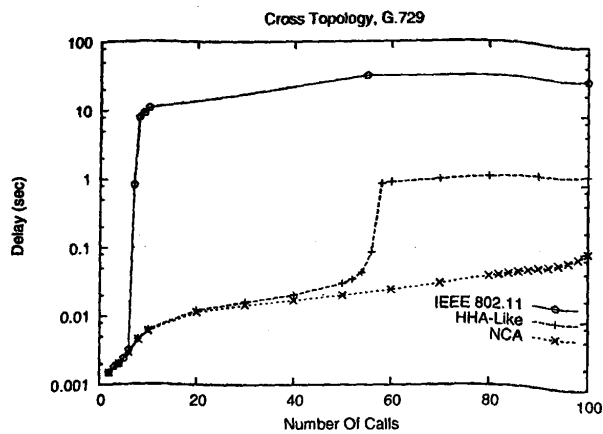
καθυστερήση σε χαμηλά επίπεδα (κάτω από 100 ms), ενώ ο αλγόριθμος NCA διατηρεί την καθυστέρηση στο ίδιο επίπεδο μέχρι τις 100 περίπου κλήσεις. Όσον αφορά το ποσοστό απωλειών πακέτων (σχ. 5.4(b)) το 802.11 πλησιάζει σχεδόν το 100% όταν οι κλήσεις είναι περισσότερες από 7, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο κοιτώντας την μέση καθυστέρηση των πακέτων στο Σχήμα 5.4(a). Οι αλγόριθμοι HHA-Like και NCA διατηρούν το ποσοστό αυτό κάτω από 1% για αριθμό κλήσεων μέχρι 52 και 78 αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος HHA-Like παρουσιάζει μία απότομη αύξηση όταν οι κλήσεις γίνονται περισσότερες από 52-53 ενώ ο αλγόριθμος NCA παρουσιάζει μία πιο ομαλή αύξηση όταν οι κλήσεις είναι περισσότερες από 80. Η τάση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ο αριθμός των πακέτων στο δίκτυο αυξάνεται (όσο αυξάνονται οι κλήσεις) ο αλγόριθμος NCA έχει περισσότερες ευκαιρίες κωδικοποίησης με αποτέλεσμα να καταφέρνει να συνδυάζει περισσότερα πακέτα. Το γεγονός αυτό θα αποδειχθεί παρακάτω από την μέτρηση του κέρδους κωδικοποίησης. Η ποιότητα των κλήσεων, η οποία αποτελεί βάση για την μέτρηση της χωρητικότητας που επιτυγχάνει ένας αλγόριθμος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4(c). Το 802.11 καταφέρνει να διατηρήσει την ποιότητα των κλήσεων πάνω από την τιμή 70 για 6 ταυτόχρονες κλήσεις. Ο αλγόριθμος HHA-Like διατηρεί την ποιότητα των κλήσεων σε ικανοποιητικά επίπεδα μέχρι τις 54 κλήσεις έχοντας μία αύξηση στην χωρητικότητα περίπου 9 φορές σε σχέση με το 802.11, ενώ ο αλγόριθμος NCA αυξάνει ακόμη περισσότερο αυτόν τον αριθμό σε περίπου 87 κλήσεις έχοντας μία αύξηση 14-15 φορές σε σχέση με το 802.11 και ένα προβάδισμα έναντι του HHA-Like της τάξεως του 61% περίπου. Τέλος, στα Σχήματα 5.4(d) και 5.4(e) παρουσιάζονται η διακύμανση της καθυστέρησης και η ρυθμαπόδοση των κλήσεων. Όσον αφορά την διακύμανση της καθυστέρησης στο 802.11 διατηρείται κάτω από 10 ms μέχρι τις 6 κλήσεις ενώ για περισσότερες κλήσεις παρατηρείται μία απότομη αύξηση. Οι αλγόριθμοι HHA-Like και NCA διατηρούν το jitter κάτω από 20 ms μέχρι τις 100 κλήσεις, με τον NCA να είναι πάντοτε καλύτερος από τον HHA-Like. Τέλος, όσον αφορά την ρυθμαπόδοση των κλήσεων, η μέγιστη τιμή της φτάνει μέχρι 16 kbps (όσο είναι το εύρος ζώνης που απαιτείται για μετάδοση μιας αμφίδρομης κλήσης με τον κωδικοποιητή G.729). Στο 802.11 η ρυθμαπόδοση διατηρείται στην μέγιστη τιμή της μέχρι της 6 κλήσεις, ενώ όταν ο αριθμός των

κλήσεων γίνεται 7 τότε παρατηρείται μία σημαντική πτώση. Στον αλγόριθμο HHA-Like τα πρώτα σημάδια μείωσης της ρυθμαπόδοσης φαίνονται στις 56 κλήσεις, σημείο στο οποίο ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει σημαντικό ποσοστό απωλειών πακέτων. Ο αλγόριθμος NCA διατηρεί την ρυθμαπόδοση των κλήσεων στην μέγιστη τιμή μέχρι τις 90 κλήσεις ενώ για περισσότερες από 90 κλήσεις παρουσιάζει σταδιακή μείωση.

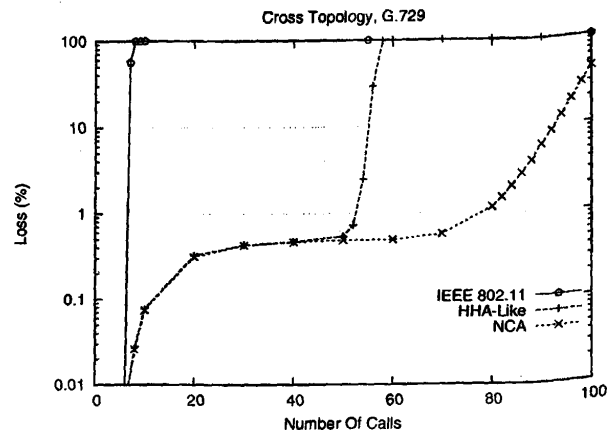
Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τριών αλγορίθμων στην τοπολογία Wheel. Στην τοπολογία αυτή ο ανταγωνισμός για το κοινό μέσο είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την τοπολογία Cross επειδή κατά μέσο όρο κάθε κόμβος έχει περισσότερους γείτονες που μεταδίδουν πακέτα. Για αυτόν τον λόγο η μέση καθυστέρηση στην τοπολογία αυτή είναι μεγαλύτερη αφού κάθε κόμβος ξοδεύει περισσότερο χρόνο μέχρι να αποκτήσει το δικαίωμα εκπομπής στο κανάλι επικοινωνίας. Για παράδειγμα, στον αλγόριθμο HHA-Like για αριθμό κλήσεων 30 η μέση καθυστέρηση των πακέτων στην τοπολογία Cross είναι περίπου 9 ms ενώ στην τοπολογία Wheel είναι περίπου 37 ms. Ο μεγαλύτερος ανταγωνισμός έχει επίσης ως αποτέλεσμα περισσότερες συγκρούσεις που μεταφράζονται σε μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας πακέτων (σχ. 5.5(b)). Ωστόσο, και σε αυτή την τοπολογία φαίνεται ότι ο αλγόριθμος NCA υπερέχει έναντι του HHA-Like. Ο NCA καταφέρνει να εξυπηρετήσει μέχρι και 40 ταυτόχρονες κλήσεις με ικανοποιητική ποιότητα ($RScore > 70$) ενώ ο HHA-Like διατηρεί το συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας μέχρι 29 περίπου κλήσεις. Συγκριτικά με το 802.11 ο NCA έχει μία βελτίωση της τάξεως του 660% περίπου (από 6 σε 40 κλήσεις) ενώ η αντίστοιχη βελτίωση του αλγορίθμου HHA-Like είναι 480% (από 6 σε 29).

Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει το κέρδος κωδικοποίησης του αλγορίθμου NCA σε κάθε μια από τις τρεις τοπολογίες. Υπενθυμίζεται ότι το κέρδος αυτό προέρχεται από την μείωση των μεταδόσεων μέσω της κωδικοποίησης. Σε όλες τις τοπολογίες το κέρδος παρουσιάζει αυξητική τάση όσο αυξάνεται ο αριθμός των κλήσεων. Για μικρό αριθμό κλήσεων το κέρδος βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός φυσιολογικό καθώς με λίγα πακέτα στις ουρές των κόμβων η πιθανότητα συνδυασμού αυτών παραμένει μικρή. Όσο οι ταυτόχρονες κλήσεις αυξάνονται και τα πακέτα πληθαίνουν οι πιθανοί συνδυασμοί των πακέτων αυξάνονται με αποτέλεσμα την άνοδο του κέρδους. Άξιο αναφοράς, επίσης, είναι το γεγονός ότι στην τοπολογία Line το κέρδος κωδικοποίησης αυξάνεται γρηγορότερα (από τις 3 κλήσεις και πάνω) σε σχέση με τις άλλες δύο τοπολογίες που το κέρδος αυξάνεται πιο αργά (από τις 8 κλήσεις και έπειτα). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην συμφόρηση που παρατηρείται στην τοπολογία Line ακόμη και σε μικρό αριθμό κλήσεων δεδομένου ότι όλες οι κλήσεις ομιλίας διέρχονται από το ίδιο μονοπάτι. Για τον λόγο αυτό ο αλγόριθμος NCA έχει την ευκαιρία για εύρεση κωδικοποιήσεων με τα πακέτα που βρίσκονται στις ουρές των κόμβων. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα το κέρδος κωδικοποίησης στην τοπολογία Line φτάνει μόλις το 1.12 ενώ για τις τοπολογίες Cross και Wheel το κέρδος φτάνει μέχρι το 1.55 και 1.61 αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο βάθος κωδικοποίησης που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτές τις τοπολογίες. Για παράδειγμα στην τοπολογία Line οι ενδιαμέσοι κόμβοι μπορούν να κωδικοποιήσουν το πολύ δύο πακέτα (ένα για κάθε γείτονα), ενώ στις τοπολογίες Cross και Wheel κάθε ενδιάμεσος κόμβος μπορεί να κωδικοποιήσει έως τέσσερα και οχτώ πακέτα αντίστοιχα.

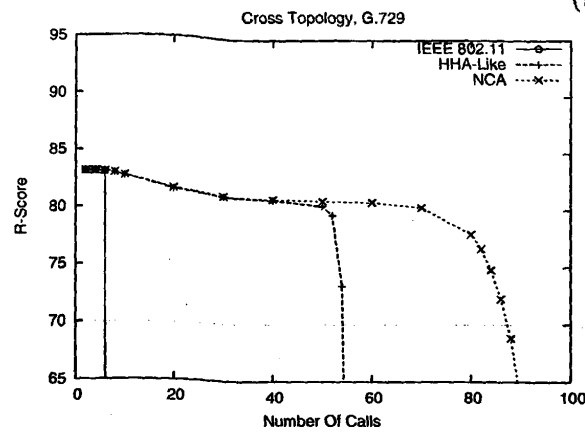




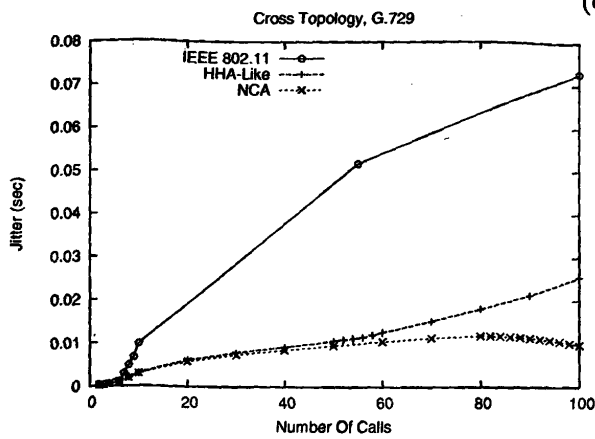
(a)



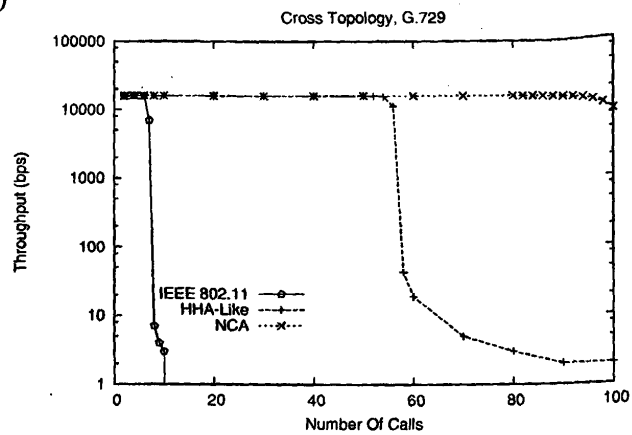
(b)



(c)



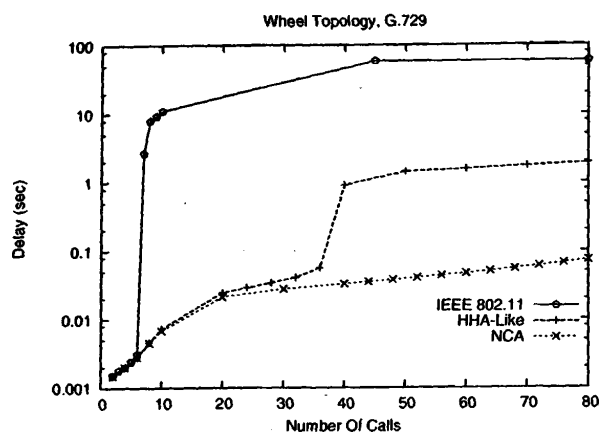
(d)



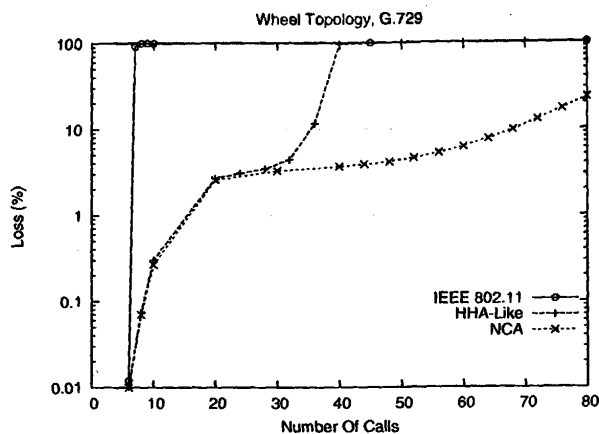
(e)

Σχήμα 5.4: Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score (d) Μέσο Jitter (e) Throughput ανά κλήση

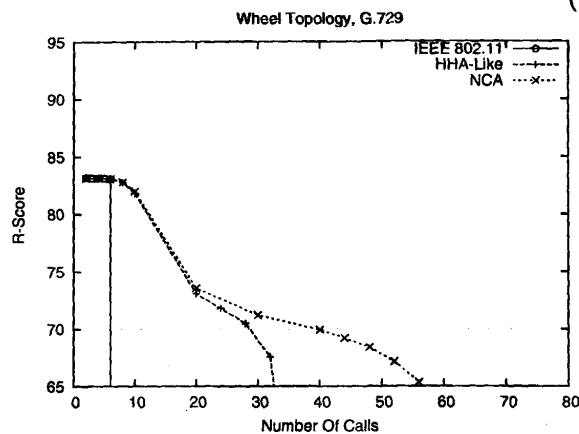




(a)



(b)



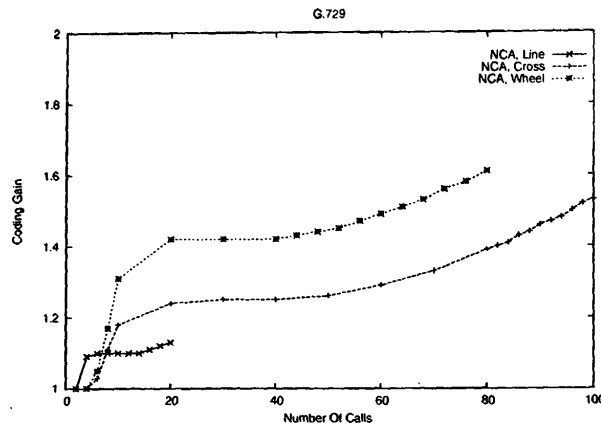
(c)

Σχήμα 5.5: Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

Συμπερασματικά, το συγκεκριμένο πείραμα καταδεικνύει το πρόβλημα που υπάρχει στην μετάδοση φωνής στο 802.11 και την αντιμετώπιση του από τους αλγόριθμους HHA-Like και NCA σε διαφορετικού είδους τοπολογίες. Επίσης, έγινε φανερό ότι ο αλγόριθμος NCA, επιτρέποντας τον συνδυασμό περισσότερων πακέτων με την κωδικοποίηση δικτύου, είναι αποδοτικότερος από τον HHA-Like σε συνθήκες μεγάλου φόρτου καθώς καταφέρνει να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων VoIP.

5.3.2 Μέρος Δεύτερο: Απόδοση Αλγορίθμων για Διαφορετικούς Κωδικοποιητές

Στο δεύτερο μέρος των αποτελεσμάτων γίνεται σύγκριση της απόδοσης των αλγορίθμων HHA-Like και NCA όταν οι κλήσεις VoIP πραγματοποιούνται με καλύτερους σε ποιότητα κωδικοποιητές. Οι κωδικοποιητές που χρησιμοποιούνται στα συγκεκριμένα πειράματα είναι ο G.726 ο οποίος παράγει πακέτα μεγέθους 80 Bytes και ο G.711 που παράγει πακέτα

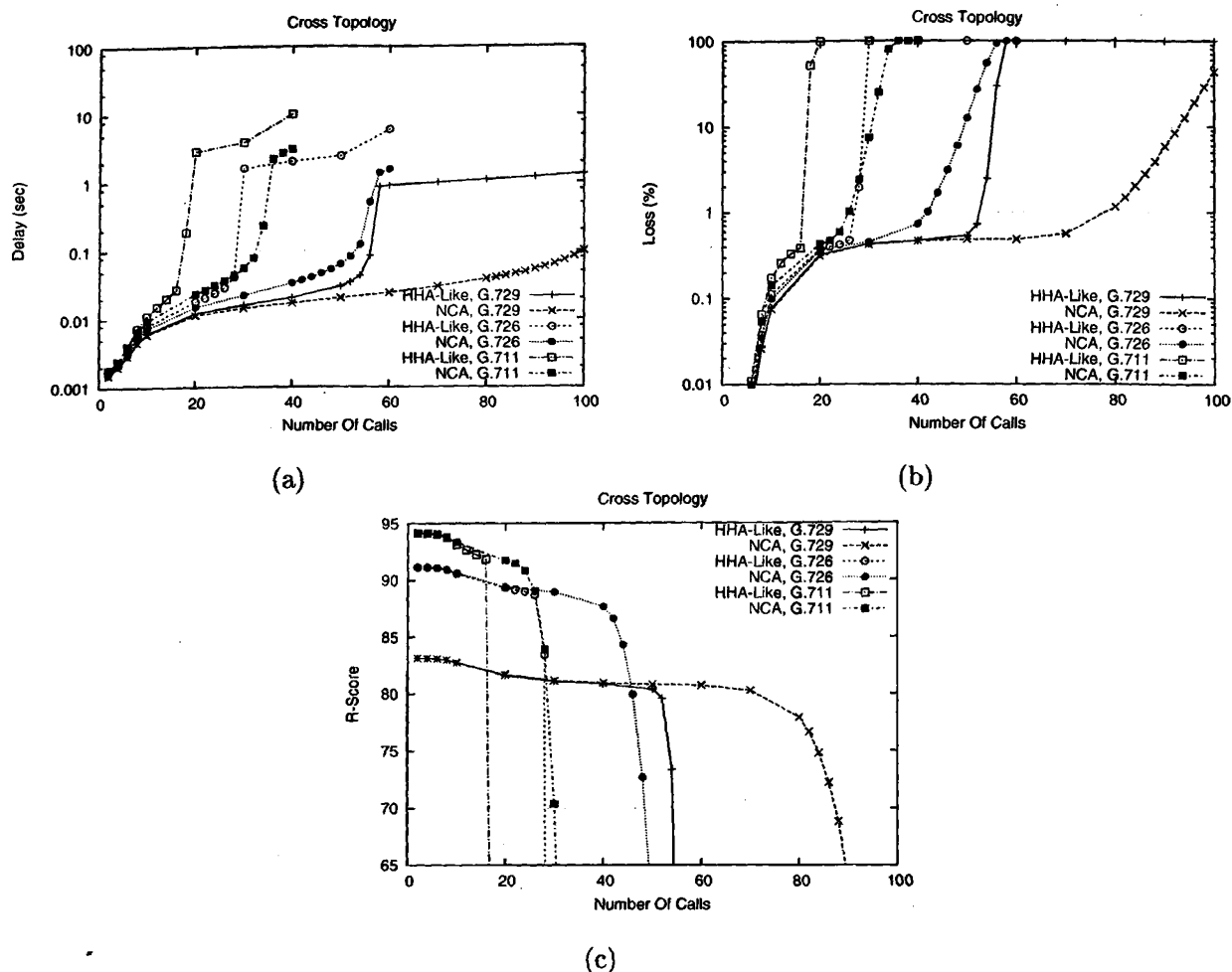


Σχήμα 5.6: Κέρδος κωδικοποίησης του NCA στις τοπολογίες Line, Cross και Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων

μεγέθους 160 Bytes. Όπως στον κωδικοποιητή G.729 έτσι καθένας από τους παραπάνω κωδικοποιητές δημιουργεί ένα πακέτο κάθε 20 milliseconds, έχοντας ως αποτέλεσμα κάθε κλήση ομιλίας να εισάγει στο δίκτυο πακέτα με ρυθμό 100pkts/sec. Τα πειράματα για την αξιολόγηση των παραπάνω αλγορίθμων πραγματοποιούνται στην τοπολογία Cross. Για την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με τον κωδικοποιητή G.729 στα γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και για τους τρεις κωδικοποιητές.

Το Σχήμα 5.7(a) παρουσιάζει την μέση καθυστέρηση των πακέτων για τους αλγόριθμους HHA-Like και NCA για καθένα από τους κωδικοποιητές. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, είτε στον αλγόριθμο HHA-Like είτε στον NCA, όσο αυξάνεται ο αριθμός των κλήσεων η μέση καθυστέρηση των πακέτων μεγαλώνει περισσότερο για τον κωδικοποιητή G.711. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των πακέτων που δημιουργούν οι κωδικοποιητές τόσο μικρότερος είναι ο αριθμός των πακέτων που μπορούν να συνδυάσουν οι δύο αλγόριθμοι. Συνεπώς, με δεδομένο ότι ο ρυθμός των πακέτων που δημιουργούν οι τρεις κωδικοποιητές σε κάθε κλήση είναι ο ίδιος (100 pkts/sec), για ίδιο αριθμό κλήσεων η συμφόρηση που παρατηρείται στο δίκτυο είναι μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής που έχει το μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου, δηλαδή ο G.711. Για παράδειγμα, για 30 κλήσεις η μικρότερη μέση καθυστέρηση παρατηρείται για τον κωδικοποιητή G.729 (ο οποίος έχει μέγεθος πακέτου 20 Byte) και η μεγαλύτερη καθυστέρηση για τον κωδικοποιητή G.711 είτε χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος HHA-Like είτε ο NCA. Τέλος, στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι ο NCA έχει μικρότερη μέση καθυστέρηση από τον HHA-Like για όλους τους κωδικοποιητές. Το γεγονός αυτό οφείλεται, όπως ειπώθηκε παραπάνω, στη δυνατότητα του NCA να συνδυάζει περισσότερα πακέτα από τον HHA-Like λόγω της κωδικοποίησης δικτύου.

Όσον αφορά το ποσοστό απώλειας πακέτων (σχ. 5.7(b)), αυτό είναι μικρότερο στον αλγόριθμο NCA για οποιοδήποτε κωδικοποιητή. Λόγω της μικρότερης καθυστέρησης το ποσοστό των πακέτων που η καθυστέρηση τους είναι μεγαλύτερη από το Delay_Threshold (Delay Loss) είναι μικρότερο στον αλγόριθμο NCA έναντι του αλγορίθμου HHA-Like. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος HHA-Like ξεπερνάει το ποσοστό 1% στις 16 (G.711), 27 (G.726) και



Σχήμα 5.7: Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

53 (G.729) κλήσεις ενώ ο αλγόριθμος NCA ξεπερνάει το ίδιο ποσοστό στις 25, 42 και 80 κλήσεις αντίστοιχα.

Τέλος, σχετικά με την ποιότητα των κλήσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7(c) είναι φανερό ότι η ποιότητα των κλήσεων είναι μεγαλύτερη για τον κωδικοποιητή G.711 και ξεκινάει από μέγιστη τιμή περίπου 94. Στον κωδικοποιητή G.726 η μέγιστη ποιότητα φτάνει περίπου την τιμή 91 ενώ για στον κωδικοποιητή G.729 η ποιότητα φτάνει μέχρι την τιμή 83. Ο αριθμός ταυτόχρονων κλήσεων που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος HHA-Like θέτοντας ως κατώτερο όριο ποιότητας την τιμή 70 είναι 54, 28 και 16 για τους κωδικοποιητές G.729, G.726 και G.711 αντίστοιχα. Για το ίδιο όριο ποιότητας ο αλγόριθμος NCA καταφέρνει να υποστηρίξει 87, 49 και 30 ταυτόχρονες κλήσεις με τον κωδικοποιητή G.729, G.726 και G.711 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές μεταφράζονται σε ένα προβάδισμα του NCA της τάξεως του 61%, 75% και 87.5% για τους κωδικοποιητές G.729, G.726 και G.711 αντίστοιχα.

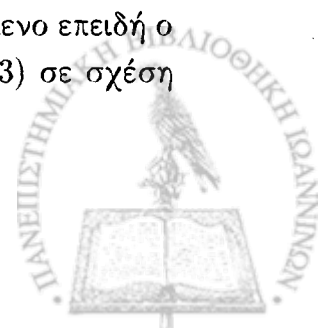


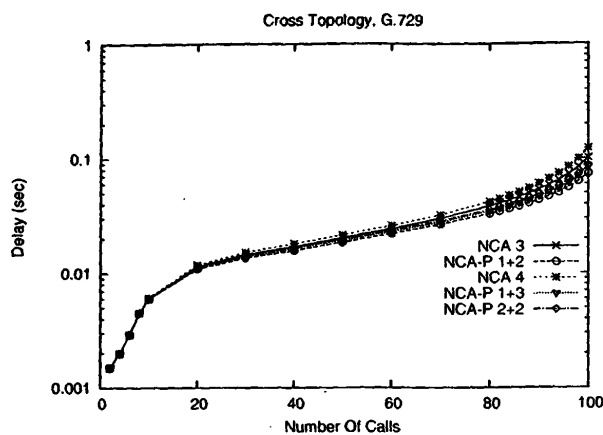
Το συμπέρασμα που προκύπτει από την συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων είναι ότι ο αλγόριθμος NCA αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τον HHA-Like όταν χρησιμοποιούνται καλύτεροι σε ποιότητα κωδικοποιητές. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των πακέτων που δημιουργούν οι κωδικοποιητές τόσο πιο σημαντική είναι η μείωση του μεγέθους των πακέτων από τη χρήση κωδικοποίησης. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα συνάθροισης περισσότερων πακέτων στον αλγόριθμο NCA. Για τον λόγο αυτό ο αλγόριθμος NCA δείχνει να αυξάνει το προβάδισμα του έναντι του HHA-Like όσο μεγαλώνει το μέγεθος των πακέτων που δημιουργούν οι κωδικοποιητές.

5.3.3 Μέρος Τρίτο: Απόδοση των Αλγορίθμων NCA και NCA-P για Διαφορετικές Τιμές του `retry_limit`

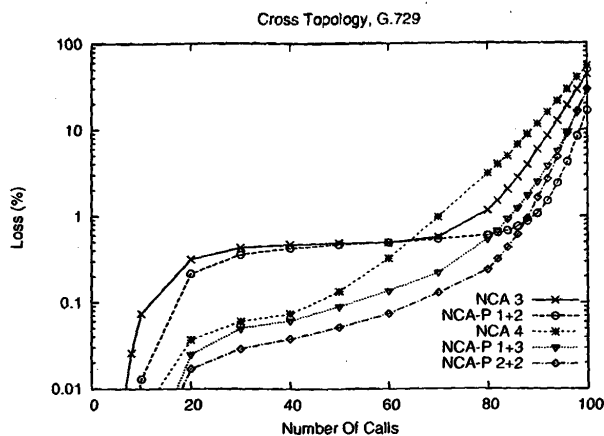
Στην υποενότητα αυτή αξιολογείται η απόδοση του αλγορίθμου NCA-P σε σύγκριση με τον αλγόριθμο NCA. Υπενθυμίζεται ότι ο αλγόριθμος NCA-P είναι μία επέκταση του NCA και στοχεύει στην αποδοτικότερη αξιοποίηση του υποεπιπέδου MAC. Ο αλγόριθμος αυτός ακολουθεί μία προοδευτική τεχνική για την αναμετάδοση των πακέτων χωρίζοντας τον αριθμό αναμεταδόσεων σε δύο ξεχωριστές προσπάθειες. Για παράδειγμα ο αλγόριθμος NCA-P 1+2 χρησιμοποιεί κατά την πρώτη μετάδοση ενός πακέτου την τιμή `retry_limit=1` ενώ αν το πακέτο αποτύχει να μεταδοθεί σωστά τότε ο αλγόριθμος το αναμεταδίδει με `retry_limit=2`. Ο αλγόριθμος NCA-P αποβλέπει στην μείωση της καθυστέρησης αναμετάδοσης των πακέτων φωνής. Στην συνέχεια, γίνεται σύγκριση της απόδοσης του αλγορίθμου NCA-P 1+2 με τον NCA 3 (`retry_limit=3`) και των αλγορίθμων NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 με τον αλγόριθμο NCA 4 (`retry_limit=4`).

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η αξιολόγηση των παραπάνω αλγορίθμων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8(a) η μέση καθυστέρηση του αλγορίθμου NCA-P σε σχέση με τον αντίστοιχο NCA είναι μικρότερη. Πιο αναλυτικά, ο αλγόριθμος NCA-P 1+2 έχει μικρότερη καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων από τον αλγόριθμο NCA 3. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος NCA-P μειώνει τον μέσο χρόνο `backoff` που χρειάζεται ένας κόμβος για να μεταδώσει ένα πακέτο. Για μικρό αριθμό κλήσεων (κάτω από 20) οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν περίπου την ίδια καθυστέρηση. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όσο λιγότερα πακέτα μεταδίδονται στο δίκτυο, οι συγκρούσεις και η απώλεια των πακέτων ελαχιστοποιούνται, με αποτέλεσμα οι αναμεταδόσεις των πακέτων να είναι σπάνιες. Η σύγκριση των αλγορίθμων NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 με τον αλγόριθμο NCA 4 μας δίνει ένα ανάλογο αποτέλεσμα. Οι αλγόριθμοι NCA-P 1+3 και NCA 2+2 έχουν μικρότερη καθυστέρηση από τον NCA 4 όσο οι κλήσεις αυξάνονται. Τέλος, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος NCA-P 1+2 έχει την μικρότερη μέση καθυστέρηση από όλους τους υπόλοιπους αλγόριθμους του σχήματος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο επειδή ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί συνολικά μικρότερο αριθμό αναμεταδόσεων (3) σε σχέση με τους υπόλοιπους που χρησιμοποιούν μεγαλύτερο, εκτός του NCA 3.

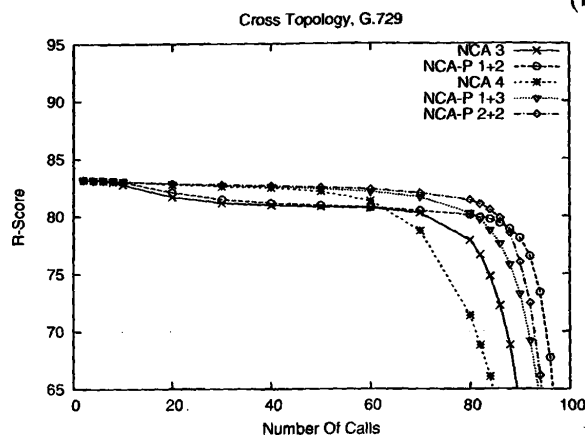




(a)



(b)



(c)

Σχήμα 5.8: Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA 4, NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

Όσον αφορά το ποσοστό απωλειών πακέτων (σχ. 5.8(b)) ο αλγόριθμος NCA-P παρουσιάζει σε όλες τις περιπτώσεις λιγότερες απώλειες πακέτων σε σχέση με τον αλγόριθμο NCA. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο NCA-P βελτιώνει την καθυστέρηση των πακέτων με αποτέλεσμα το ποσοστό των χαμένων πακέτων λόγω καθυστέρησης (delay loss) να είναι μικρότερο. Όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, οι αλγόριθμοι NCA 3 και NCA-P 1+2 παρουσιάζουν περίπου το ίδιο ποσοστό απωλειών για αριθμό κλήσεων από 50 ως 70 παρά την μικρότερη καθυστέρηση που παρουσιάζει στο ίδιο εύρος κλήσεων ο αλγόριθμος NCA-P 1+2. Αυτό συμβαίνει γιατί το ποσοστό απωλειών πακέτων λόγω καθυστέρησης που κερδίζει ο αλγόριθμος NCA-P 1+2 εξισορροπείται από τις απώλειες πακέτων λόγω συγκρούσεων δεδομένου του μικρότερου χρόνου backoff. Ωστόσο, όσο ο αριθμός κλήσεων μεγαλώνει το delay loss του αλγόριθμου NCA 3 αυξάνεται σημαντικά γεγονός το οποίο δίνει προβάδισμα στον αλγόριθμο NCA-P 1+2. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε και στους αλγόριθμους NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 σε σχέση με τον NCA 4. Οι NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 κρατούν διαρκώς τις απώλειες πακέτων σε χαμηλότερο ποσοστό σε

σχέση με τον NCA 4. Ειδικότερα, από τις 60 κλήσεις και πάνω οι δύο αλγόριθμοι αποκτούν σημαντικό προβάδισμα. Στο σημείο αυτό οι απώλειες του NCA 4 αυξάνονται σημαντικά λόγω της μεγάλης καθυστέρησης.

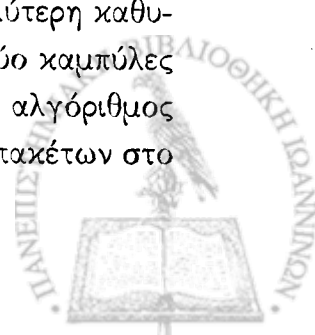
Τέλος, στο Σχήμα 5.8(c) φαίνεται η ποιότητα των κλήσεων που επιτυγχάνουν οι παραπάνω αλγόριθμοι σε συνάρτηση με τον αριθμό των ταυτόχρονων κλήσεων στο δίκτυο. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σχήμα, εκτός από την καλύτερη ποιότητα που παρουσιάζει ο αλγόριθμος NCA-P σε σχέση με τον αντίστοιχο NCA, ο αλγόριθμος αυτός καταφέρνει να αυξήσει την χωρητικότητα όσον αφορά τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων. Έτσι, έχοντας ως ελάχιστο όριο την ποιότητα με $RScore = 70$, ο αλγόριθμος NCA-P 1+2 καταφέρνει να υποστηρίξει 8 κλήσεις παραπάνω σε σχέση με τον αλγόριθμο NCA 3 (από 87 σε 95 κλήσεις), βελτιώνοντας την χωρητικότητα κατά 9.2% περίπου. Λίγο μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 σε σχέση με τον αλγόριθμο NCA 4. Συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι αυτοί πετυχαίνουν αύξηση περίπου 12.3% (από 81 σε 91 κλήσεις) και 14.8% (από 81 σε 93 κλήσεις) αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν την υπεροχή του αλγορίθμου NCA-P έναντι του αλγορίθμου NCA. Ο αλγόριθμος NCA-P έχει μικρότερη καθυστέρηση στην μετάδοση των πακέτων έναντι του NCA όσο οι κλήσεις φωνής αυξάνονται, γεγονός που έχει σημαντική επίπτωση στην μείωση του delay loss. Έτσι, ο NCA-P καταφέρνει να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό κλήσεων με ικανοποιητική ποιότητα φωνής. Ωστόσο, με την μείωση του μέσου χρόνου backoff ο αλγόριθμος NCA-P αυξάνει τον αριθμό των συγκρούσεων με αποτέλεσμα την αύξηση στο ποσοστό των χαμένων πακέτων.

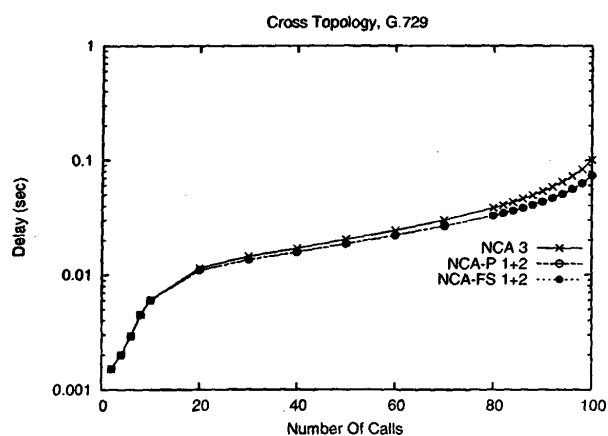
5.3.4 Μέρος Τέταρτο: Απόδοση των Αλγορίθμων NCA, NCA-P και NCA-FS

Στο τελευταίο μέρος των πειραμάτων γίνεται αξιολόγηση των αλγορίθμων NCA, NCA-P και NCA-FS. Υπενθυμίζεται ότι ο αλγόριθμος NCA-FS είναι μία επέκταση του αλγορίθμου NCA-P που έχει ως στόχο την αναμετάδοση των πακέτων φωνής που έχουν χαθεί σε προηγούμενες προσπάθειες. Η αναμετάδοση αυτή γίνεται χωρίς την ανάγκη νέων μεταδόσεων δεδομένου ότι τα χαμένα πακέτα εισάγονται (όταν είναι εφικτό) σε κάποιο πακέτο που η μετάδοσή του ήταν ήδη προγραμματισμένη. Η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στην τοπολογία Cross χρησιμοποιώντας τον κωδικοποιητή G.729 για όλους τους αλγορίθμους.

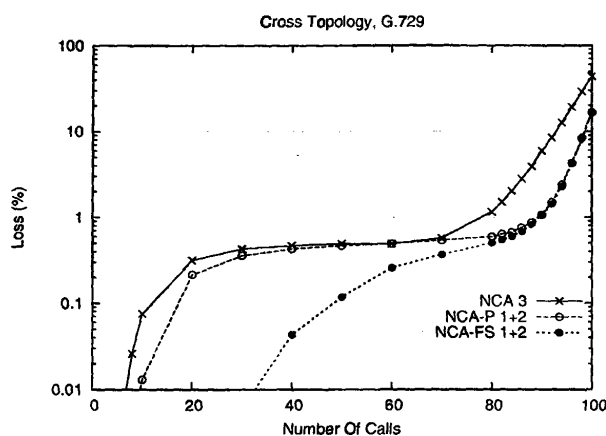
Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Στο Σχήμα 5.9(a) φαίνεται η μέση καθυστέρηση των πακέτων για τους τρεις αλγόριθμους. Την μεγαλύτερη καθυστέρηση την παρουσιάζει ο αλγόριθμος NCA. Όπως φαίνεται στο σχήμα οι δύο καμπύλες των αλγορίθμων NCA-P και NCA-FS σχεδόν ταυτίζονται. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος NCA-FS αναμεταδίδει πακέτα τα οποία έχουν χαθεί, η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο



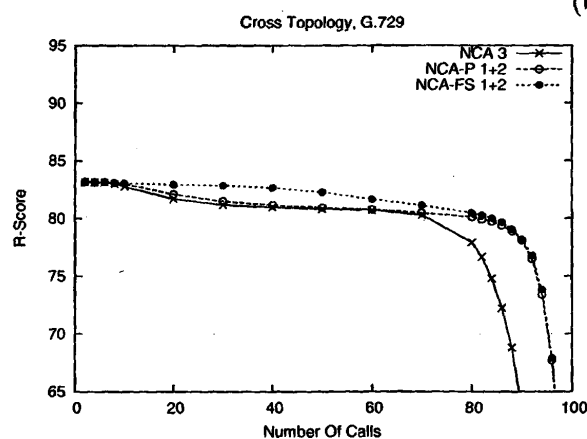
δίκτυο θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από αυτή του αλγορίθμου NCA-P. Στην πραγματικότητα υπάρχει μία μικρή αύξηση στην καθυστέρηση η οποία δεν είναι εμφανής στο Σχήμα 5.9(a). Ο λόγος για τον οποίο η αύξηση αυτή είναι μικρή οφείλεται στο γεγονός ότι το ποσοστό των πακέτων που “σώζονται” λόγω των αναμεταδόσεων στον αλγόριθμο NCA-FS είναι σχετικά μικρό όπως φαίνεται στο Σχήμα (σχ. 5.9(b)). Για παράδειγμα η διαφορά στο ποσοστό των χαμένων πακέτων των αλγορίθμων NCA-FS και NCA-P για 40 κλήσεις είναι 0.4%, για 50 κλήσεις είναι 0.3% και για 60 κλήσεις είναι 0.25%. Έτσι η επίπτωση που έχει το ποσοστό αυτό στον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης του αλγορίθμου NCA-FS είναι πολύ μικρή.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 5.9: Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA-FS 1+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9(b), η διαφορά στο ποσοστό απωλειών πακέτων ανάμεσα στους αλγόριθμους NCA-FS και NCA-P μειώνεται όσο αυξάνονται οι κλήσεις φωνής στο δίκτυο. Ειδικότερα για περισσότερες από 90 κλήσεις η διαφορά αυτή τείνει να γίνει μηδενική. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των

περιπτώσεων που ενεργοποιείται ο NCA-FS το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων προσεγγίζει την μέγιστη μονάδα μεταφοράς (MTU) καθώς ο φόρτος στο δίκτυο είναι υψηλός. Για τον λόγο αυτό, κατά την αποστολή των πακέτων συνήθως δεν υπάρχει ελεύθερος χώρος για ενσωμάτωση χαμένων πακέτων στον αλγόριθμο NCA-FS με αποτέλεσμα οι ευκαιρίες για αναμετάδοση αυτών να είναι λιγιστές. Αντίθετα, για λιγότερες από 90 κλήσεις όπου στα πακέτα που μεταδίδονται υπάρχει ελεύθερος χώρος για ενσωμάτωση πακέτων που έχουν χαθεί, ο αλγόριθμος NCA-FS είναι καλύτερος. Τα πρώτα σημάδια απώλειας πακέτων στον NCA-FS φαίνονται στις 40 περίπου κλήσεις ενώ για τους αλγόριθμους NCA και NCA-P στις 10 περίπου κλήσεις.

Παρά τη φαινομενικά μικρή διαφορά στο ποσοστό απωλειών πακέτων μεταξύ των αλγορίθμων NCA-FS και NCA-P, η αύξηση της ποιότητας που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος NCA-FS είναι εμφανής στο Σχήμα 5.9(c). Ο αλγόριθμος NCA-P μαζί με τον αλγόριθμο NCA δείχνουν τα πρώτα σημάδια μείωσης στην ποιότητα των κλήσεων όταν αυτές ξεπερνούν τις 10. Αυτό συμβαίνει γιατί στο σημείο αυτό και οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν σημαντική αύξηση απωλειών πακέτων. Αντίθετα, ο αλγόριθμος NCA-FS διατηρεί την ποιότητα των κλήσεων σχεδόν στο μέγιστο επίπεδο μέχρι τις 40 κλήσεις, έχοντας πάντα ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι των υπολοίπων αλγορίθμων μέχρι και τις 80 κλήσεις. Από το σημείο αυτό και έπειτα ο αλγόριθμος NCA-FS παρουσιάζει την ίδια πτωτική τάση στην ποιότητα των κλήσεων με τον αλγόριθμο NCA-P.

Ως συμπέρασμα από την τελευταία σειρά πειραμάτων μπορούμε να πούμε ότι ο αλγόριθμος NCA-FS με την μείωση στον αριθμό των χαμένων πακέτων επιτυγχάνει καλύτερη ποιότητα συνομιλίας σε σχέση με τους αλγόριθμους NCA και NCA-P όταν ο φόρτος δικτύου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Ωστόσο, όταν οι κλήσεις φωνής αυξάνονται και ο φόρτος του δικτύου μεγαλώνει ο αλγόριθμος NCA-FS έχοντας λιγότερες ευκαιρίες αναμετάδοσης δεν καταφέρνει να μειώσει σημαντικά το ποσοστό των χαμένων πακέτων. Για τον λόγο αυτό σε μεγάλο φόρτο δικτύου παρουσιάζει περίπου την ίδια απόδοση με τον αλγόριθμο NCA-P. Ωστόσο η απόδοση και των δύο αυτών αλγορίθμων είναι σημαντικά καλύτερη από αυτή του αλγορίθμου NCA.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια, με την εξάπλωση του Διαδικτύου, η τεχνολογία VoIP τυγχάνει μεγάλης απήχησης για την πραγματοποίηση κλήσεων ομιλίας και την μετάδοση της φωνής. Εκτός από τα ενσύρματα δίκτυα, σημαντικό κομμάτι στην μετάδοση VoIP έχουν και τα ασύρματα δίκτυα τα οποία αναπτύσσονται με ραγδαίους ρυθμούς. Είτε στα δίκτυα κορμού είτε μέχρι τον τελικό χρήστη (last mile) τα ασύρματα δίκτυα συμβάλλουν στην μεταφορά VoIP με σκοπό να παρέχουν ευελιξία και χαμηλό κόστος στους παρόχους και τους τελικούς χρήστες. Στη διατριβή αυτή ασχοληθήκαμε με το πρόβλημα που προκύπτει όταν μεταδίδονται πακέτα VoIP σε ασύρματα ad-hoc δίκτυα πολλών αλμάτων. Το χαρακτηριστικό μιας κλήσης VoIP είναι ότι η φωνή μεταδίδεται σε πολλά μικρά πακέτα τα οποία εισάγονται στο δίκτυο. Όταν οι κλήσεις αυξάνονται και τα πακέτα πληθαίνουν παρατηρείται συμφόρηση στους κόμβους ενός τέτοιου δικτύου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί καθυστέρηση και απώλειες πακέτων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ποιότητα των κλήσεων ομιλίας να υποβαθμίζεται σημαντικά. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται κυρίως στον μηχανισμό ανταγωνισμού για την πρόσβαση στο κοινό μέσο μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου που επιθυμούν να μεταδώσουν. Με τον μηχανισμό αυτό οι κόμβοι σπαταλούν περισσότερο χρόνο μέχρι να αποφασίσουν ποιος θα μεταδώσει παρά για την πραγματική μετάδοση των δεδομένων φωνής. Μία σημαντική κατηγορία τεχνικών που έχουν προταθεί για τη βελτίωση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι οι τεχνικές συνάθροισης των πακέτων. Οι τεχνικές αυτές έχουν ως στόχο τη μείωση του αριθμού των πακέτων που εκπέμπονται με την συνάθροιση πολλαπλών πακέτων σε ένα. Αν και βελτιώνουν σημαντικά την μετάδοση VoIP σε ένα ασύρματο δίκτυο, ωστόσο οι τεχνικές αυτές έχουν περιορισμένη απόδοση λόγω της σημαντικής αύξησης που παρουσιάζουν στο μέγεθος των πακέτων που δημιουργούν.

Η βασική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής είναι ότι η περαιτέρω βελτίωση των αλγορίθμων μετάδοσης VoIP μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση τεχνικών που προέρχονται από την Θεωρία της Πληροφορίας. Μια τέτοια τεχνική είναι η κωδικοποίηση δικτύου που προδιαγράφει ότι δύο ή περισσότερα πακέτα μπορούν να κωδικοποιηθούν, να μεταδοθούν μέσα από ένα δίκτυο και να αποκωδικοποιηθούν στον παραλήπτη



με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση πόρων. Στην παρούσα διατριβή προτάθηκαν τρεις αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την κωδικοποίηση δικτύου για τη βελτίωση του προβλήματος μετάδοσης της φωνής. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ο NCA, NCA-P και NCA-FS.

Ο αλγόριθμος NCA που αποτελεί τη βασική πρόταση της διατριβής αυτής χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση δικτύου για τη μείωση των μεταδόσεων με την κωδικοποίηση πολλαπλών πακέτων. Επιπλέον, ο NCA χρησιμοποιεί την τεχνική συνάθροιση πακέτων σε συνδυασμό με την κωδικοποίηση ώστε να καταφέρει να αυξήσει το κέρδος από τον συνδυασμό πολλών πακέτων σε περιπτώσεις που η εύρεση κωδικοποιήσεων περιορίζεται λόγω συγκεκριμένων συνθηκών του δικτύου. Μέσω πειραματικών μετρήσεων αποδείχθηκε ότι ο αλγόριθμος NCA έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον αλγόριθμο HHA, που είναι ο αποδοτικότερος αλγόριθμος συνάθροισης πακέτων για τα υπό μελέτη δίκτυα. Ο NCA καταφέρνει να υποστηρίξει περισσότερες ταυτόχρονες κλήσεις VoIP με ικανοποιητικά επίπεδα ποιότητας συνομιλίας. Επιπρόσθετα, αποδείχθηκε ότι ο αλγόριθμος NCA μπορεί να υποστηρίξει καλύτερα κλήσεις VoIP οι οποίες πραγματοποιούνται με καλύτερης ποιότητας κωδικοποιητές, οι οποίοι χρησιμοποιούν μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου.

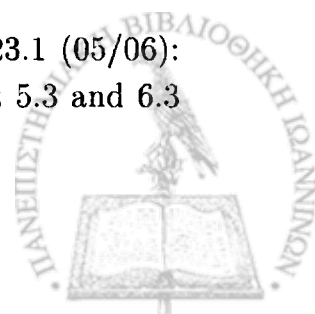
Η δεύτερη συνεισφορά της διατριβής είναι ο αλγόριθμος NCA-P. Ο αλγόριθμος αυτός επεκτείνει την λειτουργία του βασικού αλγορίθμου NCA έχοντας ως στόχο τη μείωση της καθυστέρησης που παρατηρείται κατά την αναμετάδοση των πακέτων φωνής. Ο NCA-P στοχεύει στην αποδοτικότερη αξιοποίηση του επιπέδου MAC και για τον σκοπό αυτό προτείνει ένα διαφορετικό τρόπο αναμετάδοσης των πακέτων. Αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση στην μέση καθυστέρηση μετάδοσης. Μέσω πειραματικών μετρήσεων αποδείχθηκε ότι έκτος από τη μείωση της καθυστέρησης ο αλγόριθμος NCA-P καταφέρνει να αυξήσει την χωρητικότητα του δικτύου υποστηρίζοντας περισσότερες ταυτόχρονες κλήσεις από τον αλγόριθμο NCA.

Τέλος, την τρίτη συμβολή της διατριβής αποτέλεσε μία επέκταση του NCA-P, ο αλγόριθμος NCA-FS. Ο αλγόριθμος αυτός πραγματοποιεί αναμετάδοση των χαμένων πακέτων χωρίς ωστόσο να προκαλείται επιβάρυνση στο δίκτυο με την δημιουργία νέων μεταδόσεων. Ο NCA-FS ενσωματώνει πακέτα τα οποία δεν μεταδόθηκαν επιτυχώς σε νέα πακέτα των οποίων η μετάδοσή τους έχει προγραμματιστεί και αν το μέγεθος τους το επιτρέπει. Τα πειραματικά αποτελέσματα για τον αλγόριθμο αυτό δείχνουν ότι μειώνει σημαντικά το ποσοστό των πακέτων που χάνονται από συγκρούσεις χωρίς να προκαλεί σημαντική αύξηση στην μέση καθυστέρηση των πακέτων. Επίσης, παρά το γεγονός ότι ο NCA-FS δεν αυξάνει την χωρητικότητα ενός δικτύου όσον αφορά τις ταυτόχρονες κλήσεις VoIP, ωστόσο βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα των κλήσεων αυτών.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wireless lan medium access control MAC and physical layer PHY specifications, 1997.
- [2] R.Ahlswede, N.Cai, S-Y.R.Li and R.W.Yeung, Network Information Flow, *IEEE Transaction on Information Theory*, 2000.
- [3] R.Baldwin, N.Davis IV, S.Midkiff and R.Raines, Packetized voice transmission using RT-MAC, a wireless real-time medium access control protocol, *Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 5, NO 3, Pages 11-25, July 2001.
- [4] R.G. Cole and J.H. Rosenbluth, Voice over IP performance monitoring, *ACM Computer Communication Review*, vol. 31, April 2001.
- [5] C. Fragouli, J-Y Le Boudec and J. Widmer, Network Coding: An Instant Primer, *ACM SIGCOMM 2006, Pisa, Italy*, Sept. 2006.
- [6] S. Garg and M. Kappes, Can I add a VoIP Call?, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Vol. 2, pages 779-783, Anchorage Alaska, USA, May 2003.
- [7] Hardy, W.C., VoIP service quality: measuring and evaluating packet-switched voice 2003, New York: McGraw-Hill, ISBN: 0071410767.
- [8] D.Hole and F.Tobagi, Capacity of an IEEE 802.11b WLAN supporting VoIP, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2004.
- [9] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation G.107 (05/00) The E-model. a computational model for use in transmission planning, May 2000.
- [10] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation G.114 (05/03): One-way transmission time, May 2003.
- [11] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation G.711 (11/88): Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies, Nov. 1988.
- [12] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation G.723.1 (05/06): Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s, May. 2006.



- [13] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation G.726 (12/90): 40, 32, 24, 16 kbit/s Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM), Dec. 1990.
- [14] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation G.729 (01/07): Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP), Jan. 2007.
- [15] ITU-T Recommendation P.800. Methods for Subjective Determination of Transmission Quality, August 1996
- [16] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation P.861, Methods for objective and subjective assessment of quality, 1996.
- [17] International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation P.862, Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs, February 2001.
- [18] S. Katti et al., XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding, *ACM SIGCOMM 2006*, Pisa, Italy, Sept. 2006.
- [19] K. Lee, S. Yun, I. Kang and H. Kim, Hop-by-Hop Frame Aggregation for VoIP on Multi-Hop Wireless Networks, *IEEE International Conference on Communications*, pages 2454-2459, Beijing, China, May 2008.
- [20] William C. Lee, *Mobile communications engineering*, McGraw-Hill, 1982.
- [21] The Network Simulator ns2(v2.33), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, Oct. 2001.
- [22] K.Medepalli, P.Gopalakrishnan, D.Famolari and T.Kodama, Voice Capacity of IEEE 802.11b, 802.11a and 802.11g Wireless LANs, *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)* , Vol. 3, pages 1549-1553, Nov.-Dec. 2004.
- [23] P.C Ng, S.C. Liew and W. Wang, Voice over Wireless LAN via Wireless Distribution System, *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*, Los Angeles, USA, Sept 2004.
- [24] D. Niculescu, S. Ganguly, K. Kim and R. Izmailov, Performance of VoIP in a 802.11 Wireless Mesh Network, *IEEE INFOCOM 2006*, Barcelona, Spain, April 2006.
- [25] C. Perkins, O. Hodson and V. Hardman, A Survey of Packet Loss Recovery Techniques for Streaming Audio, *IEEE Network*, Vol. 12, No. 5, pages 40-48 Sep.-Oct. 1998.
- [26] F.De Rango, M.Tropea, P.Fazio and S.Marano, Overview on VoIP: Subjective and Objective Measurement Methods, *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, Vol.6 No1B, Jan. 2006.



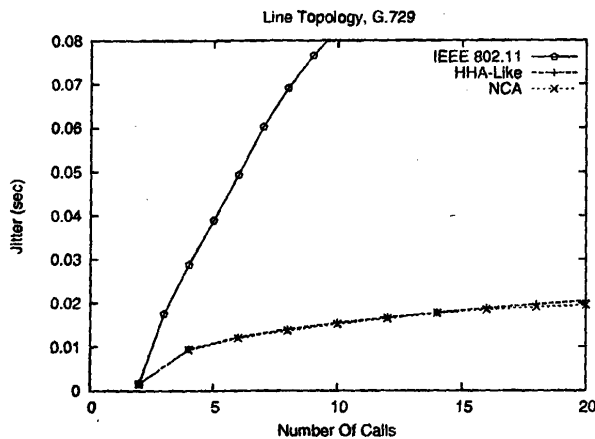
- [27] H.Schulzerinne, S.Casner, R.Frederick and V.Jacobson, RTP: A transport protocol for real-time applications, RFC1889.
- [28] K. Varadham and K. Fall, The ns manual. VINT project, Univ. California, Berkeley, CA, 2001.
- [29] W.Wang and S.C.Liew, Solutions to Performance Problems in VoIP over 802.11 Wireless LAN, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 54, Issue 1, Pages 366-384, Jan. 2005.
- [30] Martin Wenig Arne Schmitz, The effect of the radio wave propagation model in mobile.
- [31] L. Yang, Z. Chao, L. Jianhua, L. Xiaokang, A MAC Queue Aggregation Scheme for VoIP Transmission in WLAN, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Hong Kong, China, March 2007.
- [32] S. Yun, H. Kim and I. Kang, Squeezing 100+ VoIP Calls out of 802.11b WLANs, *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WiWMoM'06)*, Niagara-Falls/Buffalo, NY, USA, June 2006.
- [33] S. Yun, H. Kim, H. Lee and I. Kang, 100+ VoIP Calls on 802.11b: The Power of Combining Voice Frame Aggregation and Uplink-Downlink Bandwidth Control in Wireless LANs, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, Vol. 25, Issue. 4, pages 689-698, May 2007.



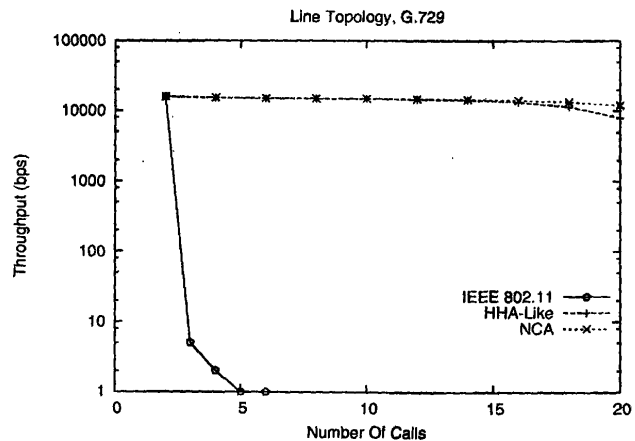
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα της αναφοράς παρουσιάζονται οι συμπληρωματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται οργανωμένα με τον ίδιο τρόπο όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.3.

Μέρος Πρώτο



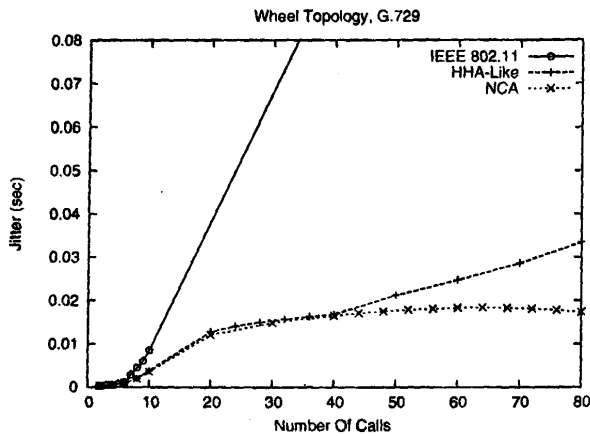
(a)



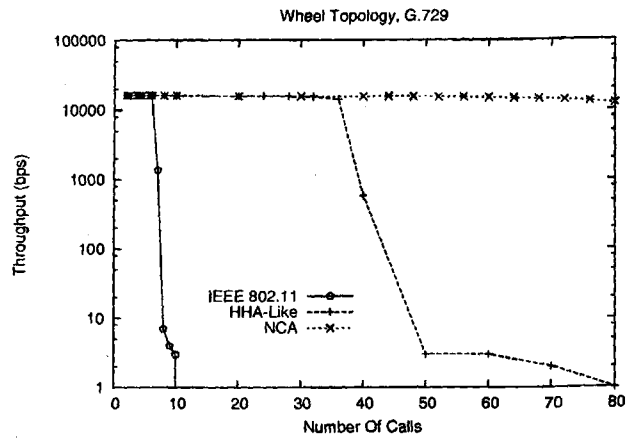
(b)

Σχήμα 6.1: Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Line σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέσο Jitter (b) Throughput ανά κλήση





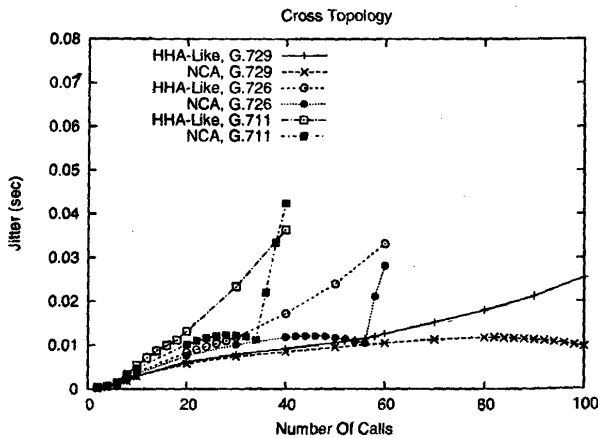
(a)



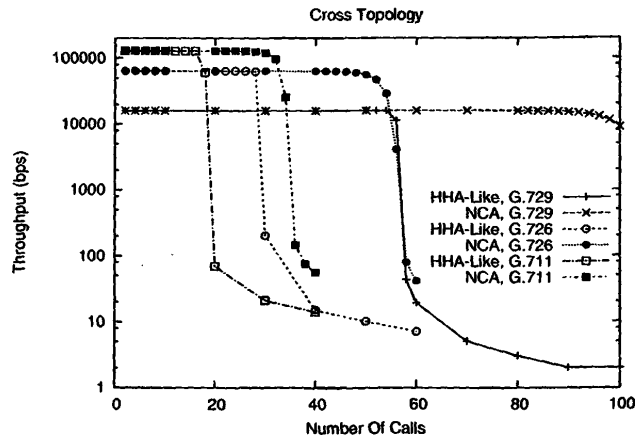
(b)

Σχήμα 6.2: Απόδοση των αλγορίθμων IEEE 802.11, HHA-Like και NCA στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέσο Jitter (b) Throughput ανά κλήση

Μέρος Δεύτερο



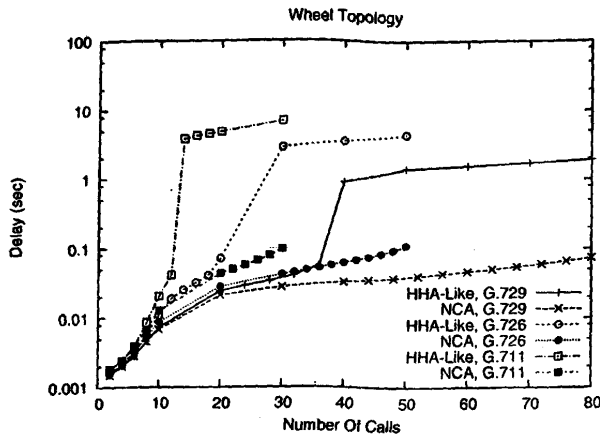
(a)



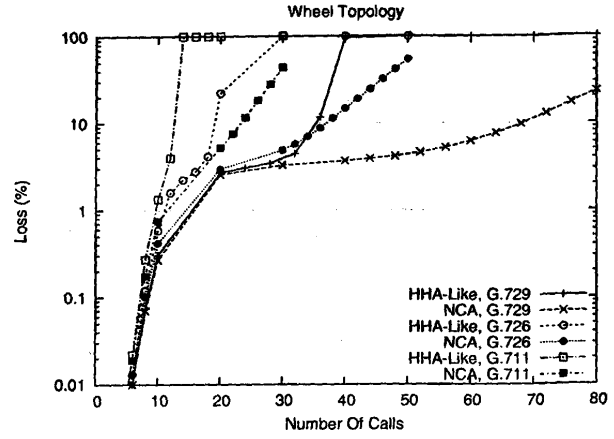
(b)

Σχήμα 6.3: Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέσο Jitter (b) Throughput ανά κλήση

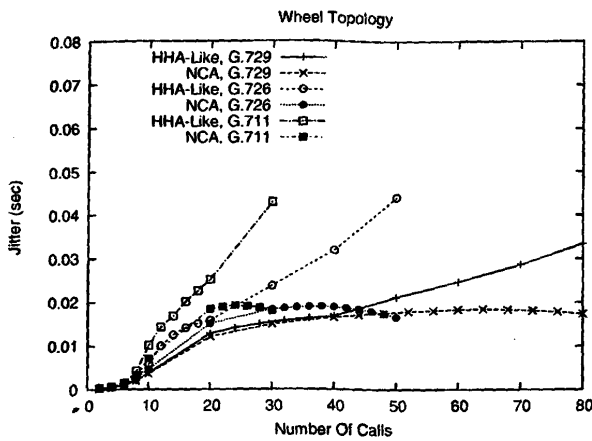




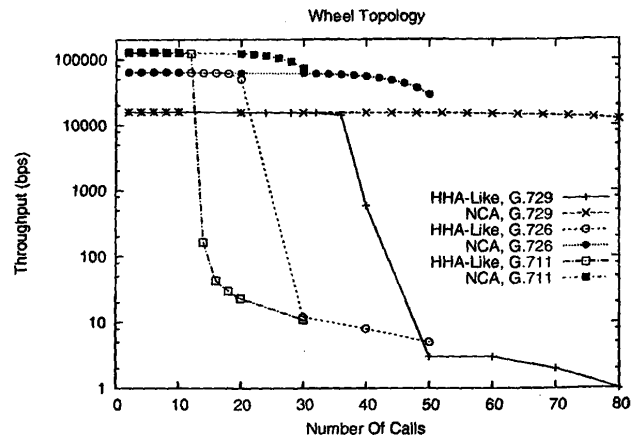
(a)



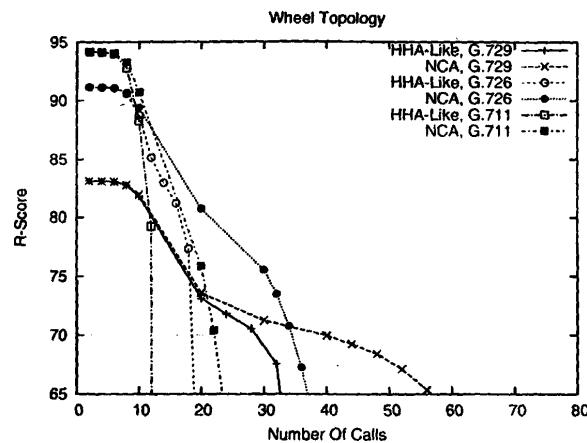
(b)



(c)

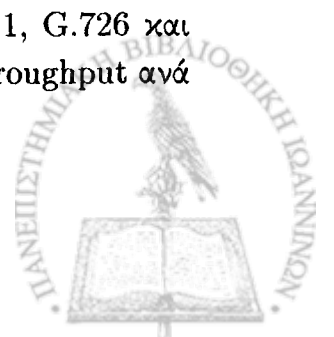


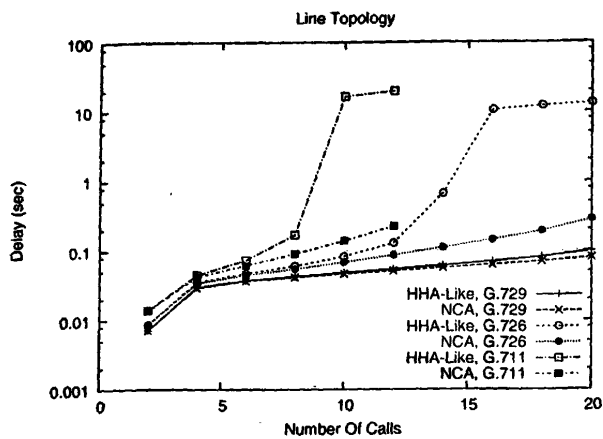
(d)



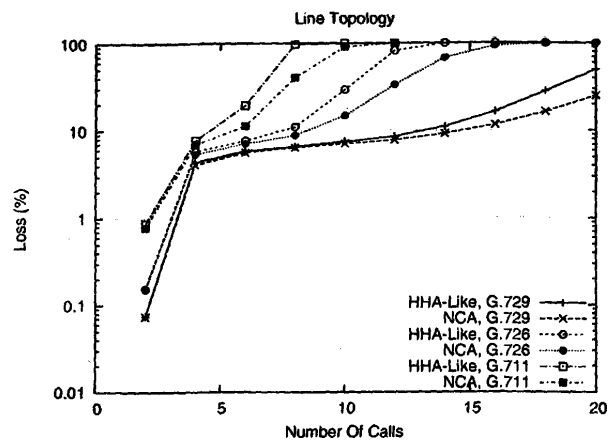
(e)

Σχήμα 6.4: Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score

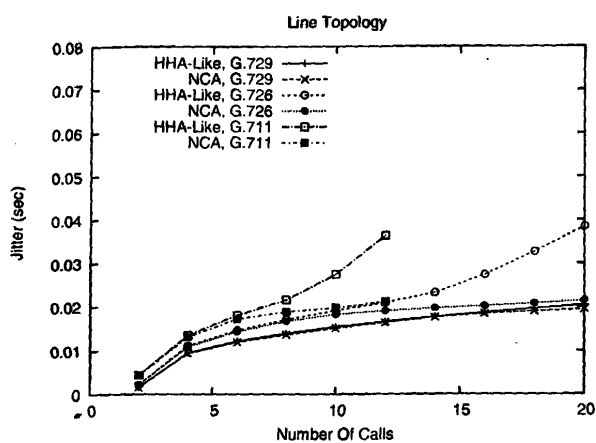




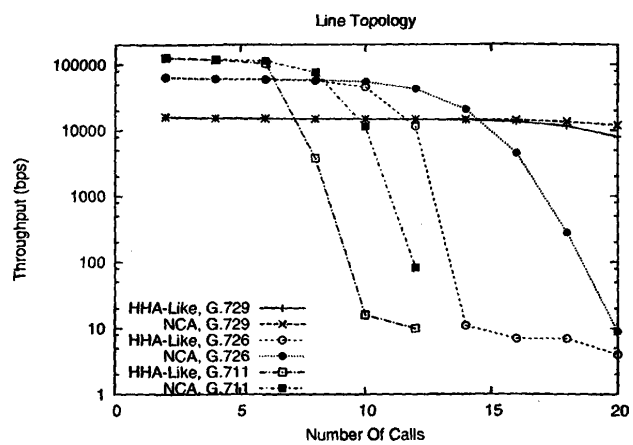
(a)



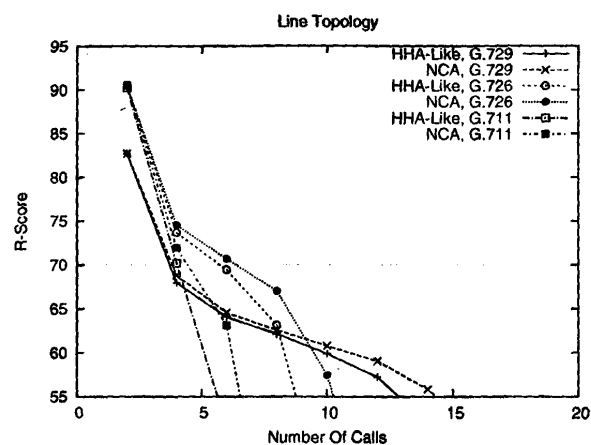
(b)



(c)



(d)

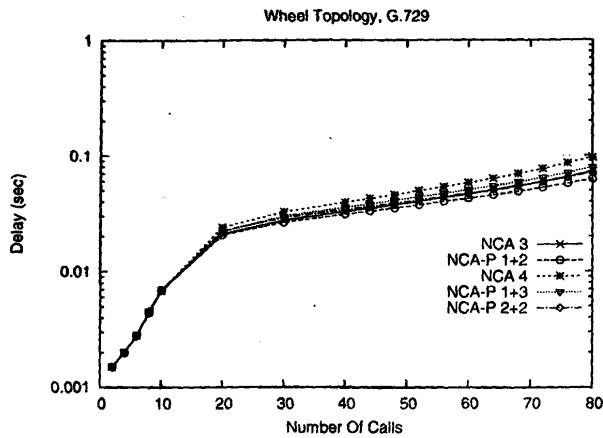


(e)

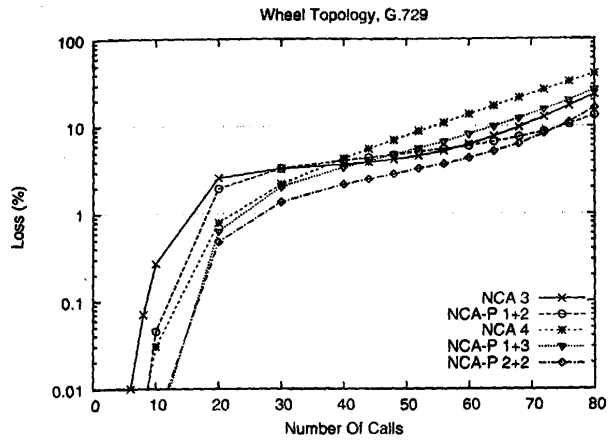
Σχήμα 6.5: Απόδοση των αλγορίθμων HHA-Like και NCA στην τοπολογία Line σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τους κωδικοποιητές G.711, G.726 και G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score



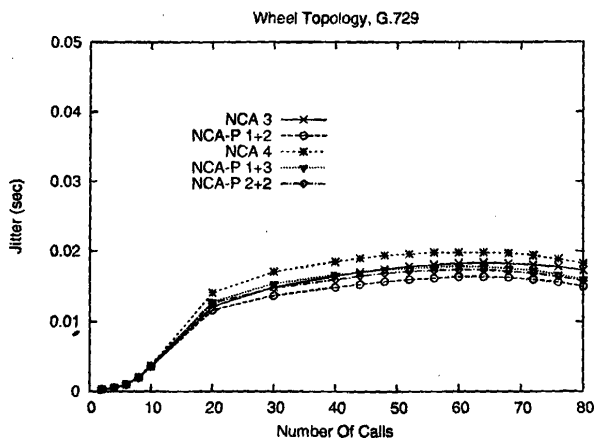
Μέρος Τρίτο



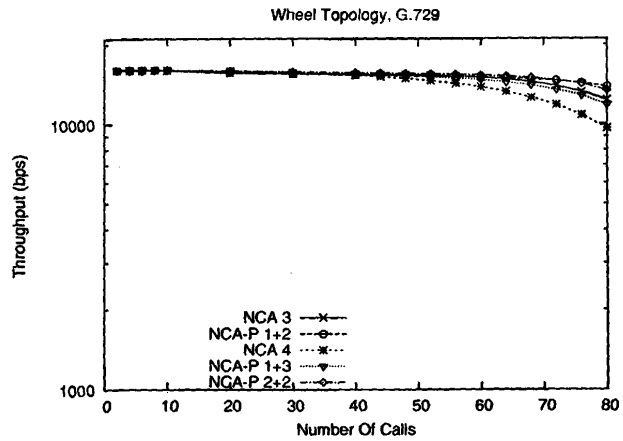
(a)



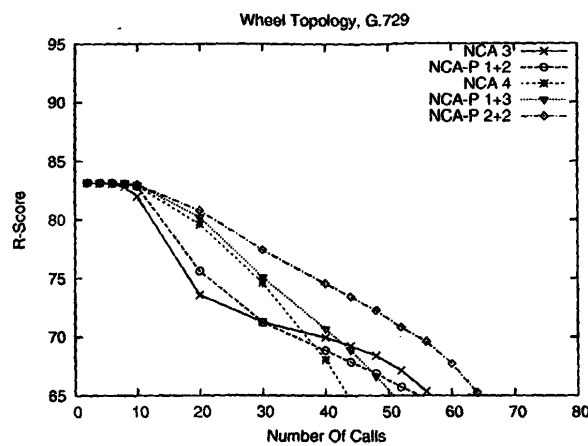
(b)



(c)

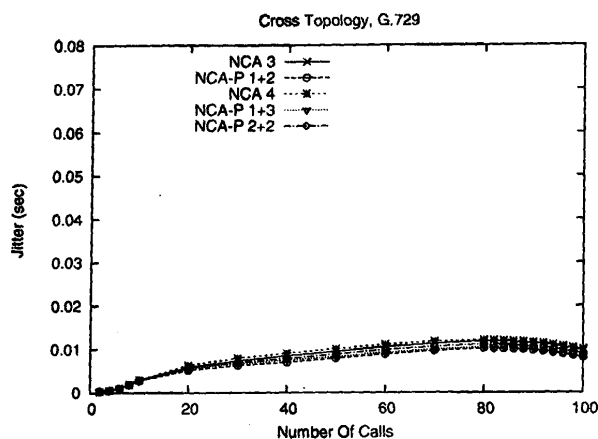


(d)

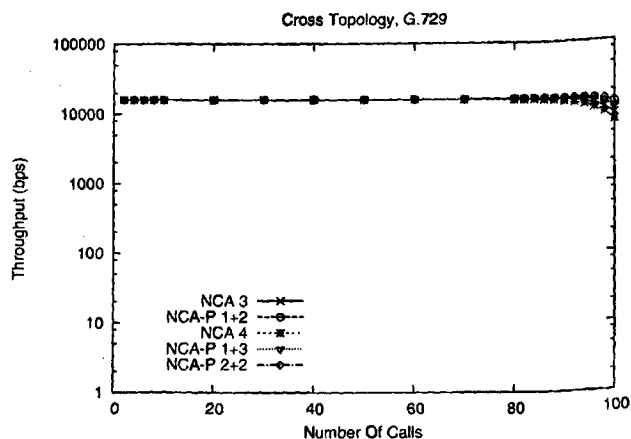


(e)

Σχήμα 6.6: Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA 4, NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score



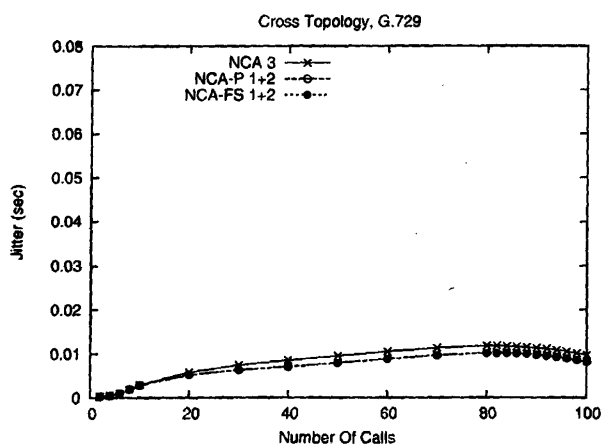
(a)



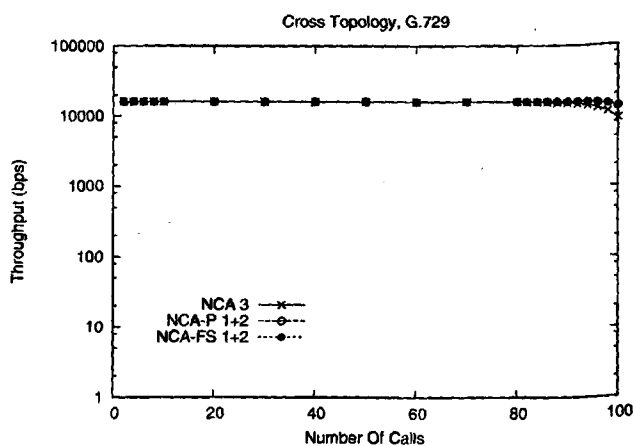
(b)

Σχήμα 6.7: Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA 4, NCA-P 1+3 και NCA-P 2+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

Μέρος Τέταρτο



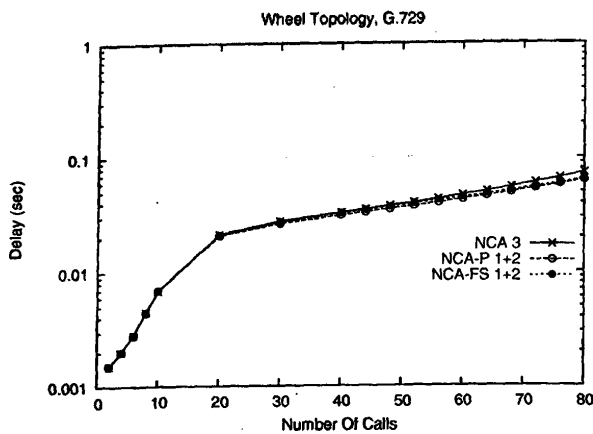
(a)



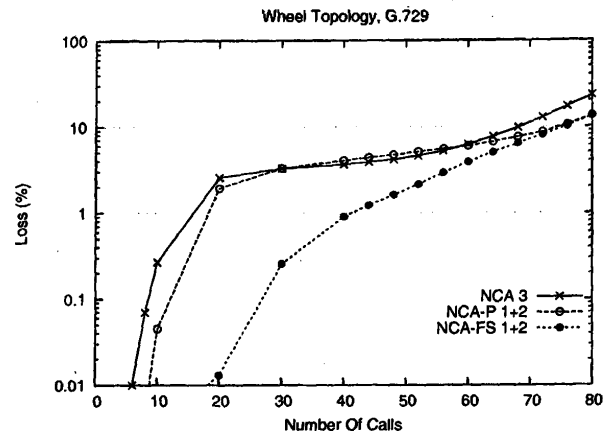
(b)

Σχήμα 6.8: Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA-FS 1+2 στην τοπολογία Cross σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστέρηση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο R-Score

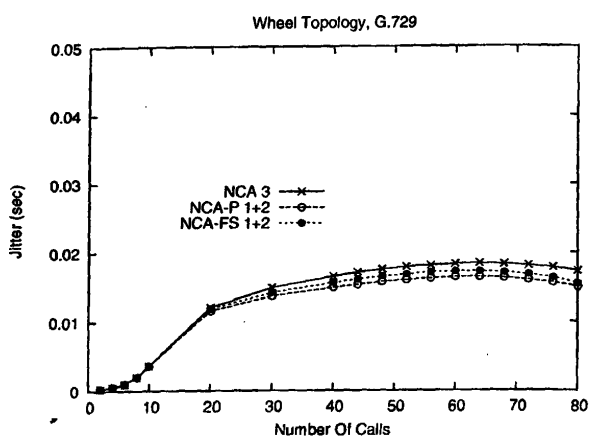




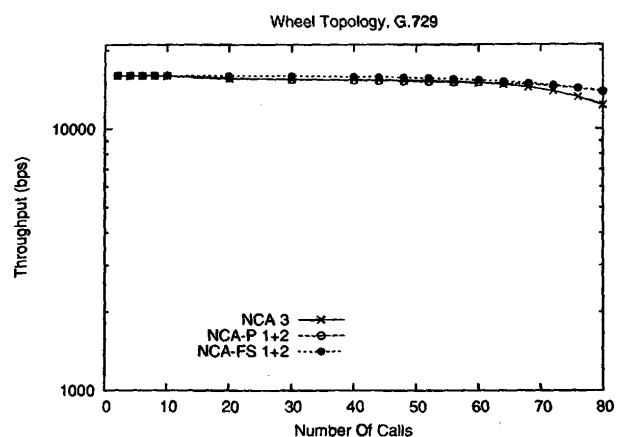
(a)



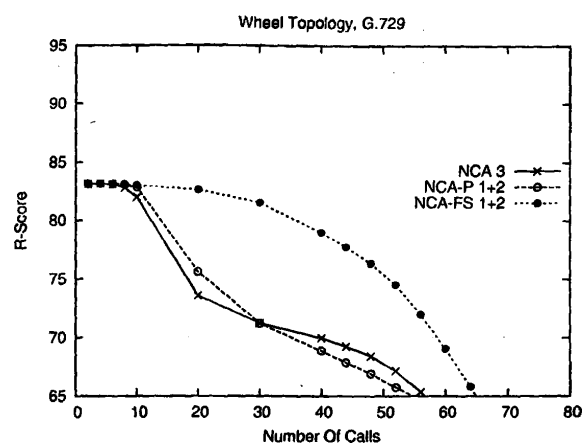
(b)



(c)



(d)



(e)

Σχήμα 6.9: Απόδοση των αλγορίθμων NCA 3 (RL=3), NCA-P 1+2, NCA-FS 1+2 στην τοπολογία Wheel σε συνάρτηση με τον αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων με τον κωδικοποιητή G.729 (a) Μέση Καθυστερήση (b) Απώλεια Πακέτων (c) Μέσο Jitter (d) Throughput ανά κλήση (e) Μέσο R-Score



ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ο Πέτρος Καραγιαννίδης γεννήθηκε το 1984 στην Βέροια. Αποφοίτησε από το Λύκειο Ειρηνούπολης το έτος 2002 και απέκτησε το Δίπλωμα του Μηχανικού Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου στη Σάμο το 2007. Την ίδια χρονιά έγινε δεκτός στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Τα ερευνητικά ενδιαφέροντα του εστιάζονται στον τομέα των Δικτύων Υπολογιστών και συγκεκριμένα στο σχεδιασμό και την υλοποίηση πρωτοκόλλων δικτύωσης. Από το 2009 είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.).

