



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΕ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστίνα Γ. Βλάχου

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΕ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστίνα Γ. Βλάχου

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 12^η Ιουλίου 2011.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Φικιώρης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Χριστίνα Γ. Βλάχου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χριστίνα Γ. Βλάχου, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρξε η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου σε σχήματα δρομολόγησης σε δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση. Η τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου όπως το εύρος ζώνης, η ενέργεια και η μνήμη. Δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση είναι δίκτυα επικοινωνιών με περιορισμένους πόρους, όπως η ενέργεια και η μνήμη, και εμφανίζουν έντονη κινητικότητα και συχνές διακοπές στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου που υλοποιήθηκε στα σχήματα δρομολόγησης των δικτύων αυτών αποδείχθηκε ότι οδηγεί σε μείωση του πλεονασμού των αντιγράφων ανά μήνυμα και σε αύξηση της πιθανότητας παράδοσης μηνυμάτων σε σχέση με σχήματα δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου και στα βασικά χαρακτηριστικά δικτύων ανθεκτικών σε καθυστέρηση. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις αρχές και η αλγεβρική προσέγγιση της κωδικοποίησης δικτύου. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε τεχνικές και αλγόριθμους σχεδίασης της κωδικοποίησης δικτύου σε δίκτυα με καθυστέρηση και ασύρματα δίκτυα. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα σχήματα δρομολόγησης σε δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κριτήρια επίδοσης των σχημάτων δρομολόγησης και γίνεται διάκριση ανάμεσα στα σχήματα δρομολόγησης πλημμύρας και προώθησης. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο προσομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου σε δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση και αναφέρονται οι αλγόριθμοι διαχείρισης μνήμης των κόμβων, κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης που σχεδιάστηκαν για τον προσομοιωτή. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Από τη σύγκριση των σχημάτων δρομολόγησης με και χωρίς την τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου σε δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση προκύπτει ότι βελτιώνονται η πιθανότητα παράδοσης και ο πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα.

ABSTRACT

The aim of this thesis has been the implementation of Network Coding in the framework of Delay Tolerant Networks routing schemes. It has been found that network coding results in better use of network resources such as bandwidth, buffer and energy. Delay tolerant networks are communication networks that are usually resource constrained, with high mobility nodes which are subjected to frequent loss of connectivity. The employment of network coding in delay tolerant networks routing schemes reduces forwarding overhead while achieving a higher delivery probability compared to the same routing schemes when no network coding is used.

Chapter 1 provides a brief introduction to network coding and to the basic characteristics of delay tolerant networks. Chapter 2 deals with the fundamental of network coding and the algebraic approach to network coding. Furthermore, it presents techniques and methods with regard to the application of network coding in networks with delay and wireless networks. Chapter 3 discusses delay tolerant networks routing schemes and attempts a comparison between flooding routing schemes and forwarding schemes. Chapter 4 presents the network simulator that has been used for the implementation of network coding in delay tolerant networks and the algorithms designed for node buffers management, coding and decoding. Finally, Chapter 5 presents the simulation results and the comparison between routing schemes employing or not the network coding technique. The performance metrics which are improved using network coding were found to be the delivery probability and the message forwarding overhead.

Key Words: Network Coding, Delay Tolerant Networks, Epidemic Routing, Probabilistic Routing

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Π. Κωττή για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα ΕΜΠ. Α. Βαζιντάρη για τις γνώσεις που μου μετέδωσε, τη σημαντική βοήθειά της και τον χρόνο που αφιέρωσε για την επίβλεψη της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΕ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ.....15

1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Εισαγωγή στην κωδικοποίηση δικτύου.....	16
1.3 Εφαρμογές της κωδικοποίησης δικτύου.....	29
1.4 Εισαγωγή στα δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση.....	21
1.4.1 Χαρακτηριστικά των DTN δικτύων.....	21
1.4.2 Παραδείγματα DTN δικτύων.....	23
1.4.3 Μεταγωγή μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση.....	24
1.4.4 Η DTN αρχιτεκτονική.....	24
1.4.4.1 Το νέο στρώμα Bundle.....	25
1.4.4.2 Περιοχές και πύλες DTN.....	26
1.4.4.3 Name Tuples.....	27

Κεφάλαιο 2: ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....29

2.1 Το κεντρικό θεώρημα του δικτύου πολυεκπομπής.....	29
2.1.1 Το θεώρημα ελάχιστης τομής μέγιστης ροής.....	29
2.1.2 Το θεώρημα της κωδικοποίησης δικτύου.....	30
2.2 Αλγεβρική προσέγγιση της κωδικοποίησης δικτύου.....	34
2.2.1 Βασικοί Ορισμοί.....	34
2.2.2 Το μοντέλο του γραμμικού γράφου.....	35
2.2.3 Αλγεβρική προσέγγιση.....	36

2.3 Τύποι δρομολόγησης και κωδικοποίησης δικτύου.....	38
2.3.1 Δρομολόγηση.....	38
2.3.2 Κωδικοποίηση.....	38
2.4 Μέθοδοι σχεδίασης του κώδικα δικτύου σε περιπτώσεις πολυεκπομπής..	39
2.4.1 Συγκεντρωτικοί αλγόριθμοι.....	40
2.4.1.1 Ο αλγόριθμος Γραμμικής Ροής Πληροφορίας.....	40
2.4.1.2 Αλγόριθμοι συμπλήρωσης πινάκων.....	41
2.4.2 Αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι.....	41
2.4.2.1 Τυχαία Ανάθεση.....	41
2.4.2.2 Η κωδικοποίηση δικτύου στην πράξη: Εισαγωγή γενεών.....	42
2.4.2.3 Κώδικες μετάθεσης και πρόσθεσης.....	43
2.5 Πόροι για την κωδικοποίηση δικτύου.....	44
2.5.1 Όρια στο μέγεθος του αλφάβητου του κώδικα.....	45
2.5.2 Όρια στον αριθμό των σημείων κωδικοποίησης.....	46
2.6 Δίκτυα με καθυστέρηση.....	46
2.6.1 Αλγόριθμοι.....	47
2.7 Κωδικοποίηση δικτύου σε ασύρματα δίκτυα.....	48
2.7.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα.....	48
2.7.2 Δικαιοσύνη και καθυστέρηση.....	49
2.7.3 Προσαρμοστικότητα σε δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.....	50
2.7.4 COPE.....	52

2.8 Σύγκριση θεωρητικής προσέγγισης και πρακτικής εφαρμογής.....	53
Κεφάλαιο 3: ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΕ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ.....	57
3.1 Εισαγωγή.....	57
3.2 Σχήματα δρομολόγησης στα DTN δίκτυα.....	60
3.2.1 Χαρακτηριστικά των σχημάτων δρομολόγησης.....	60
3.2.1.1 Κριτήρια επίδοσης.....	60
3.2.1.2 Αντιγραφή μηνυμάτων-Γνώση πληροφοριών για το δίκτυο.....	61
3.2.1.3 Στόχοι των σχημάτων δρομολόγησης.....	62
3.2.2 Σχήματα δρομολόγησης πλημμύρας.....	63
3.2.3 Σχήματα δρομολόγησης προώθησης.....	64
3.2.4 Επιδημική δρομολόγηση.....	68
3.2.4.1 Περιγραφή του σχήματος της επιδημικής δρομολόγησης.....	68
3.2.4.2 Παραλλαγές του σχήματος της επιδημικής δρομολόγησης.....	69
3.2.5 Πιθανοτική δρομολόγηση.....	70
3.2.6 Spray δρομολόγηση.....	72
3.2.6.1 Βασικά σχήματα Spray δρομολόγησης.....	72
3.2.6.1.1 Spray and Wait.....	72
3.2.6.1.2 Binary Spray δρομολόγηση.....	72
3.2.6.2 Δρομολόγηση Spray με συναρτήσεις χρησιμότητας....	73

3.2.7	Άλλα σχήματα δρομολόγησης.....	75
3.2.7.1	MaxProp.....	75
3.2.7.2	Δρομολόγηση κοινωνικής επίγνωσης: BUBBLE rap..	76
3.3	Διαχείριση της μνήμης.....	77
3.3.1	Απαλοιφή μηνυμάτων.....	77
3.3.2	Στρατηγικές διαχείρισης της μνήμης.....	79
3.4	Μοντέλα κινητικότητας.....	80
3.5	Εγωισμός στα DTN δίκτυα.....	84
3.6	Εφαρμογές της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα.....	84
Κεφάλαιο 4: Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ONE (OPPORTUNISTIC NETWORK ENVIRONMENT).....		87
4.1	Περιγραφή του προσομοιωτή ONE.....	87
4.1.1	Τα σχήματα δρομολόγησης του προσομοιωτή ONE.....	91
4.1.2	Τα μοντέλα κινητικότητας του προσομοιωτή ONE.....	92
4.1.3	Η αρχιτεκτονική λειτουργίας του προσομοιωτή ONE.....	92
4.2	Υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE.....	93
4.2.1	Διαχείριση της μνήμης στον προσομοιωτή ONE.....	94
4.2.2	Υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE.....	98
4.2.3	Υλοποίηση της αποκωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE.....	99
Κεφάλαιο 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ ONE.....		103
5.1	Τα μέτρα επίδοσης των σχημάτων δρομολόγησης.....	103

5.2	Παράμετροι της προσομοίωσης.....	104
5.3	Αποτελέσματα των προσομοιώσεων.....	105
5.3.1	Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δίκτυο 30 κόμβων..	106
5.3.1.1	Επιδημική δρομολόγηση.....	106
5.3.1.2	Πιθανοτική δρομολόγηση.....	108
5.3.2	Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δίκτυο 50 κόμβων..	110
5.3.2.1	Επιδημική δρομολόγηση.....	110
5.3.2.2	Πιθανοτική δρομολόγηση.....	112
5.3.3	Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δίκτυο 100 κόμβων	114
5.3.3.1	Επιδημική δρομολόγηση.....	114
5.3.3.2	Πιθανοτική δρομολόγηση.....	115
5.4	Παρατηρήσεις.....	117
5.4.1	Παρατηρήσεις βασιζόμενες στα μέτρα επίδοσης.....	117
5.4.2	Η επίδραση της κινητικότητας των κόμβων στα σχήματα δρομολόγησης.....	118
5.5	Δυσκολίες της εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα.....	120
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΛΓΕΒΡΑ.....		121
A.1	Στοιχεία από τη θεωρία πινάκων.....	121
A.2	Στοιχεία από τη θεωρία διανυσματικών χώρων.....	124
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΦΩΝ.....		125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΑ.....		125
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ.....		128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		133

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΕ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ.

1.1 Εισαγωγή

Τα Δίκτυα Ανθεκτικά σε Καθυστέρηση (Delay Tolerant Networks – DTN δίκτυα) είναι δίκτυα επικοινωνιών στα οποία η καθυστέρηση δεν είναι κρίσιμος παράγοντας αλλά μπορεί να ανταλλαχτεί προς όφελος περιορισμένου πόρου όπως η ενέργεια ή ένα περισσότερο σημαντικό μέτρο επίδοσης όπως η ρυθμαπόδοση. Τα χαρακτηριστικά των κόμβων των DTN δικτύων είναι η μικρή εμβέλεια, η κινητικότητα και οι περιορισμένοι πόροι. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει πάντα εφικτή διαδρομή μεταξύ πηγής και προορισμού. Συχνά τα DTN δίκτυα αναφέρονται και ως Δίκτυα Ανθεκτικά σε Αποσύνδεση (Disruption Tolerant Networks), αφού χαρακτηρίζονται από διακοπές στην επικοινωνία οι οποίες μπορεί να οφείλονται στην περιορισμένη εμβέλεια των κόμβων, στα μικρά ενεργειακά αποθέματα, σε επίθεση ή θόρυβο. Οι σχέσεις ανταλλαγής που λαμβάνουν υπόψη τα σχήματα δρομολόγησης σε DTN δίκτυα είναι μεταξύ ενέργειας, καθυστέρησης, απαιτήσεων σε μνήμη και υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Η κωδικοποίηση δικτύου είναι νέα τεχνική που προτάθηκε το 2000 για τις δορυφορικές επικοινωνίες με στόχο τη βελτίωση της ρυθμαπόδοσης. Η καινοτομία της τεχνικής αυτής έγκειται στο ότι οι ενδιαμέσοι κόμβοι του δικτύου δεν προωθούν απλώς τα μηνύματα, αλλά έχουν τη δυνατότητα να τα επεξεργάζονται και να μεταδίδουν κατάλληλο συνδυασμό τους. Για παράδειγμα, στο στρώμα δικτύου οι ενδιαμέσοι κόμβοι μπορούν να εκτελούν δυαδική πρόσθεση των ανεξάρτητων ροών, ενώ στο φυσικό στρώμα ενός δικτύου οπτικών ινών μπορούν να υπερθέτουν τα εισερχόμενα οπτικά μηνύματα. Οι σχέσεις ανταλλαγής που προκύπτουν από την εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου σε ένα σχήμα δρομολόγησης είναι μεταξύ πολυπλοκότητας, καθυστέρησης, πλεονασμού δεδομένων (overhead) και αριθμού απαιτούμενων μεταδόσεων για την παράδοση του μηνύματος.

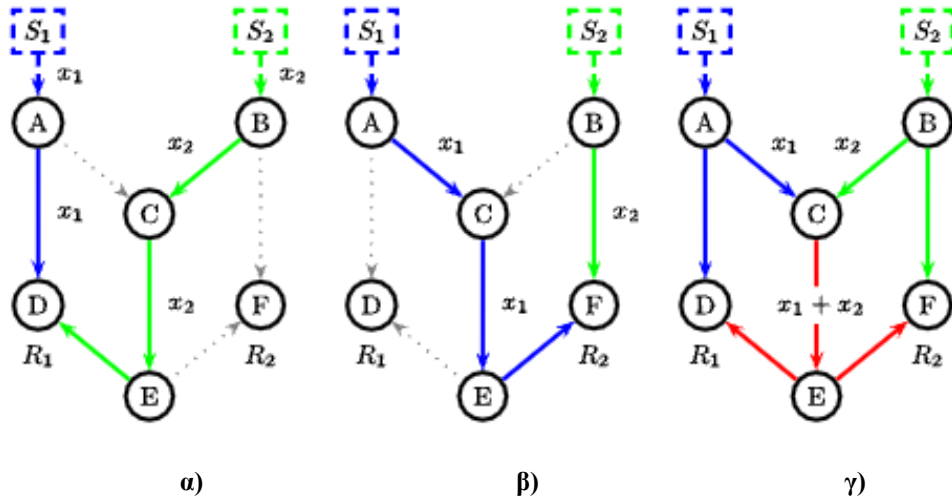
Η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα οδηγεί σε μείωση του πλεονασμού των μηνυμάτων στο δίκτυο και πετυχαίνει καλύτερη σχέση ανταλλαγής μεταξύ πιθανότητας παράδοσης του μηνύματος και πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο σε σχέση με την εφαρμογή των ίδιων σχημάτων δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου. Με τη μείωση του πλεονασμού των μηνυμάτων στο δίκτυο χρησιμοποιούνται αποτελεσματικότερα οι πόροι του δικτύου όπως η ενέργεια, το εύρος ζώνης και η αναγκαία μνήμη, αφού μειώνεται το πλήθος των αναγκαίων μεταδόσεων για να παραδοθεί ένα μήνυμα.

1.2 Εισαγωγή στην κωδικοποίηση δικτύου

Η κωδικοποίηση δικτύου είναι μια τεχνική η οποία επιτρέποντας στους κόμβους του δικτύου να συνδυάζουν τα μηνύματα μπορεί να προσφέρει πολλές δυνατότητες στα δίκτυα του μέλλοντος, καθώς με την εφαρμογή της και ανάλογα με την κατά περίπτωση απαίτηση:

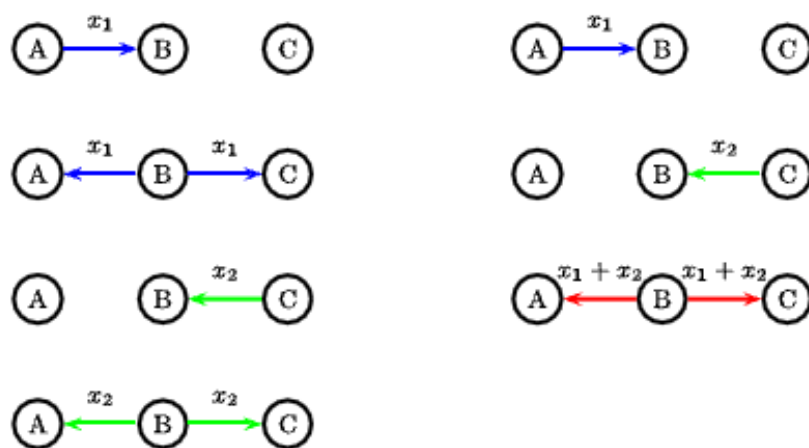
- αυξάνεται η ρυθμαπόδοση,
- χρησιμοποιούνται αποδοτικότερα οι πόροι,
- μειώνεται η καθυστέρηση μετάδοσης,
- αυξάνεται η διάρκεια ζωής των κόμβων,
- γίνεται περισσότερο εύρωστο το δίκτυο,
- ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές και
- προστατεύεται το δίκτυο από επιθέσεις.

Λόγω της γενικότητας της τεχνικής αυτής και ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών της, η κωδικοποίηση δικτύου έχει προκαλέσει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον στους τομείς της θεωρίας πληροφορίας και κωδικοποίησης, της δικτύωσης, των μεταγωγέων, των ασύρματων επικοινωνιών, της θεωρίας πολυπλοκότητας, της κρυπτογραφίας και της θεωρίας πινάκων. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται παραδείγματα των δυνατοτήτων αυτών. Να σημειωθεί ότι τα δίκτυα παρουσιάζονται ως κατευθυνόμενοι γράφοι όπου οι κορυφές αντιστοιχούν στα τερματικά (κόμβοι) και οι ακμές στις ζεύξεις μεταξύ κόμβων.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα αύξησης της ρυθμαπόδοσης με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου

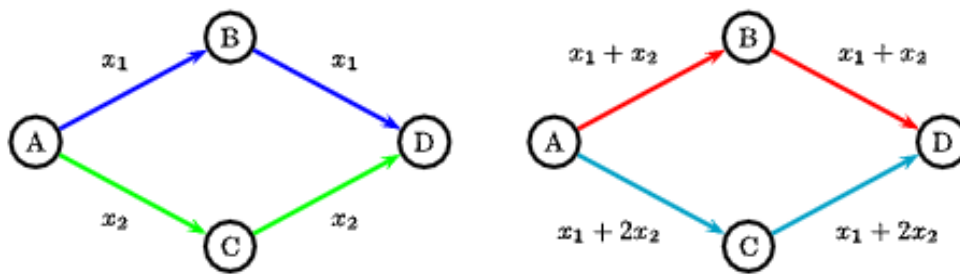
Στα Σχ.1.1α και 1.1β φαίνεται πώς γίνεται η μετάδοση των ψηφίων x_1, x_2 από τους κόμβους S_1, S_2 αντίστοιχα προς τους R_1, R_2 χωρίς τη χρήση κωδικοποίησης δικτύου σε ένα δίκτυο πεταλούδας (butterfly network), ενώ στο Σχ.1.1γ φαίνεται η ίδια διαδικασία με χρήση κωδικοποίησης δικτύου. Ενώ στην πρώτη περίπτωση το x_1 μπορεί να δρομολογηθεί μέσω της διαδρομής $\{AC, CE, EF\}$ από τον κόμβο S_1 στον R_2 και το x_2 μέσω του $\{BC, CE, ED\}$ από τον κόμβο S_2 στον R_1 , στη δεύτερη περίπτωση ο κόμβος C μπορεί να μεταδώσει το xor (δυαδικό άθροισμα) των ψηφίων και οι κόμβοι R_1, R_2 να ανακτήσουν τα x_2 και x_1 αντίστοιχα, αφού έχουν λάβει τα $\{x_1, x_1+x_2\}$ και $\{x_2, x_1+x_2\}$.



Σχήμα 1.2: Παράδειγμα εξοικονόμησης ασύρματων πόρων με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου

Στο δίκτυο του Σχ.1.2 ο κόμβος A πρόκειται να στείλει το δυαδικό αρχείο x_1 στον C και ο C το x_2 στον A . Ο αναμεταδότης B δέχεται και τα δύο αρχεία. Χωρίς

κωδικοποίηση δικτύου ο B μεταδίδει το x_1 στον A και το x_2 στον C. Υποθέτοντας ότι ο χρόνος διαιρείται σε σχισμές και ότι ένα τερματικό μπορεί να μεταδώσει ή να λάβει ένα αρχείο κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής, για τη μετάδοση των δύο αρχείων απαιτούνται τέσσερις χρονικές σχισμές. Η κωδικοποίηση δικτύου εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα ευρυεκπομπής των ασύρματων επικοινωνιών. Με χρήση κωδικοποίησης δικτύου ο B εκπέμπει το συνδυασμό $x_1 + x_2$ των αρχείων οπότε απαιτούνται τρεις χρονικές σχισμές για τη μετάδοσή τους. Είναι φανερό ότι η κωδικοποίηση δικτύου επιτυγχάνει μείωση της καθυστέρησης, του χρόνου χρησιμοποίησης του ασύρματου διαύλου και των παρεμβολών, και εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 1.3: Παράδειγμα αποφυγής υποκλοπών με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου

Στο Σχ.1.3 παρουσιάζεται η περίπτωση που ο κόμβος A πρόκειται να στείλει δύο δυαδικά ψηφία στον κόμβο D. Υποθέτοντας ότι κάποιος με στόχο την υποκλοπή των αρχείων έχει πρόσβαση μόνο στη μία από τις δύο δυνατές διαδρομές από τον A στον D, ο A μπορεί να στείλει ένα διαφορετικό γραμμικό συνδυασμό των ψηφίων μέσω των δύο διαδρομών. Με αυτόν τον τρόπο κάποιος που έχει στόχο την υποκλοπή των ψηφίων έχει πιθανότητα 50% να υποκλέψει ένα από τα δύο ψηφία.

Τα μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου είναι κυρίως η πολυπλοκότητα που εισάγεται στο σύστημα, η διατήρηση του επιπέδου ασφάλειας σε συστήματα όπου η ασφάλεια είναι πολύ σημαντική απαίτηση και η ενσωμάτωσή της στην υπάρχουσα δομή. Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα προς περαιτέρω έρευνα είναι η εύρεση της κατάλληλης σχέσης ανταλλαγής μεταξύ πολυπλοκότητας και επίδοσης του δικτύου.

Όσον αφορά την πολυπλοκότητα, για την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου οι κόμβοι πρέπει να επιτελούν πρόσθετες λειτουργίες. Στο παράδειγμα του Σχ.1.2 ο κόμβος B πρέπει να διαθέτει επιπλέον μνήμη γιατί χρειάζεται να

αποθηκεύσει το x_1 αντί να το μεταδώσει αμέσως και να εκτελεί πράξεις για να προσδιορίζει το συνδυασμό των αρχείων. Επιπλέον, οι κόμβοι A και C πρέπει να διατηρήσουν αποθηκευμένη την πληροφορία που έστειλαν και να λύσουν ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, αφού λάβουν το κωδικοποιημένο μήνυμα.

Σε συστήματα όπου η ασφάλεια είναι σημαντική απαίτηση οι μηχανισμοί σχεδιάζονται ώστε οι μόνοι εξουσιοδοτημένοι να επεξεργάζονται τα δεδομένα είναι η πηγή και ο προορισμός των δεδομένων. Με την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου απαιτείται οι ενδιάμεσοι κόμβοι να εκτελούν πράξεις στα μηνύματα δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου πρέπει να εγγυάται ότι την αυθεντικότητα της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Τέλος, ένας τομέας που ερευνάται σήμερα είναι η ενσωμάτωση της κωδικοποίησης δικτύου στα υπάρχοντα πρωτόκολλα δικτύου και στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές δικτύων. Η κωδικοποίηση δικτύου μελετάται στο Κεφ.2.

1.3 Εφαρμογές της κωδικοποίησης δικτύου

Τα πλεονεκτήματα της κωδικοποίησης δικτύου έχουν μελετηθεί σε πληθώρα δικτύων και εφαρμογών όπως οι εξής:

- *Διανομή ψηφιακών αρχείων: Content Distribution (CD) και Peer-to-Peer (P2P) διαμοιρασμός αρχείων*

Σε ένα σύστημα Peer-to-Peer, κάθε χρήστης λαμβάνει τα δεδομένα και βοηθά στην περαιτέρω διανομή τους σε άλλους κόμβους ενεργώντας ως εξυπηρετητής του συστήματος. Το αρχείο τεμαχίζεται και διαφορετικά τμήματά του μεταδίδονται μεταξύ των χρηστών. Το σύστημα Microsoft Secure Content Distribution (MSCD), γνωστό και ως Avalanche, επιτρέπει στους χρήστες να παράγουν γραμμικούς συνδυασμούς των τμημάτων των αρχείων τα οποία βρίσκονται στην κατοχή τους. Οι συνδυασμοί αυτοί αποστέλλονται μαζί με μια ετικέτα που περιλαμβάνει τους συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάστηκαν τα τμήματα του συνδυασμού. Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου σε ένα σύστημα διανομής ψηφιακών αρχείων είναι η αύξηση της ρυθμαπόδοσης και η αντιμετώπιση καταστάσεων όπως οι τυχαίες αφίξεις ή αναχωρήσεις χρηστών και η έλλειψη συνδεσιμότητας. Οι δυσκολίες της εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου είναι η πολυπλοκότητα που εισάγεται, η

διατήρηση του επιπέδου ασφαλείας στο δίκτυο και η αντιμετώπιση της ετερογένειας των χρηστών. Η εφαρμογή αυτή έχει ομοιότητες με την τοπολογία ενός DTN δικτύου λόγω της ετερογένειας των χρηστών και των τυχαίων αφίξεων και αναχωρήσεών τους από το δίκτυο, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει πάντα εφικτή διαδρομή μεταξύ πηγής και προορισμού του μηνύματος.

- *Ασύρματα δίκτυα*

Τα πλεονεκτήματα και οι δυσκολίες εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου σε ασύρματα δίκτυα μελετώνται στο εδάφιο 2.7.

- *Ευρυεκπομπή και πολυεκπομπή δεδομένων*

Με την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου σε περιπτώσεις πολυεκπομπής αυξάνεται η χωρητικότητα και η ρυθμαπόδοση, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 2.

- *Εναλλακτική στην κωδικοποίηση διαύλου (FEC: Forward Error Correction) και στην τεχνική του αυτόματου αιτήματος αναμετάδοσης (ARQ: Automatic repeat Request) στα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα*

Έχει δειχθεί ότι η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου στα ασύρματα δίκτυα με απώλειες συμβάλλει στη μείωση του αριθμού των αναμεταδόσεων των μηνυμάτων. Η αξιοπιστία της κωδικοποίησης δικτύου σε περιπτώσεις πολυεκπομπής σε σύγκριση με τις τεχνικές FEC και ARQ μελετώνται στο [7].

- *Ad-hoc δίκτυα και Δίκτυα αισθητήρων*

Στα δίκτυα αισθητήρων πόροι όπως η ενέργεια, ο χώρος αποθήκευσης της πληροφορίας και η υπολογιστική δυνατότητα είναι περιορισμένοι. Η κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να συμβάλει στη μείωση της καθυστέρησης, της απασχόλησης της μνήμης και της κατανάλωσης ενέργειας, και συνεπώς στην αύξηση του χρόνου ζωής των κόμβων του δικτύου [6]. Τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc και τα δίκτυα αισθητήρων ως δίκτυα που διέπονται από λιγότερο αυστηρά πρωτόκολλα αναμένεται να προσφέρουν τις πρώτες εφαρμογές για την κωδικοποίηση δικτύου.

- *Network monitoring*

Η παρακολούθηση των απωλειών των ζεύξεων και των αλλαγών στην τοπολογία ενός δικτύου μπορεί να γίνει με είτε παθητικές είτε με ενεργητικές μετρήσεις. Οι παθητικές στηρίζονται στη μέτρηση της μεταφερόμενης κίνησης στο δίκτυο, ενώ οι ενεργητικές στην αποστολή ειδικών μηνυμάτων (probe) από ένα σύνολο πηγών σε ένα σύνολο παραληπτών. Η κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να προσφέρει στην

παρακολούθηση των απωλειών των ζεύξεων, εφόσον οι κόμβοι συνδυάζουν γραμμικά τα εισερχόμενα probe μηνύματα τους. Η απόφαση για το αν υπάρχει απώλεια σε κάποια ζεύξη λαμβάνεται όταν τα μηνύματα probe φθάσουν στον κόμβο όπου γίνεται η μέτρηση. Με βάση την τιμή των δεδομένων αυτών εξάγονται συμπεράσματα για το αν υπάρχει απώλεια ζεύξης και ποιο τμήμα του δικτύου που ενδεχομένως δεν λειτουργεί.

- *Ασφάλεια δικτύου και ακεραιότητα δεδομένων*

Η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου σε ένα δίκτυο μπορεί να οδηγήσει αφενός σε απόκρυψη σημαντικής πληροφορίας από τρίτους (Σχ.1.3) και αφετέρου σε περιβάλλον περισσότερο ευάλωτο για τους νόμιμους χρήστες. Δύο σημαντικοί τομείς έρευνας σήμερα είναι η χρήση της κωδικοποίησης δικτύου για να διασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου από υποκλοπείς και οι τρόποι διασφάλισης της ακεραιότητας των δεδομένων μετά την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου στο δίκτυο.

1.4 Εισαγωγή στα δίκτυα ανθεκτικά σε καθυστέρηση

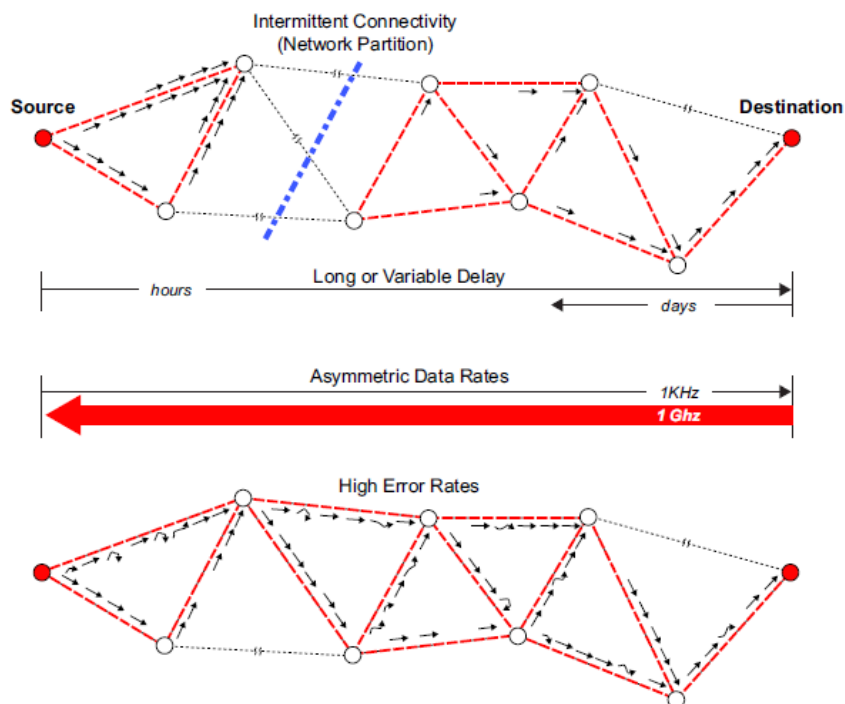
Ένα DTN δίκτυο αποτελείται από περιφερειακά δίκτυα (regional networks). Πρόκειται για υπερκείμενο δίκτυο (overlay network) επί περιφερειακών δικτύων όπως το Internet. Τα DTN δίκτυα υποστηρίζουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των περιφερειακών δικτύων προσαρμόζοντας τις μεγάλες καθυστερήσεις μεταξύ και εντός των περιφερειακών δικτύων, και αντιστοιχίζοντας τα μη συμβατά χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών. Η σύνδεση δύο περιφερειακών δικτύων απαιτεί την παρέμβαση ενός αντιπροσώπου (agent) ικανού να μεταφράζει μεταξύ των μη συμβατών χαρακτηριστικών των δικτύων αυτών και να λειτουργεί ως μνήμη των μηνυμάτων για τις μη συμβατές καθυστερήσεις των δικτύων.

1.4.1 Χαρακτηριστικά των DTN δικτύων

Τα DTN δίκτυα χαρακτηρίζονται ως «περιοδικά συνδεδεμένα», «αραιά», «αποσυνδεδεμένα» και «χωρίς μακροβιότητα».

Βασικά χαρακτηριστικά των DTN δικτύων είναι τα εξής:

- Μεγάλη ή μεταβλητή καθυστέρηση και χαμηλός ρυθμός μετάδοσης που εμποδίζουν τη λειτουργία των παραδοσιακών πρωτοκόλλων του Internet που στηρίζονται στις άμεσες επιβεβαιώσεις (ACK) και τις ανταλλαγές μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων. Η μεγάλη ή μεταβλητή καθυστέρηση οφείλεται στις μεγάλες καθυστερήσεις διάδοσης και τις μεταβλητές καθυστερήσεις αναμονής στους κόμβους.
- Διακοπτόμενη συνδεσιμότητα, καθώς δεν υπάρχει πάντα εφικτή διαδρομή μεταξύ πηγής και προορισμού. Δεν είναι δυνατή η επικοινωνία από άκρο σε άκρο χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα TCP/IP. Επομένως, απαιτείται η υιοθέτηση άλλων πρωτοκόλλων.
- Ασύμμετροι ρυθμοί μετάδοσης στις διάφορες ζεύξεις οι οποίοι εμφανίζουν μεγάλες διαφορές δεν είναι συμβατοί με τα παραδοσιακά πρωτοκόλλα του Internet, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για μικρές διαφορές μεταξύ των ρυθμών μετάδοσης.
- Υψηλά ποσοστά λαθών που απαιτούν επανεκπομπή των δεδομένων ή τη διόρθωση λαθών.
- Συνήθως είναι ασύρματα δίκτυα με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους, μικρή εμβέλεια των κόμβων, εγκατάσταση κόμβων σε μεγάλης έκτασης επιφάνειες, εξασθένηση κατά τη διάδοση του σήματος (challenged networks [1]).

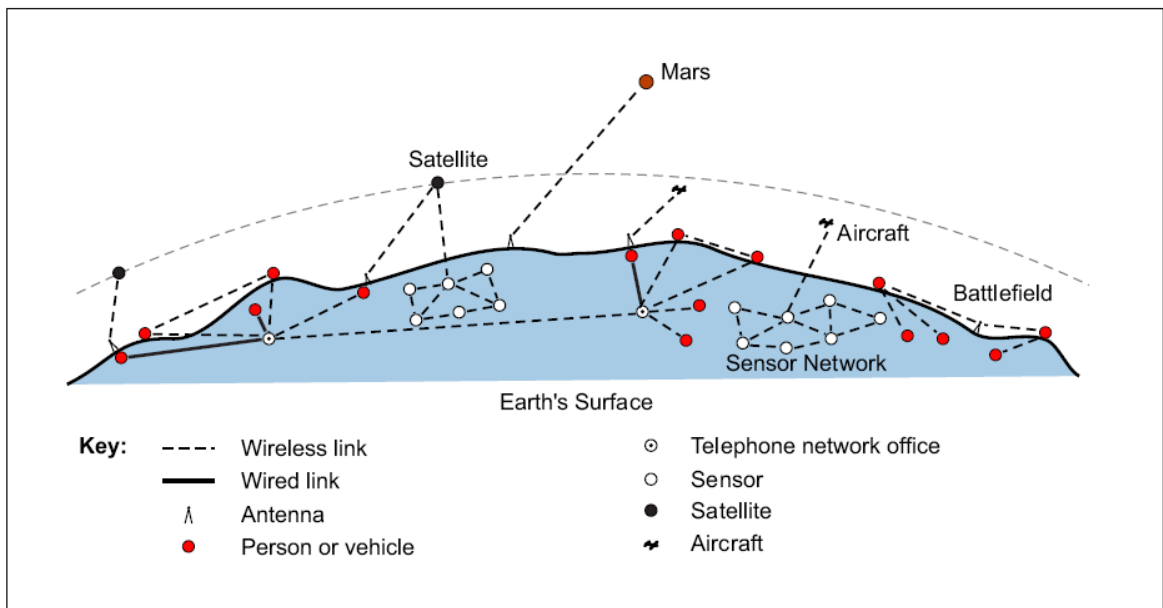


Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστικά των DTN δικτύων

1.4.2 Παραδείγματα DTN δικτύων

Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα TCP/IP αποτυγχάνουν στα DTN δίκτυα λόγω της απουσίας από άκρο σε άκρο σύνδεσης μεταξύ πηγής και προορισμού. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται συνήθως από ανεξάρτητα δίκτυα, καθένα από τα οποία υποστηρίζει ειδικευμένες απαιτήσεις επικοινωνίας. Τα δίκτυα αυτά δεν χρησιμοποιούν τα παραδοσιακά πρωτόκολλα του Internet, και μπορεί να είναι μη συμβατά μεταξύ τους. Παραδείγματα τέτοιων δικτύων αποτελούν:

- τα επίγεια κινητά δίκτυα, τα οποία συνδέουν κινητές ασύρματες συσκευές και απομακρυσμένα από τη γη σημεία,
- τα δίκτυα αισθητήρων και αισθητήρων/ενεργοποιητών,
- τα MANET (Mobile Ad-hoc NETworking),
- τα στρατιωτικά δίκτυα ad-hoc, τα οποία συνδέουν στρατεύματα, αεροσκάφη, δορυφόρους και αισθητήρες,
- τα VANET (Vehicular Ad hoc NETworks),
- τα δίκτυα ασυνήθιστων μέσων διάδοσης όπως
 - δορυφορικές επικοινωνίες κοντά στη γη,
 - ραδιοζεύξεις μεγάλης απόστασης,
 - επικοινωνία με χρήση ακουστικής διαμόρφωσης μέσω νερού ή αέρα,
 - διαπλανητικό Internet (InterPlaNetary (IPN) Internet) [3].



Σχήμα 1.5: Παραδείγματα DTN δικτύων

1.4.3 Μεταγωγή μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση (Store-carry and Forward Message Switching)

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 1.3.1 τα DTN δίκτυα αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα που σχετίζονται με μεγάλη ή μεταβλητή καθυστέρηση, διακοπόμενη συνδεσιμότητα, ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης και υψηλό ποσοστό λαθών. Με τη μέθοδο της μεταγωγής μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση, τα μηνύματα προωθούνται από ένα αποθηκευτικό χώρο ενός κόμβου σε ένα αποθηκευτικό χώρο άλλου κόμβου ακολουθώντας διαδρομή η οποία οδηγεί τελικά στον προορισμό. Οι δρομολογητές DTN πρέπει να έχουν μνήμη για τους εξής λόγους:

- Η ζεύξη επικοινωνίας για το επόμενο βήμα (hop) μπορεί να μην είναι διαθέσιμη για αρκετό χρονικό διάστημα.
- Σε ένα ζεύγος κόμβων που επικοινωνούν ο ένας κόμβος μπορεί να αποστέλλει ή να λαμβάνει δεδομένα ταχύτερα από τον άλλο κόμβο.
- Ένα μήνυμα, αφού μεταδοθεί, μπορεί να χρειάζεται αναμετάδοση αν συμβεί λάθος κατά τη μετάδοση ή αν κάποιος κόμβος αδυνατεί να το λάβει.

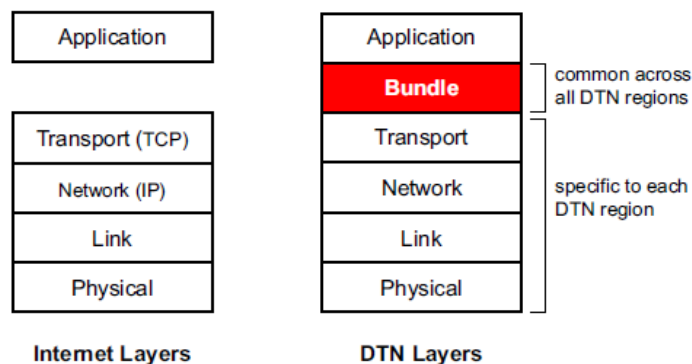
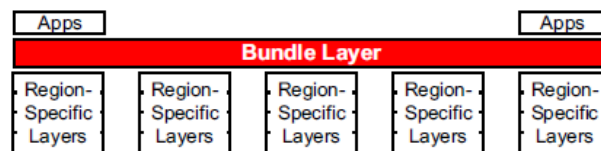
Τα σχήματα δρομολόγησης στα DTN δίκτυα στηρίζονται στη μέθοδο μεταγωγής μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση και μελετώνται στο Κεφ.3.

1.4.4 Η DTN αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική που έχει προταθεί για να εξασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ ανόμοιων περιφερειακών δικτύων στα DTN δίκτυα είναι η DTN αρχιτεκτονική. Η DTN αρχιτεκτονική βασίζεται σε μια αφηρημένη ιδέα της μεταγωγής μηνυμάτων. Η καινοτομία της αρχιτεκτονικής αυτής στη στοίβα πρωτοκόλλων OSI είναι η εισαγωγή ενός νέου στρώματος, του στρώματος Bundle, μεταξύ του στρώματος εφαρμογής και του στρώματος μεταφοράς. Οι βασικές αρχές της DTN αρχιτεκτονικής είναι:

- Η χρήση μηνυμάτων μεταβλητού μήκους και όχι ροών πληροφορίας ή μηνυμάτων περιορισμένου μεγέθους, ώστε να επιτρέπεται στο δίκτυο να αποφασίζει ορθά για τον προγραμματισμό και την επιλογή των διαδρομών όταν αυτό είναι δυνατό

- Η χρήση σύνταξης με ονόματα για τη διευθυνσιοδότηση, η οποία υποστηρίζει ένα μεγάλο εύρος ονομασιών και συμβάσεων για διευθύνσεις βελτιώνοντας τη διαλειτουργικότητα
- Η χρήση αποθηκευτικού χώρου στο δίκτυο ώστε να υποστηριχτεί η λειτουργία της αποθήκευσης και της προώθησης σε πολλαπλές διαδρομές, και, ενδεχομένως, σε μεγάλες κλίμακες χρόνου
- Η παροχή μηχανισμών ασφάλειας που προστατεύουν όσο το δυνατό ταχύτερα τη δομή από μη εξουσιοδοτημένη χρήση
- Η παροχή μιας κλάσης υπηρεσίας υψηλού επιπέδου, με επιλογές όσον αφορά την παράδοση και με έκφραση της ωφέλιμης ζωής των δεδομένων ώστε να επιτραπεί στο δίκτυο να ικανοποιεί καλύτερα τις ανάγκες των εφαρμογών.



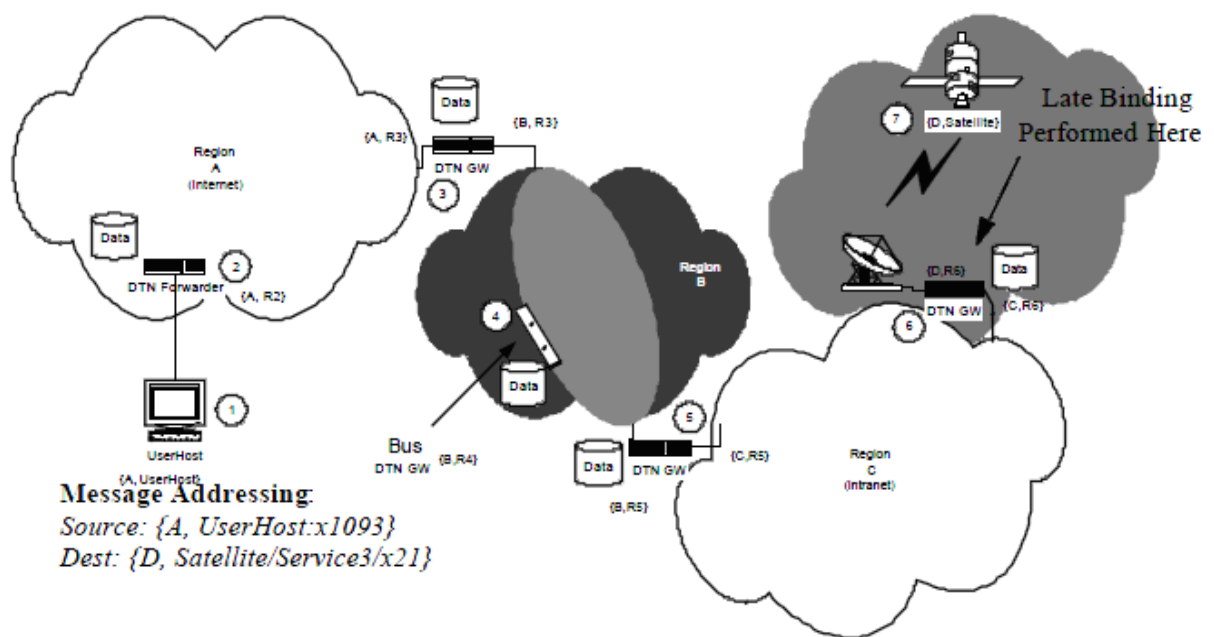
Σχήμα 1.6: Το νέο στρώμα Bundle. Σύγκριση με το πρωτόκολλο TCP/IP

1.4.4.1 Το νέο στρώμα Bundle

Το στρώμα Bundle τοποθετείται ανάμεσα στο στρώμα εφαρμογής και το στρώμα μεταφοράς. Τα κατώτερα στρώματα από το στρώμα bundle επιλέγονται με βάση την καταλληλότητά τους στο περιβάλλον επικοινωνίας κάθε περιοχής και είναι διαφορετικά μεταξύ των περιφερειακών δικτύων.

Ως bundle αναφέρονται και τα μηνύματα που δημιουργούνται στο στρώμα Bundle. Το στρώμα αυτό αποθηκεύει και προωθεί ολόκληρα bundle ή τμήματα αυτών μεταξύ των κόμβων. Σε όλα τα δίκτυα τα οποία απαρτίζουν ένα DTN δίκτυο χρησιμοποιείται το ίδιο πρωτόκολλο για το bundle στρώμα. Στο Σχ.1.6 απεικονίζεται το νέο αυτό στρώμα και συγκρίνεται η αρχιτεκτονική του Internet με τη DTN αρχιτεκτονική.

Τα bundle αποτελούνται από τα δεδομένα της εφαρμογής από την πηγή, την πληροφορία ελέγχου από την εφαρμογή στην πηγή προς την εφαρμογή στον προορισμό και μια επικεφαλίδα bundle που εισάγεται στο στρώμα bundle. Όπως στο πρωτόκολλο IP του TCP/IP, στο στρώμα bundle τα μηνύματα μπορεί να τεμαχίζονται και στην περίπτωση αυτή το αντίστοιχο στρώμα στον προορισμό τα συγκεντρώνει ξανά.



Σχήμα 1.7: Η DTN αρχιτεκτονική

1.4.4.2 Περιοχές και πύλες DTN

Η DTN αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τις έννοιες των περιοχών (regions) και των πυλών (gateways), όπως φαίνεται στο Σχ.1.7. Ως περιοχή ορίζεται ένα δικτυακό περιβάλλον μέσα στο οποίο οι κόμβοι έχουν κοινά εξειδικευμένα πρωτόκολλα και κοινή ονοματοδοσία. Η επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των περιοχών οφείλεται στην ύπαρξη ειδικών πυλών στα σημεία της μεταξύ τους σύνδεσης. Δύο

κόμβοι ανήκουν στην ίδια περιοχή αν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χωρίς τη μεσολάβηση πύλης. Στο Σχ.1.7 διακρίνονται οι περιοχές A, B, C, D και οι πύλες 3, 5, 6. Οι περιοχές αποτελούν δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία μπορεί να είναι μη συμβατά μεταξύ τους.

Οι πύλες είναι υπεύθυνες για την αποθήκευση των δεδομένων μέχρι να υπάρξει ευκαιρία επικοινωνίας με τον κόμβο στο επόμενο βήμα (hop) της δρομολόγησης ενός μηνύματος. Επιπλέον, τοποθετούνται στα σύνορα μεταξύ των περιφερειακών δικτύων ώστε να αντιστοιχίζουν τα διαφορετικά πρωτόκολλα των δικτύων αυτών και να επιλύουν τις διευθύνσεις προορισμού των μηνυμάτων. Οι διευθύνσεις προορισμού των μηνυμάτων είναι αναγνωρίσιμες μόνο στην περιοχή του δικτύου στο οποίο ανήκει ο παραλήπτης τους και οι πύλες τις επιλύουν σε τοπικά αναγνωρίσιμα ονόματα για τη γειτονική περιοχή στην οποία προορίζεται το μήνυμα. Στο Σχ.1.7 η πύλη 6 επιλύει τη διεύθυνση προορισμού ενός μηνύματος που έχει ως παραλήπτη κόμβο της περιοχής D σε αναγνωρίσιμο όνομα για το δορυφορικό δίκτυο της περιοχής D (για παράδειγμα σε διεύθυνση IP στην περιοχή D). Οι διευθύνσεις των κόμβων στη DTN αρχιτεκτονική μελετώνται στην επόμενη παράγραφο.

1.4.4.3 Name Tuples

Πολύ συχνά, τα περιφερειακά δίκτυα δεν χρησιμοποιούν τα ίδια πρωτόκολλα για τη μετάδοση. Σε αρκετά τέτοια δίκτυα δεν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IP, άρα τα αναγνωρίσιμα που χρησιμοποιούνται δεν μπορούν να είναι οι διευθύνσεις IP. Στην DTN αρχιτεκτονική αντί των διευθύνσεων IP χρησιμοποιούνται τα name tuples που αποτελούνται από δύο τμήματα: {Region Name, Entity Name}. Το πρώτο τμήμα είναι μοναδικό παγκοσμίως και είναι ένα ιεραρχικά δομημένο όνομα περιοχής. Έχει τοπολογική σημασία: μεταφράζεται από τους δρομολογητές DTN ώστε να βρεθεί η διαδρομή προς μια ή περισσότερες πύλες στο όριο της συγκεκριμένης περιοχής. Το δεύτερο τμήμα προσδιορίζει ένα όνομα το οποίο είναι αναγνωρίσιμο εντός της συγκεκριμένης περιοχής και δεν απαιτείται να είναι μοναδικό έξω από αυτήν. Στο Σχ.1.7 φαίνεται παράδειγμα για τα tuples της πηγής και του προορισμού ενός μηνύματος από τον κόμβο {A, UserHost:x1093} στον κόμβο {D, Satellite/Service3/x21}. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα, το δεύτερο τμήμα των tuples, το Entity Name, μπορεί να ανήκει σε αυθαίρετη δομή και να περιέχει ενδείξεις που επιλύονται είτε στην περιοχή της πηγής είτε στην περιοχή του προορισμού.

Καθώς το μήνυμα διαδίδεται στο δίκτυο, για τη δρομολόγηση χρησιμοποιείται μόνο το Region Name. Όταν το μήνυμα φθάσει στο άκρο της περιοχής όπου βρίσκεται ο προορισμός, μεταφράζεται τοπικά το Entity Name σε ένα όνομα πρότυπο για το πρωτόκολλο που έχει υιοθετηθεί στην περιοχή αυτή. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μορφή καθυστερημένης πρόσδεσης (late binding) για τα tuples στα οποία μόνο το τμήμα του Region Name χρησιμοποιείται άμεσα από τους DTN δρομολογητές για την προώθηση των μηνυμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

2.1 Το κεντρικό θεώρημα του δικτύου πολυεκπομπής

2.1.1 Το θεώρημα ελάχιστης τομής μέγιστης ροής

Έστω $G=(V,E)$ ένας γράφος που περιγράφει ένα δίκτυο με ένα σύνολο κορυφών V και ένα σύνολο ακμών $E \subset V \times V$. Υποτίθεται ότι κάθε ακμή έχει μοναδιαία χωρητικότητα και ότι επιτρέπονται οι παράλληλες ακμές. Έστω ότι ένας κόμβος $S \in V$ επιθυμεί να μεταδώσει πληροφορία στον κόμβο $R \in V$.

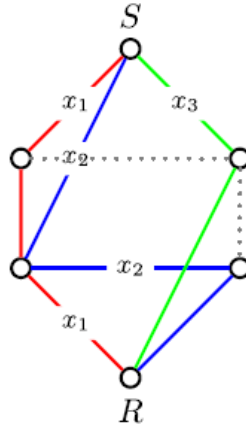
Ορισμός 2.1

Μια τομή μεταξύ των S και R είναι ένα σύνολο ακμών των οποίων η απομάκρυνση από το γράφο αποσυνδέει τον S από τον R . Η ελάχιστη τομή είναι η τομή με τη μικρότερη τιμή. Η τιμή μιας τομής είναι το άθροισμα των χωρητικοτήτων των ακμών της τομής.

Θεώρημα 2.1

Έστω ένας γράφος $G=(V,E)$ με μοναδιαίες χωρητικότητες, μια κορυφή πηγή S και μια κορυφή παραλήπτη R . Αν η ελάχιστη τομή μεταξύ S και R ισούται με h , τότε η πληροφορία μπορεί να σταλεί από τον S στον R με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης h . Ισοδύναμα, υπάρχουν ακριβώς h διαδρομές ξένες ως προς τις ακμές μεταξύ S και R .

Στο Σχ.2.1 παρουσιάζεται μια περίπτωση μονοεκπομπής (unicast) από τον κόμβο S στον κόμβο R . Υπάρχουν ενδεχομένως πολλές ελάχιστες τομές αλλά μια τιμή ελάχιστης τομής. Αφού η τιμή της ελάχιστης τομής είναι τρία, υπάρχουν τρεις διαδρομές ξένες ως προς τις ακμές οι οποίες παραδίδουν τα σύμβολα x_1, x_2, x_3 στον παραλήπτη με αποτέλεσμα η τιμή της μέγιστης ροής πληροφορίας από τον S στον R να είναι τρία.



Σχήμα 2.1 Η ελάχιστη τομή μεταξύ S και R είναι ίση με τρία

2.1.2 Το κεντρικό θεώρημα της κωδικοποίησης δικτύου

Ας θεωρηθεί ένα σενάριο πολυεκπομπής σε δίκτυο $G=(V,E)$ όπου πηγές S_1, S_2, \dots, S_h μοναδιαίου ρυθμού είναι τοποθετημένες στον ίδιο κόμβο S και μεταδίδουν ταυτόχρονα πληροφορία σε N παραλήπτες R_1, R_2, \dots, R_N . Υποτίθεται ότι ο G είναι ακυκλικός κατευθυνόμενος γράφος με μοναδιαίες χωρητικότητες στις ακμές και ότι η τιμή της ελάχιστης τομής μεταξύ του κόμβου S και των παραληπτών είναι h. Υποτίθεται μηδενική καθυστέρηση, δηλαδή κατά τη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν τις εισόδους τους και αποστέλλουν τις εξόδους τους ταυτόχρονα.

Οι ακμές του γράφου έχουν χωρητικότητα ένα. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε χρονική σχισμή μπορεί να μεταδοθεί μέσω κάθε ακμής ένα σύμβολο από κάποιο πεπερασμένο σώμα F_q με μέγεθος q. Κάθε πηγή S_i μεταδίδει ένα σύμβολο s_i , $1 \leq i \leq h$, το οποίο είναι στοιχείο του ίδιου σώματος F_q . Χρησιμοποιώντας ένα μέγεθος αλφάβητου $q=2^m$, είναι δυνατή η αποστολή πληροφορίας από την πηγή στον προορισμό σε μηνύματα των m bits. Τα m bits αντιμετωπίζονται ως ένα σύμβολο του F_q . Οι κόμβοι του δικτύου επεξεργάζονται τα σύμβολα εκτελώντας πράξεις στο F_q .

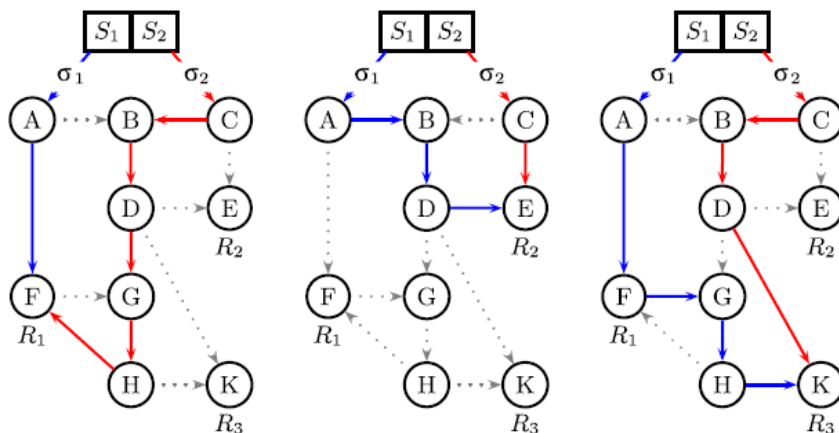
Θεώρημα 2.2

Έστω ένας κατευθυνόμενος ακυκλικός γράφος $G=(V,E)$ με ακμές μοναδιαίας χωρητικότητας, h πηγές μοναδιαίων ρυθμών μετάδοσης εγκατεστημένων στην ίδια κορυφή του γράφου και N παραλήπτες. Υποτίθεται, επίσης, ότι η τιμή της ελάχιστης τομής προς κάθε παραλήπτη είναι h. Τότε υπάρχει ένα σχήμα πολυεκπομπής, ορισμένο επί ενός αρκετά μεγάλου πεπερασμένου σώματος F_q , επί του οποίου οι

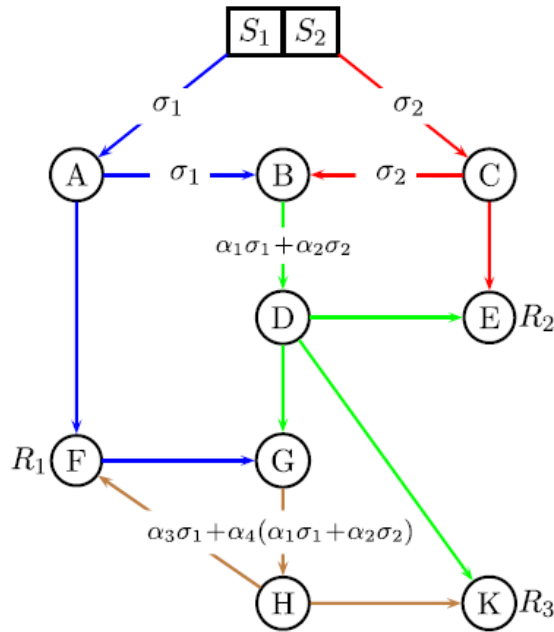
ενδιάμεσοι κόμβοι συνδυάζουν γραμμικά τα εισερχόμενα σύμβολα, το οποίο παραδίδει την πληροφορία από τις πηγές σε κάθε παραλήπτη ταυτόχρονα με ρυθμό ίσο με h .

Το ανωτέρω θεώρημα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν επιτραπεί σε ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου να συνδυάζουν κατάλληλα τις εισερχόμενες ροές τους και όχι απλώς να τις προωθούν, τότε κάθε παραλήπτης θα λαμβάνει την πληροφορία με τον ίδιο ρυθμό που θα την ελάμβανε αν είχε μοναδική πρόσβαση στους πόρους του δικτύου. Το θεώρημα υποστηρίζει ότι είναι επαρκές για τους ενδιάμεσους κόμβους να εκτελούν γραμμικές πράξεις πάνω σε ένα πεπερασμένο σώμα F_q . Αυτό το σχήμα μετάδοσης αναφέρεται ως γραμμική κωδικοποίηση δικτύου. Για να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα, πρέπει να επιλεγεί πεπερασμένο σώμα F_q όσο το δυνατό μικρότερου μεγέθους.

Στο Σχ.2.2 επισημαίνονται οι διαδρομές από την πηγή προς τον προορισμό όταν οι πηγές S_1, S_2 πρόκειται να μεταδώσουν τα σύμβολα σ_1, σ_2 , αντίστοιχα, στους παραλήπτες R_1, R_2, R_3 . Εφαρμόζοντας δρομολόγηση χωρίς κωδικοποίηση δικτύου στις ακμές που είναι κοινές για τις διαδρομές δρομολόγησης, προς τους παραλήπτες μπορεί να μεταδοθεί ένα μόνο από τα δύο σύμβολα. Εφαρμόζοντας γραμμική κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να μεταδοθεί μέσω των κοινών ακμών ένας γραμμικός συνδυασμός των σ_1, σ_2 πάνω στο F_q , όπως στο Σχ.2.3. Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν το γραμμικό συνδυασμό αποτελούν το τοπικό διάνυσμα κωδικοποίησης $c^l(e)$ για την ακμή e .



Σχήμα 2.2 Οι διαδρομές προς τους τρεις παραλήπτες συμπίπτουν για παράδειγμα στις ακμές BD και GH .



Σχήμα 2.3 Με την προσέγγιση με κωδικοποίηση δικτύου στις ακμές **BD** και **GH** αποστέλλονται γραμμικοί συνδυασμοί των εισερχόμενων ροών τους.

Οι παραλήπτες R_1, R_2, R_3 χρειάζεται να λύσουν ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων επί του F_q με άγνωστους τα σύμβολα σ_1, σ_2 . Άρα αυτός ο γραμμικός συνδυασμός των συμβόλων στις ακμές **BD** και **GH** επιτρέπει στους παραλήπτες να λαμβάνουν την πληροφορία με ρυθμό ίσο με δύο σύμβολα ανά χρονική σχισμή.

Ορισμός 2.2

Το τοπικό διάνυσμα κωδικοποίησης $c^\ell(e)$ που σχετίζεται με μια ακμή e είναι το διάνυσμα των συντελεστών επί του F_q με τους οποίους πολλαπλασιάζονται τα εισερχόμενα σύμβολα στην ακμή e . Η διάσταση του $c^\ell(e)$ είναι $1 \times |In(e)|$ όπου $|In(e)|$ είναι το σύνολο των εισερχόμενων ακμών στον πατέρα κόμβο της ακμής e .

Για παράδειγμα, στο Σχ.2.3 τα τοπικά διανύσματα κωδικοποίησης για τις ακμές **BD** και **GH** είναι $c^\ell(BD)=[a_1 \ a_2]$ και $c^\ell(GH)=[a_3 \ a_4]$. Για τους συντελεστές των διανυσμάτων κωδικοποίησης γίνεται υπόθεση ότι είναι άγνωστοι με τιμές που θα αποφασιστούν αργότερα.

Ορισμός 2.3

Το γενικό διάνυσμα κωδικοποίησης $c(e)$ που σχετίζεται με την ακμή e είναι το διάνυσμα των συντελεστών των συμβόλων από την πηγή που ρέουν (γραμμικά συνδυασμένα) μέσω της ακμής e . Η διάσταση του $c(e)$ είναι $1 \times h$.

Με το γενικό διάνυσμα κωδικοποίησης της ακμής e , ή για λόγους απλότητας το διάνυσμα κωδικοποίησης $c(e) = [c_1(e) \ c_2(e) \ \dots \ c_h(e)]$, υπολογίζεται η ροή συμβόλων μέσω της ακμής e μέσω της σχέσης

$$c_1(e)\sigma_1 + c_2(e)\sigma_2 + \dots + c_h(e)\sigma_h = [c_1(e) \ c_2(e) \ \dots \ c_h(e)] \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_h \end{bmatrix} \quad (2.1).$$

Έστω ο πίνακας \mathbf{A}_j του οποίου η i -οστή γραμμή είναι το διάνυσμα κωδικοποίησης της τελευταίας ακμής στο μονοπάτι (S_i, R_j) και ρ_i^j το σύμβολο στην ίδια ακμή. Τότε, για να ανακτήσει ο παραλήπτης τα σύμβολα σ_i , $1 \leq i \leq h$, πρέπει να λύσει το σύστημα γραμμικών εξισώσεων

$$\begin{bmatrix} \rho_1^j \\ \rho_2^j \\ \vdots \\ \rho_h^j \end{bmatrix} = \mathbf{A}_j \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_h \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Για να μπορούν όλοι οι παραλήπτες να ανακτήσουν τα σύμβολα από τις πηγές πρέπει να επιλεγούν τέτοια διανύσματα κωδικοποίησης ώστε οι πίνακες \mathbf{A}_j , $1 \leq j \leq N$, να είναι πλήρους τάξης. Άλλη μια συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι ότι το διάνυσμα κωδικοποίησης μιας ακμής εξόδου από ένα κόμβο πρέπει να ανήκει στο γραμμικό περίβλημα (linear span) των διανυσμάτων κωδικοποίησης των εισερχόμενων ακμών στον κόμβο. Για παράδειγμα, στο Σχ.2.3 το διάνυσμα κωδικοποίησης $c^\ell(GH) = [a_3 \ a_4]$ είναι στο γραμμικό περίβλημα των $c^\ell(BD) = [a_1 \ a_2]$ και $c^\ell(FG)$. Οι πίνακες \mathbf{A}_j μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των στοιχείων των τοπικών διανυσμάτων κωδικοποίησης $\{a_k\}$. Για το ίδιο

παράδειγμα οι πίνακες είναι οι $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ a_3 + a_1a_4 & a_2a_4 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix}$ και

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 + a_1a_4 & a_2a_4 \end{bmatrix}.$$

Αλγεβρική διατύπωση του κεντρικού θεωρήματος της κωδικοποίησης δικτύου

Στο γραμμική κωδικοποίηση δικτύου υπάρχουν τιμές επί ενός αρκετά μεγάλου πεπερασμένου σώματος F_q για τους συντελεστές $\{a_k\}$ των τοπικών διανυσμάτων κωδικοποίησης ώστε όλοι οι πίνακες \mathbf{A}_j , $1 \leq j \leq N$, που ορίζουν την πληροφορία που παρατηρούν οι παραλήπτες να είναι πλήρους τάξης.

Η σχεδίαση του κώδικα για το δίκτυο αφορά την εξεύρεση και ανάθεση των τοπικών διανυσμάτων κωδικοποίησης, ή ισοδύναμα, των διανυσμάτων κωδικοποίησης σε κάθε ακμή του γράφου. Άρα το πρόβλημα της σχεδίασης του κώδικα για το δίκτυο είναι η επιλογή τιμών για τους συντελεστές $\{a_k\}$, ώστε όλοι οι πίνακες \mathbf{A}_j , $1 \leq j \leq N$, να είναι πλήρους τάξης.

2.2 Αλγεβρική προσέγγιση της κωδικοποίησης δικτύου

2.2.1 Βασικοί Ορισμοί

Ορισμός 2.4

Μια περίπτωση εκπομπής $\{G=(V,E), S, R\}$ ικανοποιεί την ιδιότητα της πολυεκπομπής με ρυθμό h αν η τιμή της ελάχιστης τομής μεταξύ του S και κάθε παραλήπτη είναι τουλάχιστον ίση με h .

Ορισμός 2.5

Μια ανάθεση διανυσμάτων κωδικοποίησης είναι *εφικτή* αν το διάνυσμα κωδικοποίησης της ακμής e ανήκει στο γραμμικό περίβλημα των διανυσμάτων κωδικοποίησης των πατρικών ακμών $\text{In}(e)$. Ένας *έγκυρος* κώδικας για το δίκτυο είναι

οποιαδήποτε εφικτή ανάθεση διανυσμάτων κωδικοποίησης ώστε ο πίνακας A_j να είναι πλήρους τάξης για κάθε παραλήπτη R_j , $1 \leq j \leq N$.

Ορισμός 2.6

Ένα δίκτυο είναι *επιλύσιμο* αν υπάρχουν πράξεις τις οποίες οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να εκτελέσουν ώστε κάθε παραλήπτης να αντιλαμβάνεται τον ίδιο μέγιστο ρυθμό σαν να χρησιμοποιούσε αποκλειστικά όλους του πόρους του δικτύου. Ένα δίκτυο είναι *γραμμικώς επιλύσιμο* αν αυτές οι πράξεις είναι γραμμικές.

Ορισμός 2.7

Τα σημεία κωδικοποίησης (coding points) είναι οι ακμές του γράφου G όπου πρέπει να εκτελούνται οι πράξεις της κωδικοποίησης δικτύου.

Ορισμός 2.8

Ένας γράφος είναι ελάχιστος (minimal) υπό την ιδιότητα της πολυεκπομπής αν αφαιρώντας οποιαδήποτε ακμή παραβιάζεται η ιδιότητα αυτή.

Ο προσδιορισμός του ελάχιστου γράφου πριν την πολυεκπομπή επιτρέπει τη χρήση λιγότερων δικτυακών πόρων και τη μείωση του πλήθους των σημείων κωδικοποίησης.

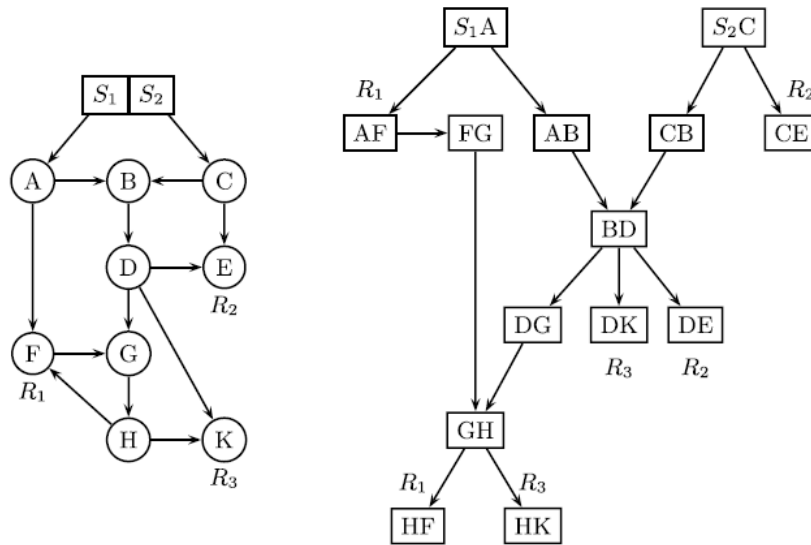
2.2.2 Το μοντέλο του γραμμικού γράφου

Ο γραμμικός γράφος $L(G)$ του γράφου G είναι ο γράφος όπου

- κάθε κορυφή του $L(G)$ αντιπροσωπεύει μια ακμή του G και
- δύο κορυφές του $L(G)$ είναι παρακαείμενες αν και μόνο αν οι αντίστοιχες ακμές του G προσπίπτουν στην ίδια κορυφή.

Για τη σχεδίαση του κώδικα για το δίκτυο πρέπει να καθοριστεί ποιος γραμμικός συνδυασμός συμβόλων από τις πηγές μεταφέρεται σε κάθε ακμή. Για την ευκολότερη κατανόηση της διαδικασίας ορίζεται ο γράφος $\gamma = \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq h \\ 1 \leq j \leq N}} L(S_i, R_j)$, όπου $L(S_i, R_j)$

είναι ο γραμμικός γράφος της διαδρομής (S_i, R_j) . Στο Σχ.2.4 φαίνεται ένα δίκτυο με τρεις παραλήπτες μαζί με το γραμμικό γράφο του.



Σχήμα 2.4 Ένα δίκτυο με δύο πηγές και τρεις παραλήπτες μαζί με το γραμμικό γράφο του

Κάθε κόμβος στο γράφο γ με είσοδο μόνο μια ακμή απλώς προωθεί το σύμβολο εισόδου του στις ακμές εξόδου του. Κάθε κόμβος με δύο ή περισσότερες ακμές εισόδου εκτελεί μια πράξη κωδικοποίησης στα εισερχόμενα σύμβολα και προωθεί το αποτέλεσμα στις ακμές εξόδου του. Αυτοί οι κόμβοι είναι τα σημεία κωδικοποίησης που ορίζονται στον Ορισμό 2.7. Χρησιμοποιώντας το γραμμικό γράφο φαίνονται εύκολα τα σημεία κωδικοποίησης τα οποία στο Σχ.2.4 είναι οι ακμές BD, GH.

2.2.3 Αλγεβρική προσέγγιση

Στο μοντέλο του γραμμικού γράφου κάθε ακμή μεταφέρει ετικέτα 1 ή τη μοναδική ετικέτα που αντιστοιχεί σε μια μεταβλητή στο $\{\alpha_k\}$. Η βασική ιδέα είναι κάθε κορυφή του γραμμικού γράφου (ακμή στον αρχικό γράφο) να γίνεται αντιληπτή ως στοιχείο μνήμης που αποθηκεύει ένα σύμβολο πληροφορίας. Για συγκεκριμένο παραλήπτη R_j ο γραμμικός γράφος συμπεριφέρεται ως γραμμικό σύστημα με h εισόδους (οι h πηγές) και h εξόδους (που παρατηρεί ο ίδιος) και έως $m = |E|$ στοιχεία μνήμης. Το σύστημα αυτό περιγράφεται από τις εξισώσεις κατάστασης (state-space equations) πεπερασμένης διάστασης

$$\mathbf{s}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{s}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k, \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{C}_j\mathbf{s}_k + \mathbf{D}_j\mathbf{u}_k, \quad (2.3)$$

όπου \mathbf{s}_k είναι το $m \times 1$ διάνυσμα κατάστασης, \mathbf{y}_k το $h \times 1$ διάνυσμα εξόδου, \mathbf{u}_k είναι το $h \times 1$ διάνυσμα εισόδου και οι πίνακες \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C}_j και \mathbf{D}_j έχουν τις κατάλληλες

διαστάσεις. Ο πίνακας μεταφοράς του γραμμικού συστήματος προκύπτει

$$\mathbf{G}_j(D) = \mathbf{D}_j + \mathbf{C}_j(D^{-1}\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (2.4),$$

όπου D είναι ο τελεστής ενδιάμεσης καθυστέρησης. Αν υποθεθεί μοναδιαία καθυστέρηση ο πίνακας μεταφοράς για τον παραλήπτη R_j είναι $\mathbf{A}_j = \mathbf{D}_j + \mathbf{C}_j(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$.

Ο πίνακας \mathbf{A} είναι κοινός για όλους τους παραλήπτες και περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα στοιχεία μνήμης (τοπολογία του δικτύου). Τα στοιχεία του είναι δείκτες των καταστάσεων (κόμβοι στο γραμμικό γράφο) Ένα στοιχείο του \mathbf{A} είναι μη μηδενικό αν και μόνο αν υπάρχει μια ακμή στο γραμμικό γράφο μεταξύ των καταχωρισμένων καταστάσεων. Τα μη μηδενικά στοιχεία είναι ίσα με 1 ή με κάποια προσδιοριστέα τιμή $\{\alpha_k\}$. Η σχεδίαση του κώδικα για το δίκτυο αφορά την επιλογή τιμών για τις μεταβλητές του πίνακα \mathbf{A} .

Ο πίνακας \mathbf{B} είναι επίσης κοινός για όλους τους παραλήπτες και περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι εισοδοί (πηγές) συνδέονται στο γράφο. Οι πίνακες \mathbf{C}_j και \mathbf{D}_j περιγράφουν το πώς οι έξοδοι που παρατηρεί ο παραλήπτης R_j εξαρτώνται από την κατάσταση των μεταβλητών και των εισόδων αντίστοιχα. Η διάσταση των \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C}_j και \mathbf{D}_j εξαρτάται από τον αριθμό των ακμών στο γράφο που μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος.

Θεώρημα 2.3

Για ένα δίκτυο πολυεκπομπής (υπό τις προϋποθέσεις του μοντέλου που τέθηκαν στο εδάφιο 2.2.1) ένα αλφάβητο μεγέθους $q > N$ είναι πάντα επαρκές, δηλαδή για ένα δίκτυο πολυεκπομπής ένα αλφάβητο μεγέθους q μεγαλύτερου του πλήθους των παραληπτών είναι πάντα επαρκές. Επομένως, επιλέγοντας συντελεστές επί ενός σώματος μεγέθους q προκύπτουν πίνακες μεταφοράς πλήρους τάξης.

2.3 Τύποι δρομολόγησης και κωδικοποίησης δικτύου

2.3.1 Δρομολόγηση

Η διαδικασία της δρομολόγησης αναφέρεται στην περίπτωση όπου οι ροές αποστέλλονται χωρίς κωδικοποίηση από τις πηγές στους παραλήπτες και οι ενδιάμεσοι κόμβοι απλά προωθούν τις εισερχόμενες ροές πληροφορίας.

Υπάρχουν οι ακόλουθες μέθοδοι δρομολόγησης:

- 1) Ακέραια δρομολόγηση (Integral routing), όπου σε κάθε ακμή με μοναδιαία χωρητικότητα απαιτείται να δρομολογείται το πολύ ένα ψηφίο.
- 2) Κλασματική δρομολόγηση (Fractional routing), που επιτρέπει σε πολλαπλούς κλασματικούς ρυθμούς μετάδοσης από διάφορες πηγές να μοιράζονται την ίδια ακμή αρκεί το άθροισμά τους να μην υπερβαίνει τη χωρητικότητα της ακμής.
- 3) Διανυσματική δρομολόγηση (Vector routing), που μπορεί να είναι είτε ακέραια είτε κλασματική και μπορεί να αλλάζει στην αρχή μιας χρονικής σχισμής.

2.3.2 Κωδικοποίηση δικτύου

Με την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου επιτρέπεται στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου να εκτελούν πράξεις κωδικοποίησης αντί απλώς να προωθούν τα μηνύματα. Έστω ότι η πηγή πρόκειται να στείλει ένα μήνυμα μήκους L . Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για την κωδικοποίηση δικτύου.

- 1) Με τη μέθοδο του της γραμμικής κωδικοποίησης δικτύου ένα σύνολο από m συνεχόμενα bit αντιμετωπίζονται ως ένα σύμβολο επί του F_q με $q=2^m$. Για την κωδικοποίηση απαιτούνται γραμμικές πράξεις επί του F_q . Οι ίδιες πράξεις εφαρμόζονται σε κάθε ένα από τα $\frac{L}{m}$ σύμβολα του μηνύματος. Άρα κάθε εισερχόμενο μήνυμα σε σημείο κωδικοποίησης πολλαπλασιάζεται με ένα σύμβολο επί του F_q και προστίθεται σε άλλα εισερχόμενα μηνύματα.

- 2) Όταν εφαρμόζεται η διανυσματική κωδικοποίηση δικτύου κάθε πακέτο αντιμετωπίζεται ως διάνυσμα μήκους $\frac{L}{m}$ με σύμβολα επί του F_{2^m} με το κάθε σύμβολο να αποτελείται από m bits. Για την κωδικοποίηση απαιτούνται γραμμικές πράξεις στο διανυσματικό χώρο $F_{2^m}^{L/m}$. Κάθε εισερχόμενο μήνυμα πολλαπλασιάζεται με ένα $\frac{L}{m} \times \frac{L}{m}$ πίνακα στο F_{2^m} και υστέρα προστίθεται σε άλλα μηνύματα. Επομένως, τα διανύσματα κωδικοποίησης είναι πίνακες επί του χώρου $F_{2^m}^{\frac{L}{m} \times \frac{L}{m}}$ και τα μηνύματα είναι διανύσματα επί του χώρου $F_{2^m}^{L/m}$. Ο διανυσματικός χώρος $F_{2^m}^{L/m}$ αποτελείται από διανύσματα μήκους $\frac{L}{m}$ με στοιχεία επί του F_{2^m} και ο χώρος $F_{2^m}^{\frac{L}{m} \times \frac{L}{m}}$ αποτελείται από πίνακες μεγέθους $\frac{L}{m} \times \frac{L}{m}$ με στοιχεία επί του F_{2^m} .
- 3) Με τη μέθοδο της μη γραμμικής κωδικοποίησης δικτύου οι ενδιάμεσοι κόμβοι επιτρέπεται να συνδυάζουν τα μηνύματα χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε πράξη.

Σε δίκτυα όπου το κεντρικό θεώρημα της κωδικοποίησης δικτύου δεν μπορεί να εφαρμοστεί και δεν υπάρχει λύση χρησιμοποιώντας γραμμική κωδικοποίηση δικτύου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διανυσματική κωδικοποίηση δικτύου ή η μη γραμμική κωδικοποίηση δικτύου. Υπάρχουν δίκτυα τα οποία είναι επιλύσιμα χρησιμοποιώντας μόνο μη γραμμικές πράξεις. Το μέγεθος του αλφάβητου της λύσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά με μετάβαση από τη γραμμική κωδικοποίησης δικτύου στη διανυσματική και στη μη γραμμική.

2.4 Μέθοδοι σχεδίασης του κώδικα δικτύου σε περιπτώσεις πολυεκπομπής

Υπάρχουν αλγόριθμοι σχεδίασης του κώδικα δικτύου οι οποίοι είναι είτε συγκεντρωτικοί είτε αποκεντρωμένοι. Οι συγκεντρωτικοί στηρίζονται σε πληροφορία για τη δομή ολόκληρου του δικτύου, ενώ οι αποκεντρωμένοι απαιτούν μόνο τοπική

πληροφορία και δεν εξαρτώνται από την τοπολογία του δικτύου. Έστω περίπτωση πολυεκπομπής $\{G=(V,E),S,R\}$. Τα πρώτα κοινά βήματα των αλγορίθμων που θα περιγραφούν είναι τα εξής:

- 1) Εύρεση h διαδρομών ξένων ως προς τις ακμές $(S_i, R_j), 1 \leq i \leq h$ από τις πηγές στους παραλήπτες, του συνδυαστικού γράφου $G' = \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq h \\ 1 \leq j \leq N}} (S_i, R_j)$, του συνόλου των σημείων κωδικοποίησης C , και
- 2) του ελάχιστου γράφου

Το Βήμα 1 είναι απαραίτητο για όλους τους αλγόριθμους που θα παρουσιαστούν. Για να εφαρμοστεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε αλγόριθμος μέγιστης ροής, όπως αυτός που περιγράφεται στο Θεώρημα 2.1. Μια διαδρομή αυξανόμενης ροής μπορεί να βρεθεί σε χρόνο $O(|E|)$, άρα η συνολική πολυπλοκότητα είναι $O(|E|hN)$.

Το Βήμα 2 δεν είναι απαραίτητο αλλά με την εκτέλεσή του μπορεί να μειωθούν σημαντικά οι απαιτούμενοι πόροι του δικτύου, όπως το πλήθος των σημείων κωδικοποίησης και των χρησιμοποιούμενων ακμών από τη ροή πληροφορίας. Ο ανωτέρω αλγόριθμος απομακρύνει επαναληπτικά κάθε ακμή και ελέγχει αν η συνθήκη ελάχιστης τομής για κάθε παραλήπτη ικανοποιείται ακόμα. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί $O(|E|^2 hN)$ πράξεις.

2.4.1 Συγκεντρωτικοί αλγόριθμοι

2.4.1.1 Ο αλγόριθμος Γραμμικής Ροής Πληροφορίας (Linear Information Flow)

Ο αλγόριθμος Γραμμικής Ροής Πληροφορίας είναι ένας άπληστος αλγόριθμος που βασίζεται στην παρατήρηση ότι η επιλογή των διανυσμάτων κωδικοποίησης πρέπει γίνεται έτσι ώστε να διατηρείται η ιδιότητα πολυεκπομπής του δικτύου. Ο αλγόριθμος επισκέπτεται τα σημεία κωδικοποίησης με βάση την τοπολογία του δικτύου και τους αναθέτει διανύσματα κωδικοποίησης. Κάθε διάνυσμα κωδικοποίησης που έχει ανατεθεί διατηρεί την ιδιότητα πολυεκπομπής για όλους τους παραλήπτες μέχρι το σημείο κωδικοποίησης στο οποίο έχει ανατεθεί.

2.4.1.2 Αλγόριθμοι συμπλήρωσης πινάκων

Οι αλγόριθμοι συμπλήρωσης πινάκων αφορούν τη συμπλήρωση μικτών πινάκων, δηλαδή πινάκων με στοιχεία άγνωστες μεταβλητές και αριθμούς. Για το πρόβλημα της σχεδίασης της κωδικοποίησης για το δίκτυο η επιθυμητή ιδιότητα είναι ότι οι N πίνακες μεταφοράς από την πηγή σε κάθε παραλήπτη που έχουν κοινές μεταβλητές πρέπει να είναι πλήρους τάξης.

2.4.2 Αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι

2.4.2.1 Τυχαία Ανάθεση

Η βασική ιδέα του αλγόριθμου αυτού είναι η λειτουργία επί ενός πεπερασμένου σώματος F_q με μέγεθος q αρκετά μεγάλο για τυχαίες επιλογές των συντελεστών των διανυσμάτων κωδικοποίησης. Ο στόχος του αλγόριθμου αυτού είναι να προσφέρει με μεγάλη πιθανότητα μια έγκυρη λύση. Ο αλγόριθμος δεν απαιτεί συγκεντρωτική ή τοπική πληροφορία, καθώς οι κόμβοι απλά επιλέγουν τους μη μηδενικούς συντελεστές των διανυσμάτων κωδικοποίησης ανεξάρτητα και ομοιόμορφα από το F_q . Η πιθανότητα λάθους μπορεί να γίνει αρκετά μικρή αν επιλεγεί ένα κατάλληλα μεγάλο μέγεθος αλφάβητου, όπως προκύπτει από το παρακάτω θεώρημα.

Θεώρημα 2.4

Έστω μια περίπτωση πολυεκπομπής $\{G=(V,E), S, R\}$ με $N = |R|$ παραλήπτες, όπου τα στοιχεία των τοπικών διανυσμάτων κωδικοποίησης επιλέγονται ανεξάρτητα και ομοιόμορφα από ένα σώμα F_q με μέγεθος $q > N$. Η πιθανότητα όλοι οι παραλήπτες (N το πλήθος) να μπορούν να αποκωδικοποιήσουν όλες τις πηγές (h το πλήθος) είναι τουλάχιστον $(1 - N/q)^\eta$, όπου $\eta \leq |E|$ είναι ο μέγιστος αριθμός σημείων κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται από οποιοδήποτε παραλήπτη.

Η υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου χρησιμοποιώντας τυχαία ανάθεση μπορεί να οδηγήσει σε κωδικοποίηση μεγαλύτερου αλφάβητου από το ελάχιστο αναγκαίο. Είναι όμως αποκεντρωμένη και εύκολα προσαρμοζόμενη σε πιθανές αλλαγές του δικτύου. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για πληθώρα εφαρμογών όπως τα δυναμικά μεταβαλλόμενα δίκτυα, αφού η σχεδίαση του κώδικα μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από την τοπολογία του δικτύου.

2.4.2.2 Η κωδικοποίηση δικτύου στην πράξη: Εισαγωγή γενεών

Η πληροφορία αποστέλλεται υπό μορφή μηνυμάτων έκαστο των οποίων από L bit. Ομάδες από m συνεχόμενα bit αντιμετωπίζονται ως σύμβολα ενός σώματος F_q με $q = 2^m$. Για την εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου πραγματοποιούνται γραμμικές πράξεις επί του F_q . Οι ίδιες πράξεις εφαρμόζονται σε κάθε ένα από τα L/m σύμβολα κάθε μηνύματος.

Για να αντιμετωπιστεί η έλλειψη συγχρονισμού, τα μηνύματα χωρίζονται σε γενεές. Τα μηνύματα συνδυάζονται μόνο με άλλα μηνύματα της ίδιας γενεάς. Το πλήθος της γενεάς ενσωματώνεται στην επικεφαλίδα κάθε μηνύματος. Αν χρησιμοποιηθεί το πεπερασμένο σώμα με $q = 2^8$, τότε κάθε byte αντιμετωπίζεται ως σύμβολο οπότε για h πηγές προκύπτουν h σύμβολα και επομένως h byte πλεονασμού στην επικεφαλίδα. Αν το μήκος του ωφέλιμου φορτίου είναι l byte, ο πλεονασμός λόγω επικεφαλίδας είναι $\frac{h}{l}$ ανά μήνυμα.

Κάθε γενεά είναι ένας $n \times m$ πίνακας \mathbf{B} , οι γραμμές του οποίου είναι τα n μηνύματα της κάθε γενιάς και οι στήλες τα m byte κάθε μηνύματος δεδομένων. Συνήθως επιλέγονται m και n τέτοια ώστε $m \gg n$. Οι λειτουργίες κωδικοποίησης παράγουν ένα γραμμικό συνδυασμό των αρχικών μηνυμάτων $\mathbf{X} = \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{B}$, όπου \mathbf{R}_y είναι ένας $n \times n$ πίνακας αποτελούμενος από τυχαία επιλεγμένους συντελεστές πάνω στο σώμα F_q . Τα κωδικοποιημένα μηνύματα μαζί με τους συντελεστές κωδικοποίησης τοποθετούνται στο ίδιο μήνυμα και δρομολογούνται προς τον προορισμό. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να παράγουν νέο κωδικοποιημένο μήνυμα κωδικοποιώντας ξανά τα ήδη κωδικοποιημένα μηνύματα ως $\mathbf{Y} = \mathbf{R}'_y \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{B} = \mathbf{R}'_y \cdot \mathbf{B}$. Άρα οι αρχικοί συντελεστές \mathbf{R}_y αντικαθίστανται από τους \mathbf{R}'_y . Για να μειωθούν οι άσκοπες μεταδόσεις οι κόμβοι αποθηκεύουν ένα εισερχόμενο μήνυμα μόνο αν είναι νέο και γραμμικώς ανεξάρτητο από τα ήδη ληφθέντα μηνύματα. Τα μηνύματα αυτά αναφέρονται ως πρωτότυπα (innovative).

Ως μέγεθος της γενεάς μπορεί να θεωρηθεί το πλήθος των πηγών h σε συγχρονισμένα δίκτυα, αφού από αυτό κρίνεται το μέγεθος των πινάκων που χρειάζεται να αντιστρέψουν οι παραλήπτες για να αποκωδικοποιήσουν την πληροφορία. Από τη μια πλευρά, το μέγεθος της γενιάς είναι επιθυμητό να είναι μικρό - αφού από αυτό εξαρτάται ο αριθμός των πράξεων επί του F_q και επομένως

να μειώνει την πολυπλοκότητα και την καθυστέρηση που εισάγεται λόγω της κωδικοποίησης δικτύου. Από την άλλη πλευρά, το μέγεθος της γενεάς επηρεάζει πόσο καλά «αναμειγνύονται» τα μηνύματα, με συνέπεια να είναι επιθυμητό ένα μεγάλο μέγεθος γενεάς. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθεί μεγάλο πλήθος από γενεές με μικρό μέγεθος, οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να λάβουν μηνύματα που προορίζονται για τους ίδιους παραλήπτες αλλά ανήκουν σε διαφορετικές γενεές. Τέλος, το μέγεθος της γενεάς χρησιμοποιείται ώστε να λαμβάνονται υπόψη διαφορές στους τύπους των δεδομένων, την προτεραιότητά τους, τις χρονικές στιγμές που δημιουργήθηκαν.

2.4.2.3 Κώδικες μετάθεσης και πρόσθεσης (Permute-and-Add)

Οι κώδικες αυτοί εκτελούν διανυσματική κωδικοποίηση δικτύου χρησιμοποιώντας τυχαία ανάθεση πάνω στο σώμα \mathbb{F}_2^L . Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα κωδικοποίησης οι κώδικες αυτοί δεν επιλέγουν τυχαία τους $L \times L$ πίνακες αλλά περιορίζονται στην επιλογή ανάμεσα σε πίνακες μετάθεσης (permutation). Κάθε πηγή παράγει ένα δυαδικό αρχείο μήκους L . Οι κώδικες μετάθεσης και πρόσθεσης επιτρέπουν στους ενδιάμεσους κόμβους να μεταθέτουν κάθε από τα εισερχόμενα δυαδικά μηνύματα και ύστερα να τα αθροίζουν δυαδικά (xor λειτουργία), ώστε να δημιουργηθεί το νέο μήνυμα προς αποστολή. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι επιλέγουν τυχαία ποιά από τις $L!$ πιθανές μεταθέσεις θα εφαρμόσουν σε κάθε εισερχόμενο μήνυμα. Κάθε παραλήπτης λύνει ένα σύνολο $hL \times hL$ εξισώσεων για να ανακτήσει τα δεδομένα πληροφορίας.

Θεώρημα 2.5

Έστω h η δυαδική χωρητικότητα ελάχιστης τομής. Για κάθε $\varepsilon > 0$, ο κώδικας πρόσθεσης και μετάθεσης πετυχαίνει ρυθμό $R = h - (|E| + 1)\varepsilon$ με πιθανότητα μεγαλύτερη από $1 - 2^{-L\varepsilon + \log(N) \frac{|E| + h}{L + 1}}$.

2.5 Πόροι για την κωδικοποίηση δικτύου

Αφού δείχθηκε πώς μπορούν να σχεδιαστούν κώδικες δικτύου, είναι φυσικό να ερευνηθούν οι πόροι που απαιτούνται για να λειτουργήσουν τα δίκτυα. Όσο μεγαλύτερη είναι η πολυπλοκότητα της κωδικοποίησης δικτύου τόσο περισσότεροι πόροι καταναλώνονται στο δίκτυο. Η πολυπλοκότητα της εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου διακρίνεται στην πολυπλοκότητα εγκατάστασης και στην πολυπλοκότητα λειτουργίας.

Η πολυπλοκότητα εγκατάστασης αφορά τη σχεδίαση του σχήματος για το την κωδικοποίηση δικτύου, η οποία περιλαμβάνει την επιλογή των διαδρομών μέσω των οποίων ρέει η πληροφορία και την απόφαση για το ποιες λειτουργίες θα εκτελούν οι κόμβοι. Σε ένα δίκτυο χρονικά αμετάβλητο αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μόνο μια φορά, ενώ σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο δίκτυο πρέπει να ληφθεί υπόψη η πολυπλοκότητα της προσαρμογής του σχήματος σε ενδεχόμενες αλλαγές.

Η πολυπλοκότητα λειτουργίας αφορά το κόστος λειτουργίας για τη χρήση της κωδικοποίησης δικτύου, δηλαδή την ποσότητα των υπολογιστικών και δικτυακών πόρων που απαιτούνται ανά μονάδα πληροφορίας που παραδίδεται επιτυχώς.

Η πολυπλοκότητα σχετίζεται με το σχήμα της κωδικοποίησης δικτύου που εφαρμόζεται. Για τη γραμμική κωδικοποίηση δικτύου ο παραλήπτης πρέπει να λύσει ένα σύστημα $h \times h$ γραμμικών εξισώσεων και απαιτούνται $O(h^3)$ πράξεις επί του F_q αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος απαλοιφής του Gauss. Ο γραμμικός συνδυασμός των ροών πληροφορίας απαιτεί $O(h^2)$ πράξεις στο πεπερασμένο σώμα F_q . Η πολυπλοκότητα επηρεάζεται επιπλέον από:

- 1) Το μέγεθος του πεπερασμένου σώματος (δηλαδή το μέγεθος του αλφάβητου) του κώδικα επί του οποίου γίνονται οι πράξεις. Το κόστος των πράξεων στο πεπερασμένο σώμα αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους του αλφάβητου του κώδικα. Επιπλέον, το μέγεθος του αλφάβητου επηρεάζει τον απαιτούμενο χώρο αποθήκευσης στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου.
- 2) Το πλήθος των σημείων κωδικοποίησης στο δίκτυο όπου απαιτείται να εκτελεστούν λειτουργίες κωδικοποίησης. Στόχος ενός σχήματος κωδικοποίησης δικτύου πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση των σημείων κωδικοποίησης στο δίκτυο, καθώς οι κόμβοι που συνδυάζουν τις εισερχόμενες ροές πληροφορίας αφενός είναι περισσότερο δαπανηροί από τους κόμβους

που απλώς αντιγράφουν και προωθούν τα μηνύματα, και αφετέρου αυξάνουν την καθυστέρηση μετάδοσης.

2.5.1 Όρια στο μέγεθος του αλφάβητου του κώδικα

Για δίκτυα στα οποία απαιτείται μόνο δρομολόγηση το δυαδικό αλφάβητο είναι αρκετό. Για τα δίκτυα στα οποία εφαρμόζεται κωδικοποίηση δικτύου το μέγεθος του αλφάβητου εξαρτάται από το είδος του κώδικα δικτύου που εφαρμόζεται, το πλήθος των πηγών και το πλήθος των παραλήπτων. Ως μέγιστο ορίζεται το μέγεθος του αλφάβητου που είναι επαρκές αλλά όχι αναγκαίο σε περίπτωση πολυεκπομπής $\{G,S,R\}$ για όλα τα δίκτυα με h πηγές και N παραλήπτες.

Το πρόβλημα της ανάθεσης διανυσμάτων κωδικοποίησης στις κορυφές του γράφου σχετίζεται με το πρόβλημα χρωματισμού των κορυφών. Ο χρωματισμός των κορυφών είναι η ανάθεση χρωμάτων στις κορυφές ενός γράφου έτσι ώστε όλες οι ακμές να έχουν άκρα διαφορετικού χρώματος.

Ορισμός 2.9

Ο χρωματικός αριθμός ενός γράφου είναι ο ελάχιστος αριθμός χρωμάτων που απαιτούνται για να χρωματιστούν οι κορυφές του γράφου ώστε όλες οι ακμές να έχουν άκρα διαφορετικού χρώματος. Ένας γράφος είναι k -χρωματικός αν ο χρωματικός αριθμός του είναι ακριβώς k .

Το πρόβλημα της εύρεσης του χρωματικού αριθμού ενός γράφου είναι NP δύσκολο. Άρα η εύρεση του ελάχιστου μεγέθους του αλφάβητου είναι και αυτό NP δύσκολο πρόβλημα.

Θεώρημα 2.6

Για δίκτυα με δύο πηγές και N παραλήπτες το μέγεθος του αλφάβητου F_q $\left\lceil \sqrt{2N-7/4} + 1/2 \right\rceil$ είναι επαρκές για οποιοδήποτε ελάχιστο γράφο. Υπάρχουν περιπτώσεις δικτύων για τις οποίες το μέγεθος αλφάβητου αυτό είναι αναγκαίο.

Θεώρημα 2.7

Για όλους τους γράφους με h πηγές και N παραλήπτες ένα αλφάβητο με μέγεθος μεγαλύτερο από N είναι πάντα επαρκές.

Στην πραγματικότητα, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν παραδείγματα δικτύων για τα οποία το μέγεθος αλφάβητου πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $O(\sqrt{N})$.

2.5.2 Όρια στον αριθμό των σημείων κωδικοποίησης

Το πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου αριθμού των σημείων κωδικοποίησης είναι NP δύσκολο στην πλειοψηφία των περιπτώσεων.

Θεώρημα 2.8

Έστω μια περίπτωση πολυεκπομπής $\{G,S,R\}$. Τότε, είναι δυνατή η σχεδίαση ενός αποδοτικού κώδικα δικτύου με $|C| \leq h^3 N^2$, όπου h είναι ο αριθμός των πηγών και N ο αριθμός των παραληπτών και $|C|$ το πλήθος των κωδικών σημείων για τον κώδικα δικτύου.

2.6 Δίκτυα με καθυστέρηση

Ως τώρα είχε γίνει υπόθεση ότι στο δίκτυο δεν υπάρχει καθυστέρηση και οι κόμβοι λαμβάνουν τις εισόδους τους και ταυτόχρονα παράγουν τις εξόδους τους. Στην πραγματικότητα οι ζεύξεις εισάγουν μεταβαλλόμενη καθυστέρηση η οποία μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα συγχρονισμού στους κώδικες για το δίκτυο. Υπάρχουν δύο τρόποι να αντιμετωπιστεί η καθυστέρηση.

Στην πρώτη προσέγγιση οι κόμβοι αποθηκεύουν τα ληφθέντα μηνύματα της ίδιας γενεάς, τα συνδυάζουν και ενσωματώνουν το αντίστοιχο διάλυμα κωδικοποίησης στα εξερχόμενα μηνύματα. Οι κόμβοι πρέπει να γνωρίζουν με ποιό ρυθμό θα εισάγουν τα κωδικοποιημένα μηνύματα στις εξερχόμενες ζεύξεις. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδανικά κατάλληλη σε δυναμικά μεταβαλλόμενα δίκτυα, όπου μπορεί να υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στην καθυστέρηση.

Η δεύτερη προσέγγιση είναι κατάλληλη για δίκτυα με μικρές μεταβολές στην καθυστέρηση. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι αναμένουν για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (μεγαλύτερο από την αναμενόμενη καθυστέρηση στις ζεύξεις) ώστε να λάβουν τα μηνύματα πριν τα συνδυάσουν. Σε αυτήν την περίπτωση, η λειτουργία του δικτύου μπορεί να διαμορφωθεί συσχετίζοντας μια μονάδα καθυστέρησης D (ή μεγαλύτερη) είτε με κάθε ακμή είτε μόνο με ακμές οι οποίες είναι σημεία κωδικοποίησης.

Η συσχέτιση των ζεύξεων με μια μονάδα καθυστέρησης σημαίνει ότι αντί να χρησιμοποιούνται πίνακες και διανύσματα με στοιχεία από το σώμα F_q , χρησιμοποιούνται πίνακες με στοιχεία που είναι πολώνυμα του τελεστή D της καθυστέρησης με συντελεστές από το σώμα F_q και ανήκουν στο δακτύλιο πολωνύμων $F_q[D]$. Επιπλέον, για δίκτυα με κύκλους χρησιμοποιούνται διανύσματα πάνω στο σώμα των ρητών συναρτήσεων πολωνύμων πάνω από το $F_q[D]$, δηλαδή στοιχεία του $F_q(D) = \left\{ \frac{a(D)}{b(D)}, a(D), b(D) \in F_q[D], b(D) \neq 0 \right\}$. Σε αυτό το πλαίσιο ο στόχος της σχεδίασης του κώδικα είναι να επιλεγούν τέτοια διανύσματα κωδικοποίησης ώστε κάθε παραλήπτης R_j να παρατηρεί έναν αντιστρέψιμο πίνακα A_j .

2.6.1 Αλγόριθμοι

Υπάρχουν δύο τρόποι προσέγγισης της σχεδίασης κώδικα δικτύου με καθυστέρηση:

- (1) Τα διανύσματα κωδικοποίησης έχουν στοιχεία από το F_q . Σε αυτήν την προσέγγιση οι ενδιάμεσοι κόμβοι επιτρέπεται να συνδυάζουν γραμμικά τις εισερχόμενες ροές μόνο επί του F_q , αλλά δεν εισάγουν πρόσθετη καθυστέρηση. Η καθυστέρηση εισάγεται μόνο μέσω των ζεύξεων του δικτύου.
- (2) Τα διανύσματα κωδικοποίησης έχουν στοιχεία πάνω στο $F_q[D]$ ή στο $F_q(D)$. Σε αυτήν την προσέγγιση οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να αποθηκεύουν την εισερχόμενη πληροφορία και να μεταδίδουν γραμμικούς συνδυασμούς των τρεχουσών και παρελθουσών εισόδων τους και ενδεχομένως να εισάγουν πρόσθετη καθυστέρηση. Τα πλεονεκτήματα της

προσέγγισης αυτής είναι η λειτουργία σε μικρού μεγέθους πεπερασμένο σώμα όπως το δυαδικό σώμα.

Και στις δύο προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν αποδοτικά οι αλγόριθμοι που αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.4. Στα δίκτυα με καθυστέρηση είναι επαρκής η επιλογή διανυσμάτων κωδικοποίησης ώστε όλοι οι παραλήπτες να λαμβάνουν η γραμμικούς συνδυασμούς που τους επιτρέπουν να αποκωδικοποιήσουν η σύμβολα πληροφορίας, ένα από κάθε πηγή, χωρίς να είναι απαραίτητο τα η σύμβολα να δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής σχισμής. Η χρήση της κωδικοποίησης δικτύου μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και επομένως μείωση της καθυστέρησης, αλλά μπορεί και να οδηγήσει σε αύξηση της καθυστέρησης, καθώς κάποιος παραλήπτης μπορεί να χρειάζεται να περιμένει την άφιξη αρκετών κωδικοποιημένων συμβόλων πριν την αποκωδικοποίηση.

2.7 Κωδικοποίηση δικτύου σε ασύρματα δίκτυα

Η κωδικοποίηση δικτύου εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες ευρυεκπομπής στα ασύρματα δίκτυα και μπορεί να συμβάλλει στην προσαρμοστικότητα σε δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, στην ορθότερη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης και της ενέργειας για μεταδόσεις, και στη μείωση της καθυστέρησης. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται κάθε ένα από τα παραπάνω πλεονεκτήματα.

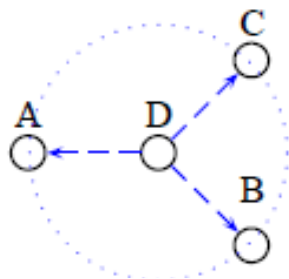
2.7.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Ο συνδυασμός της ευρυεκπομπής με την κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερα σχήματα δρομολόγησης σε σχέση με την ενέργεια. Η ενεργειακή απόδοση επηρεάζει το χρόνο ζωής των κόμβων και είναι πολύ σημαντική για δίκτυα ad-hoc και δίκτυα αισθητήρων. Η κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να επιτύχει καλύτερη σχέση ανταλλαγής μεταξύ του ποσοστού παράδοσης μηνυμάτων και του αριθμού απαιτούμενων μεταδόσεων. Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί σχεδιάζοντας έναν κώδικα για το δίκτυο όπου κάθε ακμή έχει ένα κόστος το οποίο είναι συνάρτηση του ρυθμού δεδομένων. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε ακμή. Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους είναι αρκετά υπολογιστικά δύσκολο αν δεν εφαρμοστεί η

κωδικοποίηση δικτύου. Αν χρησιμοποιηθεί η κωδικοποίηση δικτύου ένα πρόβλημα πολυεκπομπής μπορεί να λυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο διατυπώνοντας ένα γραμμικό πρόγραμμα, ενώ στη περίπτωση δρομολόγησης το πρόβλημα είναι NP-complete.

2.7.2 Δικαιοσύνη και καθυστέρηση

Στα ασύρματα δίκτυα η ποιότητα του σήματος μεταβάλλεται λόγω των διαλείψεων και των παρεμβολών. Η μεταβολή της ποιότητας του σήματος γίνεται αντιληπτή ως απώλεια μηνυμάτων στα ανώτερα στρώματα και μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή των ρυθμών μετάδοσης σε μικρά χρονικά διαστήματα. Ο συνδυασμός της κωδικοποίησης δικτύου με την ευρυεκπομπή σε τέτοιου τύπου περιβάλλοντα διάδοσης μπορεί να εξομαλύνει τις διαφορές των ρυθμών μετάδοσης που αντιλαμβάνονται οι παραλήπτες. Στο Σχ.2.5 απεικονίζεται ένα δίκτυο με τέσσερις κόμβους. Ο κόμβος D μεταδίδει μηνύματα με ευρυεκπομπή και κυκλική δρομολόγηση (Round Robin Routing) τα οποία προορίζονται για τους κόμβους A, B, C. Λόγω των απωλειών μηνυμάτων στο διάλυο οι κόμβοι αυτοί μπορεί να λάβουν το μήνυμα που προορίζεται για αυτούς με πιθανότητα p . Με την ίδια πιθανότητα μπορεί να λάβουν μηνύματα που προορίζονται για άλλους κόμβους. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται ένα τέτοιο σενάριο. Ο D μεταδίδει μηνύματα και για τους τρεις κόμβους. Μετά από έξι χρονικές σχισμές ο A δεν έχει λάβει κάποιο μήνυμα από τη ροή $x_A = \{x_A^i\}$ που τον αφορά, αλλά αντίθετα ο B έχει λάβει μήνυμα από αυτή τη ροή χωρίς να τον αφορά. Ακόμα, ο B λαμβάνει ένα μήνυμα από τη ροή $x_B = \{x_B^i\}$ που τον αφορά και ο C δύο μηνύματα από τη ροή $x_C = \{x_C^i\}$. Άρα οι ρυθμοί που αντιλαμβάνονται οι κόμβοι A, B, C στην περίπτωση αυτή είναι κανένα μήνυμα ανά έξι χρονικές σχισμές, ένα μήνυμα ανά έξι χρονικές σχισμές και δύο μηνύματα ανά έξι χρονικές σχισμές αντίστοιχα. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται ένα δεύτερο σενάριο με χρήση κωδικοποίησης δικτύου. Σε αυτό το σενάριο ο κόμβος D, αφού μεταδώσει ένα μήνυμα από τη ροή που αφορά κάθε κόμβο, μεταδίδει γραμμικούς συνδυασμούς των μηνυμάτων αυτών ώστε κάθε μετάδοση να προσφέρει χρήσιμη πληροφορία για όλους τους κόμβους που τα λαμβάνουν. Οι κόμβοι έχοντας λάβει τουλάχιστον τρία μηνύματα μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τη χρήσιμη γι' αυτούς πληροφορία. Στο σενάριο του Πίνακα 2.1 με χρήση κωδικοποίησης δικτύου όλοι οι κόμβοι έχουν λάβει ένα μήνυμα μετά την έκτη χρονική σχισμή.



Σχήμα 2.5 : Οι κόμβοι A,B και C λαμβάνουν πληροφορία από τον κόμβο D

Round Robin Routing						
time	1	2	3	4	5	6
D tx	x_A^1	x_B^1	x_C^1	x_A^1	x_B^1	x_C^1
A rx	-	-	x_C^1	-	x_B^1	x_C^1
B rx	x_A^1	-	x_C^1	-	x_B^1	x_C^1
C rx	-	x_B^1	x_C^1	x_A^1	-	x_C^1
Network Coding Solution						
time	1	2	3	4	5	6
D tx	x_A^1	x_B^1	x_C^1	$x_A^1 + x_B^1 + x_C^1$	$x_A^1 + 2x_B^1 + 3x_C^1$	$x_A^1 + 4x_B^1 + 5x_C^1$
A rx	-	-	x_C^1	-	$x_A^1 + 2x_B^1 + 3x_C^1$	$x_A^1 + 4x_B^1 + 5x_C^1$
B rx	x_A^1	-	x_C^1	-	$x_A^1 + 2x_B^1 + 3x_C^1$	$x_A^1 + 4x_B^1 + 5x_C^1$
C rx	-	x_B^1	x_C^1	$x_A^1 + x_B^1 + x_C^1$	-	$x_A^1 + 4x_B^1 + 5x_C^1$

Πίνακας 2.1: Ο σταθμός D πραγματοποιεί ευρεκπομπή δεδομένων με προορισμό τους κόμβους A, B και C σε κανάλια με πιθανότητα απώλειας 0.5. Η περίπτωση της εφαρμογής κωδικοποίησης δικτύου οδηγεί στην ίδια συνολική ρυθμαπόδοση, αλλά με περισσότερο ομοιόμορφα διαιρεμένο ρυθμό δεδομένων ανάμεσα στους παραλήπτες

Να σημειωθεί ότι σε αυτήν την περίπτωση η κωδικοποίηση δικτύου δεν μεταβάλλει τη μέση ρυθμαπόδοση του δικτύου, αλλά παρέχει το πλεονέκτημα όλοι οι χρήστες να απολαμβάνουν ένα ρυθμό ο οποίος συγκλίνει προς τη μέση τιμή (για το παράδειγμα του Σχ.2.5 ένα μήνυμα ανά έξι χρονικές σχισμές).

2.7.3 Προσαρμοστικότητα σε δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα

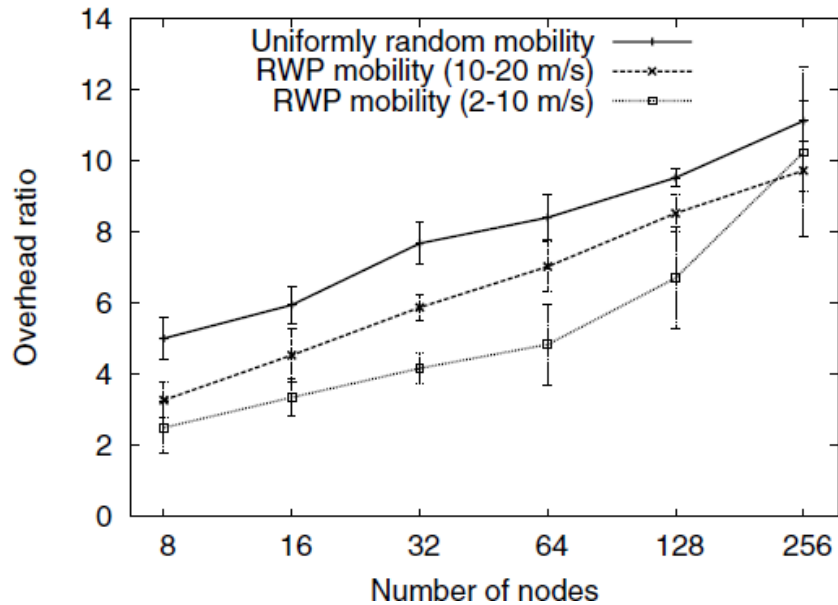
Στα ασύρματα δίκτυα οι κόμβοι κινούνται συνεχώς, τίθενται εκτός λειτουργίας ή κινούνται εκτός της περιοχής κάλυψης με αποτέλεσμα η τοπολογία του δικτύου να μεταβάλλεται συνεχώς. Με τη συμβολή της κωδικοποίησης δικτύου μπορεί είτε να εξοικονομηθεί ενέργεια στο δίκτυο είτε να απαλλαγεί το δίκτυο από τις συνεχείς ενημερώσεις σχετικά με τη δρομολόγηση.

Στην περίπτωση όπου n κόμβοι μεταδίδουν ένα τυχαίο γραμμικό συνδυασμό μηνυμάτων που έχουν ήδη λάβει επί ενός πεπερασμένου σώματος F_q , χωρίς να

γνωρίζουν την ταυτότητα ή την προΐστορία των γειτόνων τους, οι απαιτούμενες μεταδόσεις μειώνονται κατά ένα παράγοντα $\log n$ σε σχέση με αυτές της δρομολόγησης χωρίς επίγνωση της κατάστασης των γειτόνων. Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει εξοικονόμηση ενέργειας, αφού αυτή είναι ανάλογη του αριθμού των μεταδόσεων.

Αν συγκριθεί η ίδια περίπτωση με την περίπτωση δρομολόγησης όπου κάθε κόμβος έχει πλήρη επίγνωση των ταυτοτήτων και των μηνυμάτων των γειτόνων του, τότε η απόδοση της κωδικοποίησης δικτύου είναι η ίδια με αυτή της δρομολόγησης. Σε αυτήν την περίπτωση η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου καθιστά μη αναγκαίες τις ενημερώσεις σχετικά με τις πληροφορίες δρομολόγησης.

Η κινητικότητα έχει σημαντική επίδραση στην προώθηση των μηνυμάτων. Αρχικά, καθώς οι κόμβοι κινούνται τυχαία, η πληροφορία διαδίδεται ταχύτερα σε σχέση με ένα στάσιμο δίκτυο. Εντούτοις, αφού οι κόμβοι δεν γνωρίζουν ποια πληροφορία έχουν οι γείτονές τους, και εφόσον περίπου οι μισοί κόμβοι συλλέγουν πληροφορία περισσότερο συχνά, με τις μεταδόσεις οι παραλήπτες δεν λαμβάνουν νέα πληροφορία. Στο Σχ.2.6 φαίνεται ο λόγος του πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο σε περίπτωση απλής προώθησης προς τον πλεονασμό σε περίπτωση της κωδικοποίησης δικτύου που είναι αποτέλεσμα προσομοίωσης για το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (RWP: Random Waypoint Mobility). Τα πλεονεκτήματα της κωδικοποίησης δικτύου αυξάνονται με την αύξηση του πλήθους των κόμβων. Η επίδοση της κωδικοποίησης δικτύου μειώνεται όταν η κινητικότητα είναι περιορισμένη, καθώς για την κωδικοποίηση δικτύου είναι σημαντικό το πόσο καλά «αναμειγνύονται» τα μηνύματα.



Σχήμα 2.6 : Λόγος του πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο σε περίπτωση δρομολόγησης προς τον πλεονασμό σε περίπτωση εφαρμογής κωδικοποίησης δικτύου για μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (RWP: Random Waypoint Mobility)

Τα μοντέλα κινητικότητας που έχουν μελετηθεί σε δίκτυα DTN παρουσιάζονται στο Κεφ. 3.

2.7.4 COPE

Το COPE του MIT είναι μια αρχιτεκτονική συστήματος η οποία εφαρμόζει ευκαιριακούς (opportunistic) αλγόριθμους για την κωδικοποίηση δικτύου σε ασύρματα δίκτυα. Οι κόμβοι του δικτύου λαμβάνουν τις μεταδόσεις των γειτόνων τους και μεταδίδουν με ευρυστομία το λογικό άθροισμα (XOR) των δεδομένων που διαθέτουν. Οι δύο βασικές λειτουργίες των κόμβων είναι η Ευκαιριακή ακρόαση (Opportunistic Listening) και η Ευκαιριακή κωδικοποίηση (Opportunistic Coding):

- *Ευκαιριακή ακρόαση*

Εκμεταλλευόμενο την εγγενή ευρυστομία του ασύρματου μέσου, το COPE θέτει κάθε κόμβο να κατασκοπεύει τα μηνύματα που ανταλλάσσουν οι γείτονές του και να τα αποθηκεύει για ένα χρονικό διάστημα. Τα μηνύματα αυτά χρησιμεύουν στις αποφάσεις κωδικοποίησης, καθώς ο κόμβος μπορεί να μεταδώσει το XOR δύο μηνυμάτων: από αυτά το ένα γνωρίζει ότι βρίσκεται στον κόμβο γείτονά του και το άλλο βρισκόταν στην ουρά του και προορίζεται για τον κόμβο γείτονά του.

- *Ευκαιριακή κωδικοποίηση*

Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί μόνο τα μηνύματα που έχει στην ουρά του για να κωδικοποιήσει. Αυτό επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων τοπικά και χωρίς να απαιτείται συνεργασία μεταξύ των κόμβων. Το ερώτημα είναι ποιά μηνύματα θα μεταδώσει ο κόμβος. Ο κόμβος μπορεί να έχει πολλές επιλογές σχετικά με την κωδικοποίηση των μηνυμάτων, αλλά ο στόχος του πρέπει να είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των ακέραιων μηνυμάτων εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι για κάθε μήνυμα υπάρχει αρκετή πληροφορία στο επόμενο βήμα ώστε αυτό να αποκωδικοποιηθεί.

Το COPE οδήγησε σε αύξηση της ρυθμαπόδοσης στα ασύρματα δίκτυα. Εκτός από το COPE έχουν προταθεί και άλλα σχήματα δρομολόγησης με χρήση κωδικοποίησης δικτύου, όπως το MORE [20], το ExOR [18], το Phoenix [19]. Η δυσκολία εφαρμογής κωδικοποίησης δικτύου σε ασύρματα δίκτυα είναι η απαίτηση αποθηκευτικού χώρου, μηχανισμών συγχρονισμού και αξιοπιστίας. Ακόμα, απαιτείται ο σχεδιασμός νέων πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών, ή προσαρμογή της υπάρχουσας δομής για ασύρματα δίκτυα έτσι ώστε να επιτραπούν οι λειτουργίες της κωδικοποίησης δικτύου. Τέλος, τα θέματα που ερευνώνται στους τομείς των πρωτοκόλλων και της αρχιτεκτονικής δικτύων σχετίζονται με το στρώμα στο οποίο θα λειτουργεί η κωδικοποίηση δικτύου, τους τύπους των συνδέσεων που θα υποστηρίζει και τους μηχανισμούς που πρέπει να τοποθετηθούν ή να αλλάξουν.

2.8 Σύγκριση θεωρητικής προσέγγισης και πρακτικής εφαρμογής

Τα θεωρήματα των ενοτήτων 2.1 και 2.2 έχουν βασιστεί στις παραδοχές ότι:

- οι ακμές έχουν χωρητικότητα ίση με ένα ή με ακέραιο αριθμό
- τα σύμβολα ρέουν κατά σύγχρονο τρόπο στο δίκτυο
- η τοπολογία είναι συγκεντρωμένη και πλήρως γνωστή
- οι κόμβοι λαμβάνουν και αποστέλλουν ένα σύμβολο ταυτόχρονα, χωρίς καθυστερήσεις επεξεργασίας ή αναμονής στην ουρά των προς μετάδοση συμβόλων.

Όμως, στην πραγματικότητα

- οι χωρητικότητες των ακμών είναι συχνά άγνωστες και μεταβλητές στο χρόνο,
- η πληροφορία ρέει κατά ασύγχρονο τρόπο υπό μορφή μηνυμάτων,

- η τοπολογία του δικτύου μεταβάλλεται καθιστώντας δύσκολη τη συγκέντρωση πληροφορίας για το συνολικό δίκτυο και τη σχεδίαση κατάλληλου κώδικα δικτύου,
- τα μηνύματα υπόκεινται σε τυχαίες καθυστερήσεις και απώλειες.

Για να αντιμετωπιστούν οι ανωτέρω διαφορές μεταξύ θεωρίας και πρακτικής εφαρμογής έχουν προταθεί τα εξής:

- *Επιλογή των συντελεστών κωδικοποίησης με τυχαίο τρόπο από ένα σώμα κατάλληλου μεγέθους*

Η επιλογή του μεγέθους του πεπερασμένου σώματος q είναι πολύ σημαντικό ζήτημα, αφού επηρεάζει την πιθανότητα επιτυχίας ελάχιστης καθυστέρησης, την πολυπλοκότητα κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης και την επιβάρυνση λόγω επικεφαλίδας στο κόστος αποθήκευσης/μετάδοσης.

- *Αποστολή του διανύσματος κωδικοποίησης μέσα στο ίδιο το μήνυμα*

Στην επικεφαλίδα του μηνύματος ενσωματώνεται το διάνυσμα κωδικοποίησης και έτσι δεν χρειάζεται πλέον η συγκεντρωμένη γνώση για την τοπολογία του δικτύου ή τις συναρτήσεις κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης.

- *Αποθήκευση των μηνυμάτων στη μνήμη από τους κόμβους*

Με την αποθήκευση των ληφθέντων μηνυμάτων και την κωδικοποίησή τους, αφού φθάσει ένας ικανός αριθμός μηνυμάτων (μέγεθος γενεάς) επιτρέπεται ο συνδυασμός μηνυμάτων με ασύγχρονες αφίξεις ή αναχωρήσεις, μεταβλητές καθυστερήσεις και απώλειες.

Ο αλγόριθμος που στηρίζεται στις ανωτέρω προτάσεις είναι ο εξής:

- Κάθε κόμβος μεταδίδει ένα γραμμικό συνδυασμό των μηνυμάτων που έχει στον αποθηκευτικό του χώρο. Για το συγχρονισμό αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιείται το μέγεθος της γενεάς, το οποίο έχει ήδη αναφερθεί.
- Κάθε κόμβος λαμβάνει μηνύματα τα οποία είναι γραμμικοί συνδυασμοί των μηνυμάτων από τις πηγές και τα αποθηκεύει ώστε $[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_h]^T = G_t[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_h]^T$, όπου $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_h]^T$ τα άγνωστα μηνύματα εισόδου, $[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_h]^T$ τα κωδικοποιημένα μηνύματα και G_t ο πίνακας οι γραμμές του οποίου είναι τα γενικά

διανύσματα κωδικοποίησης που είναι αποθηκευμένα στην επικεφαλίδα του μηνύματος.

- Αν ο πίνακας G_i του κόμβου είναι πλήρους τάξης ή υπάρχει ένας υποπίνακας πλήρους τάξης, ο κόμβος μπορεί να αποκωδικοποιήσει τον αντίστοιχο αριθμό μηνυμάτων, ο οποίος είναι ίσος με την τάξη του πίνακα. Κάθε φορά που ο κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα ελέγχει αν αυτό είναι πρωτότυπο (innovative), δηλαδή αν αυξάνει την τάξη του τρέχοντος πίνακά του. Τα μηνύματα που δεν είναι πρωτότυπα απορρίπτονται.

Σε δίκτυα όπως τα DTN δίκτυα όπου η τοπολογία μεταβάλλεται συνεχώς απαιτείται η εφαρμογή μιας αποκεντρωμένης λειτουργίας κωδικοποίησης δικτύου. Ακόμα και για τυχαία δίκτυα, αποδεικνύεται ότι αν επιτραπεί σε όλους τους κόμβους να λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο (για παράδειγμα να συνδυάζουν γραμμικά τις εισερχόμενες ροές τους), υπό δεδομένη ελάχιστη τομή για τον παραλήπτη, επιτυγχάνεται η λήψη της πληροφορίας με ρυθμό ίσο με την τιμή της ελάχιστης τομής. Επομένως, οι κόμβοι ενός DTN δικτύου πρέπει να έχουν την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά την κωδικοποίηση και να εφαρμόζουν γραμμική κωδικοποίηση δικτύου επιλέγοντας τους συντελεστές κωδικοποίησης τυχαία από ένα πεπερασμένο σώμα F_q .

Στα δίκτυα DTN η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου πρέπει να στοχεύει στην επίτευξη βελτιωμένων σχέσεων ανταλλαγής μεταξύ πλεονασμού μηνυμάτων και καθυστέρησης και μεταξύ ενέργειας καταναλισκόμενης σε μεταδόσεις και καθυστέρησης. Επιπλέον, πρέπει να ερευνηθεί η μεταβολή της επίδοσης της κωδικοποίησης δικτύου σε σχέση με τα μοντέλα κινητικότητας των κόμβων, του μεγέθους του buffer τους, το εύρος ζώνης και το σχήμα δρομολόγησης του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΕ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Η από άκρο σε άκρο σύνδεση στα DTN δίκτυα δεν είναι πάντα εφικτή. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι (relays) αναλαμβάνουν να μεταφέρουν τα δεδομένα και να τα μεταδώσουν κρατώντας αντίγραφο αυτών όταν τους δοθεί η ευκαιρία. Τα σχήματα δρομολόγησης σε DTN δίκτυα συχνά περιλαμβάνουν αντιγραφή των μηνυμάτων και όχι μόνο απλή μετάδοση για την παράδοσή τους. Οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με μονόδρομες ζεύξεις. Αυτές οι ζεύξεις μπορεί να βρίσκονται εντός ή εκτός λειτουργίας λόγω κινητικότητας, αποτυχιών ή άλλων γεγονότων. Όταν μία ζεύξη λειτουργεί, η πηγή έχει την ευκαιρία να στείλει δεδομένα στο άλλο άκρο. Στη βιβλιογραφία η ευκαιρία αυτή αναφέρεται ως επαφή (contact). Η επαφή χαρακτηρίζεται από τη χρονική διάρκειά της, τη χωρητικότητά της και την καθυστέρηση διάδοσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα από τα χαρακτηριστικά των DTN δικτύων είναι οι μεγάλες ή μεταβλητές καθυστερήσεις. Ο χρόνος μεταφοράς ενός μηνύματος μεταξύ δύο κόμβων αποτελείται από

- την καθυστέρηση διάδοσης,
- την καθυστέρηση μετάδοσης,
- το χρόνο αναμονής και
- το χρόνο «ουράς» ή προτεραιότητας.

Η καθυστέρηση διάδοσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να διαδοθεί ένα bit κατά μήκος της σύνδεσης και εξαρτάται από την ταχύτητα μετάδοσης στη ζεύξη και το μήκος της ζεύξης. Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθούν όλα τα bit του μηνύματος και εξαρτάται από το μέγεθος του μηνύματος και το ρυθμό μετάδοσης στην επαφή. Ο χρόνος αναμονής είναι ο χρόνος κατά τον οποίο πρέπει να αναμείνει ένα μήνυμα από τη στιγμή που φθάνει σε ένα κόμβο μέχρι τη στιγμή όπου η επαφή προς τον επόμενο κόμβο καταστεί διαθέσιμη. Εξαρτάται από τον προγραμματισμό της επαφής και το χρόνο άφιξης του μηνύματος. Ο χρόνος προτεραιότητας είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αδειάσει η ουρά των μηνυμάτων

του κόμβου με μεγαλύτερη προτεραιότητα από το νεοαφιχθέν μήνυμα. Αυτός εξαρτάται από την ταχύτητα μετάδοσης στη ζεύξη μεταξύ των κόμβων (όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα μετάδοσης τόσο ταχύτερα μεταδίδονται τα μηνύματα) και την κίνηση στο δίκτυο. Στα DTN δίκτυα ο σημαντικότερος παράγοντας καθυστέρησης είναι ο χρόνος αναμονής ο οποίος μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος, δηλαδή ώρες και ενδεχομένως ημέρες.

Τα DTN είναι δίκτυα στα οποία δεν μπορούν να εφαρμοστούν τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης (RIP [21], OSPF [22], DSF [23], AODV [24]) αποτυγχάνουν στα δίκτυα αυτά για τους εξής λόγους:

- *Αδυναμία προγραμματισμού των επαφών*

Μπορεί να είναι περισσότερες από μία επαφές διαθέσιμες για ένα ζεύγος κόμβων. Για παράδειγμα, μία επαφή υψηλής επίδοσης και υψηλού κόστους και μια επαφή χαμηλής επίδοσης και χαμηλού κόστους. Ο προγραμματισμός των επαφών είναι το σύνολο των στιγμών που οι επαφές ενός κόμβου είναι διαθέσιμες, δηλαδή το χρονοδιάγραμμα των επαφών. Στη θεωρία των γράφων αυτό το μοντέλο είναι ένας χρονομεταβλητός γράφος. Αφού ο σημαντικότερος παράγοντας καθυστέρησης είναι ο χρόνος αναμονής, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό ενός DTN δικτύου είναι το χρονοδιάγραμμα των επαφών, το οποίο εξαρτάται από το είδος του υπό θεώρηση δικτύου. Από τη μια πλευρά, τα χρονοδιαγράμματα των επαφών μπορεί να είναι πολύ ακριβή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι επικοινωνίες στο διάστημα όπου οι διακοπές συνδέσεων οφείλονται στην κίνηση των διαστημικών αντικειμένων και μπορούν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια. Ένα παράδειγμα δικτύου με λιγότερο προβλέψιμο προγραμματισμό των επαφών είναι ένα DTN δίκτυο του οποίου οι κόμβοι έχουν τοποθετηθεί σε λεωφορεία. Ενώ τα λεωφορεία έχουν σταθερό χρονοδιάγραμμα, αυτό δεν είναι ακριβές. Λόγω της κίνησης, των ατυχημάτων ή τη δυσλειτουργία του εξοπλισμού οι πραγματικοί χρόνοι άφιξης μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Τέλος, υπάρχουν δίκτυα με τελείως τυχαία συνδεσιμότητα, όπως τα ad hoc δίκτυα.

- *Κυμαινομένη χωρητικότητα των επαφών*

Ο ρυθμός μετάδοσης μεταξύ δύο κόμβων σχετίζεται με τον προγραμματισμό της επαφής. Η χωρητικότητα της επαφής εξαρτάται τόσο από το μήκος της ζεύξης και από την ταχύτητα μετάδοσης στη ζεύξη όσο και από τη διάρκεια της επαφής. Ακόμα

και αν η διάρκεια είναι γνωστή με ακρίβεια, μπορεί να μην είναι δυνατή η πρόβλεψη της χωρητικότητας της επαφής λόγω της διακύμανσης του ρυθμού μετάδοσης. Η χωρητικότητα της επαφής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι αυξημένη λόγω πολλών χρηστών ή λόγω μεγάλων μηνυμάτων. Τα σχήματα δρομολόγησης που υπολογίζουν την καθυστέρηση που προκύπτει λόγω κίνησης στο δίκτυο και ύστερα δρομολογούν τα μηνύματα στις διαδρομές με τη μικρότερη καθυστέρηση χρησιμοποιούν τα βάρη των ζεύξεων EDLQ και EDAQ. Τα σχήματα αυτά περιγράφονται στο εδάφιο 3.2.3.

- *Περιορισμένη χωρητικότητα μνήμης*

Τα μηνύματα πρέπει να αποθηκεύονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα ώστε να αντιμετωπιστούν οι μακροχρόνιες διακοπές σύνδεσης. Αυτό σημαίνει ότι ενδιάμεσοι κόμβοι έχουν ανάγκη αρκετό χώρο για να αποθηκεύουν μηνύματα που αναμένουν για μελλοντικές ευκαιρίες επικοινωνίας. Από τη μια πλευρά, οι δρομολογητές αυτοί πρέπει να διαθέτουν μνήμη ανάλογη της ζήτησης. Από την άλλη πλευρά, τα σχήματα δρομολόγησης μπορούν να λάβουν υπόψη τους τη διαθέσιμη μνήμη πριν πάρουν αποφάσεις. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποδοτική λειτουργία ενός σχήματος δρομολόγησης είναι η διαχείριση της μνήμης των κόμβων. Η απαλοιφή των αντιγράφων ενός μηνύματος στο δίκτυο όταν αυτό παραδοθεί και η διαχείριση των νεοαφιχθέντων μηνυμάτων όταν η μνήμη είναι πλήρης μελετώνται στο εδάφιο 3.3.

- *Περιορισμένη διαθέσιμη ενέργεια*

Ορισμένοι κόμβοι στα DTN δίκτυα μπορεί να έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας είτε επειδή κινούνται είτε επειδή βρίσκονται σε θέσεις όπου δεν μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη δρομολόγηση καταναλώνεται ενέργεια, αφού αποστέλλονται, παραλαμβάνονται και αποθηκεύονται μηνύματα, και εκτελούνται υπολογισμοί. Επομένως, σχήματα δρομολόγησης με την εφαρμογή των οποίων αποστέλλονται λιγότερα δεδομένα και εκτελούνται λιγότεροι υπολογισμοί είναι αποδοτικότερα. Επιπλέον, τα σχήματα δρομολόγησης μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας απασχολώντας με φειδώ τους κόμβους με περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, δηλαδή επιτρέποντας σε κόμβους με περιορισμένα αποθέματα ενέργειας να αποστέλλουν λιγότερα μηνύματα από τους υπόλοιπους κόμβους.

- *Ισχύς διεργασιών*

Οι συσκευές από τις οποίες απαρτίζονται οι κόμβοι των DTN δικτύων μπορεί να έχουν πολύ μικρό μέγεθος και περιορισμένη υπολογιστική ικανότητα, σε όρους CPU και μνήμης. Κατά συνέπεια, δεν είναι ικανές να εξυπηρετήσουν πολύπλοκα πρωτόκολλα. Τα σχήματα δρομολόγησης που προορίζονται για DTN δίκτυα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους και την περιορισμένη υπολογιστική ικανότητα των κόμβων.

3.2 Σχήματα δρομολόγησης στα DTN δίκτυα

3.2.1 Χαρακτηριστικά των σχημάτων δρομολόγησης

3.2.1.1 Κριτήρια Επίδοσης

Τα μέτρα επίδοσης με τα οποία συγκρίνονται τα σχήματα δρομολόγησης είναι το ποσοστό των επιτυχώς παραδομένων μηνυμάτων, η καθυστέρηση παράδοσης και το πλήθος των μεταδόσεων που απαιτούνται για την παράδοση.

- *Ποσοστό Παράδοσης Μηνυμάτων*

Το ποσοστό παράδοσης των μηνυμάτων στα DTN δίκτυα αναφέρεται στα μηνύματα που παραδόθηκαν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

- *Καθυστέρηση παράδοσης*

Αν και η καθυστέρηση παράδοσης μπορεί να μην είναι το σημαντικότερο μέτρο επίδοσης για τα DTN δίκτυα, ορισμένες εφαρμογές απαιτούν να γίνει η παράδοση των μηνυμάτων σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, καθώς τα μηνύματα αυτά είναι χρήσιμα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που ορίζεται από την εφαρμογή. Παράδειγμα τέτοιων δικτύων είναι τα DTN δίκτυα έκτακτης ανάγκης.

- *Πλήθος μεταδόσεων*

Το πλήθος των μεταδόσεων είναι μέτρο της κατάληψης της χωρητικότητας των επαφών από ένα σχήμα δρομολόγησης. Σχετίζεται ακόμα με τους υπολογιστικούς πόρους και την ισχύ που απαιτούνται ανά μήνυμα και, τέλος, με την κατανάλωση ενέργειας, αφού κάθε μετάδοση καταναλώνει ενέργεια.

Ανάλογα με τον τύπο του δικτύου και τους στόχους σχετικά με τα μέτρα επίδοσης επιλέγεται το κατάλληλο σχήμα δρομολόγησης. Σε δίκτυα με μικρή υπολογιστική ικανότητα, περιορισμένη μνήμη και περιορισμένα αποθέματα ενέργειας προτείνονται σχήματα δρομολόγησης που οδηγούν στο ελάχιστο πλήθος μεταδόσεων ανά παραδιδόμενο μήνυμα. Σε δίκτυα επικοινωνιών έκτακτης ανάγκης το σημαντικότερο κριτήριο επίδοσης είναι η καθυστέρηση.

3.2.1.2 Αντιγραφή Μηνυμάτων – Γνώση πληροφοριών για το δίκτυο

Τα σχήματα δρομολόγησης σε DTN δίκτυα βασίζονται αφενός στην αντιγραφή των μηνυμάτων και αφετέρου στην γνώση πληροφοριών για το δίκτυο. Τα σχήματα δρομολόγησης με αντιγραφή των μηνυμάτων βασίζονται στην παραδοχή ότι όσο περισσότερα αντίγραφα του μηνύματος κυκλοφορούν στο δίκτυο τόσο αυξάνεται η πιθανότητα κάποιο από αυτά να φθάσει στον προορισμό και τόσο μειώνεται ο χρόνος παράδοσής του. Η αντιγραφή των μηνυμάτων δημιουργεί στο δίκτυο μια σχέση ανταλλαγής μεταξύ καθυστέρησης και πλεονασμού μηνυμάτων, άρα μια σχέση ανταλλαγής μεταξύ απόδοσης και κόστους. Τα σχήματα κωδικοποίησης ανοχής σε διαγραφές (erasure coding) και κωδικοποίησης δικτύου (network coding) ερευνώνται ώστε να διατηρηθεί το πλεονέκτημα των πολλαπλών μηνυμάτων στο δίκτυο μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατανάλωσης των πόρων του συστήματος.

Ορισμένα σχήματα δρομολόγησης απαιτούν περισσότερη γνώση του δικτύου σε σχέση με άλλα σχήματα δρομολόγησης. Από τη μια πλευρά, ένας κόμβος μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις με μηδενική γνώση για το δίκτυο γνωρίζοντας μόνο ποιες επαφές είναι διαθέσιμες εκείνη τη στιγμή. Τα σχήματα αυτά χρησιμοποιούν κανόνες που διατυπώνονται κατά τη σχεδίαση του σχήματος δρομολόγησης στους οποίους υπακούει κάθε κόμβος. Η σχεδίαση αυτή οδηγεί σε απλή εφαρμογή που απαιτεί ελάχιστο συντονισμό και μηνύματα ελέγχου αφού όλοι οι κανόνες είναι διατυπωμένοι εκ των προτέρων. Το μειονέκτημα είναι ότι το σχήμα αυτό δεν μπορεί να υιοθετηθεί σε διαφορετικά δίκτυα ή συνθήκες, άρα μπορεί να αποτύχει να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις. Από την άλλη πλευρά, ένας κόμβος μπορεί να πρέπει να διαθέτει το πλήρες χρονοδιάγραμμα κάθε επαφής στο δίκτυο ώστε να δρομολογήσει ένα μήνυμα.

Οι οικογένειες σχημάτων δρομολόγησης στα DTN δίκτυα είναι τα σχήματα πλημμύρας (flooding), που βασίζονται κυρίως στην αντιγραφή των μηνυμάτων σε αρκετούς κόμβους ώστε ο προορισμός να λάβει το μήνυμα, και τα σχήματα

προώθησης (forwarding), που βασίζονται στη γνώση του δικτύου ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη διαδρομή προς τον προορισμό. Με βάση τους στόχους της εκάστοτε εφαρμογής προβλέπονται διάφορα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη το πλήθος των κόμβων, το μοντέλο κινητικότητάς τους και την κίνηση που δημιουργείται στο δίκτυο. Οι παράμετροι αυτές μπορεί να μην είναι γνωστές από την αρχή και να μεταβάλλονται δυναμικά.

3.2.1.3 Στόχοι των σχημάτων δρομολόγησης

Δεν υπάρχει κάποιο σχήμα δρομολόγησης που επιτυγχάνει μικρή καθυστέρηση και ταυτόχρονα αποδοτική χρήση των πόρων. Οι στόχοι των σχημάτων δρομολόγησης σε DTN δίκτυα πρέπει να είναι:

- Πραγματοποίηση μικρότερου πλήθους μεταδόσεων από τα σχήματα στρατηγικών πλημμύρας, κάτω από τις ίδιες συνθήκες
- Παράδοση ενός μηνύματος ταχύτερα από τα υπάρχοντα σχήματα δρομολόγησης ενός αντίγραφου και πολλαπλών αντιγράφων
- Παράδοση της πλειοψηφίας των μηνυμάτων που δημιουργήθηκαν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Από τη μία πλευρά, τα σχήματα δρομολόγησης πλημμύρας (flooding) οδηγούν σε μια σχέση ανταλλαγής μεταξύ αριθμού αναγκαίων μεταδόσεων για την παράδοση ενός μηνύματος και καθυστέρησης παράδοσης. Δεν εισάγουν πολυπλοκότητα στο σύστημα, η λειτουργία τους είναι αποκεντρωμένη και ιδανική για δίκτυα με δυναμικά μεταβαλλόμενη τοπολογία όπως τα DTN δίκτυα. Από την άλλη πλευρά, τα σχήματα δρομολόγησης προώθησης (forwarding) περιορίζουν το πλήθος των μηνυμάτων που κυκλοφορούν στο δίκτυο και επομένως αξιοποιούν αποτελεσματικότερα τους πόρους του δικτύου. Το μειονέκτημα των σχημάτων αυτών είναι ότι απαιτείται γνώση του δικτύου για τη λήψη των αποφάσεων δρομολόγησης. Η συνεχής ενημέρωση των κόμβων σχετικά με την κατάσταση του δικτύου είναι διαδικασία που ενδεχομένως να είναι αδύνατο να εφαρμοστεί σε δίκτυα με δυναμικά μεταβαλλόμενη τοπολογία όπως τα DTN δίκτυα.

3.2.2 Σχήματα δρομολόγησης πλημμύρας

Τα σχήματα δρομολόγησης πλημμύρας στηρίζονται αποκλειστικά στην αντιγραφή των μηνυμάτων σε κόμβους αναμεταδότες και δεν χρησιμοποιούν πληροφορία σχετικά με την κατάσταση του δικτύου για τη λήψη αποφάσεων δρομολόγησης. Η σχέση ανταλλαγής που προκύπτει μεταξύ των σχημάτων που περιγράφονται στο εδάφιο αυτό είναι μεταξύ του πλήθους αναγκαίων μεταδόσεων για την παράδοση του μηνύματος και της καθυστέρησης παράδοσης. Τα σχήματα δρομολόγησης όσον αφορά το πλήθος των αναγκαίων μεταδόσεων για την παράδοση ενός μηνύματος είναι, κατά αύξουσα σειρά, τα εξής:

- *Άμεση επαφή (Direct Contact)*

Σε αυτό το σχήμα η πηγή περιμένει μέχρι να έλθει σε επαφή με τον προορισμό πριν προωθήσει τα δεδομένα. Αυτή είναι η εκφυλισμένη περίπτωση της οικογένειας σχημάτων δρομολόγησης πλημμύρας, καθώς το σύνολο των αναμεταδοτών που μπορούν να λάβουν το μήνυμα περιέχει μόνο τον προορισμό. Μπορεί ακόμα να θεωρηθεί η εκφυλισμένη περίπτωση της οικογένειας σχημάτων δρομολόγησης προώθησης, η οποία επιλέγει πάντα την απευθείας διαδρομή μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Αφού δεν απαιτείται καμία πληροφορία για το δίκτυο, και χρησιμοποιεί μόνο ένα βήμα για τη από-άκρο-σε-άκρο μετάδοση, το σχήμα αυτό θεωρείται σχήμα πλημμύρας. Το μοντέλο αυτό, αν και δεν καταναλώνει πολλούς πόρους και χρησιμοποιεί μόνο μια μετάδοση μηνύματος, λειτουργεί αποδοτικά μόνο αν η πηγή έλθει σε επαφή με τον προορισμό και επομένως υπάρχει πιθανότητα το μήνυμα να μην παραδοθεί.

- *Αναμετάδοση δύο βημάτων (Two-Hop Relay)*

Σε αυτό το σχήμα η πηγή αντιγράφει το μήνυμα στους n πρώτους κόμβους με τους οποίους έρχεται σε επαφή. Η πηγή και οι κόμβοι-αναμεταδότες έχουν στην κατοχή τους το μήνυμα και το παραδίδουν στον προορισμό. Αφού υπάρχουν $n+1$ μηνύματα στο δίκτυο, καταλαμβάνεται περισσότερο εύρος ζώνης, μνήμη και καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα. Ωστόσο, η κατανάλωση των πόρων είναι περιορισμένη και μπορεί να ρυθμιστεί προσαρμόζοντας το πλήθος των αντιγράφων. Το σχήμα αυτό είναι πολύ πιθανότερο να παραδώσει το μήνυμα σε σχέση με το προηγούμενο. Αν υποθεθεί ότι κάθε κόμβος συναντά τον προορισμό με πιθανότητα p , τότε το σχήμα αυτό θα παραδώσει ένα μήνυμα με πιθανότητα $1 - (1 - p)^{n+1}$, που είναι περίπου ίση με $(n+1)p$, όταν η p είναι πολύ μικρή. Ομοίως, αν

αυξηθεί το πλήθος των αντιγράφων ενός μηνύματος μειώνεται η μέση καθυστέρηση, καθώς το μήνυμα παραδίδεται όταν ένας από τους $n+1$ κόμβους συναντήσει τον προορισμό. Το σχήμα αυτό έχει τους ίδιους περιορισμούς με το προηγούμενο: αν οι $n+1$ κόμβοι δεν έλθουν σε επαφή ποτέ με τον προορισμό, το μήνυμα δεν μπορεί να παραδοθεί.

- *Πλημμύρα βασισμένη σε δένδρο (Tree-Based Flooding)*

Το σχήμα αυτό επεκτείνει το προηγούμενο επιτρέποντας και σε άλλους κόμβους την αντιγραφή των μηνυμάτων. Όταν ένα μήνυμα αντιγράφεται, υπάρχει ένδειξη για το πόσα μηνύματα μπορεί να αντιγράψει ο αναμεταδότης. Η τεχνική ονομάζεται έτσι γιατί το σύνολο των αναμεταδοτών σχηματίζει ένα δένδρο κόμβων με ρίζα την πηγή. Το σχήμα με αναμετάδοση δύο βημάτων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως σχήμα πλημμύρας βασισμένη σε δένδρο με βάθος ένα.

- *Επιδημική δρομολόγηση (Epidemic Routing)*

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό όταν δύο κόμβοι έλθουν σε επαφή ανταλλάσσουν τα μηνύματα που έχουν στη μνήμη τους. Όταν η διαδικασία αυτή τελειώσει, οι κόμβοι έχουν τα ίδια μηνύματα στη μνήμη τους. Η επιδημική δρομολόγηση αντιπροσωπεύει την ακραία περίπτωση δρομολόγησης προώθησης καθώς δεν υπάρχει περιορισμός στο πλήθος των αντιγράφων των μηνυμάτων στο δίκτυο. Εντούτοις, το σχήμα αυτό οδηγεί σε μεγάλη σπατάλη πόρων.

3.2.3 Σχήματα δρομολόγησης προώθησης

Τα σχήματα δρομολόγησης προώθησης σχετίζονται με τα παραδοσιακά σχήματα δρομολόγησης δεδομένων. Συνήθως, δεν χρησιμοποιούν την αντιγραφή των μηνυμάτων και αποστέλλουν το μήνυμα μέσω της βέλτιστης διαδρομής βάσει της γνώσης που διαθέτουν για το δίκτυο. Η βέλτιστη διαδρομή μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας κάποιο από τα εξής σχήματα δρομολόγησης:

- *Δρομολόγηση βασισμένη στην θέση (Location-Based Routing)*

Είναι το σχήμα που απαιτεί την ελάχιστη πληροφορία για το δίκτυο καθώς αποδίδει συντεταγμένες σε κάθε κόμβο. Σε αυτό το σχήμα χρησιμοποιείται μια συνάρτηση απόστασης για να εκτιμηθεί το κόστος παράδοσης ενός μηνύματος από τον ένα κόμβο στον άλλο. Οι συντεταγμένες μπορεί να έχουν φυσική σημασία ή όχι. Γενικά, ένα μήνυμα προωθείται στον επόμενο κόμβο εφόσον αυτός είναι πλησιέστερος στον

προορισμό από τον τρέχοντα στο σύστημα συντεταγμένων. Το πλεονέκτημα του σχήματος είναι ότι απαιτείται ελάχιστη πληροφορία για το δίκτυο, αφού ο κόμβος χρειάζεται να γνωρίζει τις συντεταγμένες του ίδιου, του προορισμού και αυτές των πιθανών επόμενων βημάτων. Το μειονέκτημα του σχήματος αυτού είναι ότι οι θέσεις των κόμβων δεν σχετίζονται πάντα με την τοπολογία του δικτύου. Μεταξύ δύο κόμβων υποψήφιων για τη μεταφορά του μηνύματος δεν υπάρχει απαραίτητα ζεύξη οπτικής επαφής του πλησιέστερου κόμβου στον προορισμό για την παράδοση του μηνύματος αλλά μπορεί να υπάρχει ζεύξη οπτικής επαφής του κόμβου που βρίσκεται μακρύτερα από τον προορισμό. Επιπλέον, οι συντεταγμένες των κόμβων μεταβάλλονται συνεχώς γεγονός που περιπλέκει τη δρομολόγηση καθώς η πηγή πρέπει να γνωρίζει τις συντεταγμένες του προορισμού.

- *Δρομολόγηση διαβάθμισης (Gradient Routing)*

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η ανάθεση βαρών σε κάθε κόμβο. Τα βάρη αυτά αντιπροσωπεύουν την ικανότητα κάθε κόμβου να παραδώσει μηνύματα σε συγκεκριμένο προορισμό. Όταν ένας κόμβος που μεταφέρει ένα μήνυμα έρχεται σε επαφή με έναν άλλο κόμβο που έχει καλύτερο μέτρο βάρους σε σχέση με το συγκεκριμένο προορισμό του μηνύματος, προωθεί το μήνυμα σε αυτόν. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται έτσι γιατί το μήνυμα ακολουθεί μια διαβάθμιση με βελτίωση των τιμών της συνάρτησης βάρους προς τον προορισμό. Για το σχήμα αυτό χρειάζεται περισσότερη γνώση για το δίκτυο σε σχέση με το προηγούμενο, γιατί κάθε κόμβος πρέπει να αποθηκεύει πληροφορία για κάθε δυνατό προορισμό. Επιπλέον, πρέπει να διαδοθεί στο δίκτυο επαρκής πληροφορία ώστε κάθε κόμβος να υπολογίσει τα βάρη του για κάθε προορισμό. Τα βάρη θα μπορούσαν να βασιστούν σε διάφορα μεγέθη όπως το χρονικό διάστημα από την τελευταία επαφή με τον κόμβο, η απομένουσα ενέργεια του κόμβου ή η κινητικότητα.

- *Δρομολόγηση βασιζόμενη στα βάρη των ζεύξεων (Link Metrics)*

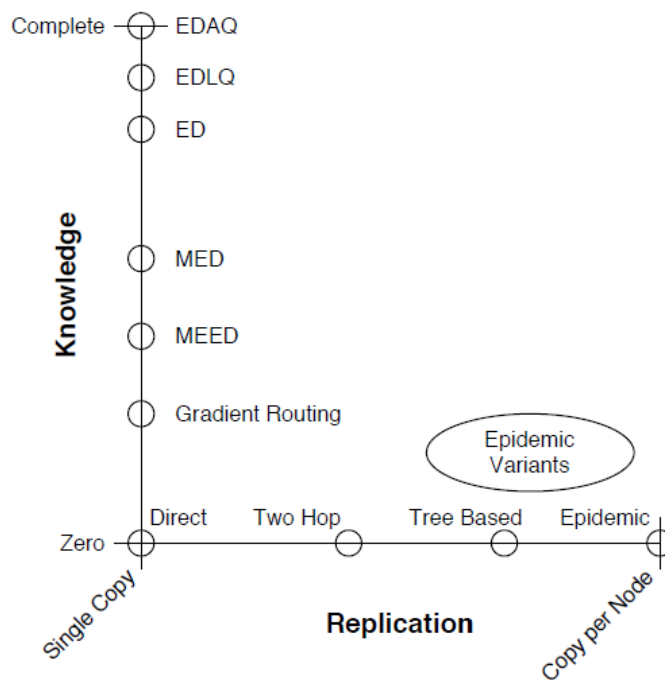
Τα σχήματα που χρησιμοποιούν τα βάρη των ζεύξεων έχουν ομοιότητες με τα παραδοσιακά σχήματα δρομολόγησης. Κατασκευάζουν ένα γράφο της τοπολογίας, αναθέτουν βάρη σε κάθε ζεύξη και χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο για τον προσδιορισμό της συντομότερης διαδρομής με βάση τα βάρη αυτά. Αυτό απαιτεί τη μέγιστη πληροφορία για το δίκτυο, αφού κάθε κόμβος πρέπει να έχει επαρκή γνώση για να εφαρμόσει τον εκάστοτε επιλεγμένο αλγόριθμο δρομολόγησης. Τα βάρη στις ζεύξεις εκχωρούνται ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη υπηρεσία βασιζόμενη σε

συγκεκριμένα μέτρα επίδοσης που μπορεί να είναι το απαιτούμενο εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και το ποσοστό παράδοσης. Στα DTN δίκτυα το σημαντικότερο μέτρο επίδοσης είναι το ποσοστό παράδοσης, αφού ένα DTN δίκτυο πρέπει να εγγυάται την παράδοση των δεδομένων. Ένα μέτρο μικρότερης σημασίας αλλά και αυτό σημαντικό είναι η καθυστέρηση της παράδοσης. Άρα είναι πολύ ενδιαφέρον και χρήσιμο να επινοηθεί ένα σχήμα που θα μεγιστοποιεί το ποσοστό παράδοσης και θα ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση παράδοσης. Επιπλέον, τα βάρη ζεύξεων μπορεί να ανατεθούν έτσι ώστε να έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση της χρήσης των πόρων, όπως η ενέργεια και η μνήμη.

Υπάρχουν αρκετά μέτρα που περιγράφουν τα βάρη των ζεύξεων. Τα μέτρα αυτά βασίζονται στον ακριβή προγραμματισμό των επαφών. Το πρώτο μέτρο ονομάζεται Ελάχιστη αναμενόμενη καθυστέρηση (Minimum Expected Delay - MED) και είναι αυτό που απαιτεί την ελάχιστη πληροφορία για το δίκτυο. Υποθέτει ότι ο χρόνος στην ουρά αναμονής των κόμβων είναι μηδενικός και ότι οι μέσοι χρόνοι διάδοσης, μετάδοσης και αναμονής είναι γνωστοί. Το κόστος κάθε ζεύξης είναι το άθροισμα των μέσων χρόνων διάδοσης, μετάδοσης και αναμονής. Με το μέτρο αυτό χρησιμοποιείται η ίδια διαδρομή για την παράδοση μηνυμάτων με το ίδιο ζεύγος πηγής-προορισμού. Το επόμενο μέτρο είναι η Έγκαιρη παράδοση (Earliest Delivery - ED). Με την υπόθεση ότι ο χρόνος στην ουρά είναι μηδενικός και ότι οι χρόνοι διάδοσης, μετάδοσης και αναμονής είναι γνωστοί ακριβώς, η διαδρομή του μηνύματος προσδιορίζεται αρχικά στην πηγή και το μήνυμα απορρίπτεται αν η μνήμη κάποιου από τους κόμβους στη διαδρομή είναι πλήρης. Η διαδρομή δρομολόγησης επιλέγεται ώστε το μήνυμα να φθάσει στον προορισμό όσο το δυνατό ταχύτερα. Αυτό απαιτεί πλήρες χρονοδιάγραμμα των επαφών, ενώ το μέτρο MED απαιτεί μόνο τις μέσες τιμές των χρόνων διάδοσης, μετάδοσης και αναμονής. Το επόμενο μέτρο είναι η Έγκαιρη παράδοση με τοπική ουρά αναμονής (Earliest Delivery with Local Queuing - EDLQ), όπου λαμβάνεται υπόψη η απασχόληση της μνήμης σε κάθε κόμβο για να προστεθεί μια εκτίμηση του χρόνου αναμονής στο μέτρο ED. Τέλος, το μέτρο της Έγκαιρης παράδοσης με όλες τις ουρές αναμονής (Earliest Delivery with All Queues - EDAQ) χρησιμοποιεί την πληροφορία για τις απαιτήσεις της κίνησης προς όλους τους κόμβους ώστε να υπολογίσει τον ακριβή χρόνο στην ουρά. Δυστυχώς, τα χρονοδιαγράμματα μπορεί να είναι ανακριβή ή εντελώς απρόβλεπτα. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, προτάθηκε το μέτρο της Ελάχιστης εκτιμώμενης αναμενόμενης καθυστέρησης (Minimum Estimated Expected Delay -

MEED), όπου τα βάρη βασίζονται καθαρά στη συνδεσιμότητα που παρατηρείται. Στο μέτρο αυτό γίνεται υπόθεση ότι η μελλοντική συνδεσιμότητα θα είναι όμοια με αυτή του παρελθόντος. Για να διαδοθούν τα μέτρα για τα βάρη των ζεύξεων κατά μήκος του δικτύου χρησιμοποιείται ένα επιδημικό πρωτόκολλο ώστε να διαδοθούν στο δίκτυο οι ανανεώσεις των καταστάσεων των ζεύξεων. Ένα ενδιαφέρον ζήτημα που προκύπτει όταν χρησιμοποιείται η δρομολόγηση της συντομότερης διαδρομής είναι το πότε πρέπει να λαμβάνονται οι αποφάσεις δρομολόγησης. Η παραδοσιακή επιλογή είναι η λήψη απόφασης για ολόκληρη την από-άκρο-σε-άκρο διαδρομή (από την πηγή στον προορισμό) στην πηγή (source routing), ή η λήψη απόφασης μόνο για το επόμενο βήμα όταν το μήνυμα φθάνει σε κάποιο κόμβο (per-hop routing). Στην περίπτωση των DTN δικτύων τα βάρη δεν είναι ακριβή και τα μηνύματα χρειάζονται αρκετό χρόνο για να διασχίσουν το δίκτυο. Επομένως, η επιλογή για το πότε πρέπει να λαμβάνονται οι αποφάσεις δρομολόγησης έχει σημαντική επίπτωση. Έχει υποστηριχθεί ότι η καλύτερη επιλογή είναι οι αποφάσεις να λαμβάνονται όσο το δυνατόν αργότερα, αφού αυτό επιτρέπει στα μηνύματα να προωθηθούν χρησιμοποιώντας την πλέον πρόσφατη πληροφορία. Για να επιτευχθεί αυτό, εφαρμόζεται η δρομολόγηση ανά επαφή (per-contact routing), όπου κάθε κόμβος επαναυπολογίζει τον πίνακα δρομολόγησής του κάθε φορά που κάποια επαφή γίνεται διαθέσιμη και, στη συνέχεια, ελέγχει όλα τα μηνύματα στη μνήμη του για να αποφασίσει αν πρέπει να προωθηθούν στις διαθέσιμες ζεύξεις. Αυτό μπορεί να είναι υπολογιστικά δύσκολο αλλά, δεδομένου ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται πάντα βάσει της πλέον πρόσφατης πληροφορίας, μειώνεται η καθυστέρηση παράδοσης. Στο Σχ.3.1 γίνεται σύγκριση των σχημάτων δρομολόγησης πλημμύρας και προώθησης με βάση το μέγεθος της αντιγραφής και της πληροφορίας που απαιτείται από το δίκτυο ώστε να εφαρμοστούν. Η δρομολόγησης άμεσης επαφής είναι το σχήμα δρομολόγησης που δεν απαιτεί ούτε γνώση για το δίκτυο ούτε αντιγραφή των μηνυμάτων. Το μειονέκτημα του σχήματος αυτού είναι η μικρή πιθανότητα παράδοσης του μηνύματος. Καθώς μετακινούμαστε δεξιότερα του οριζόντιου άξονα του σχήματος η πιθανότητα αυτή αυξάνεται αλλά αυξάνονται τα αντίγραφα των μηνυμάτων που κυκλοφορούν στο δίκτυο και κατά συνέπεια αυξάνεται η χρήση των πόρων του δικτύου. Η ακραία περίπτωση των σχημάτων δρομολόγησης αντιγραφής είναι η επιδημική δρομολόγηση όπου δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στο πλήθος αντιγράφων ανά μήνυμα ή στο πλήθος αντιγράφων που δημιουργούνται ανά κόμβο. Στον κατακόρυφο άξονα, καθώς μετακινούμαστε προς τα πάνω, η σχέση ανταλλαγής

που προκύπτει δεν είναι μεταξύ του μέτρου χρήσης των πόρων του συστήματος και της επίδοσής του αλλά μεταξύ της γνώσης που απαιτείται για το δίκτυο και της επίδοσης. Το μέτρο της Έγκαιρης παράδοσης με όλες τις ουρές αναμονής (Earliest Delivery with All Queues - EDAQ) απαιτεί την περισσότερη γνώση για το δίκτυο προσθέτοντας επιπλέον πολυπλοκότητα στο δίκτυο αλλά μειώνοντας την καθυστέρηση παράδοσης του μηνύματος.



Σχήμα 3.1: Ιδιότητες σχημάτων δρομολόγησης των DTN δικτύων

3.2.4 Επιδημική Δρομολόγηση (Epidemic Routing)

3.2.4.1 Περιγραφή του σχήματος της επιδημικής δρομολόγησης

Το σχήμα επιδημικής δρομολόγησης ανήκει στην οικογένεια των σχημάτων δρομολόγησης πλημμύρας και βασίζεται στην αντιγραφή ενός μηνύματος στη μνήμη του κόμβου και στη μετάδοση των αντιγράφων του σε πολλούς κόμβους. Το όνομα του σχήματος προέρχεται από τη συμπεριφορά των κόμβων η οποία είναι όμοια με επιδημία αφού κάθε κόμβος που μεταφέρει ένα μήνυμα συμπεριφέρεται αντίστοιχα με το φορέα μεταδοτικού ιού. Καθώς μεταδίδει αντίγραφα του μηνύματος σε άλλους κόμβους ο ιός εξαπλώνεται όμοια με μια επιδημία. Όταν ένα μήνυμα αποστέλλεται,

αποθηκεύεται στη μνήμη του κόμβου και τιτλοφορείται με μία μοναδική ταυτότητα. Κάθε φορά που δύο κόμβοι έρχονται σε επαφή αποστέλλουν ο ένας στον άλλον τον κατάλογο με τις ταυτότητες των μηνυμάτων που περιέχονται στις μνήμες τους, η οποία ονομάζεται διάνυσμα σύνοψης (summary vector). Χρησιμοποιώντας το διάνυσμα σύνοψης, οι κόμβοι ανταλλάσσουν τα μηνύματα που δεν έχουν αποθηκεύσει μέχρι να αποκτήσουν τα ίδια μηνύματα άρα και το ίδιο διάνυσμα σύνοψης. Ένας πολύ σημαντικός πόρος για την επιδημική δρομολόγηση είναι η μνήμη. Μια αποδοτική διαχείριση της μνήμης των κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του ποσοστού παράδοσης των μηνυμάτων. Θέματα σχετικά με τη διαχείριση της μνήμης στα DTN δίκτυα μελετώνται στο εδάφιο 3.3.

3.2.4.2 Παραλλαγές του σχήματος της επιδημικής δρομολόγησης

Με στόχο την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου έχουν προταθεί οι εξής παραλλαγές της επιδημικής δρομολόγησης:

- *k-βήματα (k-HOP)*

Το μήνυμα μπορεί να πραγματοποιήσει στο δίκτυο το πολύ k βήματα μέχρι να φθάσει τον προορισμό. Για $k=2$ η πηγή μεταδίδει ένα αντίγραφο του μηνύματος σε όποιον κόμβο συναντήσει μέχρι να συναντήσει τον προορισμό. Οι κόμβοι όμως δεν αντιγράφουν μηνύματα σε άλλους κόμβους εκτός από τον προορισμό. Για $k=1$ η πηγή μπορεί να προωθήσει το μήνυμα μόνο στον προορισμό. Η παραλλαγή αυτή σχετίζεται με το πεδίο TTL (Time To Live) των μηνυμάτων του πρωτοκόλλου IP το οποίο καθορίζει το μέγιστο πλήθος βημάτων που μπορεί το μήνυμα να πραγματοποιήσει.

- *k-αντίγραφα (k-COPY)*

Κατά τη διάρκεια της αντιγραφής ο κόμβος αποστέλλει το πολύ σε k κόμβους τα αντίγραφα του μηνύματος. Μπορεί να γίνει συνδυασμός των δύο ανωτέρω παραλλαγών όπως 2-hop k-copy, όπου η πηγή αντιγράφει το πολύ σε k κόμβους το μήνυμα, ενώ οι κόμβοι μπορούν να προωθήσουν το μήνυμα μόνο στον προορισμό.

- *Limited-time forwarding*

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, όταν ένας κόμβος αποθηκεύει ένα μήνυμα ξεκινά ένα χρονόμετρο με διάρκεια που είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Όταν λήξει ο χρόνος το αντίγραφο του μηνύματος διαγράφεται από τη μνήμη του.

Στα εδάφια 3.2.5, 3.2.6 και 3.2.7 παρουσιάζονται περισσότερες παραλλαγές του σχήματος της επιδημικής δρομολόγησης.

3.2.5 Πιθανοτική δρομολόγηση

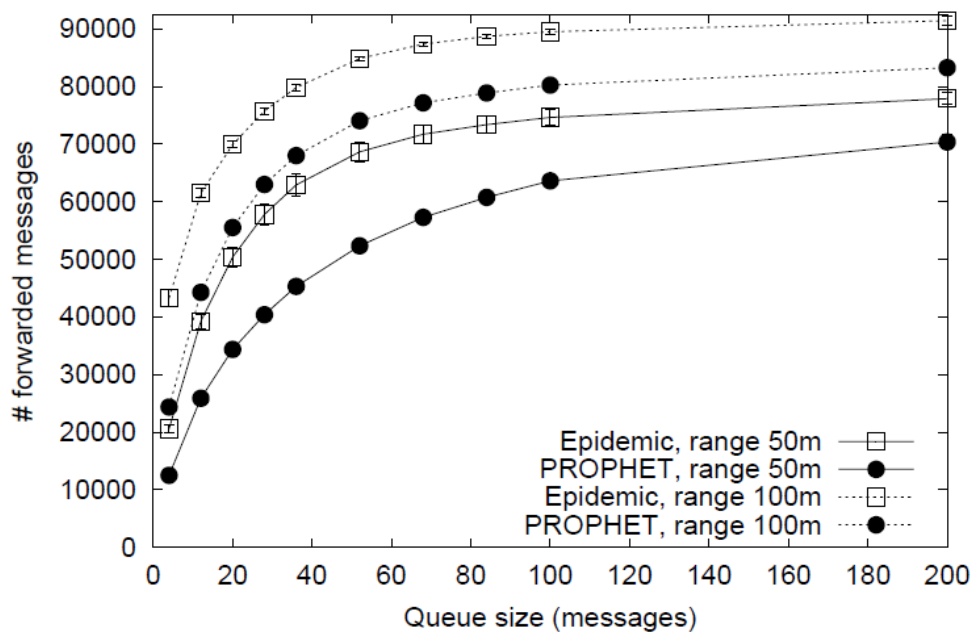
Το μοντέλο PROPHEET (Probabilistic ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity) που βασίζεται στην πιθανοτική δρομολόγηση είναι ικανό να παραδώσει περισσότερα μηνύματα από την επιδημική δρομολόγηση με πολύ μικρότερο πλεονασμό αντιγράφων. Με στόχο τη μείωση του πλεονασμού αυτού προτάθηκε η χρήση ενός μέτρου που ονομάζεται προβλεψιμότητα παράδοσης. Η προβλεψιμότητα παράδοσης αποθηκεύεται στη μνήμη του κόμβου και υπολογίζεται για όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Η λειτουργία του μοντέλου αυτού είναι όμοια με την επιδημική δρομολόγηση με τη διαφορά ότι οι κόμβοι ανταλλάσσουν πλέον ένα μήνυμα μόνο αν η προβλεψιμότητα παράδοσης είναι μεγαλύτερη στον κόμβο ο οποίος έχει τη δυνατότητα να το λάβει. Όταν οι κόμβοι έλθουν σε επαφή, εκτός από το διάνυσμα σύνοψης του επιδημικού σχήματος ανταλλάσσουν και την αποθηκευμένη πληροφορία σχετικά με την προβλεψιμότητα παράδοσης. Η προβλεψιμότητα παράδοσης έχει μηδενική αρχική τιμή και εξαρτάται από το πλήθος των συναντήσεων των κόμβων, το χρόνο που παρήλθε από την τελευταία συνάντηση των κόμβων και τη μεταβατικότητα. Η μεταβατικότητα βασίζεται στην παρατήρηση ότι αν ο κόμβος A συναντά συχνά τον κόμβο B, και ο κόμβος B συναντά συχνά τον κόμβο Γ, τότε ο κόμβος Γ είναι ικανός να μεταδώσει μηνύματα στον κόμβο A. Η τιμή της προβλεψιμότητας παράδοσης υπολογίζεται ως εξής:

- Με βάση τις συναντήσεις των κόμβων a, b και την αρχική σταθερά P_{init} από τη σχέση $P_{(a,b)} = P_{(a,b)old} + (1 - P_{(a,b)old})P_{init}$.
- Με βάση τη σταθερά γήρανσης γ και το πλήθος k των χρονικών μονάδων που παρήλθαν από την τελευταία φορά που η τιμή της προβλεψιμότητας παράδοσης αυξήθηκε από τη σχέση $P_{(a,b)} = P_{(a,b)old}\gamma^k$.
- Με βάση τη σταθερά β και τη μεταβατικότητα στους κόμβους a, b, c από τη σχέση $P_{(a,c)} = P_{(a,c)old} + (1 - P_{(a,c)old})P_{(a,b)}P_{(b,c)}\beta$.

Οι σταθερές P_{init} , β , γ επιλέγονται από το σχεδιαστή του συστήματος και από αυτές εξαρτάται η επίπτωση που θα έχουν το πλήθος των συναντήσεων των κόμβων, ο

χρόνος που παρήλθε από την τελευταία συνάντηση των κόμβων και η μεταβατικότητα, αντίστοιχα, στον υπολογισμό της προβλεψιμότητας παράδοσης.

Η πιθανοτική δρομολόγηση προτάθηκε με στόχο τη βελτίωση της σχέσης ανταλλαγής που επιτυγχάνει η επιδημική δρομολόγηση μεταξύ ποσοστού παράδοσης και πλεονασμού αντιγράφων των μηνυμάτων. Στο Σχ.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των δύο σχημάτων δρομολόγησης για ακτίνα κάλυψης κόμβων 50 και 100 μέτρα και περιοχή προσομοίωσης 3000×1500 μέτρα. Η κίνηση των κόμβων στηρίζεται στο μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (εδάφιο 3.4). Και για τις δύο τιμές της ακτίνας κάλυψης με την πιθανοτική δρομολόγηση μειώνεται σημαντικά ο πλεονασμός μηνυμάτων λόγω αντιγραφής στο δίκτυο. Στο σχήμα διακρίνεται και η εξάρτηση της επίδοσης του σχήματος δρομολόγησης από την ακτίνα κάλυψης των κόμβων. Από τη μια πλευρά, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα κάλυψης τόσο μικρότερη είναι η συχνότητα συνάντησης των κόμβων και επομένως απαιτούνται περισσότερα αντίγραφα ανά μήνυμα ώστε το μήνυμα να παραδοθεί στον προορισμό. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της ακτίνας κάλυψης συνεπάγεται την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας από τον κόμβο και επομένως μειώνεται η διάρκεια ζωής του κόμβου.



Σχήμα 3.2: Σύγκριση πλεονασμού αντιγράφων μηνυμάτων επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης

3.2.6 Spray Δρομολόγηση

Το σχήμα δρομολόγησης Spray σχεδιάστηκε με στόχο τη μείωση του μεγάλου πλεονασμού μηνυμάτων λόγω αντιγραφής που απαιτεί η επιδημική δρομολόγηση. Στο σχήμα αυτό η πηγή ενός μηνύματος μαζί με το αρχικό μήνυμα μοιράζει κουπόνια (tokens) τα οποία ορίζουν το μέγιστο πλήθος αντιγράφων του μηνύματος που μπορούν να υπάρξουν στο δίκτυο. Τα σχήματα δρομολόγησης Spray με ελεγχόμενη αντιγραφή μελετώνται στα εδάφια που ακολουθούν.

3.2.6.1 Βασικά σχήματα Spray δρομολόγησης

3.2.6.1.1 Spray and Wait

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό όταν μια πηγή δημιουργεί ένα νέο μήνυμα, δημιουργεί ταυτοχρόνως και L κουπόνια προώθησης για το μήνυμα αυτό. Το κουπόνι δίνει τη δυνατότητα στον κόμβο που έχει στην κατοχή του το μήνυμα να δημιουργήσει και να προωθήσει ένα αντίγραφο του μηνύματος. Κατά τη διάρκεια της φάσης spray τα μηνύματα προωθούνται με τους εξής κανόνες:

- Όταν ένας κόμβος που μεταφέρει ένα μήνυμα με $c > 1$ κουπόνια έλθει σε επαφή με κάποιο κόμβο που δεν έχει στη μνήμη του το μήνυμα αυτό, τότε προωθεί ένα αντίγραφο του μηνύματος στον κόμβο αυτόν. Επιπλέον, δίνει w κουπόνια στον κόμβο αυτόν και κρατά τα υπόλοιπα $c - w$ (spray φάση).
- Αν $c = 1$, δηλαδή στον κόμβο έχει απομείνει μόνο ένα κουπόνι, ο κόμβος αναμένει μέχρι να έλθει σε επαφή με τον προορισμό του μηνύματος και να παραδώσει το μήνυμα (wait φάση).

3.2.6.1.2 Binary Spray δρομολόγηση

Η καινοτομία του σχήματος αυτού είναι ότι κατά τη διάδοση των μηνυμάτων στο δίκτυο ο κόμβος παραδίδει το αντίγραφο του μηνύματος μαζί με τα μισά κουπόνια που έχει στην κατοχή του και κρατά τα υπόλοιπα μισά για τον ίδιο. Η πηγή ενός μηνύματος έχει αρχικά L κουπόνια. Κάθε κόμβος A που έχει $n > 1$ κουπόνια και συναντά άλλον κόμβο B που δεν έχει αντίγραφο του μηνύματος αυτού, εκτός από το αντίγραφο του μηνύματος παραδίδει $\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ κουπόνια στον κόμβο B και κρατά τα

υπόλοιπα $\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$. Όταν ο κόμβος έχει μόνο ένα κουπόνι στην κατοχή του το σχήμα δρομολόγησης μετατρέπεται σε αυτό της άμεσης επαφής ή σε ένα από τα σχήματα Spray δρομολόγησης.

3.2.6.2 Δρομολόγηση Spray με συναρτήσεις χρησιμότητας (Utility-based Spraying)

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί παρόμοια με τη δρομολόγηση Spray, δηλαδή χρησιμοποιεί προωθητικά κουπόνια για να χορηγήσει σε ένα κόμβο το δικαίωμα να προωθήσει περαιτέρω τα αντίγραφα του μηνύματος. Επιπλέον, κάθε κόμβος i διαθέτει μια συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(j)$ για κάθε άλλο κόμβο j στο δίκτυο. Η $U_i(j)$ σχετίζεται με την πιθανότητα ο κόμβος i να παραδώσει μήνυμα στον κόμβο j και βασίζεται σε πλήθος διαφορετικών παραμέτρων (για παράδειγμα το ιστορικό συναντήσεων των κόμβων, την κινητικότητα, τη φιλία). Όταν ένας κόμβος i , ο οποίος μεταφέρει ένα αντίγραφο μηνύματος για τον προορισμό d και $c > 1$ προωθητικά κουπόνια, συναντήσει ένα κόμβο j που δεν έχει αντίγραφο του μηνύματος, προωθεί το μήνυμα με έναν από τους ακόλουθους κανόνες:

- Κανόνας 1: αν $U_j(d) > U_{th}$ για κάποια τιμή κατωφλίου U_{th}
- Κανόνας 2: αν $U_j(d) > U_i(d)$

Παραδίδει επίσης w προωθητικά κουπόνια και κρατά τα υπόλοιπα $c-w$ για τον εαυτό του.

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας μπορεί να κατηγοριοποιηθούν στις εξής:

- *Συναρτήσεις χρησιμότητας εξαρτώμενες από τον προορισμό (Destination-dependent Utility)*

Ένας κόμβος i μπορεί να είναι βέλτιστος αναμεταδότης για τον προορισμό d_1 ενώ ένας κόμβος j για τον προορισμό d_2 . Αυτό σημαίνει ότι $U_i(d_1) > U_j(d_1)$ και $U_j(d_2) > U_i(d_2)$. Οι συναρτήσεις αυτές εισάγουν πολυπλοκότητα στο σύστημα και απαιτείται μνήμη ώστε κάθε κόμβος να διαθέτει συνάρτηση χρησιμότητας για όλους τους υπόλοιπους.

- *Συναρτήσεις χρησιμότητας μη εξαρτώμενες από τον προορισμό (Destination-independent Utility)*

Η συνάρτηση χρησιμότητας ενός κόμβου είναι ανεξάρτητη του προορισμού αλλά εξαρτάται από κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κόμβου αυτού. Αυτό σημαίνει ότι κάποιος κόμβος μπορεί να είναι ιδανικός αναμεταδότης προς όλους τους προορισμούς, δηλαδή μπορεί να ισχύει $U_i(d_1) \geq U_j(d_1) \Rightarrow U_i(d) \geq U_j(d)$, για τους περισσότερους κόμβους j, d . Οι καλύτεροι αναμεταδότες μπορεί να είναι οι κόμβοι με τη μεγαλύτερη κινητικότητα, τους περισσότερους φίλους, ή τους περισσότερους πόρους. Αυτό όμως σημαίνει ότι οι κόμβοι αυτοί επιβαρύνονται και ότι η κίνηση δεν κατανέμεται ισότιμα στο δίκτυο.

Μια διάκριση σχημάτων δρομολόγησης με βάση τον τρόπο υπολογισμού της συνάρτησης χρησιμότητας είναι η εξής:

- *Last-Seen-First (LSF) Spraying*

Σε αυτό το σχήμα κάθε κόμβος i διατηρεί ένα χρονόμετρο $\tau_i(j)$ για κάθε κόμβο j στο δίκτυο το οποίο καταγράφει το χρόνο που παρήλθε από τη στιγμή που συναντήθηκαν οι δύο κόμβοι την τελευταία φορά. Αρχικά τίθεται $\tau_i(i) = 0$ και $\tau_i(j) = \infty, \forall i, j$. Αν ο κόμβος i συναντήσει τον κόμβο j , τίθεται $\tau_i(j) = 0$, αλλιώς το $\tau_i(j)$ αυξάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τελικά, για τη συνάρτηση χρησιμότητας ισχύει

$$U_i(j) = \frac{1}{1 + \tau_i(j)}.$$

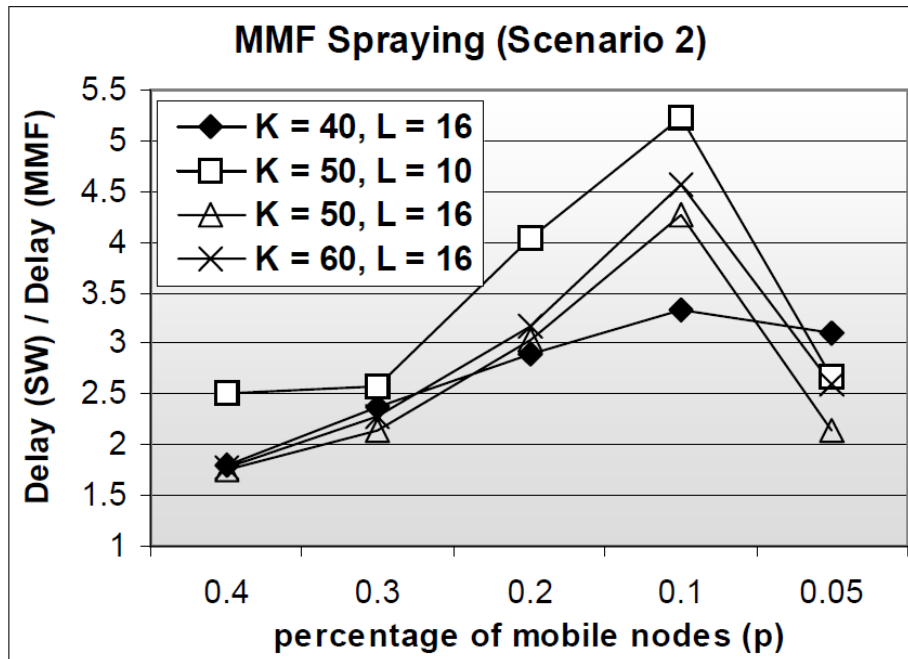
- *Most-Mobile-First (MMF) Spraying*

Υποτίθεται ότι υπάρχουν m συνολικά ετικέτες κόμβων, $LABEL_1, LABEL_2, \dots, LABEL_m$. Σε κάθε κόμβο ανατίθεται μία από τις ετικέτες $LABEL_{(i)}$, και καθορίζεται η χρησιμότητα ενός κόμβου i ως $U_i(j) = U_i = LABEL_{(i)} \forall j$. Τέλος, οι ανωτέρω ετικέτες τοποθετούνται κατά σειρά προτίμησης ανάλογα με την κινητικότητα του κόμβου $LABEL_1 > LABEL_2 > \dots > LABEL_m$ και μπορεί να αφορούν το είδος του κόμβου. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο VANET οι ετικέτες αυτές μπορεί να είναι «Λεωφορείο», «Ταξί», ..., «Τραμ».

- *Most-Social-First (MSF) Spraying*

Στην περίπτωση αυτή κάθε κόμβος i διατηρεί ένα τρέχοντα μέσο όρο δείκτη κοινωνικότητας S_i ως εξής: για δεδομένο χρονικό διάστημα $t_n = [(n-1)T, nT]$ (όπου T η διάρκεια ολισθαίνοντος παραθύρου), μετρά τον αριθμό των μοναδικών ταυτοτήτων των κόμβων που συνάντησε, $N_i(n)$. Κατόπιν, στο τέλος του παραθύρου n , ανανεώνει το δείκτη S_i ως $S_i = (1-\alpha)S_i + \alpha N_i(n)/T$, και συνεχίζει στο επόμενο διάστημα t_{n+1} . Η

παράμετρος α είναι το βάρος που δόθηκε στη συγκεκριμένη μέτρηση. Τελικά, η χρησιμότητα ενός κόμβου δίνεται από τη σχέση $U_i(j)=U_i=S_i, \forall j$.



Σχήμα 3.3: Το σχήμα MMF παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση έναντι του Spray and Wait ως συνάρτηση του ποσοστού των χρησικών αναμεταδοτών στο δίκτυο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για διάφορες περιπτώσεις K ακτίνας κάλυψης των κόμβων και L αρχικών κουπονιών

3.2.7 Άλλα σχήματα δρομολόγησης

3.2.7.1 MaxProp

Το σχήμα δρομολόγησης MaxProp [37] σχεδιάστηκε με στόχο την αύξηση του ποσοστού παράδοσης των μηνυμάτων και τη μείωση της καθυστέρησης παράδοσης. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός χρησιμοποιούνται οι εξής μηχανισμοί:

- Εκτίμηση πιθανότητας παράδοσης

Το MaxProp αναθέτει βάρη στις ζεύξεις ώστε να εκτιμηθεί η πιθανότητα παράδοσης ενός μηνύματος μέσω μιας διαδρομής. Έστω S το σύνολο των κόμβων. Κάθε κόμβος $i \in S$ παρακολουθεί την πιθανότητα συνάντησης με κάποιο κόμβο $j \in S$. Αρχικά η

πιθανότητα αυτή τίθεται ίση με $\frac{1}{S-1}$. Κάθε φορά που δύο κόμβοι συναντώνται η

πιθανότητα συνάντησης αυξάνεται κατά μια μονάδα και ύστερα κανονικοποιείται.

- *Διαχείριση της μνήμης*

Ο τρόπος διαχείρισης της μνήμης είναι από τα σημαντικότερα ζητήματα σχεδίασης ενός σχήματος δρομολόγησης στα DTN δίκτυα. Αν ένα μήνυμα απορριφθεί λόγω πλήρωσης της μνήμης, υπάρχει πιθανότητα να μην παραδοθεί στον προορισμό. Οι περιπτώσεις για τις οποίες το συνολικό ποσοστό παράδοσης του δικτύου δεν μειώνεται μολονότι απορρίφθηκε το αντίγραφο ενός μηνύματος είναι οι εξής:

- Ένα άλλο αντίγραφο του ίδιου μηνύματος έχει ήδη φθάσει στον προορισμό
- Κάποιο αντίγραφο του μηνύματος θα παραδοθεί ακόμα και αν αυτός ο κόμβος το απορρίψει
- Δεν υπάρχει εφικτή διαδρομή από τον κόμβο προς τον προορισμό κατά τη διάρκεια ζωής του μηνύματος.

Με στόχο την εκτίμηση του λόγου για τον οποίο το συνολικό ποσοστό παράδοσης του δικτύου δεν μειώνεται, στην πρώτη περίπτωση το MaxProp χρησιμοποιεί μηνύματα επιβεβαιώσεων (ACK) για κάθε μήνυμα που παραδίδεται. Τα μηνύματα επιβεβαιώσεων διαδίδονται σε όλο το δίκτυο. Στη δεύτερη περίπτωση, της οποίας η εκτίμηση είναι και η πλέον δύσκολη, χρησιμοποιεί ένα μετρητή βημάτων του μηνύματος στο δίκτυο. Τα μηνύματα με το μεγαλύτερο πλήθος βημάτων απορρίπτονται καθώς είναι πιθανότερο ένα από τα αντίγραφά τους να έχει φθάσει ήδη στον προορισμό. Τέλος, για την εκτίμηση της τρίτης περίπτωσης χρησιμοποιείται το μέτρο της πιθανότητας παράδοσης.

Συνοπτικά, όταν η μνήμη είναι πλήρης, το MaxProp διαγράφει αρχικά τα μηνύματα επιβεβαιώσεων, κατόπιν τα μηνύματα που έχουν φθάσει σε ένα κατώφλι βημάτων και η πιθανότητα παράδοσης στον προορισμό αυτόν είναι μικρή και τέλος τα μηνύματα με τα περισσότερα βήματα κάτω από το κατώφλι αυτό.

3.2.7.2 Δρομολόγηση κοινωνικής επίγνωσης: BUBBLE rap

Στα σχήματα δρομολόγησης κοινωνικής επίγνωσης επιλέγεται ένα σύνολο βέλτιστων αναμεταδοτών με κριτήριο την κοινωνικότητα μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων και η επιτυχής παράδοση βασίζεται στους κόμβους αυτούς. Ο αλγόριθμος της δρομολόγησης αυτής αναθέτει σε κάθε κόμβο ένα δείκτη κοινωνικότητας ο οποίος είναι χρονικά μεταβαλλόμενος. Κάθε κόμβος προωθεί τα μηνύματα στους

περισσότερο κοινωνικούς κόμβους, δηλαδή στους κόμβους με τους υψηλότερους δείκτες κοινωνικότητας. Η δρομολόγηση κοινωνικής επίγνωσης έχει ιδιαίτερη εφαρμογή στη διάδοση πληροφορίας όπως οι υπηρεσίες διαφήμισης, η διάδοση των ειδήσεων, οι περιβαλλοντικές επαγρυπνήσεις. Η συνδεσιμότητα μπορεί να εξασφαλισθεί με βάση τους κοινωνικούς δεσμούς των χρηστών. Οι χρήστες που ανήκουν στην ίδια ομάδα μπορεί να αποχωριστούν μεταξύ τους για μεγάλη περίοδο αλλά είναι πολύ πιθανό να συναντηθούν ξανά. Σε αυτό στηρίζεται η κοινωνική κατάταξη της δρομολόγησης κοινωνικής επίγνωσης. Οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια ομάδα με τον προορισμό ενός μηνύματος είναι ιδανικότεροι αναμεταδότες από κόμβους που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες.

Το BUBBLE rap είναι σχήμα δρομολόγησης που βασίζεται στην κοινωνικότητα των κόμβων [33]. Κάθε κόμβος ανήκει σε τουλάχιστον μία κοινότητα και έχει μια τάξη τόσο εντός της κοινότητάς του όσο και στη γενική κοινότητα που ορίζει όλους τους κόμβους. Στο σχήμα αυτό προτείνεται ένας αλγόριθμος ο οποίος επιλέγει ως αναμεταδότες ενός μηνύματος τους κόμβους με υψηλή γενική τάξη ή τους κόμβους που είναι μέλη της κοινότητας του προορισμού. Αν κάποιος κόμβος συναντήσει κάποιον άλλον, προωθεί το μήνυμα μόνο στις περιπτώσεις όπου:

- οι δύο κόμβοι ανήκουν στην ίδια κοινότητα και η κοινότητα αυτή είναι ίδια με αυτή του προορισμού και η τοπική τάξη του κόμβου που συνάντησε είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη δική του.
- η κοινότητα του κόμβου που συνάντησε είναι ίδια με αυτή του προορισμού ή η γενική τάξη του κόμβου που συνάντησε είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη δική του.

3.3 Διαχείριση της μνήμης

3.3.1 Απαλοιφή μηνυμάτων

Η επιλογή της μεθόδου της απαλοιφής των μηνυμάτων αφού αυτά παραδοθούν στον προορισμό είναι πολύ σημαντική για ένα σχήμα δρομολόγησης. Ιδανικά, αφού παραδοθεί το μήνυμα πρέπει να διαγραφούν όλα τα αντίγραφα του από το δίκτυο ώστε να μην καταλαμβάνεται πλέον η μνήμη των κόμβων από αυτά. Σε DTN δίκτυα αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας αντι-μηνύματα (antipackets), τα οποία

αναλαμβάνουν να ενημερώσουν τους κόμβους ότι το μήνυμα παραδόθηκε. Συγκεκριμένα, μέθοδοι απαλοιφής των μηνυμάτων είναι οι εξής:

- *JUST TTL*

Αυτή είναι η απλούστερη μέθοδος. Όλα τα μηνύματα μένουν στο σύστημα μέχρι TTL (Time To Live) χρόνο από την αρχική στιγμή δημιουργία τους.

- *FULL ERASE*

Με τη μέθοδο αυτή ο κόμβος που παραδίδει κάποιο μήνυμα στον προορισμό διαγράφει το αντίγραφο του που βρίσκεται στη μνήμη του. Είναι λογικό να διαγραφεί αυτό το μήνυμα, αλλά μπορεί και άλλοι κόμβοι του δικτύου να έχουν ακόμα στη μνήμη τους αντίγραφα του μηνύματος και ο προορισμός να λάβει το ίδιο μήνυμα πολλές φορές. Η μετάδοση των αντιγράφων αυτών οδηγεί σε αύξηση της χρήσης των πόρων του συστήματος ενώ το μήνυμα έχει ήδη παραδοθεί.

- *IMMUNE*

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί παρόμοια με την FULL ERASE. Η διαφορά είναι ότι αφού διαγραφεί το μήνυμα, ο ίδιος κόμβος κρατά ένα δείκτη του μηνύματος ώστε ο κόμβος να μη λάβει το μήνυμα αυτό ξανά. Ο δείκτης αυτός αναφέρεται και ως αντι-μήνυμα, αφού προλαμβάνει την «επαναμόλυνση» του κόμβου με το ίδιο μήνυμα.

- *IMMUNE_TX*

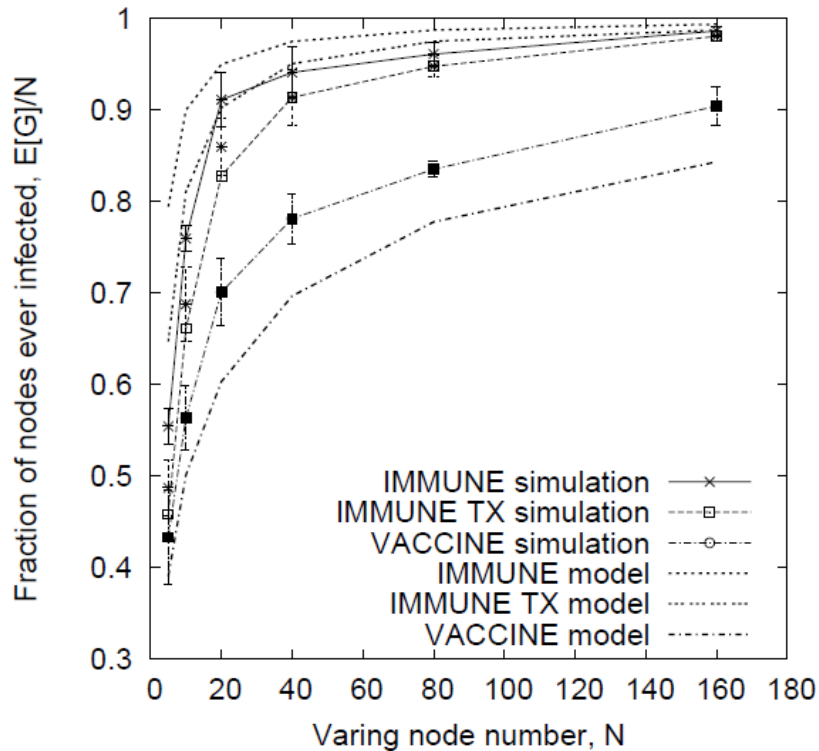
Η μέθοδος αυτή λειτουργεί παρόμοια με τη μέθοδο IMMUNE. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή ο κόμβος μοιράζεται το αντι-μήνυμα με άλλους κόμβους που μεταφέρουν αντίγραφα του μηνύματος που παραδόθηκε. Αυτό σημαίνει ότι ένας κόμβος μπορεί να λάβει ένα αντι-μήνυμα μόνο αν αυτός διατηρεί αντίγραφο του μηνύματος που παραδόθηκε. Το αντίγραφο του μηνύματος σβήνεται και το αντι-μήνυμα διατηρείται στη μνήμη του κόμβου.

- *VACCINE*

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί όμοια με την IMMUNE_TX με τη διαφορά ότι όλοι οι κόμβοι μπορούν να λάβουν το αντι-μήνυμα έτσι ώστε να μη διαδοθούν πλέον άλλα αντίγραφα του μηνύματος που παραδόθηκε.

Τα αντι-μηνύματα δημιουργούν ένα πλεονασμό δεδομένων στο δίκτυο. Ένα τυπικό μέγεθος αντι-μηνύματος είναι 4 bytes και ενός μηνύματος 330 bytes, άρα ο πλεονασμός είναι περίπου 1.2 % ανά αντι-μήνυμα. Στο Σχ.3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός αναλυτικού μοντέλου συνήθων διαφορικών εξισώσεων της Επιδημικής δρομολόγησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα

θεωρητικά αποτελέσματα για όλες τις μεθόδους απαλοιφής που περιγράφηκαν ανωτέρω. Η μέθοδος VACCINE εγγυάται τη «μόλυνση» των λιγότερων κόμβων στο δίκτυο.



Σχήμα 3.4: Ποσοστό «μολυσμένων» κόμβων για διάφορα σχήματα απαλοιφής μηνυμάτων

3.3.2 Στρατηγικές διαχείρισης της μνήμης

Οι κόμβοι των DTN δικτύων έχουν συχνά περιορισμένη μνήμη και απαιτείται να αποθηκεύουν μηνύματα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι στρατηγικές που υιοθετούνται για τη διαχείριση της μνήμης στα DTN δίκτυα είναι οι εξής:

- *Droptail*

Όταν η μνήμη είναι πλήρης, τα νεοαφιχθέντα μηνύματα απορρίπτονται.

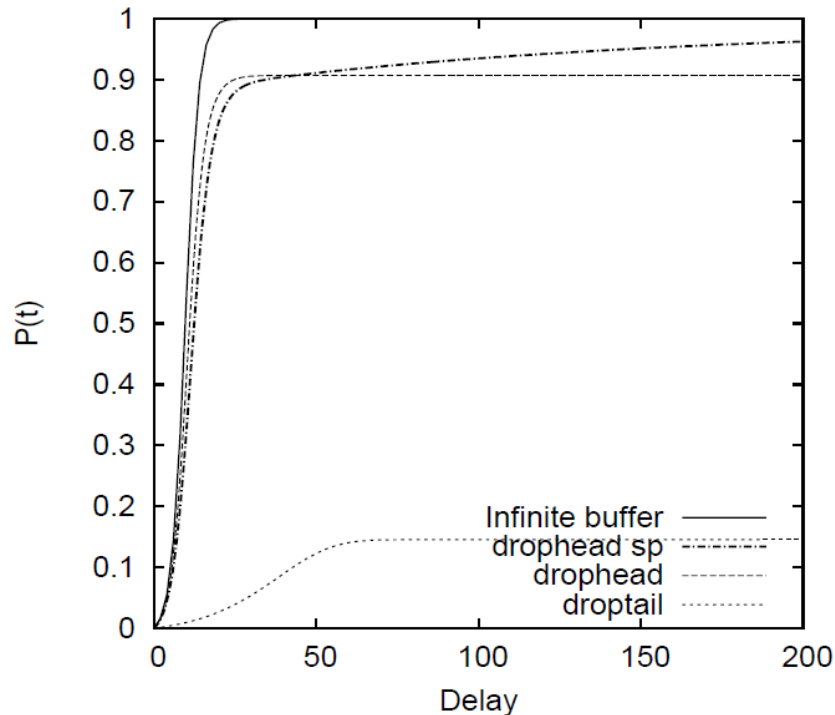
- *Drop-head*

Όταν η μνήμη είναι πλήρης και φθάνει νέο μήνυμα, διαγράφεται το παλαιότερο μήνυμα από τη μνήμη.

- *Drophead_sp*

Όταν ένα μήνυμα φθάσει σε πλήρη μνήμη, ο κόμβος εξετάζει αν αυτό το μήνυμα προέρχεται από την πηγή του ή από κάποιο αναμεταδότη. Αν προέρχεται από την πηγή του μηνύματος, τότε διαγράφεται το παλαιότερο μήνυμα από αναμεταδότη από

τη μνήμη. Αν όλα τα μηνύματα στη μνήμη και το νέο μήνυμα είναι μηνύματα από πηγή, τότε το παλαιότερο μήνυμα διαγράφεται από τη μνήμη. Μηνύματα από κόμβο αναμεταδότη που φθάνουν σε μνήμη γεμάτη από μηνύματα από πηγές απορρίπτονται.



Σχήμα 3.5: Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function-CDF)

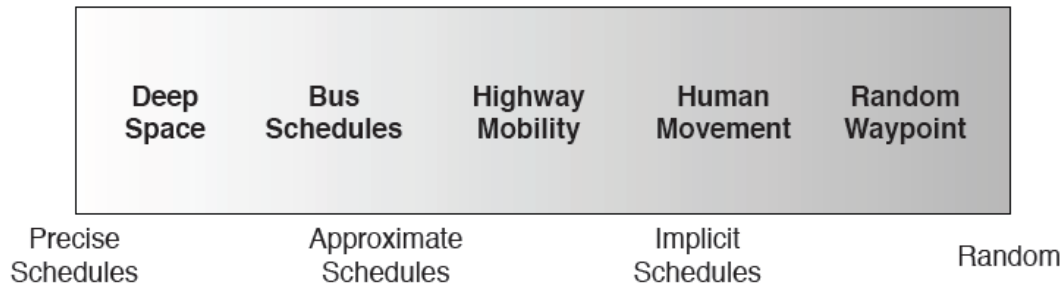
$P(t) = \text{PROP}(T_d < t)$ για τρεις στρατηγικές διαχείρισης μνήμης και για απεριόριστη μνήμη

Στο Σχ.3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της επιδημικής δρομολόγησης με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Το μέγεθος της μνήμης κάθε κόμβου είναι ίσο με πέντε μηνύματα. Από το Σχ.3.5 προκύπτει ότι η στρατηγική drophead_sp πετυχαίνει παράδοση περισσότερων μηνυμάτων από τις άλλες στρατηγικές, αν και τα μηνύματα διαδίδονται ταχύτερα στην περίπτωση της στρατηγικής drophead.

3.4 Μοντέλα κινητικότητας

Η επίδοση των σχημάτων δρομολόγησης στα DTN δίκτυα εξαρτάται από το μοντέλο κινητικότητας των κόμβων. Ο προγραμματισμός των επαφών σχετίζεται άμεσα με το μοντέλο κινητικότητας των κόμβων και επομένως με το είδος του δικτύου το οποίο λαμβάνεται υπόψη. Η κινητικότητα των κόμβων είναι πολύ σημαντική παράμετρος

στη μελέτη επίδοσης ενός σχήματος δρομολόγησης, αφού ο προγραμματισμός των επαφών εξαρτάται από αυτήν. Στο Σχ.3.6 παρουσιάζονται παραδείγματα κινητικότητας για ακριβή, περίπου ακριβή, εύκολα προβλέψιμο και τυχαίο προγραμματισμό επαφών.



Σχήμα 3.6: Το φάσμα της προβλεψιμότητας του χρονοπρογραμματισμού των επαφών

Στη βιβλιογραφία έχουν ερευνηθεί τυχαία μοντέλα κινητικότητας αλλά και μοντέλα κινητικότητας τα οποία στηρίζονται σε ρεαλιστική κίνηση ανθρώπων ή αντικειμένων. Από τα τυχαία μοντέλα κινητικότητας αξίζει να αναφερθούν τα εξής:

- *Μοντέλο κινητικότητας τυχαίου περιπάτου (Random Walk Mobility Model)*

Οι κόμβοι που ακολουθούν το μοντέλο αυτό επιλέγουν τυχαία την ταχύτητα και την κατεύθυνση με την οποία θα κινηθούν. Οι τιμές της ταχύτητας και της κατεύθυνσης που θα ακολουθήσουν επιλέγονται ομοιόμορφα από τα αντίστοιχα σύνολα τιμών που ορίζονται στην προσομοίωση. Οι νέες τιμές της ταχύτητας και της κατεύθυνσης επιλέγονται αφού ο κόμβος διανύσει μια συγκεκριμένη απόσταση ή παρέλθει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από την προηγούμενη επιλογή.

- *Μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (Random Waypoint Mobility Model)*

Οι κόμβοι που ακολουθούν το μοντέλο αυτό επιλέγουν τυχαία έναν προορισμό και μια ταχύτητα, και μετακινούνται στον προορισμό αυτόν. Όταν ο κόμβος φθάσει στον προορισμό, παραμένει στη θέση αυτή για ένα χρονικό διάστημα (χρόνος παύσης) και επιλέγει ένα νέο προορισμό. Ο προορισμός που επιλέγουν οι κόμβοι πρέπει να βρίσκεται εντός μιας περιοχής προσομοίωσης, ενώ οι τιμές της ταχύτητας και του χρόνου παύσης της κίνησης επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από διαστήματα τιμών και είναι συνήθως ομοιόμορφα κατανομημένες στα αντίστοιχα διαστήματα.

- *Μοντέλο κινητικότητας τυχαίας κατεύθυνσης (Random Direction Mobility Model)*

Στο μοντέλο αυτό ο κόμβος κινείται με όμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο κινητικότητας τυχαίου περιπάτου. Όταν ο κόμβος φθάσει στα σύνορα της περιοχής προσομοίωσης σταματά για ένα χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια επιλέγει μια ταχύτητα και μια κατεύθυνση και ακολουθεί την ίδια διαδικασία.

Από τα μοντέλα κινητικότητας που στηρίζονται σε ρεαλιστική κίνηση ανθρώπων ή αντικειμένων αξίζουν να αναφερθούν τα εξής:

- *Μοντέλο κοινότητας*

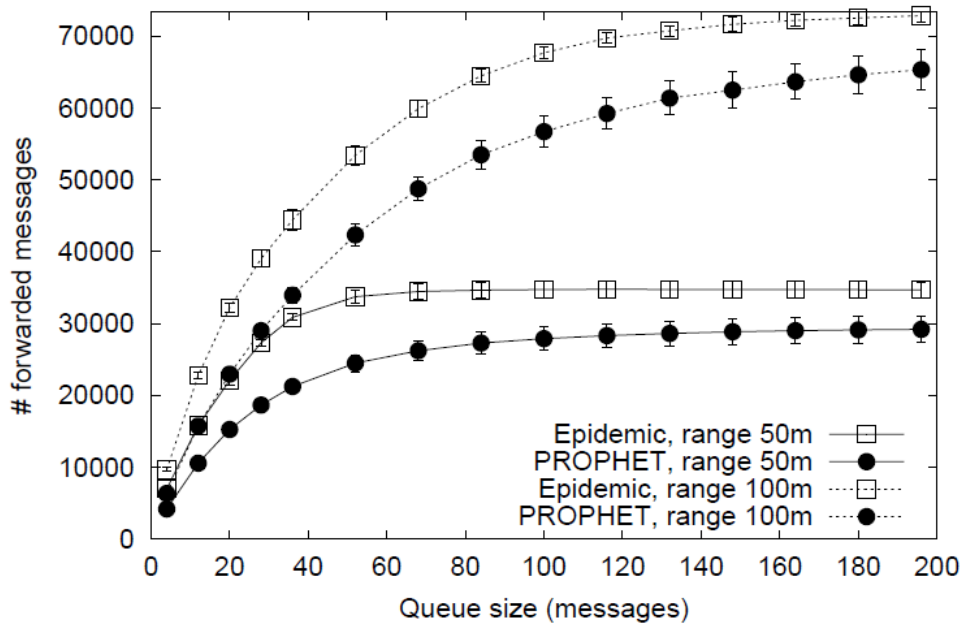
Ένα μοντέλο που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία αποτελείται από μια περιοχή χωρισμένη σε n υπο-περιοχές, δηλαδή $n-1$ κοινότητες και μια περιοχή συνάντησης. Κάθε κόμβος ανήκει σε κοινότητα την οποία είναι πιθανότερο να επισκεφθεί και σε κάθε κοινότητα ανήκει συγκεκριμένο πλήθος κόμβων. Επιπλέον, σε κάθε κοινότητα, και στο σημείο συνάντησης, υπάρχει ένας σταθερός (όχι κινητός) κόμβος που μπορεί να λειτουργεί ως πύλη για την κοινότητα αυτή. Η κίνηση του κόμβου είναι όμοια με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων με τη διαφορά ότι οι προορισμοί επιλέγονται έτσι ώστε αν ο κόμβος βρίσκεται στην κοινότητά του, να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να κινηθεί προς την πύλη (αλλά και πιθανότητα να κινηθεί σε άλλες θέσεις) και αν ο κόμβος βρίσκεται μακριά από την κοινότητά του, να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να επιστρέψει σε αυτή. Το μοντέλο αυτό προσεγγίζει αρκετά ρεαλιστικά την κίνηση των ανθρώπων καθώς αυτή επηρεάζεται από την περιοχή που κατοικούν και την κοινωνικότητά τους. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα αισθητήρων, για παράδειγμα τοποθετημένων σε ζώα. Σε αυτήν την περίπτωση το σημείο συνάντησης μπορεί να είναι ο χώρος όπου τρέφονται.

- *Μοντέλα κινητικότητας οχημάτων*

Τα δίκτυα MANET (Mobile Ad-hoc NETworking) και VANET (Vehicular Ad hoc NETworks) τοποθετούνται συχνά σε οχήματα. Τα οχήματα αυτά μπορεί είτε να είναι ιδιωτικά είτε μέσα μαζικής μεταφοράς. Η κίνηση των κόμβων σε αυτά τα δίκτυα στηρίζεται σε χάρτες. Χαρακτηριστικό των μοντέλων αυτών είναι η συγκεκριμένη διαδρομή που πρέπει να ακολουθούν και το περίπου ακριβές χρονοδιάγραμμα των επαφών μεταξύ των κόμβων. Συνήθως τα μοντέλα αυτά προσαρμόζονται ανάλογα με την χρονική στιγμή που εφαρμόζονται, για παράδειγμα υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα για κίνηση σε καθημερινή μέρα, για κίνηση το απόγευμα ή για κίνηση απογευματινής εκδρομής.

- Μοντέλα κινητικότητας βασισμένα στις δραστηριότητες των ανθρώπων

Όμοια με τα μοντέλα κινητικότητας οχημάτων, οι άνθρωποι μπορούν να κινούνται σε συγκεκριμένες διαδρομές. Η κινητικότητα μπορεί να εξαρτάται από τη μέρα και την ώρα κατά τις οποίες πραγματοποιείται η θεωρητικά προσομοίωση, αλλά και από το λόγο κίνησης των ανθρώπων.



Σχήμα 3.7: Πλεονασμός μηνυμάτων σε συνάρτηση με το μέγεθος της μήμης στο σχήμα PROPHEX με μοντέλο κινητικότητας κοινότητας

Στο Σχ.3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Σχ.3.2 όταν οι κόμβοι ακολουθούν το μοντέλο κοινότητας για την κίνηση τους. Παρατηρείται ότι η υιοθέτηση ενός περισσότερο ρεαλιστικού μοντέλου κίνησης για τους κόμβους οδηγεί σε μείωση του πλεονασμού των μηνυμάτων στο δίκτυο σε σχέση με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων. Αυτό συμβαίνει διότι κόμβοι κοινωνικά συνδεδεμένοι έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα συνάντησης, άρα μεγαλύτερη προβλεψιμότητα παράδοσης για το σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης. Η διάδοση των μηνυμάτων στο δίκτυο γίνεται με βάση την προβλεψιμότητα παράδοσης η οποία ευνοεί τους κόμβους που συναντιούνται συχνά. Επομένως, υιοθετώντας το μοντέλο αυτό μειώνονται τα περιττά αντίγραφα μηνυμάτων καθώς η προβλεψιμότητα παράδοσης συγκλίνει σε περισσότερο ρεαλιστικές πιθανότητες να συναντηθούν οι κόμβοι της ίδιας κοινότητας.

Τα μοντέλα κινητικότητας έχουν στόχο να προσεγγίσουν όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματική κίνηση των κόμβων του δικτύου. Αρκετά στηρίζονται στην κοινωνική ζωή των ανθρώπων και άλλα αντλούν στοιχεία της κίνησης των κόμβων από την κίνησή τους στην πραγματικότητα.

3.5 Εγωισμός στα DTN δίκτυα

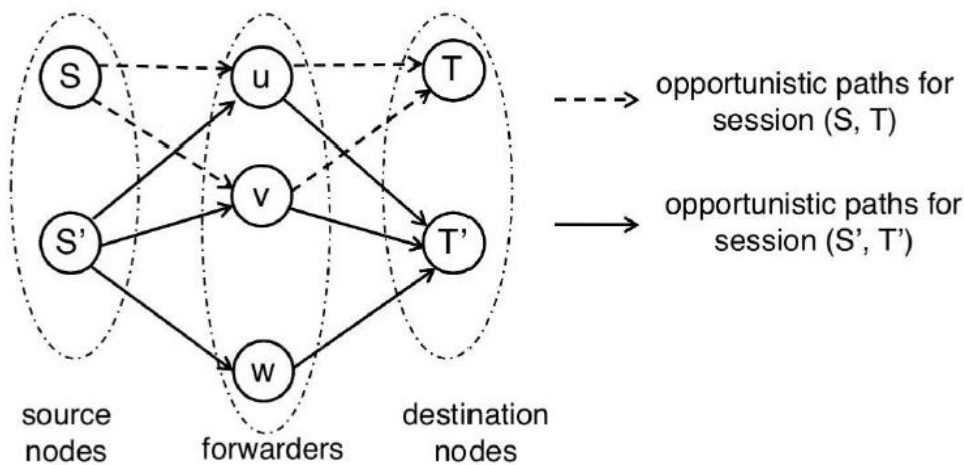
Στα δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών οι κόμβοι συχνά συμπεριφέρονται εγωιστικά, αφού μεταφορτώνουν μηνύματα που τους ενδιαφέρουν, αλλά αρνούνται να αποθηκεύσουν και να μεταδώσουν μηνύματα που απευθύνονται σε άλλους κόμβους. Οι κόμβοι συμπεριφέρονται εγωιστικά γιατί επιθυμούν να εξοικονομήσουν πόρους όπως η μνήμη, η υπολογιστική ικανότητα και η ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση προτείνονται μηχανισμοί οι οποίοι βασίζονται στην ανταλλακτική οικονομία. Ο κόμβος μπορεί να λάβει ένα μήνυμα από κάποιον κόμβο μόνο αν μεταδώσει και αυτός ένα μήνυμα στο δεύτερο κόμβο. Αναπτύσσοντας ένα μοντέλο θεωρίας παιγνίων μπορεί ναδειχθεί ότι η ατομική ευεργετική συμπεριφορά σύμφωνα με τους κανόνες του παιγνίου μπορεί να οδηγήσει τελικά στο βέλτιστο κοινωνικό συμφέρον του συστήματος. Όταν δύο κόμβοι εγκαθιστούν μια σύνδεση ελέγχουν ποια μηνύματα έχουν στη μνήμη τους και επιλέγουν τα μηνύματα που θα ανταλλάξουν. Η ανταλλαγή αυτή γίνεται μήνυμα-με-μήνυμα ώστε αν αρνηθεί κάποιος από τους δύο να μεταδώσει, ο άλλος να μην έχει σημαντικό μειονέκτημα. Τα μηνύματα που δεν αφορούν άμεσα τον κόμβο έχουν ανταλλακτική αξία (barter value) για τον κόμβο. Τα μηνύματα μπορεί να έχουν ετικέτες πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος ανάλογα με τα ενδιαφέροντα των κόμβων. Εκτός από τα πρωτεύοντα μηνύματα τα οποία ενδιαφέρουν τον κόμβο, ο κόμβος μπορεί να επιλέξει να αποθηκεύσει και δευτερεύοντα μηνύματα ώστε να τα ανταλλάξει αργότερα με μηνύματα που τον ενδιαφέρουν [25].

3.6 Εφαρμογές της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα

Η κωδικοποίηση δικτύου μελετάται στον τομέα των DTN δικτύων με στόχο τη μείωση της καθυστέρησης παράδοσης, την αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση των πόρων και την αύξηση του ποσοστού παράδοσης των μηνυμάτων σε σχέση με τα

σχήματα δρομολόγησης που περιγράφηκαν σε προηγούμενα εδάφια. Σε δίκτυα με δυναμικά μεταβαλλόμενη τοπολογία όπως τα DTN δίκτυα η σχεδίαση ενός σχήματος κωδικοποίησης δικτύου πρέπει να είναι αποκεντρωμένη. Η επικρατούσα μέθοδος σχεδίασης είναι αυτή της τυχαίας ανάθεσης και της χρήσης γενεών. Οι κόμβοι συνδυάζουν μόνο τα μηνύματα που ανήκουν στην ίδια γενεά επιλέγοντας τους συντελεστές κωδικοποίησης τυχαία από ένα πεπερασμένο σώμα F_q .

Τα σχήματα δρομολόγησης με χρήση κωδικοποίησης δικτύου που έχουν προταθεί αφορούν περιπτώσεις μονοεκπομπής και πολυεκπομπής. Στα περισσότερα από αυτά η πηγή τεμαχίζει το αρχείο που επιθυμεί να αποστείλει σε n τμήματα και κωδικοποιεί τα τμήματα αυτά με γραμμική κωδικοποίηση δικτύου. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να κωδικοποιήσουν ξανά τα μηνύματα αν έχουν επαρκή πληροφορία, δηλαδή αν έχουν δύο τουλάχιστον κωδικοποιημένα μηνύματα από τα ίδια αρχικά μηνύματα στη μνήμη τους. Ο παραλήπτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει το αρχικό αρχείο αφού φθάσουν σε αυτόν n κωδικοποιημένα μηνύματα με γραμμικά ανεξάρτητα διανύσματα κωδικοποίησης. Το σχήμα αυτό ονομάζεται πολυδιαδρομική κωδικοποίηση δικτύου (Multipath network coding - MNC). Στο Σχ.3.8 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα πολυδιαδρομικής κωδικοποίησης δικτύου. Οι κόμβοι-αναμεταδότες u, v προωθούν μηνύματα των δύο συνόδων μονοεκπομπής μεταξύ των κόμβων S, T και των κόμβων S', T' . Σε περίπτωση που οι σύνοδοι αυτές είναι αρκετά επιβαρυνμένες ο κόμβος w μπορεί να προωθήσει μηνύματα της συνόδου S', T' . Η πληροφορία για το ποιά μηνύματα πρέπει να κωδικοποιηθούν και σε ποιούς κόμβους αναμεταδότες μπορεί να αποκτηθεί από αλγορίθμους που κατανέμουν τους ρυθμούς κωδικοποίησης και ευρυεκπομπής των μηνυμάτων σε όλους τους παραλήπτες.



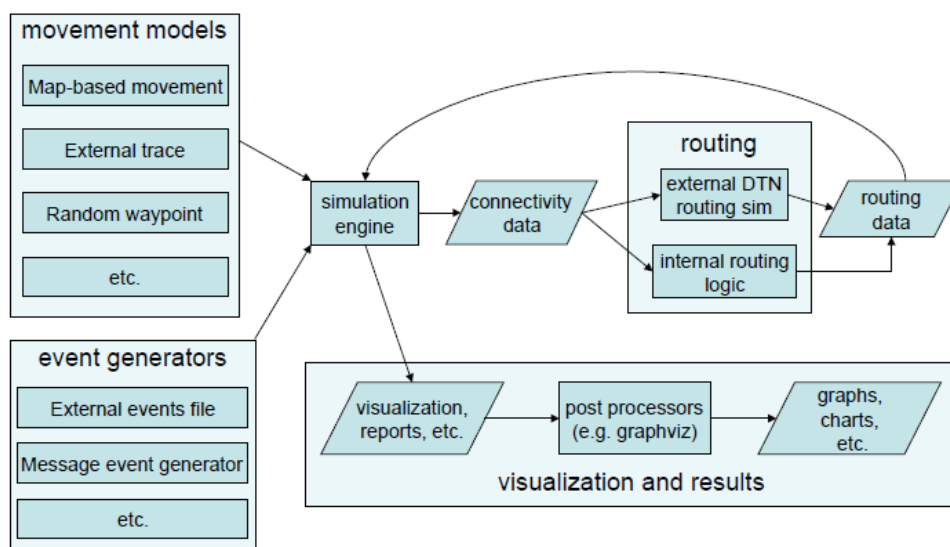
Σχίμα 3.8: Παράδειγμα περίπτωσης πολυδιαδρομικής κωδικοποίησης δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ONE (OPPORTUNISTIC NETWORK ENVIRONMENT)

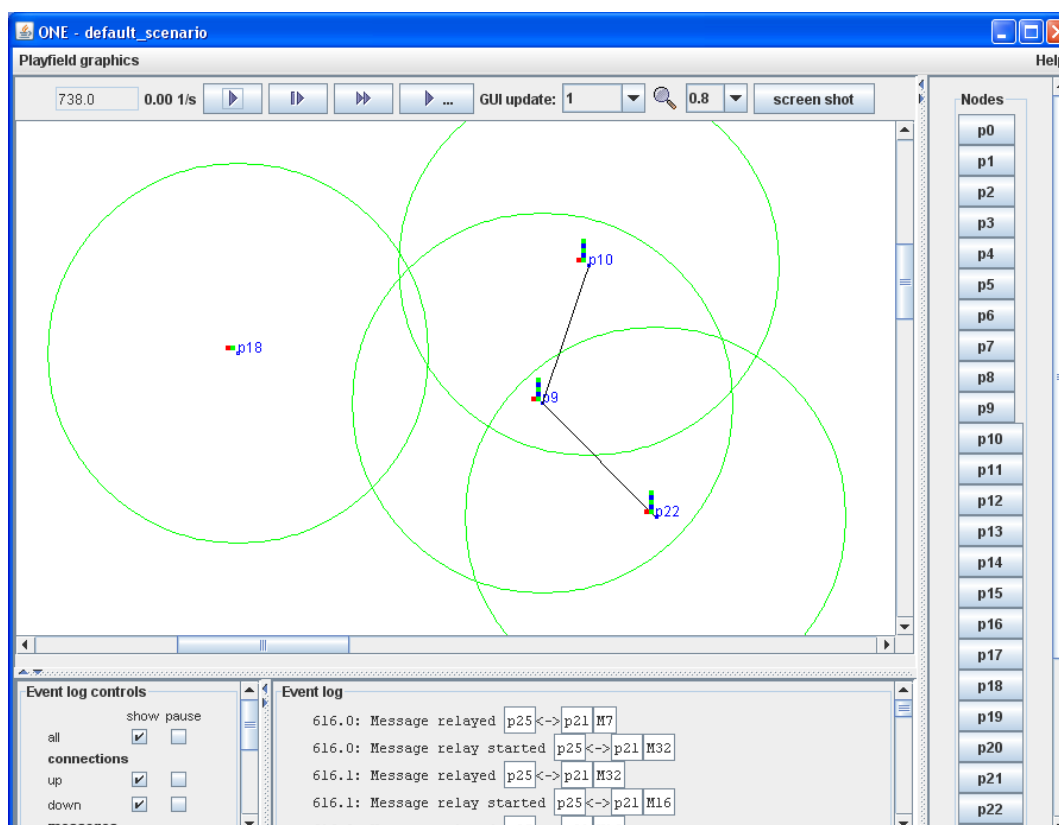
4.1 Περιγραφή του προσομοιωτή ONE

Ο προσομοιωτής ONE δημιουργήθηκε στο τεχνολογικό πανεπιστήμιο του Ελσίνκι με στόχο τη ρεαλιστική προσομοίωση ενός ευκαιριακού δικτυακού περιβάλλοντος. Σε σύγκριση με άλλα περιβάλλοντα προσομοίωσης, ο προσομοιωτής ONE δεν βασίζεται μόνο στην προσομοίωση της δρομολόγησης αλλά συνδυάζει τα μοντέλα κινητικότητας, τα σχήματα δρομολόγησης και την οπτικοποίηση του δικτύου, και είναι εύκολα επεκτάσιμος. Στο Σχ.4.1 παρουσιάζονται οι λειτουργίες του προσομοιωτή ONE. Εκτός από την υλοποίηση των σχημάτων δρομολόγησης και των μοντέλων κινητικότητας, οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν την εξαγωγή αναφορών για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τη δημιουργία γεγονότων, για παράδειγμα τη δημιουργία μηνυμάτων.



Σχήμα 4.1: Επισκόπηση του περιβάλλοντος προσομοίωσης ONE

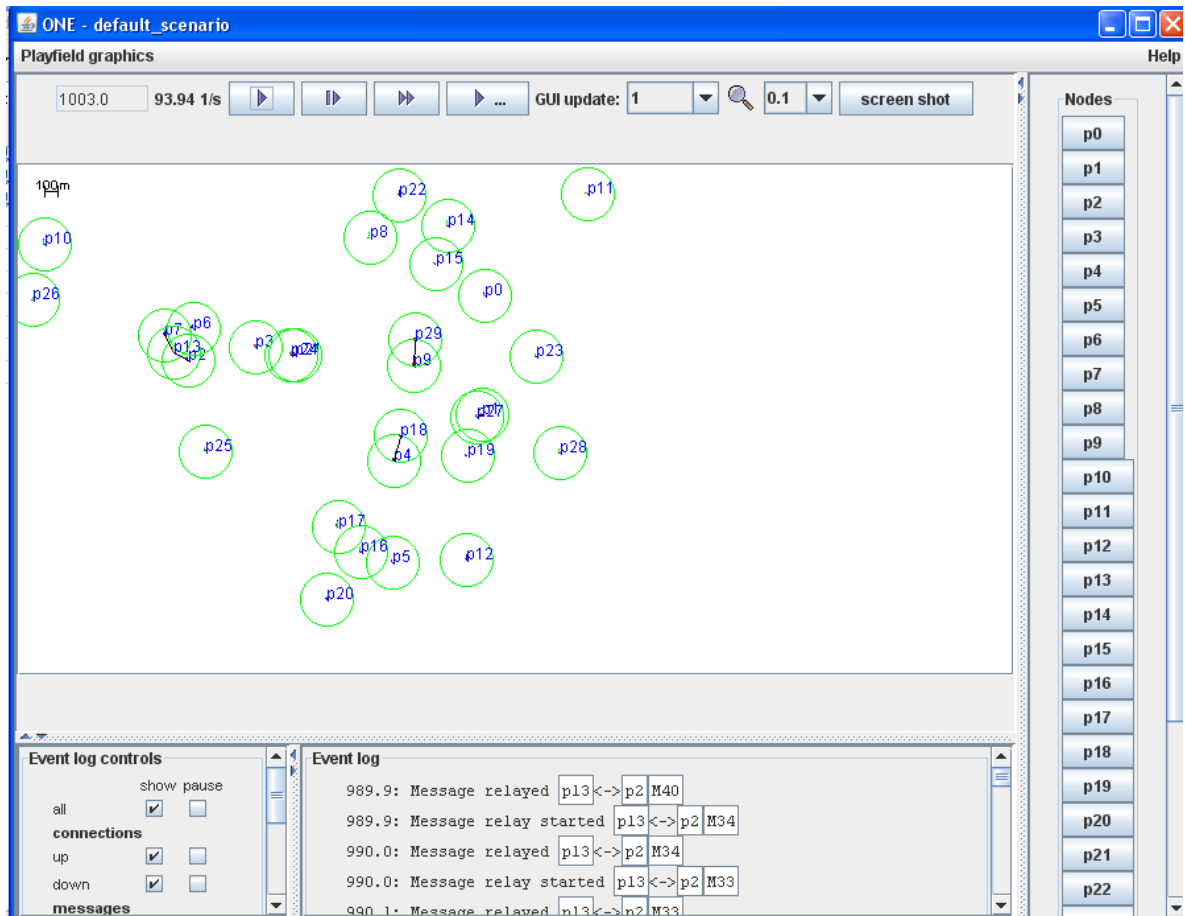
Στο Σχ.4.2 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από τον προσομοιωτή ONE. Κάθε κόμβος βρίσκεται στο κέντρο του κύκλου τον οποίο ορίζει η ακτίνα κάλυψής του. Με μαύρες γραμμές παρουσιάζονται οι εγκατεστημένες συνδέσεις μεταξύ των κόμβων. Ο κόμβος p9 έχει εγκατεστημένες συνδέσεις με τους κόμβους p10 και p22. Με πράσινο χρώμα διαγράφονται οι περιοχές κάλυψης των κόμβων. Όταν κάποιος κόμβος βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης κάποιου άλλου κόμβου, μπορεί να εγκαταστήσει σύνδεση με τον κόμβο αυτόν. Οι κόμβοι έχουν περιορισμένη μνήμη και στο Σχ.4.2 διακρίνεται η ουρά των μηνυμάτων σε κάθε κόμβο.



Σχήμα 4.2: Οπτικοποίηση του δικτύου μέσω του προσομοιωτή ONE

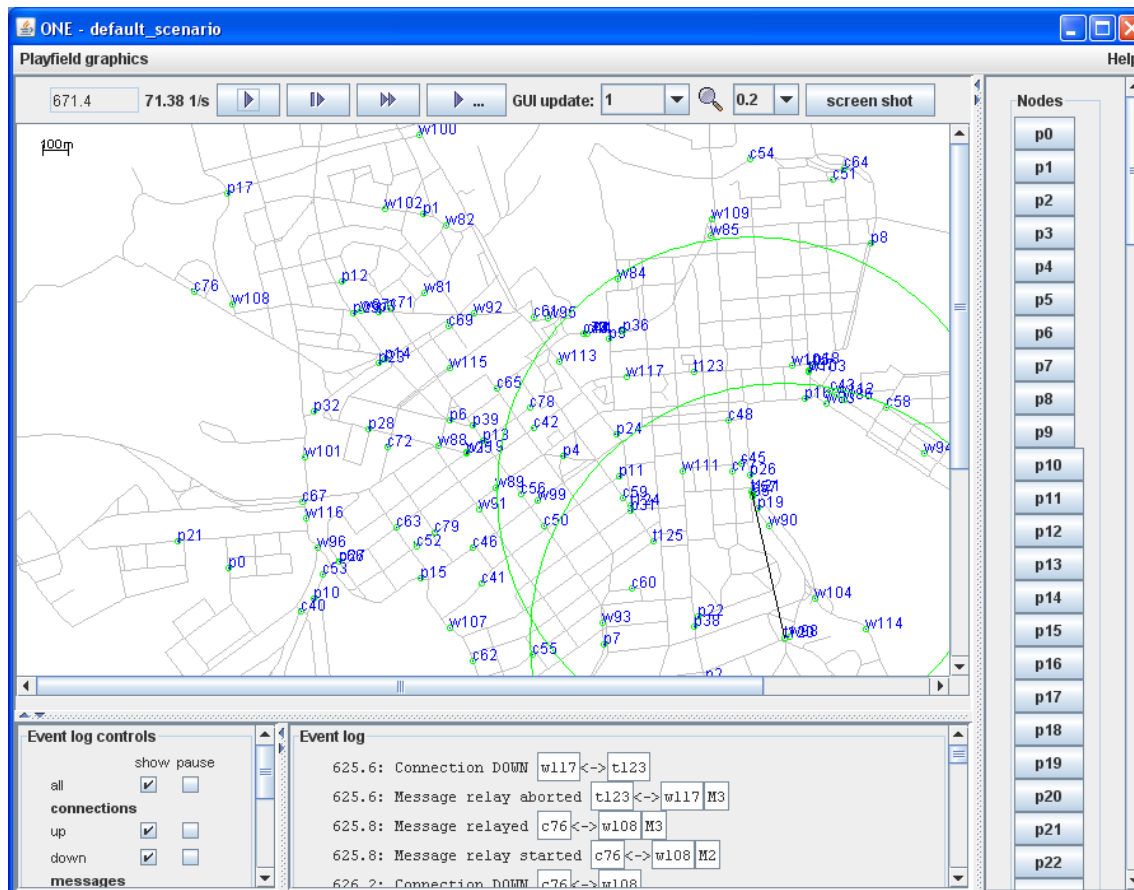
Η περιοχή της προσομοίωσης, η ακτίνα κάλυψης των κόμβων και το μοντέλο κινητικότητάς τους ορίζονται πριν την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Στο Σχ.4.3 φαίνεται στιγμιότυπο από την προσομοίωση δικτύου 30 κόμβων περιοχής 4500×3400 μέτρα, ακτίνα κάλυψης κόμβων 100 μέτρα και μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων. Κατά την προσομοίωση δημιουργούνται ειδοποιήσεις για την

εγκατάσταση ή την απώλεια των συνδέσεων, τη μετάδοση, τη διαγραφή, την αποτυχία μετάδοσης και την παράδοση των μηνυμάτων.



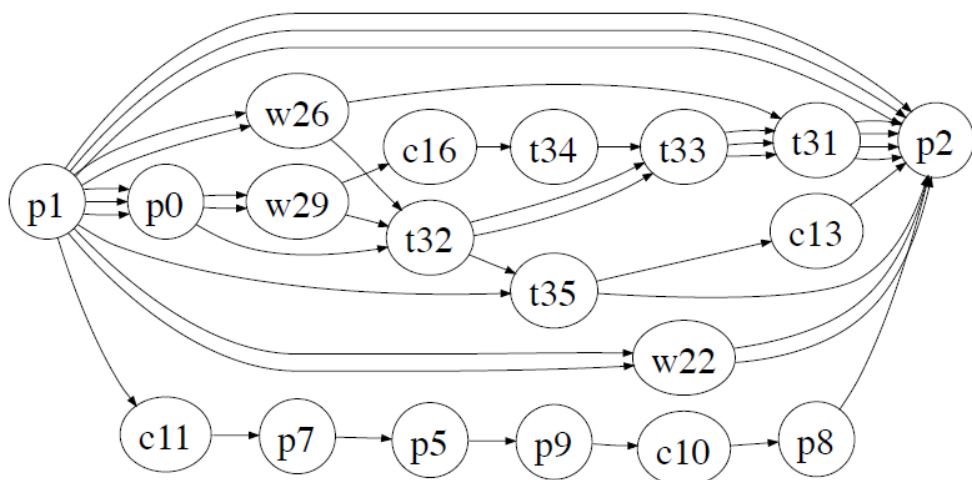
Σχήμα 4.3: Στιγμιότυπο δικτύου με 30 κόμβους και μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων

Σε αντίθεση με το Σχ.4.3, στο Σχ.4.4 οι κόμβοι ακολουθούν μοντέλα κινητικότητας βασισμένα σε χάρτη. Υπάρχουν έξι ομάδες κόμβων κάθε μία από τις οποίες ακολουθεί διαφορετικό μοντέλο κινητικότητας. Οι κόμβοι μπορούν να κινούνται μόνο σε συγκεκριμένες διαδρομές που ορίζονται από το χάρτη.

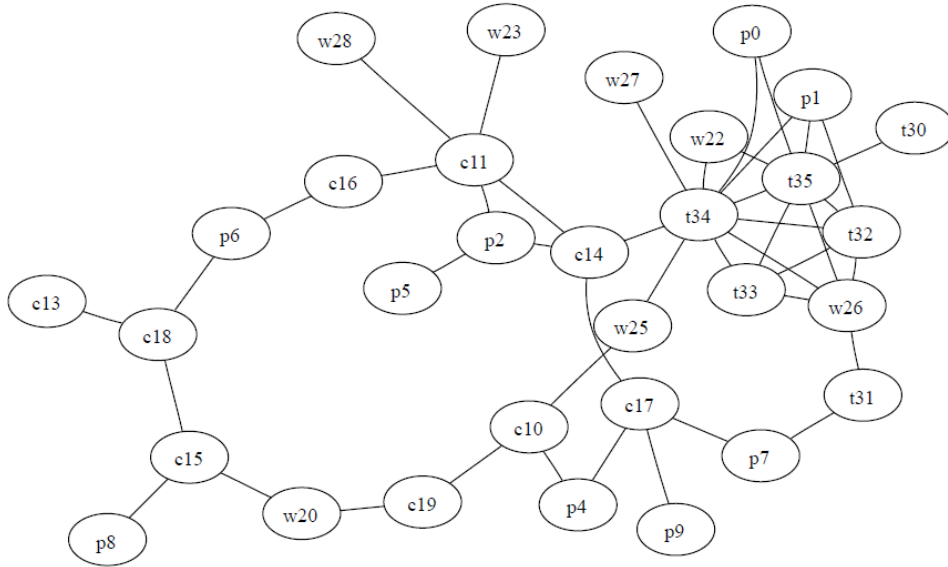


Σχήμα 4.4: Στιγμιότυπο δικτύου με 130 κόμβους και μοντέλα κινητικότητας βασισμένα σε χάρτη

Εκτός από την οπτικοποίηση της προσομοίωσης ο προσομοιωτής ONE μπορεί να εξάγει γράφους των διαδρομών των παραδομένων μηνυμάτων όπως στο Σχ.4.5 ή γράφους γειτνίασης των κόμβων όπως στο Σχ.4.6.



Σχήμα 4.5: Παράδειγμα διαδρομών ενός μηνύματος από τον κόμβο p1 στον κόμβο p2



Σχήμα 4.6: Παράδειγμα γράφου γειτνίασης κόμβων

Στο γράφο γειτνίασης οι κόμβοι που συναντήθηκαν περισσότερες από μια φορές συνδέονται με μια ακμή και κόμβοι που συναντήθηκαν συχνότερα σχεδιάζονται κοντινότερα μεταξύ τους.

4.1.1 Τα σχήματα δρομολόγησης του προσομοιωτή ONE

Τα σχήματα δρομολόγησης του προσομοιωτή ONE περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 και είναι τα εξής:

- Δρομολόγηση άμεσης επαφής
- Επιδημική δρομολόγηση
- PROPHET
- MaxProp
- Spray and Wait
- Binary Spray and Wait

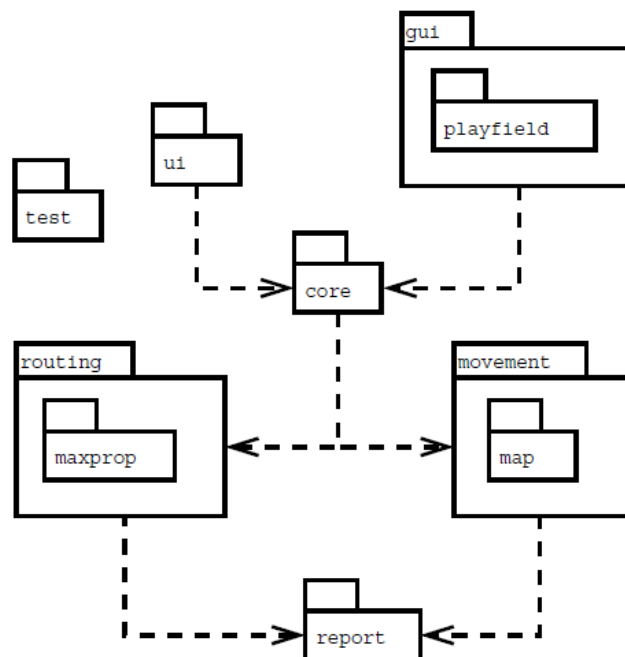
Σε όλα τα σχήματα δρομολόγησης όταν δύο κόμβοι έρχονται σε επαφή και υπάρχει δυνατότητα να ανταλλάξουν μηνύματα, ελέγχουν αρχικά αν έχουν στην κατοχή τους κάποιο μήνυμα που προορίζεται για τον άλλον κόμβο. Αν το μήνυμα έχει ληφθεί νωρίτερα από τον άλλον κόμβο απορρίπτεται. Η δρομολόγηση για τα υπόλοιπα μηνύματα εξαρτάται από το σχήμα δρομολόγησης. Το μήνυμα δρομολόγησης του ONE περιλαμβάνει την κλάση MessageRouter. Η κλάση αυτή καθορίζει τη

συμπεριφορά των κόμβων ως προς τη δρομολόγηση όταν έρχονται σε επαφή. Όλες οι κλάσεις των σχημάτων δρομολόγησης είναι επεκτάσεις της κλάσης αυτής.

4.1.2 Τα μοντέλα κινητικότητας του προσομοιωτή ONE

Το λογισμικό πακέτο κινητικότητας του προσομοιωτή ONE περιέχει κλάσεις για μοντέλα κινητικότητας τυχαίου περιπάτου και τυχαίων στάσεων (βλ. παράγραφο 3.4). Εκτός από τα μοντέλα τυχαίας κινητικότητας, ο προσομοιωτής ONE υποστηρίζει μοντέλα κινητικότητας βασισμένα σε χάρτη όπου οι διαδρομές των κόμβων είναι συγκεκριμένες. Κάθε ομάδα κόμβων μπορεί να ακολουθεί διαδρομή με διαφορετικά χαρακτηριστικά ταχύτητας (για παράδειγμα διαφορετικές τιμές ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας με την οποία κινούνται σε μια διαδρομή), και κάθε κόμβος μπορεί να ακολουθεί διαφορετική διαδρομή.

4.1.3 Η αρχιτεκτονική λειτουργίας του προσομοιωτή ONE



Σχήμα 4.7: Τα πακέτα (package) λογισμικού του ONE

Ο προσομοιωτής ONE είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Τα πακέτα λογισμικού του ONE είναι τα εξής:

- Πακέτο οπτικοποίησης
- Πακέτο δρομολόγησης
- Πακέτο κινητικότητας
- Πακέτο αναφορών
- Πακέτο εισόδου
- Πακέτο δοκιμών σωστής λειτουργίας
- Το κεντρικό πακέτο

Στο Σχ.4.7 παρουσιάζονται όλα τα πακέτα λογισμικού μαζί με τις εξαρτήσεις μεταξύ των πακέτων.

4.2 Υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE

Για την υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE μεταβλήθηκε η κλάση MessageRouter. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου συμπεριφέρονται όμοια κωδικοποιώντας μηνύματα που ανήκουν στην ίδια γενεά και που προορίζονται για τον ίδιο προορισμό. Η κωδικοποίηση που εφαρμόστηκε είναι η γραμμική κωδικοποίηση δικτύου με τυχαία ανάθεση συντελεστών βαρύτητας επί του $GF(2^8)$ για το γραμμικό συνδυασμό των μηνυμάτων. Τα μηνύματα στον προσομοιωτή ONE δημιουργούνται τυχαία προς τυχαίους παραλήπτες και από τυχαίες πηγές. Τα μηνύματα που δημιουργούνται εντός επιλεγμένου χρονικού διαστήματος ανήκουν στην ίδια γενεά. Οι γενεές αποσκοπούν στη μείωση των λανθασμένων κωδικοποιήσεων από τους κόμβους, αφού κωδικοποιούνται μόνο τα μηνύματα που δημιουργήθηκαν χρονικά κοντά και ο παραλήπτης δεν χρειάζεται να αναμένει επί μεγάλο χρονικό διάστημα τα αναγκαία σε πλήθος μηνύματα ώστε να αποκωδικοποιήσει. Η καινοτομία της τεχνικής κωδικοποίησης αυτής είναι ο συνδυασμός μηνυμάτων που προκύπτουν από τυχαίες πηγές προς τον ίδιο παραλήπτη. Στη βιβλιογραφία [15] έχει προταθεί ο συνδυασμός των τμημάτων αρχείων που θρυμματίζονται προκειμένου να κωδικοποιηθούν. Τα αρχεία αυτά προορίζονται προς ένα παραλήπτη, άρα η κωδικοποίηση πραγματοποιείται στην πηγή του αρχείου.

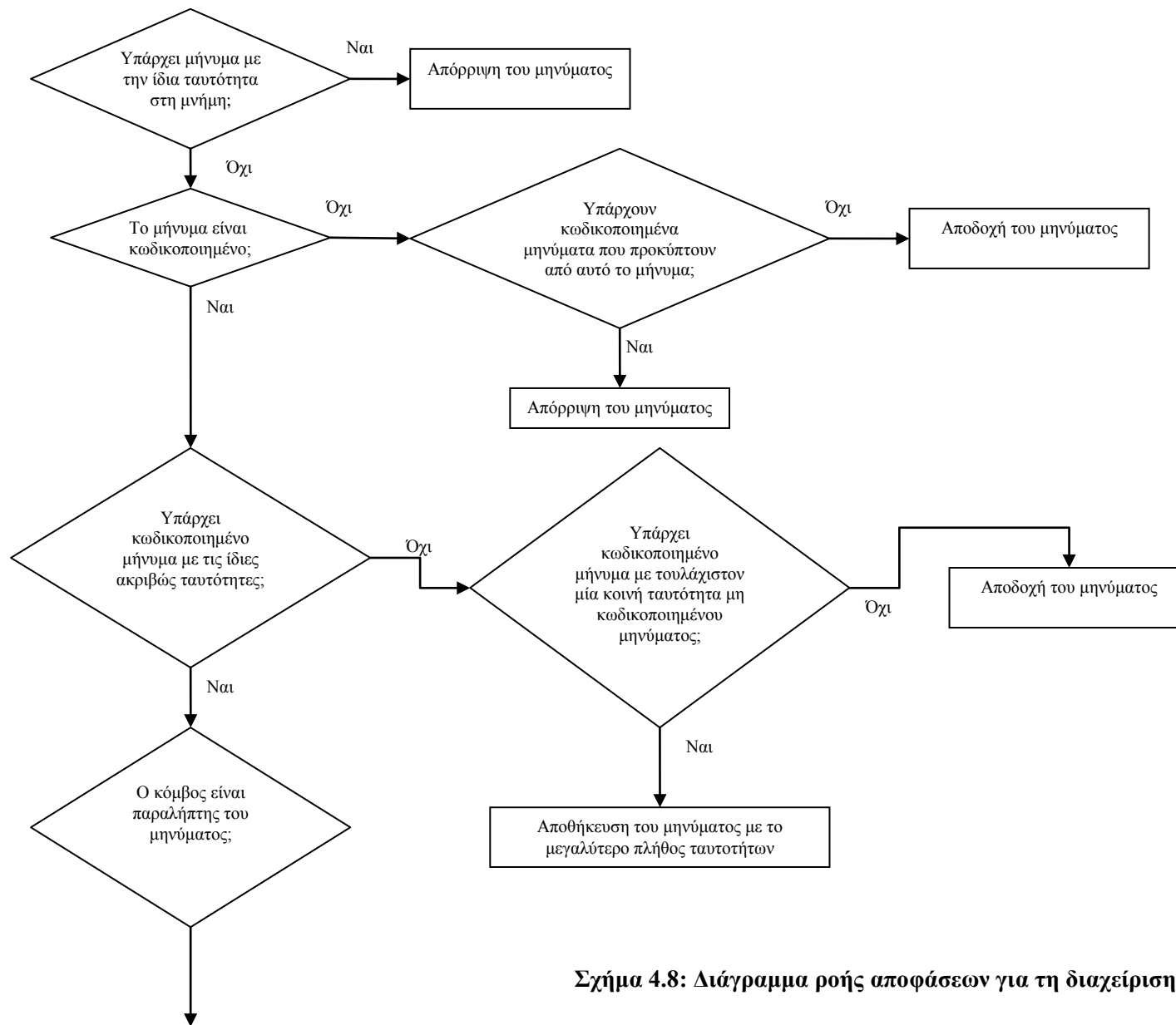
4.2.1 Διαχείριση της μνήμης στον προσομοιωτή ONE

Με στόχο την εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE μεταβλήθηκε η μέθοδος `hasMessage` της κλάσης `MessageRouter`. Η μέθοδος αυτή ελέγχει αν ο κόμβος έχει στη μνήμη του μήνυμα με συγκεκριμένη ταυτότητα. Στο δίκτυο υπάρχουν τόσο κωδικοποιημένα μηνύματα όσο και μη κωδικοποιημένα μηνύματα. Η μέθοδος `hasMessage` μεταβλήθηκε ώστε να περιλαμβάνει ελέγχους τόσο στα μη κωδικοποιημένα όσο και στα κωδικοποιημένα μηνύματα που είναι πιθανό να φθάσουν σε κάποιο κόμβο. Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται παρουσιάζονται με διάγραμμα ροής στο Σχ.4.8. Αρχικά γίνεται έλεγχος για την ύπαρξη μηνύματος στη μνήμη με την ίδια ταυτότητα. Για τα μη κωδικοποιημένα μηνύματα γίνεται έλεγχος ύπαρξης κωδικοποιημένου μηνύματος που προήλθε από τα μη κωδικοποιημένα αυτά μηνύματα. Για τα κωδικοποιημένα μηνύματα γίνονται έλεγχοι για το αν υπάρχουν κωδικοποιημένα μηνύματα που προήλθαν από τα ίδια ακριβώς μη κωδικοποιημένα και για το αν το νεοαφιχθέν μήνυμα αυξάνει την τάξη του πίνακα του κόμβου. Ο πίνακας του κόμβου αποτελείται από τους συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάστηκαν τα μη κωδικοποιημένα μηνύματα για να προκύψει ο γραμμικός συνδυασμός αυτών. Κάθε γραμμή του πίνακα του κόμβου αντιπροσωπεύει και ένα κωδικοποιημένο μήνυμα. Για την εύρεση της τάξης του πίνακα χρησιμοποιείται η μέθοδος απαλοιφής Gauss-Jordan, η οποία περιγράφεται στο Παράρτημα Α. Για τη μείωση του πλεονασμού των μηνυμάτων στο δίκτυο προτάθηκαν τα εξής:

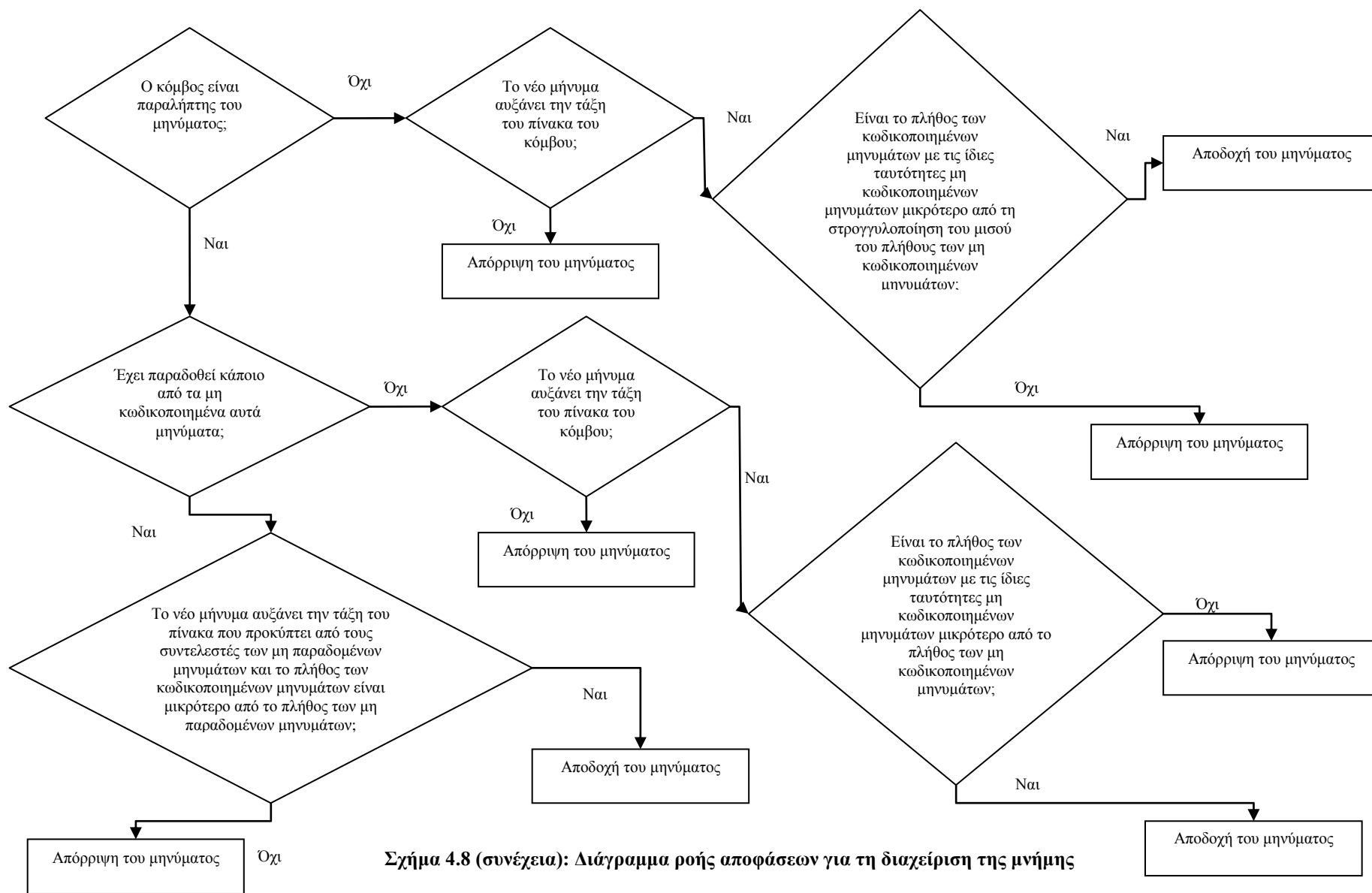
- Περιορισμός των κωδικοποιημένων μηνυμάτων ανά κόμβο στο στρογγυλοποιημένο μισό πλήθος των μη κωδικοποιημένων μηνυμάτων από τα οποία προήλθε το κωδικοποιημένο μήνυμα.
- Σε περίπτωση όπου δύο κωδικοποιημένα μηνύματα προήλθαν από ένα τουλάχιστον κοινό μη κωδικοποιημένο μήνυμα, κρατείται το μήνυμα με το μεγαλύτερο πλήθος μη κωδικοποιημένων μηνυμάτων

Η μέθοδος διαχείρισης της μνήμης σε ένα DTN δίκτυο είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδίασης ενός σχήματος δρομολόγησης. Ο στόχος της υλοποίησης της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE είναι η αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μνήμης με το γραμμικό συνδυασμό των μηνυμάτων που ανήκουν στην ίδια γενιά και προορίζονται για τον ίδιο παραλήπτη. Οι κόμβοι συνδυάζουν γραμμικά τα μηνύματα που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις αυτές και κατόπιν

πραγματοποιείται απαλοιφή των μηνυμάτων αυτών. Άρα το κωδικοποιημένο μήνυμα καταλαμβάνει λιγότερο χώρο στη μνήμη από ότι θα καταλάμβαναν τα μηνύματα χωρίς κωδικοποίηση δικτύου.



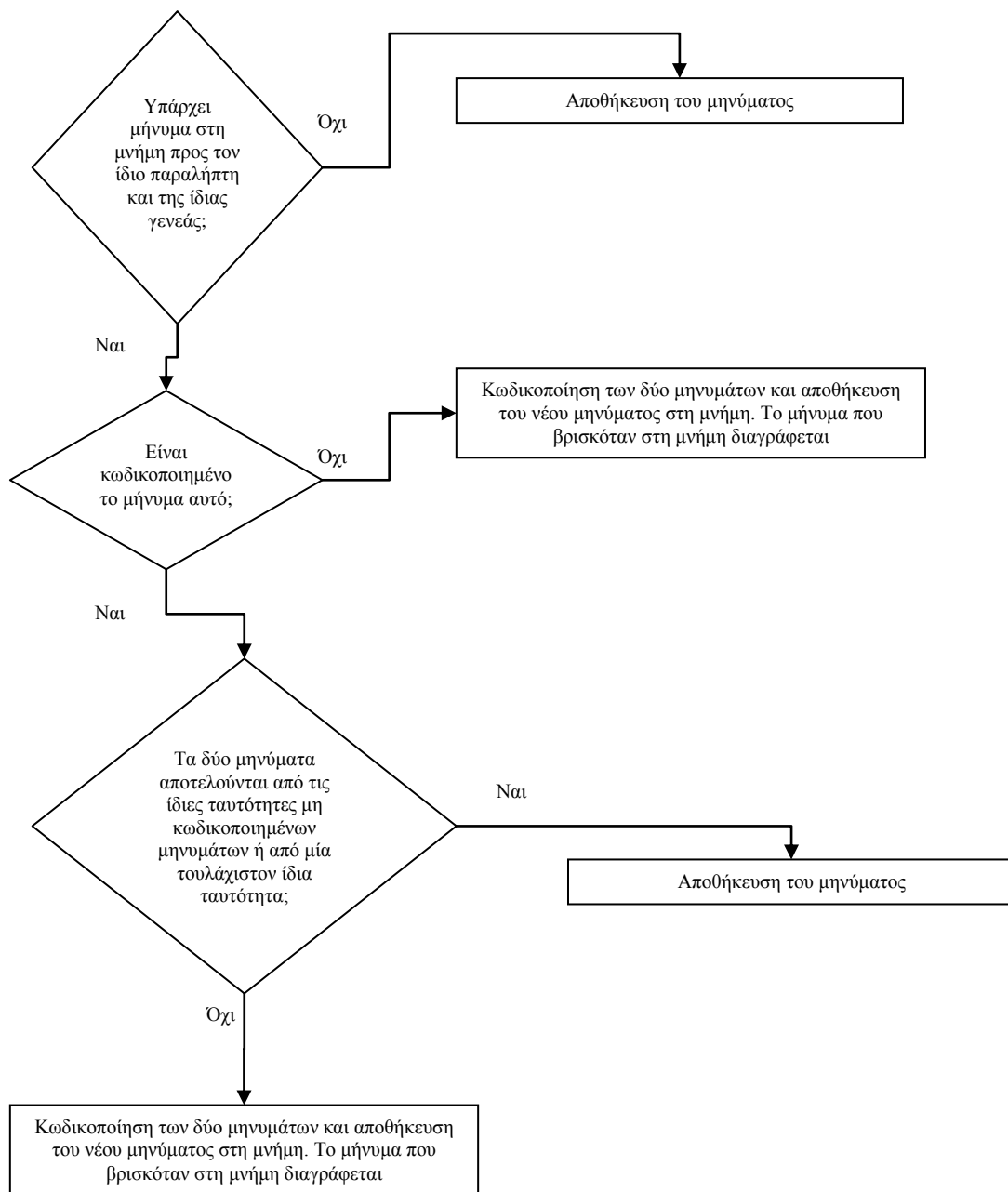
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής αποφάσεων για τη διαχείριση της μνήμης



Σχήμα 4.8 (συνέχεια): Διάγραμμα ροής αποφάσεων για τη διαχείριση της μνήμης

4.2.2 Υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE

Με στόχο την εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE μεταβλήθηκε η μέθοδος `addToMessages` της κλάσης `MessageRouter`. Η μέθοδος αυτή καλείται κατά την αποθήκευση ενός μηνύματος στη μνήμη του κόμβου. Οι κόμβοι μπορούν να συνδυάζουν γραμμικά μηνύματα μόνο τις ίδιας γενεάς και προς τον ίδιο παραλήπτη. Για κάθε μήνυμα που πρόκειται να αποθηκευτεί στη μνήμη του ο κόμβος ελέγχει αν υπάρχουν μηνύματα τα οποία μπορεί να συνδυάσει γραμμικά με το νέο μήνυμα. Αν το νέο μήνυμα είναι κωδικοποιημένο και δεν υπάρχει κωδικοποιημένο μήνυμα στη μνήμη με τουλάχιστον ένα κοινό μη κωδικοποιημένο μήνυμα, πραγματοποιείται κωδικοποίηση δικτύου αλλιώς, το νέο μήνυμα αποθηκεύεται στη μνήμη. Στο Σχ.4.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για την κωδικοποίηση δικτύου μηνυμάτων στον προσομοιωτή ONE. Όλοι κόμβοι του δικτύου μπορούν να εκτελούν κωδικοποίηση δικτύου. Κάθε φορά που φθάνει κάποιο μήνυμα στον κόμβο γίνεται έλεγχος για το αν υπάρχει κάποιο μήνυμα στη μνήμη του κόμβου που ανήκει στην ίδια γενιά και προορίζεται για τον ίδιο παραλήπτη. Αν υπάρχει τέτοιο μήνυμα πραγματοποιείται κωδικοποίηση δικτύου με την προϋπόθεση ότι αν τα μηνύματα είναι κωδικοποιημένα δεν έχουν προκύψει από κοινά μη κωδικοποιημένα μηνύματα ή ότι αν ένα από τα δύο μηνύματα είναι κωδικοποιημένο το κωδικοποιημένο μήνυμα δεν έχει προκύψει από το μη κωδικοποιημένο μήνυμα. Στο νέο κωδικοποιημένο μήνυμα ως TTL (Time To Live) τίθεται το μικρότερο TTL από τα μηνύματα τα οποία συνδυάστηκαν για την καλύτερη χρησιμοποίηση της μνήμης των κόμβων. Η κωδικοποίηση γίνεται με τυχαία ανάθεση όπως περιγράφηκε στις παραγράφους 2.4.2.1 και 2.4.2.2. Η πιθανότητα να μπορεί να γίνει αποκωδικοποίηση από όλους τους παραλήπτες προσδιορίζεται στο Θεώρημα 2.4 και εξαρτάται από το πλήθος των παραληπτών, το πλήθος των σημείων κωδικοποίησης (βλ. Ορισμό 2.7) και το μέγεθος q του πεπερασμένου σώματος F_q . Η κωδικοποίηση δικτύου στον προσομοιωτή ONE πραγματοποιείται επί του σώματος $GF(2^8)$, άρα κάθε συντελεστής βαρύτητας αποτελείται από ένα byte άρα ο πλεονασμός λόγω επικεφαλίδας σε κάθε κωδικοποιημένο μήνυμα είναι h/L όπου h το πλήθος των μη κωδικοποιημένων μηνυμάτων από τα οποία προέκυψε το κωδικοποιημένο μήνυμα και L (σε bytes) το μέγεθος των μη κωδικοποιημένων μηνυμάτων.



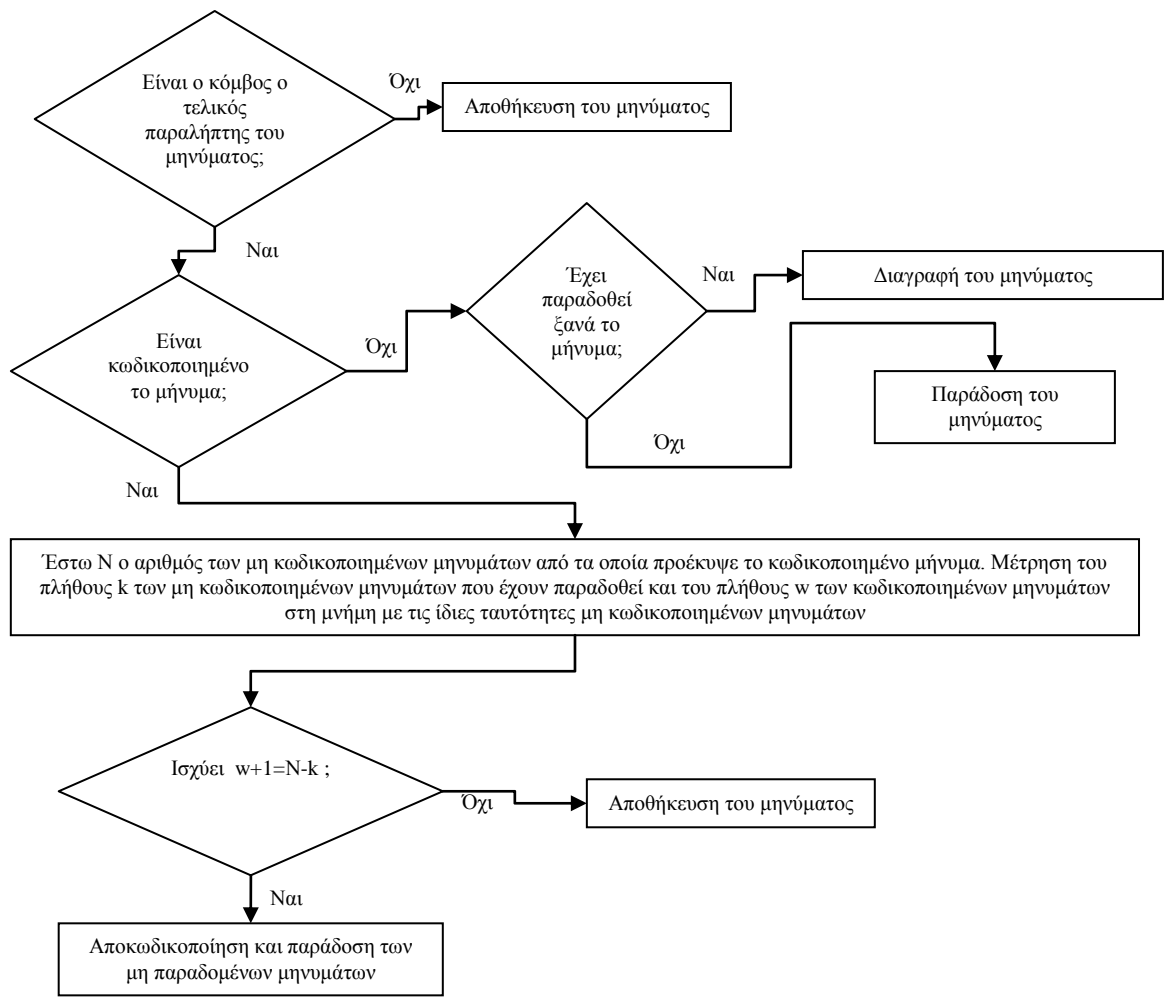
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής για την κωδικοποίηση στον προσομοιωτή ONE

4.2.3 Υλοποίηση της αποκωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE

Με στόχο την εισαγωγή της αποκωδικοποίησης δικτύου στον προσομοιωτή ONE μεταβλήθηκε η μέθοδος `messageTransferred` της κλάσης `MessageRouter`. Η μέθοδος αυτή καλείται αφού μεταφερθεί επιτυχώς ένα μήνυμα στον κόμβο. Η αποκωδικοποίηση γίνεται μόνο στον παραλήπτη. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν έχουν το

δικαίωμα να αποκωδικοποιούν μηνύματα που δεν προορίζονται για αυτούς. Αν το μήνυμα δεν προορίζεται για τον κόμβο που το έλαβε, αποθηκεύεται στη μνήμη. Τα μη κωδικοποιημένα μηνύματα που προορίζονται για τον κόμβο που τα έλαβε αποθηκεύονται απευθείας. Για τα κωδικοποιημένα μηνύματα που προορίζονται για τον κόμβο που τα έλαβε γίνεται έλεγχος για το πλήθος w των κωδικοποιημένων μηνυμάτων στη μνήμη που προήλθαν από τα ίδια N μη κωδικοποιημένα μηνύματα και για το πλήθος k των ήδη παραδομένων μη κωδικοποιημένων μηνυμάτων από τα N μηνύματα. Αν το πλήθος των μη παραδομένων μηνυμάτων $N-k$ είναι ίσο με το πλήθος των κωδικοποιημένων μηνυμάτων $w+1$ που διαθέτει ο κόμβος, τότε μπορεί να πραγματοποιηθεί η αποκωδικοποίηση. Για την αποκωδικοποίηση χρησιμοποιείται η μέθοδος απαλοιφής Gauss-Jordan, η οποία περιγράφεται στο Παράρτημα Α. Η καινοτομία της διαδικασίας της αποκωδικοποίησης είναι η χρήση των ήδη παραδομένων μηνυμάτων ώστε να αποκωδικοποιηθούν μηνύματα που δεν έχουν παραδοθεί και έχουν συνδυαστεί μαζί με τα ήδη παραδομένα. Η διαδικασία αυτή εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι στο δίκτυο μεταδίδονται τόσο μη κωδικοποιημένα όσο και κωδικοποιημένα μηνύματα και η κωδικοποίηση δεν πραγματοποιείται απαραίτητα στην πηγή αλλά τυχαία στους κόμβους. Αυτό σημαίνει ότι παραδίδονται είτε μη κωδικοποιημένα μηνύματα είτε κωδικοποιημένα και στην κλάση `messageTransferred` υπάρχουν συναρτήσεις οι οποίες είτε εκτελούν την αποκωδικοποίηση N μηνυμάτων αφού φθάσουν N κωδικοποιημένα μηνύματα στη μνήμη του παραλήπτη είτε χρησιμοποιούν τα k ήδη παραδομένα μηνύματα για να αποκωδικοποιήσουν τα $N-k$ μηνύματα (που δεν έχουν παραδοθεί ακόμα) αφού φθάσουν $N-k$ κωδικοποιημένα μηνύματα στη μνήμη του παραλήπτη. Η αποκωδικοποίηση είναι επιτυχής, αφού για την τάξη του πίνακα που προκύπτει από τους συντελεστές βαρύτητας των μη κωδικοποιημένων μηνυμάτων γίνεται έλεγχος πριν ληφθεί το μήνυμα (στην κλάση `hasMessage`) και στις δύο περιπτώσεις. Σε δίκτυα όπου η κωδικοποίηση δικτύου δεν πραγματοποιείται στην πηγή αλλά στους ενδιάμεσους κόμβους ένα μη κωδικοποιημένο μήνυμα μπορεί να κυκλοφορεί στο δίκτυο κωδικοποιημένο σε κωδικοποιημένα μηνύματα που προέκυψαν από διαφορετικά μη κωδικοποιημένα μηνύματα. Επιπλέον, στο δίκτυο κυκλοφορούν μη κωδικοποιημένα κάποια από τα μηνύματα αυτά. Για το λόγο αυτό για κάθε κωδικοποιημένο μήνυμα που φθάνει στον παραλήπτη γίνεται έλεγχος τόσο για τα μη κωδικοποιημένα παραδομένα μηνύματα όσο και για τα κωδικοποιημένα μηνύματα στη μνήμη του κόμβου. Αν η αποκωδικοποίηση δεν είναι δυνατή, το μήνυμα

αποθηκεύεται στη μνήμη του κόμβου για να χρησιμοποιηθεί για μελλοντική αποκωδικοποίηση.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής για την αποκωδικοποίηση στον προσομοιωτή ONE

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ ONE

5.1 Τα μέτρα επίδοσης των σχημάτων δρομολόγησης

Τα μέτρα μέσω των οποίων αξιολογήθηκε το όφελος λόγω χρήσης κωδικοποίησης δικτύου στα διάφορα σχήματα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται σε DTN δίκτυα είναι η πιθανότητα παράδοσης ενός μηνύματος, η μέση καθυστέρηση παράδοσης και ο πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα.

Λόγος παράδοσης (delivery ratio) P_{del} είναι ο λόγος του πλήθους των μηνυμάτων που παραδόθηκαν (number_of_messages_delivered) προς το πλήθος των μηνυμάτων που δημιουργήθηκαν (number_of_messages_created) εντός της χρονικής διάρκειας της προσομοίωσης

$$P_{del} = \frac{\text{number_of_messages_delivered}}{\text{number_of_messages_created}}$$

Ως μέση καθυστέρηση παράδοσης $D_{average}$ ορίζεται ο μέσος όρος των διαφορών μεταξύ των χρονικών στιγμών δημιουργίας και των χρονικών στιγμών παράδοσης των μηνυμάτων

$$D_{average} = E\{t_{delivery(1)} - t_{creation(1)}, t_{delivery(2)} - t_{creation(2)}, \dots, t_{delivery(n)} - t_{creation(n)}\}.$$

Ο πλεονασμός των αντιγράφων ανά μήνυμα (delivery cost) R είναι ο λόγος της διαφοράς των μηνυμάτων που παραδόθηκαν (number_of_messages_delivered) από τα μηνύματα που διακινήθηκαν (number_of_messages_relayed) προς τα μηνύματα που παραδόθηκαν

$$R = \frac{\text{number_of_messages_relayed} - \text{number_of_messages_delivered}}{\text{number_of_messages_delivered}}$$

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση σχημάτων δρομολόγησης με κωδικοποίηση δικτύου ο πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα περιλαμβάνει και τον πλεονασμό λόγω επικεφαλίδας. Στην επικεφαλίδα ο πλεονασμός οφείλεται στην ενσωμάτωση των συντελεστών κωδικοποίησης των μηνυμάτων. Αφού το πεπερασμένο σώμα επί του οποίου εκτελούνται οι συνδυασμοί των πακέτων είναι το $GF(2^8)$, κάθε

συντελεστής κωδικοποίησης αποτελείται από ένα byte και ο πλεονασμός υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{NC} = \frac{\text{modified_number_of_messages_relayed} - \text{number_of_delivered}}{\text{number_of_delivered}},$$

$$\text{όπου modified_number_of_messages_relayed} = \frac{\text{number_of_bytes_relayed}}{\text{message_size}}.$$

Ως `number_of_bytes_relayed` αναφέρεται το πλήθος των byte που ανταλλάχθηκαν μεταξύ των κόμβων και το μέγεθος αυτό διαιρείται με το μέγεθος του μηνύματος στο δίκτυο (`message_size`) ώστε να προκύψει το μέγεθος `modified_number_of_messages_relayed`.

Στα DTN δίκτυα στόχοι των νέων σχημάτων δρομολόγησης ή των νέων τεχνικών κωδικοποίησης είναι η αύξηση της πιθανότητας παράδοσης και η μείωση του πλεονασμού των αντιγράφων ανά μήνυμα. Η μείωση του πλεονασμού των αντιγράφων ανά μήνυμα συνεπάγεται τη μείωση των αναγκαίων μεταδόσεων για την παράδοση ενός μηνύματος. Επομένως, μέσω της μείωσης του πλεονασμού των αντιγράφων ανά μήνυμα θα χρησιμοποιούνται λιγότερο οι πόροι του δικτύου, όπως η μνήμη και η ενέργεια των κόμβων με συνέπεια να αυξάνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε DTN δίκτυα έκτακτης ανάγκης στόχος των νέων σχημάτων δρομολόγησης ή των νέων τεχνικών κωδικοποίησης πρέπει να είναι κυρίως η μείωση της μέσης καθυστέρησης παράδοσης των μηνυμάτων σε συνδυασμό με την αύξηση της πιθανότητας παράδοσης.

5.2 Παράμετροι της προσομοίωσης

Η κωδικοποίηση δικτύου στον προσομοιωτή ONE υλοποιήθηκε για τα σχήματα επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης. Στόχος της υλοποίησης της κωδικοποίησης δικτύου υπήρξε η σύγκριση των μέτρων επίδοσης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μεταξύ των σχημάτων δρομολόγησης με και χωρίς κωδικοποίηση δικτύου. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι των προσομοιώσεων των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενα εδάφια.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Χρόνος προσομοίωσης	9000 s (2.5 h)
Time-To-Live (TTL)	60 min (1 h)
Μέγεθος μηνύματος	500 byte
Ακτίνα κάλυψης κόμβου	200 m
Μέγεθος περιοχής προσομοίωσης	4500×3400 m ²
Ταχύτητα μετάδοσης	2 Mbps
Μοντέλο κινητικότητας κόμβων	Μοντέλο τυχαίων στάσεων

Πίνακας 5.1: Οι παράμετροι της προσομοίωσης στον προσομοιωτή ONE

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για δίκτυο με 30, για δίκτυο με 50 και για δίκτυο με 100 κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί ακολουθούν το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (βλ. παράγραφο 3.4). Οι κόμβοι επιλέγουν τυχαία μια ταχύτητα και ένα προορισμό και μετακινούνται προς τον προορισμό αυτό. Αφού φθάσουν στον προορισμό σταματούν για τυχαίο χρονικό διάστημα μεταξύ 0 και 120s. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για δύο εύρη μεταβολής της ταχύτητας κόμβων. Στην πρώτη περίπτωση η ταχύτητα επιλέγεται ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή από τους κόμβους στο διάστημα 7 έως 10 m/s ενώ στη δεύτερη στο διάστημα 10 έως 20 m/s.

Στο δίκτυο δημιουργούνται μηνύματα από τυχαίες πηγές προς τυχαίους προορισμούς κάθε 15 με 25 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια της κάθε προσομοίωσης δημιουργήθηκαν 461 μηνύματα. Στην περίπτωση του δικτύου με 100 κόμβους δημιουργήθηκαν 458 μηνύματα.

5.3 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων

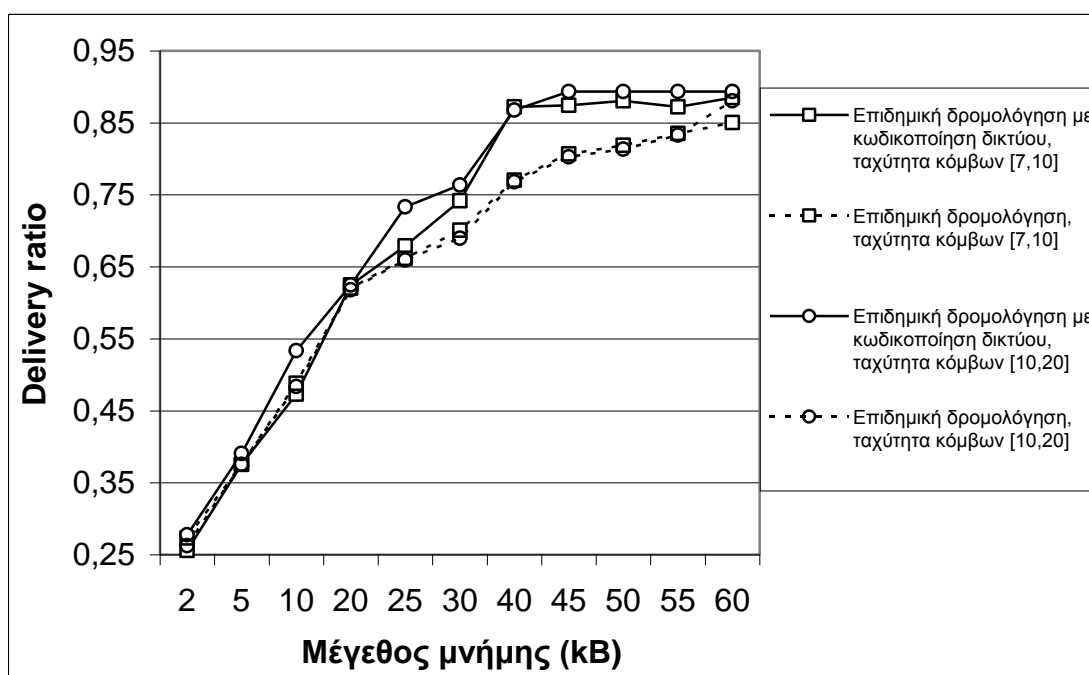
Με στόχο τη μελέτη των επιπτώσεων της χρήσης κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για δίκτυα 30, 50 κόμβων και 100 κόμβων οι οποίοι όταν σταματούν επιλέγουν ταχύτητες ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή στα εύρη ταχυτήτων [7,10] και [10,20] m/s. Τα σχήματα δρομολόγησης που μελετήθηκαν είναι αυτά της επιδημικής και της πιθανοτικής δρομολόγησης. Για την πιθανοτική δρομολόγηση οι σταθερές P_{init} , γ και β (βλ. παράγραφο 3.2.5) τέθηκαν ίσες με 0.75, 0.98 και 0.25, αντίστοιχα. Στόχος των

προσομοιώσεων υπήρξε η μελέτη της εξάρτησης των μέτρων επίδοσης από το μέγεθος της αποθηκευτικής δυνατότητας κάθε κόμβου που εκφράζεται σε kB.

5.3.1 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δίκτυο 30 κόμβων

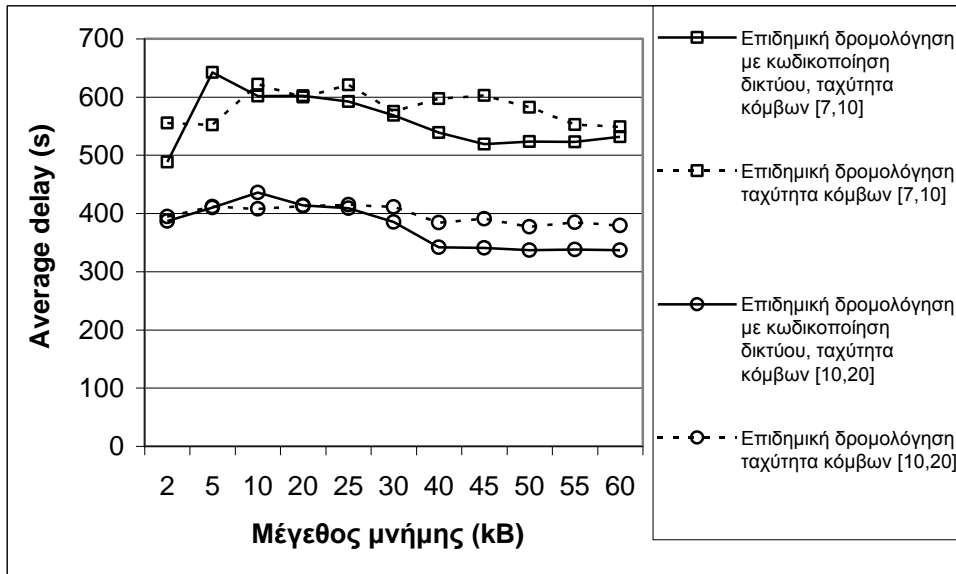
5.3.1.1 Επιδημική δρομολόγηση

Στα Σχ.5.1, 5.2, 5.3 απεικονίζεται η εξάρτηση των μέτρων επίδοσης που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.1 από την αποθηκευτική δυνατότητα των κόμβων για δίκτυο 30 κόμβων και σχήμα επιδημικής δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις συγκρίνεται η επίδοση του σχήματος επιδημικής δρομολόγησης με το αντίστοιχο σχήμα με κωδικοποίηση δικτύου για τα δύο προαναφερθέντα εύρη μεταβολής της ταχύτητας των κόμβων.



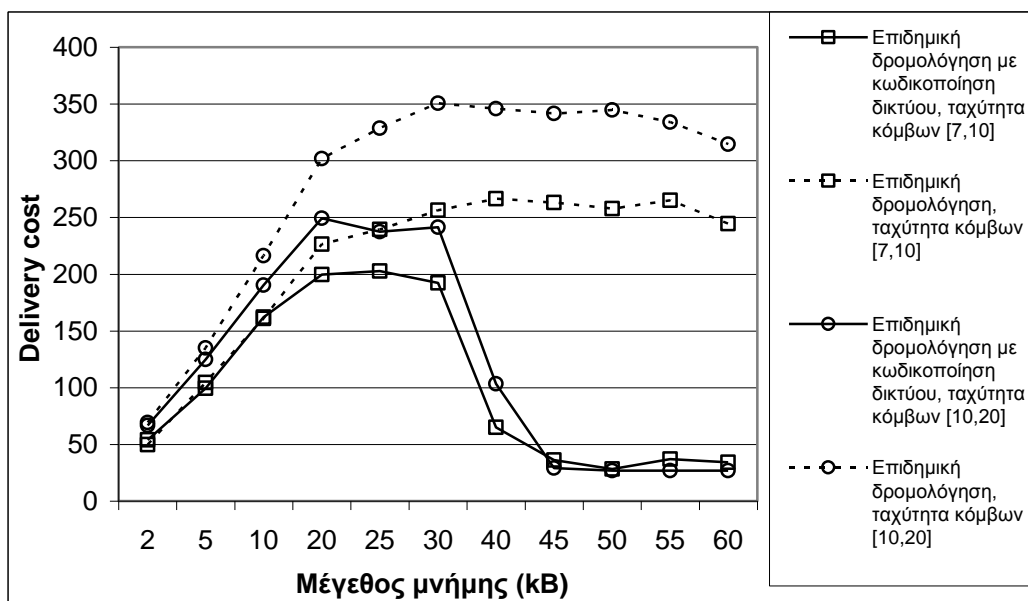
Σχήμα 5.1: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων

Από το Σχ.5.1 προκύπτει ότι η χρήση κωδικοποίησης δικτύου στο σχήμα επιδημικής δρομολόγησης οδηγεί στην παράδοση περισσότερων μηνυμάτων σε σχέση με το σχήμα επιδημικής δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου.



Σχήμα 5.2: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων

Από το Σχ.5.2 προκύπτει ότι με την εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στο σχήμα επιδημικής δρομολόγησης δεν μεταβάλλεται σημαντικά η μέση καθυστέρηση παράδοσης των μηνυμάτων. Μικρή αύξηση στη μέση καθυστέρηση παράδοσης ενδεχομένως οφείλεται στην παράδοση περισσότερων μηνυμάτων του σχήματος επιδημικής δρομολόγησης με κωδικοποίηση δικτύου σε σχέση με την επιδημική δρομολόγηση χωρίς κωδικοποίηση δικτύου.

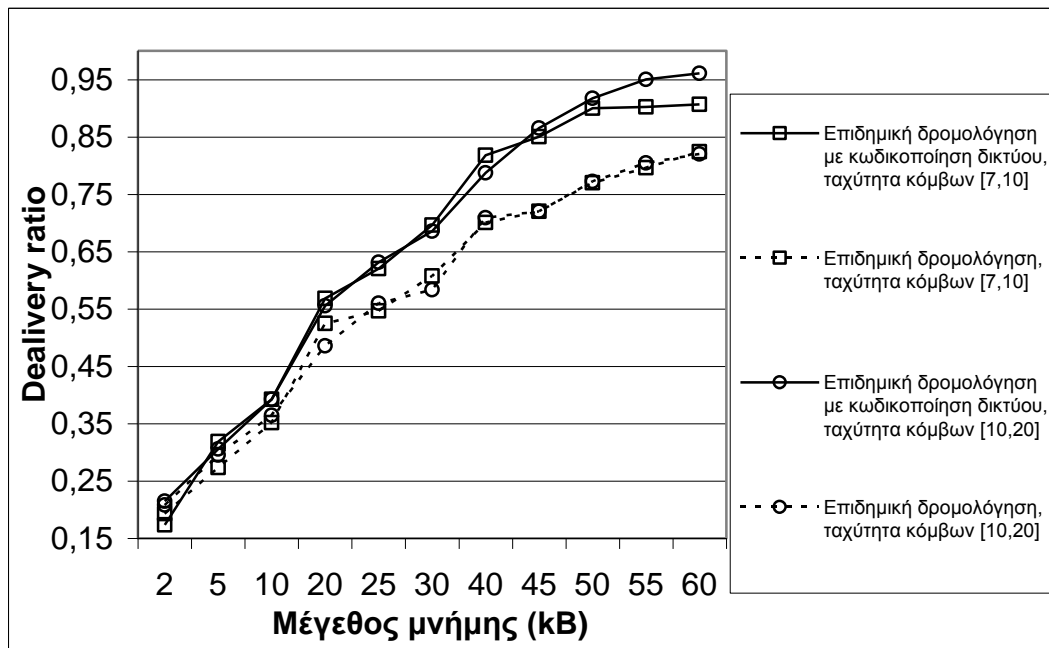


Σχήμα 5.3: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων

Από το Σχ.5.3 προκύπτει ότι η εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στο σχήμα επιδημικής δρομολόγησης οδηγεί σε σημαντική μείωση του πλεονασμού αντιγράφων ανά μήνυμα και, συνεπώς, στην καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου, όπως η ενέργεια και η μνήμη, σε σχέση με το σχήμα επιδημικής δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου.

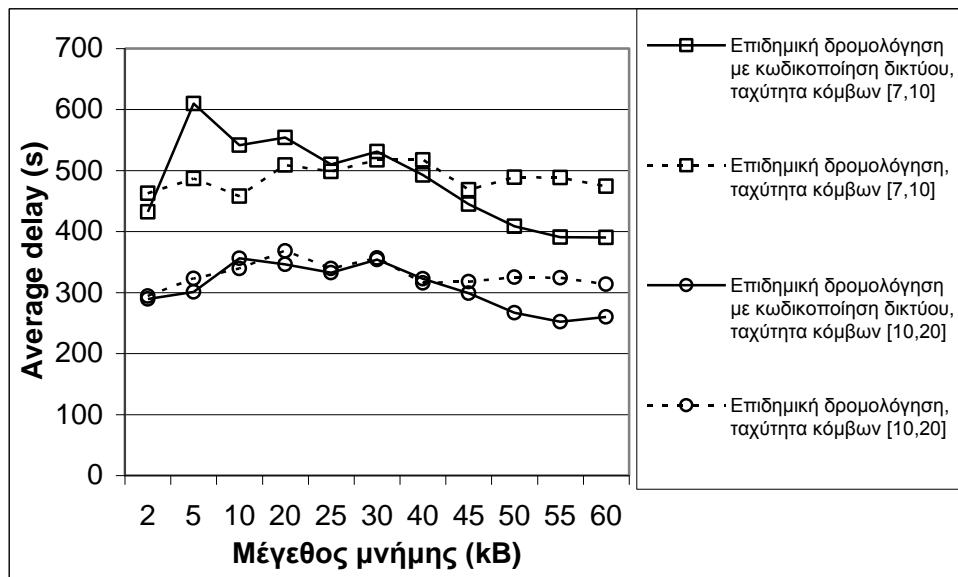
5.3.1.2 Πιθανοτική δρομολόγηση

Στα Σχ.5.4, 5.5, 5.6 απεικονίζεται η εξάρτηση των μέτρων επίδοσης που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.1 από την αποθηκευτική δυνατότητα των κόμβων για δίκτυο 30 κόμβων και σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις συγκρίνεται η επίδοση του σχήματος πιθανοτικής δρομολόγησης με το αντίστοιχο σχήμα με κωδικοποίηση δικτύου για τα δύο προαναφερθέντα εύρη μεταβολής της ταχύτητας των κόμβων.



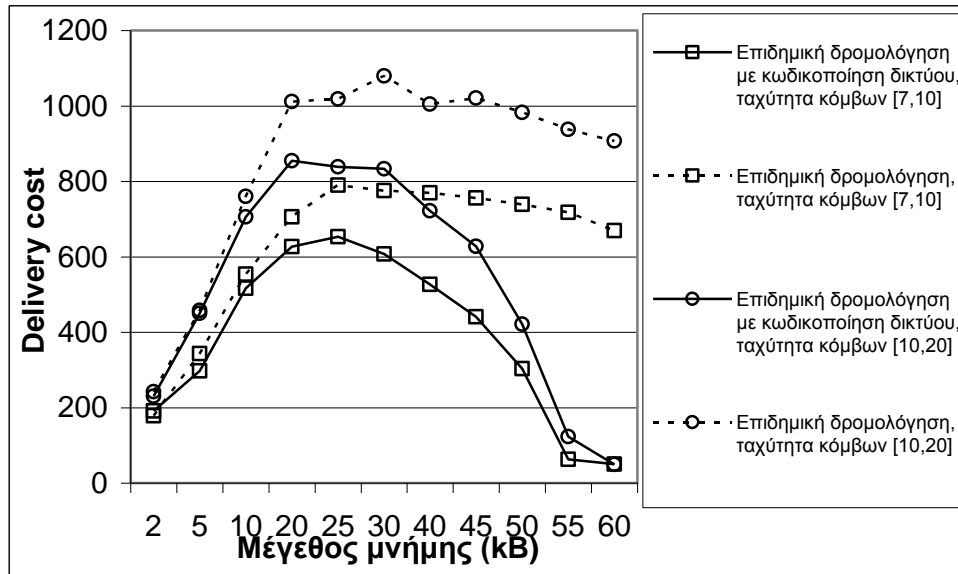
Σχήμα 5.4: Πιθανότητα παράδοσης μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων

Από το Σχ.5.4 προκύπτει ότι η εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στο σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης οδηγεί στην παράδοση περισσότερων μηνυμάτων σε σχέση με το σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου.



Σχήμα 5.5: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων

Από το Σχ.5.5 προκύπτει ότι με την εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στο σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης δεν μεταβάλλεται σημαντικά η μέση καθυστέρηση παράδοσης των μηνυμάτων. Μικρή αύξηση στη μέση καθυστέρηση παράδοσης ενδεχομένως οφείλεται στην παράδοση περισσότερων μηνυμάτων του σχήματος πιθανοτικής δρομολόγησης με κωδικοποίηση δικτύου σε σχέση με το σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου. Η μέση καθυστέρηση παράδοσης στα σχήματα πιθανοτικής δρομολόγησης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα σχήματα επιδημικής δρομολόγησης όπως φαίνεται από τα Σχ.5.5 και 5.2. Αυτό συμβαίνει καθώς οι αποφάσεις δρομολόγησης στο σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης λαμβάνονται με βάση την προβλεψιμότητα παράδοσης. Η προβλεψιμότητα παράδοσης βασίζεται στις συναντήσεις των κόμβων στο παρελθόν. Έτσι, ενώ μπορεί να είναι μικρή για έναν κόμβο και για έναν συγκεκριμένο προορισμό και το μήνυμα να μην προωθηθεί στον κόμβο αυτό, ο κόμβος αυτός μπορεί τελικά να συναντήσει τον προορισμό. Η αύξηση της καθυστέρησης στα σχήματα πιθανοτικής δρομολόγησης σε σύγκριση με αυτά της επιδημικής δρομολόγησης αντισταθμίζεται από τη μείωση του πλεονασμού των αντιγράφων ανά μήνυμα όπως φαίνεται στο Σχ.5.6.

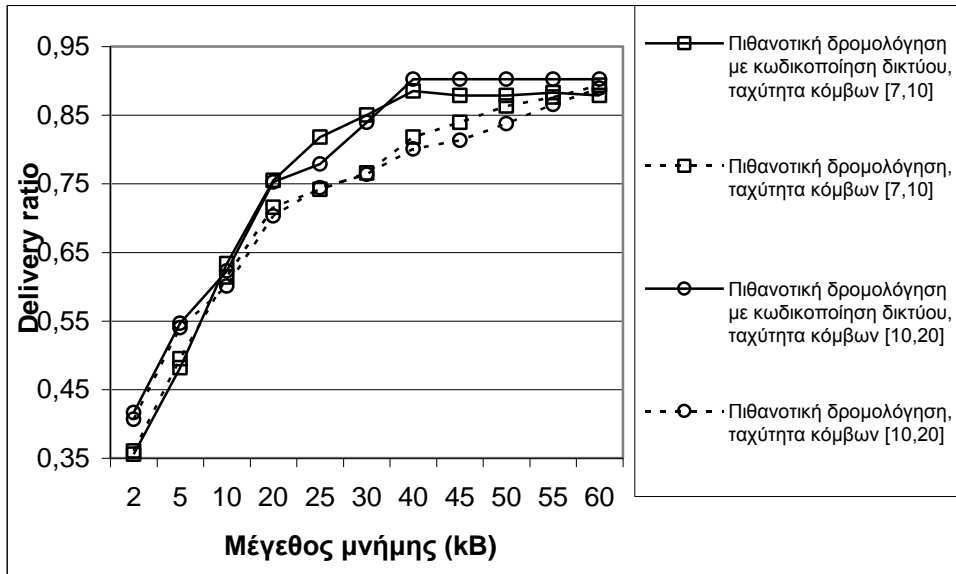


Σχήμα 5.6: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων

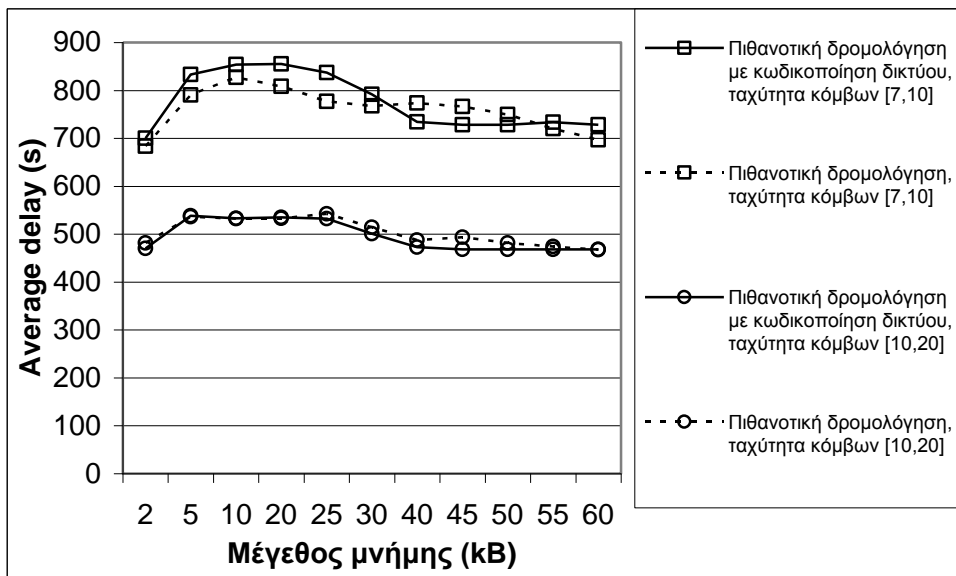
5.3.2 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δίκτυο 50 κόμβων

5.3.2.1 Επιδημική δρομολόγηση

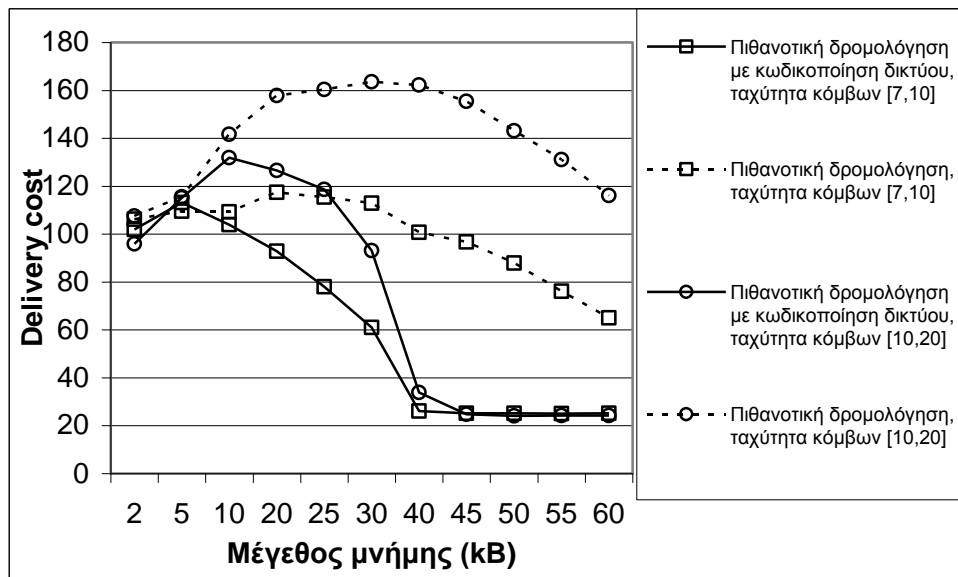
Στα Σχ.5.7, 5.8, 5.9 παρουσιάζονται τα μέτρα επίδοσης που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.1 σε συνάρτηση με το μέγεθος της μνήμης ανά κόμβο για δίκτυο 50 κόμβων και σχήμα επιδημικής δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις συγκρίνεται η επίδοση του σχήματος επιδημικής δρομολόγησης με το αντίστοιχο σχήμα με κωδικοποίηση δικτύου για δύο διαφορετικά διαστήματα ταχύτητας των κόμβων.



Σχήμα 5.7: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων



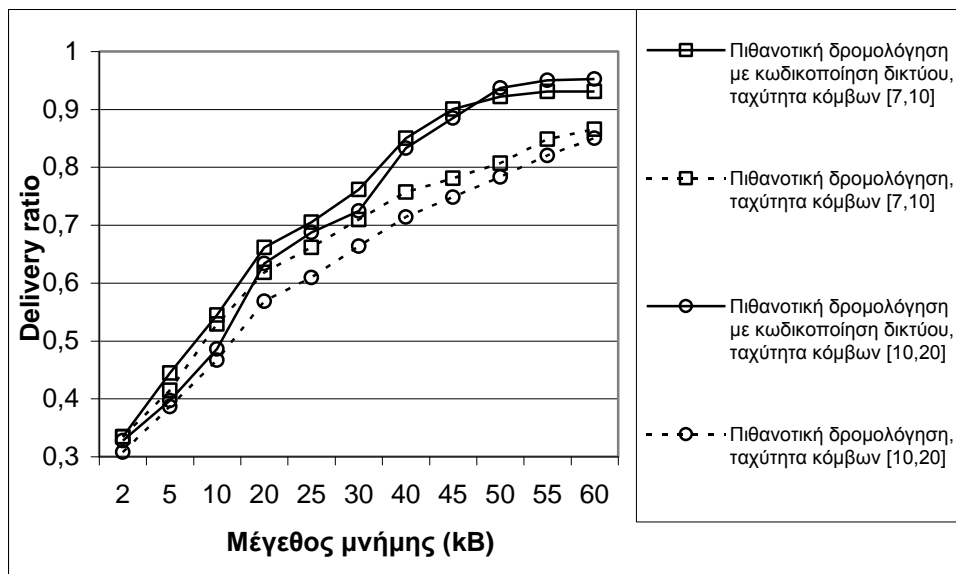
Σχήμα 5.8: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων



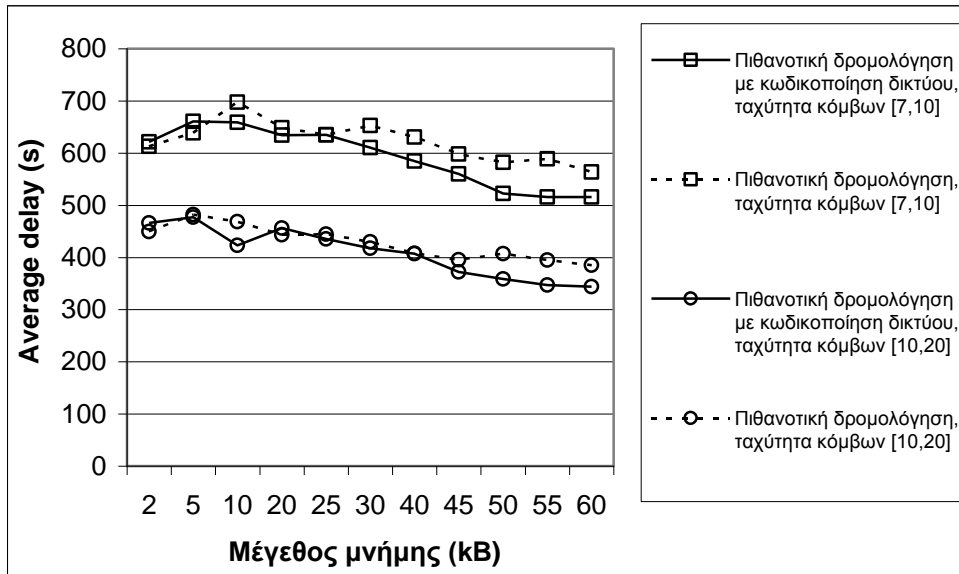
Σχήμα 5.9: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων

5.3.2.2 Πιθανοτική δρομολόγηση

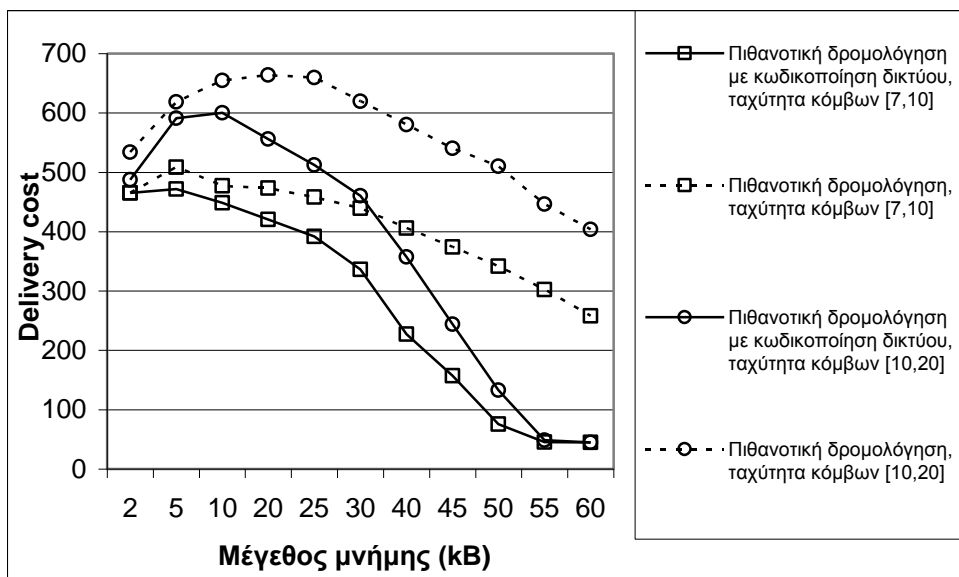
Στα Σχ.5.10, 5.11, 5.12 παρουσιάζονται τα μέτρα επίδοσης που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.1 σε συνάρτηση με το μέγεθος της μνήμης ανά κόμβο για δίκτυο 50 κόμβων και σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις συγκρίνεται η επίδοση του σχήματος πιθανοτικής δρομολόγησης με το αντίστοιχο σχήμα με κωδικοποίηση δικτύου για δύο διαφορετικά διαστήματα ταχύτητας των κόμβων.



Σχήμα 5.10: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων



Σχήμα 5.11: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μήνιμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων

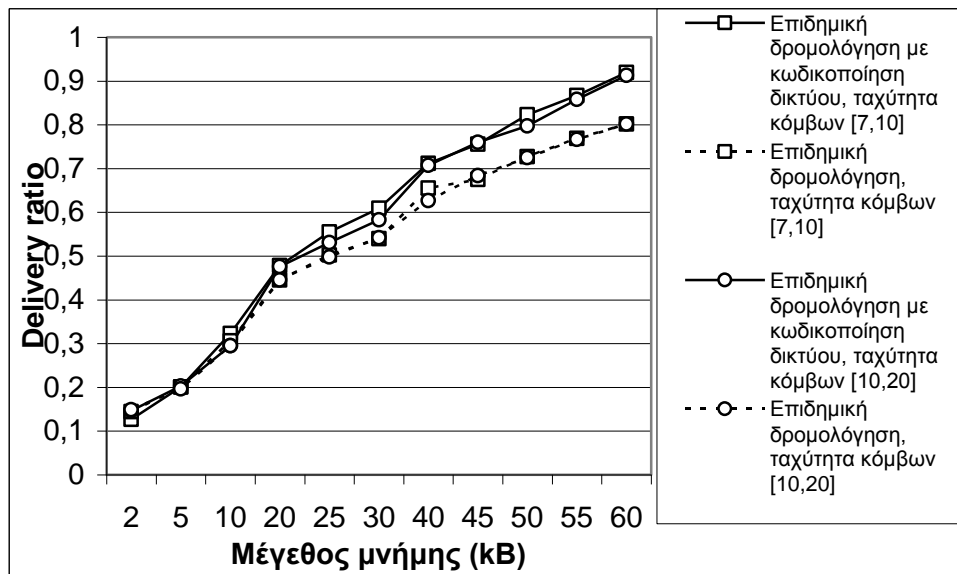


Σχήμα 5.12: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μήνιμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων

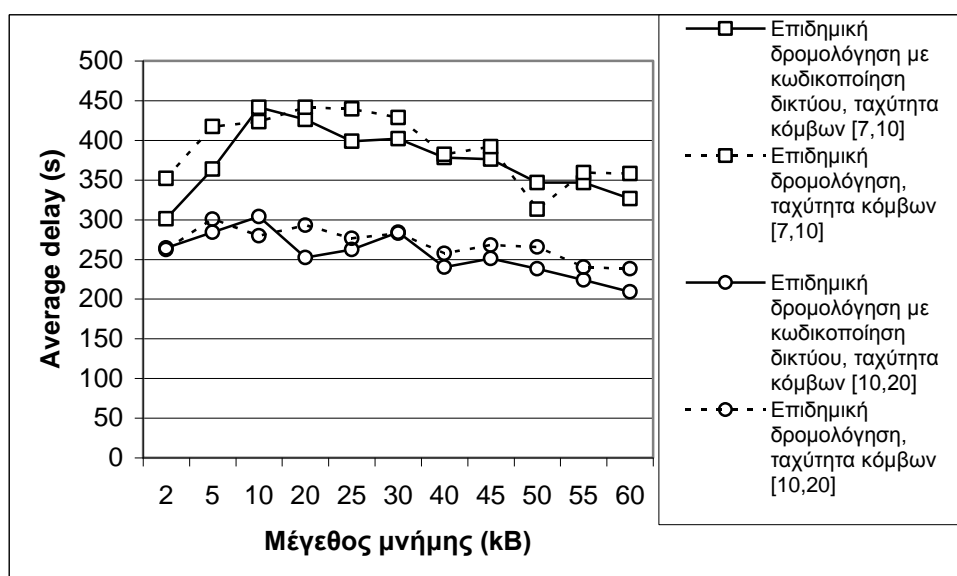
5.3.3 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δίκτυο 100 κόμβων

5.3.3.1 Επιδημική δρομολόγηση

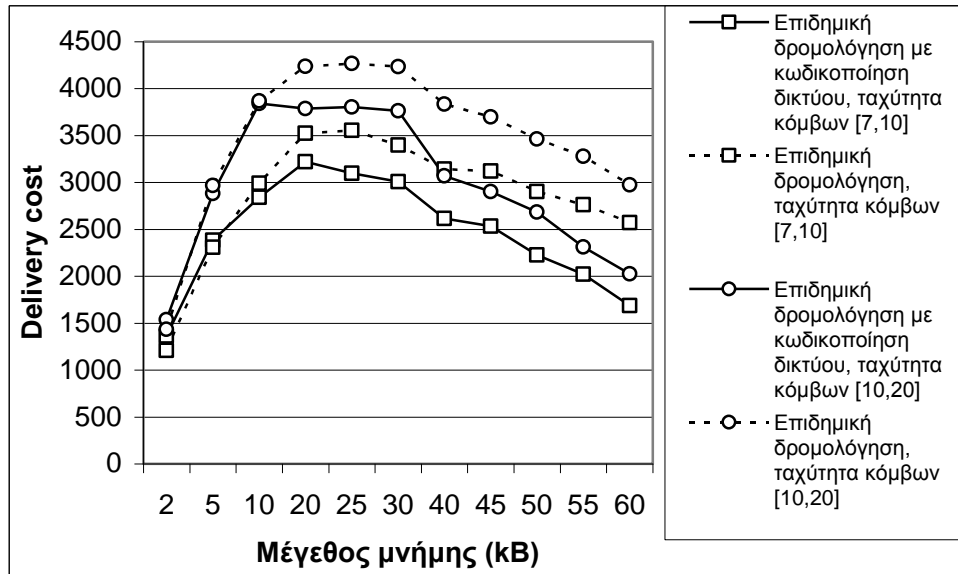
Στα Σχ.5.13, 5.14, 5.15 παρουσιάζονται τα μέτρα επίδοσης που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.1 σε συνάρτηση με το μέγεθος της μήμης ανά κόμβο για δίκτυο 100 κόμβων και σχήμα επιδημικής δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις συγκρίνεται η επίδοση του σχήματος επιδημικής δρομολόγησης με το αντίστοιχο σχήμα με κωδικοποίηση δικτύου για δύο διαφορετικά διαστήματα ταχύτητας των κόμβων.



Σχήμα 5.13: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων



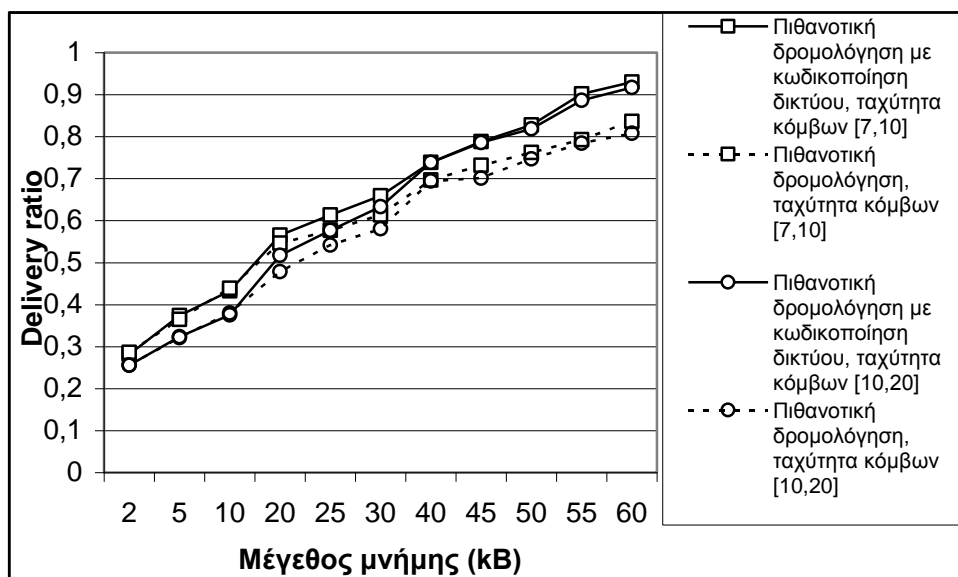
Σχήμα 5.14: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων



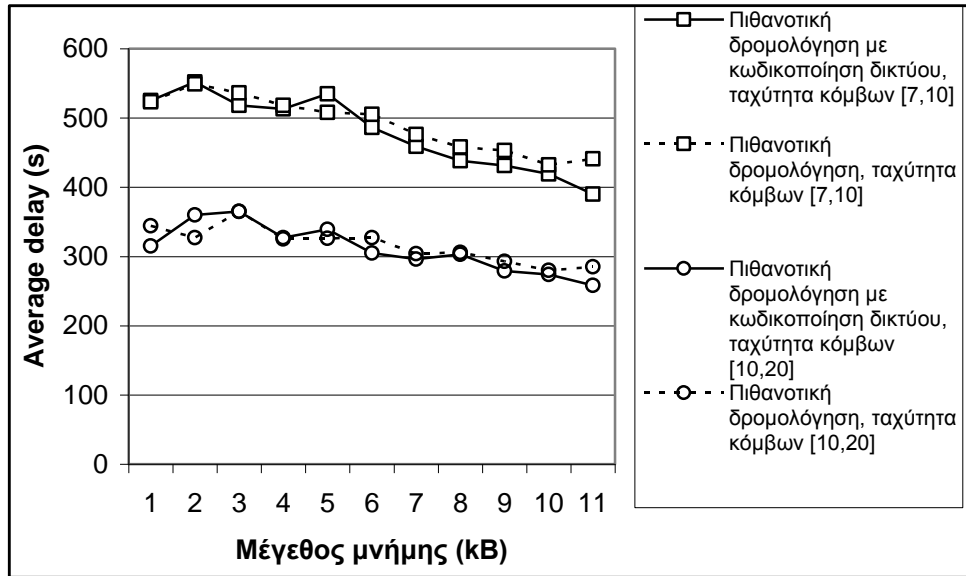
Σχήμα 5.15: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμες των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων

5.3.3.2 Πιθανοτική δρομολόγηση

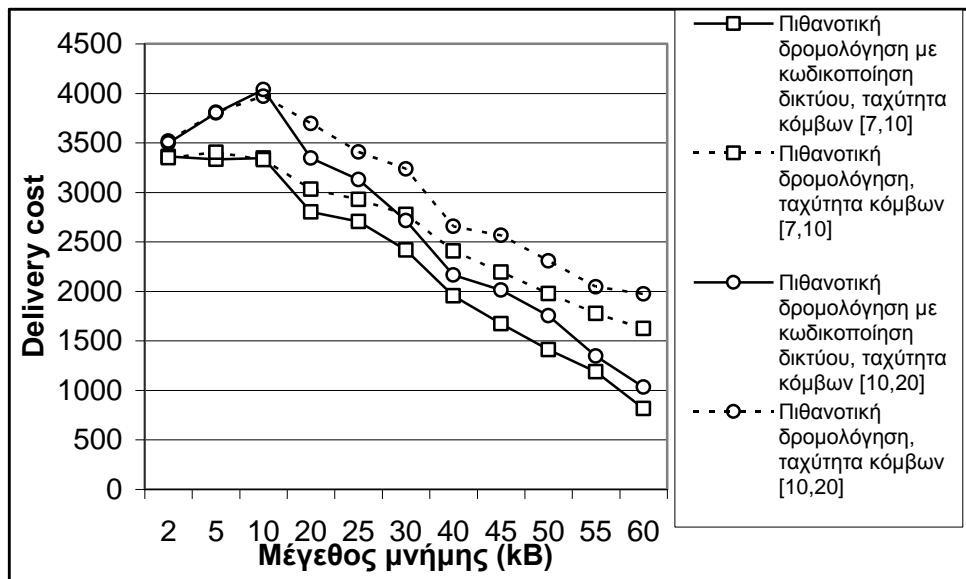
Στα Σχ.5.16, 5.17, 5.18 παρουσιάζονται τα μέτρα επίδοσης που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.1 σε συνάρτηση με το μέγεθος της μνήμες ανά κόμβο για δίκτυο 100 κόμβων και σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης. Σε όλες τις περιπτώσεις συγκρίνεται η επίδοση του σχήματος πιθανοτικής δρομολόγησης με το αντίστοιχο σχήμα με κωδικοποίηση δικτύου για δύο διαφορετικά διαστήματα ταχύτητας των κόμβων.



Σχήμα 5.16: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμες των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων



Σχήμα 5.17: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μήνιμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων



Σχήμα 5.18: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μήνιμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων

5.4 Παρατηρήσεις

5.4.1 Παρατηρήσεις βασισμένες στα μέτρα επίδοσης

- *Πιθανότητα παράδοσης*

Η εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου στα υπάρχοντα σχήματα δρομολόγησης οδηγεί σε μείωση του πλεονασμού των μηνυμάτων στο δίκτυο και επομένως σε καλύτερη χρησιμοποίηση της μνήμης των κόμβων. Η μνήμη των κόμβων (αν δεν είναι πλήρης) χρησιμοποιείται λιγότερο όταν εφαρμόζονται σχήματα δρομολόγησης με κωδικοποίηση δικτύου σε σχέση με τη χρησιμοποίηση της μνήμης όταν εφαρμόζονται σχήματα δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου. Το γεγονός αυτό δίνει την ευκαιρία σε περισσότερα μηνύματα να προωθηθούν στους ενδιάμεσους κόμβους και αποτρέπει την απόρριψη των μηνυμάτων λόγω πλήρωσης της μνήμης. Επομένως, η μείωση του πλεονασμού των αντιγράφων ανά μήνυμα σχετίζεται με την πιθανότητα παράδοσης των μηνυμάτων.

- *Πλεονασμός των αντιγράφων ανά μήνυμα*
 - Στην περίπτωση των 50 κόμβων ο πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον πλεονασμό στην περίπτωση των 30 κόμβων για το ίδιο μέγεθος μνήμης ανά κόμβο. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση των 50 κόμβων η συνολική μνήμη του δικτύου για το ίδιο μέγεθος μνήμης ανά κόμβο είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη συνολική μνήμη του δικτύου 30 κόμβων και επομένως δίνεται δυνατότητα να ανταλλαχθούν περισσότερα μηνύματα μεταξύ των κόμβων. Σε κάθε περίπτωση ο πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα είναι μικρότερος στα σχήματα πιθανοτικής δρομολόγησης σε σχέση με τα σχήματα επιδημικής δρομολόγησης.
 - Από τη σύγκριση των σχημάτων επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης προκύπτει μια καλύτερη σχέση ανταλλαγής μεταξύ πλεονασμού αντιγράφων ανά μήνυμα και καθυστέρησης. Η καθυστέρηση αυξάνεται αλλά ο πλεονασμός μειώνεται αρκετά στο σχήμα της πιθανοτικής δρομολόγησης σε σχέση με το σχήμα επιδημικής δρομολόγησης.

- *Μέση καθυστέρηση παράδοσης*
 - Η καθυστέρηση δε μεταβάλλεται σημαντικά όταν στα σχήματα επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης εισάγεται η κωδικοποίηση δικτύου. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων όταν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση δικτύου στα σχήματα επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης παραδίδονται περισσότερα μηνύματα σε σχέση με τα σχήματα επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης χωρίς χρήση κωδικοποίησης δικτύου. Συνεπώς, η μικρή αύξηση στην καθυστέρηση παράδοσης δικαιολογείται από την παράδοση περισσότερων μηνυμάτων.
 - Η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι περιορισμένη. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο λιγότερο κινούνται οι κόμβοι (που έχουν στην κατοχή τους αντίγραφο ενός μηνύματος) τόσο μειώνεται η πιθανότητα κάποιος από αυτούς να συναντήσει τον προορισμό ενός μηνύματος.
 - Η καθυστέρηση επίσης αυξάνεται στα σχήματα πιθανοτικής δρομολόγησης σε σχέση με σχήματα επιδημικής δρομολόγησης, καθώς τα μηνύματα προωθούνται σε ενδιάμεσους κόμβους με βάση την προβλεψιμότητα παράδοσης η οποία βασίζεται στις συναντήσεις των κόμβων στο παρελθόν.

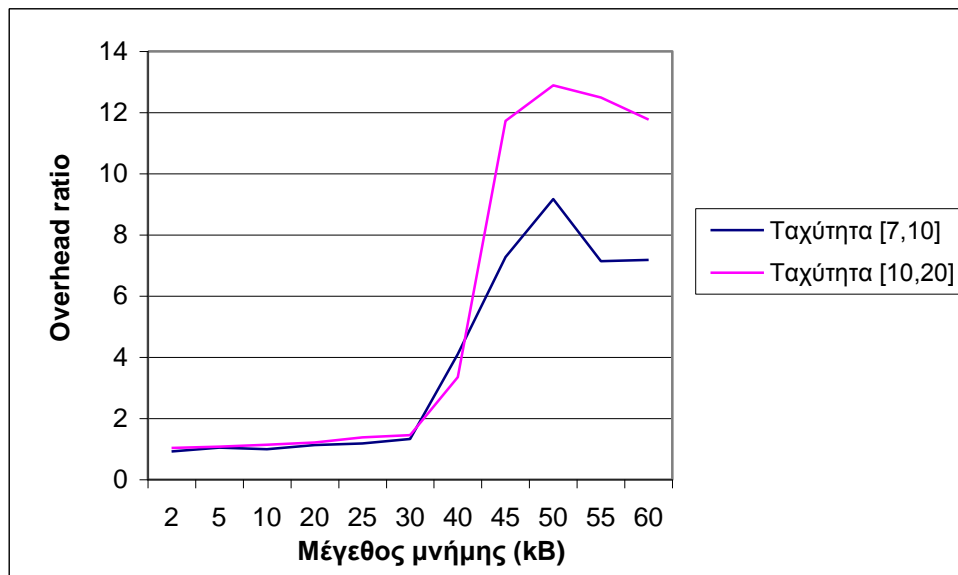
5.4.2 Η επίδραση της κινητικότητας των κόμβων στα σχήματα δρομολόγησης

Η κινητικότητα των κόμβων έχει σημαντική επίδραση στην επίδοση των σχημάτων δρομολόγησης σε DTN δίκτυα. Όσο μικρότερη είναι η κινητικότητα των κόμβων τόσο αργότερα διακινείται ένα μήνυμα στο δίκτυο και, συνεπώς, τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση παράδοσης. Μάλιστα, υπάρχει ενδεχόμενο εφόσον ο TTL του μηνύματος λήξει, το μήνυμα αυτό να μην παραδοθεί. Μετά από προσομοιώσεις ανάλογες των προσομοιώσεων που παρατέθηκαν στο εδάφιο 5.3 για ταχύτητα κόμβων στο διάστημα $[0,5]$ m/s προέκυψε το συμπέρασμα ότι σχήματα δρομολόγησης, όπως η πιθανοτική δρομολόγηση, τα οποία βασίζονται στην κινητικότητα των κόμβων για τη λήψη αποφάσεων δρομολόγησης, συμπεριφέρονται

χειρότερα (αρκετά μικρή πιθανότητα παράδοσης και μεγάλος πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα) σε σχέση με το σχήμα επιδημικής δρομολόγησης. Επιπλέον, με την εισαγωγή τεχνικών όπως η κωδικοποίηση δικτύου, η οποία βασίζεται στην κίνηση των κόμβων για την κωδικοποίηση και το συνδυασμό των μηνυμάτων, στα υπάρχοντα σχήματα δρομολόγησης δεν οδηγεί σε βελτίωση των μέτρων επίδοσης που μελετώνται σε σχέση με τα ίδια σχήματα δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου σε δίκτυα με κόμβους με χαμηλή κινητικότητα. Από την άλλη πλευρά, όσο αυξάνεται η ταχύτητα των κόμβων τόσο ταχύτερα διακινούνται τα μηνύματα στο δίκτυο και, συνεπώς, τόσο ταχύτερα παραδίδονται τα μηνύματα. Όμως, στην περίπτωση αυτή όσο εντονότερη είναι η κινητικότητα των κόμβων τόσο περισσότερα μηνύματα ανταλλάσσονται μεταξύ τους και τόσο μεγαλύτερος είναι ο πλεονασμός των πακέτων στο δίκτυο. Η τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου εκμεταλλεύεται την έντονη κινητικότητα των κόμβων για το συνδυασμό των πακέτων. Όσο εντονότερη είναι η κίνηση των κόμβων τόσο περισσότερα μηνύματα συνδυάζονται γραμμικά μειώνοντας το συνολικό αριθμό των μηνυμάτων στο δίκτυο. Από το Σχ.5.3 φαίνεται ότι ο πλεονασμός των αντιγράφων ανά μήνυμα είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση έντονης κινητικότητας για το σχήμα επιδημικής δρομολόγησης με 30 κόμβους. Ο λόγος πλεονασμού του ίδιου σχήματος χωρίς κωδικοποίηση προς τον πλεονασμό του ίδιου σχήματος με κωδικοποίηση (overhead ratio) και ορίζεται ως

$$\text{overhead ratio} = \frac{R}{R_{NC}} .$$

Το μέτρο overhead ratio είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέτρο όταν υπάρχει περιορισμένη κινητικότητα στο δίκτυο (βλ. Σχ.5.19). Επομένως, ενώ ο πλεονασμός αυξάνεται όταν οι κόμβοι επιλέγουν τυχαία στο διάστημα [10,20] m/s, το σχήμα δρομολόγησης με κωδικοποίηση δικτύου πλεονεκτεί περισσότερο έναντι του σχήματος δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου, αφού το μέτρο overhead ratio είναι μεγαλύτερο όταν η ταχύτητα των κόμβων είναι εντονότερη.



Σχήμα 5.19: Overhead ratio στο σχήμα επιδημικής δρομολόγησης για δίκτυο 30 κόμβων

5.5 Δυσκολίες της εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα

Η υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και σε καλύτερη αξιοποίηση της μνήμης των κόμβων, εισάγει όμως πολυπλοκότητα στο σύστημα. Οι κόμβοι πρέπει να εκτελούν πρόσθετες λειτουργίες όπως ανάκτηση μηνυμάτων από τη μνήμη (είτε παραδομένων για την αποκωδικοποίηση είτε μη παραδομένων για την κωδικοποίηση), εκτέλεση γραμμικών πράξεων επί του σώματος $GF(2^8)$, αντιστροφή πινάκων επί του σώματος $GF(2^8)$, αναζήτηση στη μνήμη για μηνύματα που ικανοποιούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις (είτε με στόχο την κωδικοποίηση είτε με στόχο την αποκωδικοποίηση). Για την υλοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου σε ένα DTN δίκτυο πρέπει αρχικά να εξετασθεί αν οι κόμβοι έχουν την υπολογιστική ικανότητα να εκτελούν τις λειτουργίες που μόλις αναφέρθηκαν και, στη συνέχεια, να προσδιοριστεί η ενέργεια που καταναλώνεται για την εκτέλεση των λειτουργιών αυτών. Τέλος, οι χρόνοι κωδικοποίησης, αποκωδικοποίησης και επεξεργασίας των μηνυμάτων πρέπει να υπολογισθούν με βάση τα χαρακτηριστικά των κόμβων και να εξετασθεί αν η καθυστέρηση παράδοσης αυξάνεται σημαντικά λόγω της εκτέλεσης των λειτουργιών αυτών όταν στα υπάρχοντα σχήματα δρομολόγησης εισάγεται η κωδικοποίηση δικτύου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΛΓΕΒΡΑ

A.1.1 Στοιχεία από τη θεωρία πινάκων

Ορισμός A.1.1

Τάξη ενός πίνακα A λέγεται ο αριθμός των γραμμικά ανεξάρτητων στηλών (ή γραμμών) του A .

Ορισμός A.1.2

Διαγώνιος λέγεται ένας πίνακας A ο οποίος έχει όλα του τα στοιχεία ίσα με μηδέν, εκτός από τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου, δηλαδή τα στοιχεία a_{ij} με $i=j$.

Ορισμός A.1.3

Ένας $m \times n$ πίνακας λέγεται κλιμακωτός αν

- i. οι μη μηδενικές γραμμές του προηγούνται των μηδενικών γραμμών του,
- ii. το πρώτο μη μηδενικό στοιχείο κάθε γραμμής (που λέγεται ηγετικό στοιχείο της γραμμής) βρίσκεται σε θέση δεξιότερη από το αντίστοιχο μη μηδενικό στοιχείο της προηγούμενης γραμμής.

Ένας κλιμακωτός πίνακας λέγεται ανηγμένος κλιμακωτός αν έχει επιπλέον τις ιδιότητες:

- iii. Το ηγετικό στοιχείο κάθε μη μηδενικής γραμμής είναι το 1.
- iv. Κάθε στήλη που περιέχει το ηγετικό στοιχείο 1 μιας γραμμής έχει όλα τα υπόλοιπα στοιχεία μηδενικά.

Πρόταση A.1.1

Αν εφαρμόσουμε τις παρακάτω στοιχειώδεις πράξεις στις εξισώσεις ενός συστήματος προκύπτει πάντα ένα σύστημα ισοδύναμο με το αρχικό:

- i. Εναλλαγή δύο εξισώσεων του συστήματος.
- ii. Αντικατάσταση μιας εξίσωσης (ϵ) του συστήματος με την $c(\epsilon)$ που προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε τα μέλη της (ϵ) επί $c \neq 0$.
- iii. Πρόσθεση στα μέλη μιας εξίσωσης του συστήματος τα αντίστοιχα μέλη μιας άλλης πολλαπλασιασμένα επί έναν αριθμό $c \neq 0$.

Κάθε μια από τις στοιχειώδεις αυτές πράξεις στις εξισώσεις του συστήματος αντιστοιχεί σε μια «ίδια» πράξη στις γραμμές του επαυξημένου πίνακα του συστήματος. Τις πράξεις αυτές στις γραμμές του πίνακα τις ονομάζουμε γραμμοπράξεις.

Ορισμός A.1.4

Πίνακες που ο ένας προκύπτει από τον άλλον με γραμμοπράξεις λέγονται γραμμοϊσοδύναμοι.

Θεώρημα A.1.1

Κάθε μη-μηδενικός πίνακας είναι γραμμοϊσοδύναμος με έναν ανηγμένο κλιμακωτό πίνακα.

Για την αποκωδικοποίηση των n μηνυμάτων σε μια περίπτωση κωδικοποίησης δικτύου, όταν αυτά φτάσουν στον προορισμό, πρέπει να λυθεί ένα $n \times n$ γραμμικό σύστημα. Το σύστημα αυτό μπορεί να γραφεί σε μορφή εξίσωσης πινάκων $\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}$, όπου \mathbf{X} ο πίνακας με τις άγνωστες μεταβλητές, \mathbf{B} ο πίνακας που περιέχει τα κωδικοποιημένα μηνύματα και \mathbf{A} πίνακας οι γραμμές του οποίου αποτελούνται από τους συντελεστές κωδικοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για καθένα από τα κωδικοποιημένα μηνύματα. Η λύση δίνεται από τη σχέση $\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$.

Για την εύρεση του αντίστροφου πίνακα του \mathbf{A} χρησιμοποιείται η μέθοδος απαλοιφής Gauss-Jordan στον επαυξημένο πίνακα $[\mathbf{A} | \mathbf{I}]$. Η μέθοδος απαλοιφής Gauss-Jordan στοχεύει στη μετατροπή του πίνακα \mathbf{A} σε διαγώνιο πίνακα. Ο αντίστροφος πίνακας του \mathbf{A} μπορεί να βρεθεί αν εφαρμοστούν οι εξής πράξεις πινάκων:

$$[\mathbf{A} | \mathbf{I}] \Rightarrow \mathbf{A}^{-1}[\mathbf{A} | \mathbf{I}] \Rightarrow [\mathbf{I} | \mathbf{A}^{-1}].$$

Η παραπάνω μονοσήμαντη σχέση προκύπτει εκτελώντας γραμμοπράξεις στον $[\mathbf{A} | \mathbf{I}]$ μέχρι να έρθει σε ανηγμένη κλιμακωτή μορφή. Τα βήματα της μεθόδου αυτής περιγράφονται στον Πίνακα A.1.1.

Βήματα απαλοιφής Gauss-Jordan	
Βήμα 1 ^ο	Δημιουργία επαυξημένου πίνακα $[A I]$
Βήμα 2 ^ο	Εκτέλεση γραμμοπράξεων στον πίνακα $[A I]$ ώστε ο πίνακας $n \times n$ που προκύπτει από τα στοιχεία των γραμμών 1 έως n και στηλών 1 έως n να μετατραπεί σε διαγώνιο. Αν ένα μηδενικό βρίσκεται στη διαγώνιο τότε είναι απαραίτητη η εναλλαγή γραμμών μέχρι να βρεθεί μη μηδενικό στοιχείο στη θέση αυτή. Αν αυτό είναι αδύνατο, τότε το σύστημα έχει άπειρες λύσεις ή δεν έχει λύση.
Βήμα 3 ^ο	Διαίρεση κάθε γραμμής με το στοιχείο στη διαγώνιο της γραμμής αυτής, αν το στοιχείο στη διαγώνιο δεν είναι ίσο με ένα. Ο πίνακας που προκύπτει είναι ανηγμένος κλιμακωτός.

Πίνακας Α.1.1: Βήματα απαλοιφής Gauss-Jordan

Ο αλγόριθμος που υλοποιεί την απαλοιφή Gauss-Jordan σε πίνακα $n \times m$ περιγράφεται στον Πίνακα Α.1.2.

Αλγόριθμος απαλοιφής Gauss-Jordan
<ol style="list-style-type: none"> 1) Αρχή στο στοιχείο $[1][1]$ του πίνακα. Δείκτες i, j ίσοι με ένα. 2) Εύρεση ενός μη μηδενικού στοιχείου στη στήλη j και στη γραμμή i ή κάτω από τη γραμμή αυτή. <ul style="list-style-type: none"> ○ Αν βρεθεί τέτοιο στοιχείο στη γραμμή k: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Αν η γραμμή που βρέθηκε δεν είναι η i τότε γίνεται εναλλαγή της k με την i. ▪ Αν το στοιχείο που βρέθηκε δεν ισούται με ένα τότε διαιρείται η γραμμή i με την τιμή του στοιχείου που βρέθηκε. ▪ Στη στήλη j γίνεται απαλοιφή όλων των μη μηδενικών στοιχείων αφαιρώντας από κάθε γραμμή (εκτός της i) το κατάλληλο πολλαπλάσιο της γραμμής i. ▪ Αύξηση του δείκτη γραμμής i. ○ Αύξηση του δείκτη στήλης j. ○ Επανάληψη του βήματος 2) μέχρι ο δείκτης i να γίνει ίσος με n ή ο j ίσος με m.

Πίνακας Α.1.2: Αλγόριθμος απαλοιφής Gauss-Jordan

A.2 Στοιχεία από τη θεωρία διανυσματικών χώρων

Ορισμός A.2.1

Έστω V ένα μη κενό σύνολο και K ένα σώμα. Το σύνολο V θα λέγεται διανυσματικός ή γραμμικός χώρος πάνω στο σώμα K , αν έχουν οριστεί δύο πράξεις:

- i. Μια εσωτερική $V \times V \xrightarrow{+} V : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{y}$, που θα λέγεται πρόσθεση, έτσι ώστε το $(V, +)$ να είναι μια «αντιμεταθετική ομάδα», δηλαδή για κάθε $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in V$ να ισχύουν οι ιδιότητες:
 1. $\mathbf{x} + \mathbf{y} = \mathbf{y} + \mathbf{x}$ (αντιμεταθετική ιδιότητα)
 2. $(\mathbf{x} + \mathbf{y}) + \mathbf{z} = \mathbf{x} + (\mathbf{y} + \mathbf{z})$ (προσεταιριστική ιδιότητα)
 3. υπάρχει ουδέτερο στοιχείο $\mathbf{0} \in V : \mathbf{x} + \mathbf{0} = \mathbf{x}$ για κάθε $\mathbf{x} \in V$
 4. κάθε $\mathbf{x} \in V$, έχει αντίθετο στοιχείο $-\mathbf{x} \in V : \mathbf{x} + (-\mathbf{x}) = \mathbf{0}$
- ii. Μια εσωτερική πράξη $K \times V \longrightarrow V : (\lambda, \mathbf{x}) \rightarrow \lambda \cdot \mathbf{x}$, που θα λέγεται βαθμωτός πολλαπλασιασμός (scalar multiply) και για κάθε $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$ και $\lambda, \mu \in K$ θα ικανοποιεί τις ιδιότητες:
 1. $(\lambda + \mu)\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x} + \mu\mathbf{x}$
 2. $\lambda(\mathbf{x} + \mathbf{y}) = \lambda\mathbf{x} + \lambda\mathbf{y}$
 3. $(\lambda\mu)\mathbf{x} = \lambda(\mu\mathbf{x})$
 4. $1\mathbf{x} = \mathbf{x}$. Το 1 είναι το μοναδιαίο στοιχείο στο σώμα K .

Το σώμα K λέγεται πεδίο συντελεστών του διανυσματικού χώρου V και τα στοιχεία του λέγονται διανύσματα.

Ορισμός A.2.2

Έστω A ένα μη κενό σύνολο του διανυσματικού χώρου V . Το σύνολο όλων των στοιχείων του V που είναι γραμμικοί συνδυασμοί στοιχείων του A λέγεται γραμμικό περίβλημα ή γραμμική θήκη του A και συμβολίζεται με $\langle A \rangle$.

Ορισμός A.2.3

Έστω V ένας διανυσματικός χώρος πάνω σε ένα σώμα K . Τα διανύσματα $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k$ του V θα λέγονται γραμμικώς εξαρτημένα αν και μόνο αν υπάρχουν συντελεστές $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k \in K$, όχι όλοι μηδέν, τέτοιοι ώστε να ισχύει:

$$\lambda_1 \mathbf{x}_1 + \lambda_2 \mathbf{x}_2 + \dots + \lambda_k \mathbf{x}_k = \mathbf{0} \tag{A.1}$$

Τα διανύσματα $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k$ του V θα λέγονται γραμμικώς ανεξάρτητα αν και μόνο αν κάθε σχέση της μορφής (Α.1) ισχύει μόνο όταν $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_k = 0$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΦΩΝ

Ορισμός Β.1

Διαδρομή ονομάζεται μια ακολουθία διαδοχικών ακμών.

Μονοπάτι ονομάζεται μια διαδρομή χωρίς επανάληψη κορυφών ή ακμών.

Ορισμός Β.2

Δύο μονοπάτια λέγονται ξένα ως προς τις ακμές (edge disjoint), αν δεν έχουν καμία κοινή ακμή (παρότι μπορεί να τέμνονται). Δύο κορυφές ονομάζονται συνδεδεμένες (connected), αν υπάρχει κάποιο μονοπάτι από τη μια κορυφή προς την άλλη.

Ορισμός Β.3

Κύκλος ονομάζεται ένα μονοπάτι που τα άκρα του ταυτίζονται. Ένας γράφος ονομάζεται ακυκλικός αν δεν περιέχει κύκλους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΑ

Ορισμός Γ.1

Σώμα είναι ένα σύνολο F αντικειμένων οποιουδήποτε είδους, μαζί με δύο δυαδικές πράξεις $+$ και $*$ ορισμένες στο F , οι οποίες απεικονίζουν σε 2 στοιχεία a και b που ανήκουν στο F , άλλα στοιχεία, $a+b$ και $a*b$, πάλι στο F . Ισχύουν οι εξής ιδιότητες:

- $(a+b)+c=a+(b+c)$
- Υπάρχει στοιχείο 0 που ανήκει στο F τέτοιο ώστε
 - $a+0=a$ για κάθε a που ανήκει στο F , και
 - για κάθε a που ανήκει στο F υπάρχει b που ανήκει στο F τέτοιο ώστε $a+b=0$,
- $a+b=b+a$, δηλαδή ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα στο F ,
- $(a*b)*c=a*(b*c)$
- Υπάρχει αριθμός 1 που ανήκει στο F τέτοιος ώστε
 - $a*1=a$

ο και να υπάρχει, για κάθε a διάφορο του μηδενός, ένα b , τέτοιο ώστε

$$a*b=1.$$

- $a*b=b*a$
- $a*(b+c)=a*b+a*c$

Ορισμός Γ.2

Ένα πεπερασμένο σώμα (finite field) είναι ένα αλγεβρικό σύστημα που αποτελείται από ένα πεπερασμένο σύνολο F μαζί με δύο δυαδικές πράξεις $+$ και \cdot , ορισμένες στο F , και ικανοποιεί τα ακόλουθα αξιώματα :

- Το F είναι μια αβελιανή ομάδα με την πράξη “+”
- Το F είναι μια αβελιανή ομάδα με την πράξη “ \cdot ”
- Επιμεριστική ιδιότητα

Ένα πεπερασμένο σώμα λέγεται αλλιώς και σώμα Γκαλουά. Τα πεπερασμένα σώματα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Κάθε πεπερασμένο σώμα έχει p^n στοιχεία για κάποιο p πρώτο αριθμό και ακέραιο $n \geq 1$. Το p ονομάζεται χαρακτηριστική του σώματος.
- Για κάθε πρώτο p και κάθε ακέραιο $n \geq 1$, υπάρχει ένα μοναδικό πεπερασμένο σώμα τάξης p^n (σώμα με p^n στοιχεία).
- Όλα τα σώματα με p^n στοιχεία είναι ισόμορφα μεταξύ τους. Μπορούμε να ταυτίσουμε όλα τα σώματα με τον ίδιο αριθμό στοιχείων. Τα σώματα αυτά συμβολίζονται με ή με $GF(p^n)$, όπου τα γράμματα “GF” προέρχονται από το “Galois field”.

Prime finite fields

Έστω p ένας πρώτος αριθμός. Οι ακέραιοι modulo p , οι οποίοι είναι οι $\{0,1,2, \dots, p-1\}$, με πρόσθεση και πολλαπλασιασμό modulo p , είναι ένα πεπερασμένο σώμα τάξης p . Για κάθε ακέραιο a , το $a \bmod p$ θα δηλώνει το μοναδικό ακέραιο υπόλοιπο r , $0 \leq r \leq p-1$, που προκύπτει από τη διαίρεση του a με το p και αυτή η λειτουργία λέγεται αναγωγή modulo p . Η πρόσθεση modulo p και η αφαίρεση modulo p πραγματοποιούνται ως εξής:

$$(a+b) \bmod p = \begin{cases} a+b, & \alpha\nu a+b < p \\ a+b-p, & \alpha\nu a+b \geq p \end{cases}$$

$$(a-b) \bmod p = a-b$$

Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού modulo p είναι $(a \cdot b) \bmod p$. Ο αντίστροφος ενός αριθμού a είναι ο b τέτοιος ώστε $(a \cdot b) \bmod p = 1$. Τέλος, η διαίρεση πραγματοποιείται σε συνδυασμό πολλαπλασιασμού και αντιστροφής

$$\frac{a}{b} \bmod q = [a \cdot (\frac{1}{b})] \bmod q.$$

Binary fields

Τα πεπερασμένα σώματα τάξης 2^m ονομάζονται δυαδικά σώματα (binary fields) ή σώματα χαρακτηριστικής 2. Ένας τρόπος να κατασκευαστεί το F_q είναι η χρήση αναπαράστασης με πολωνυμική βάση. Τα στοιχεία του σώματος αυτού είναι δυαδικά πολώνυμα (πολώνυμα των οποίων οι συντελεστές είναι στο σώμα $F_2 = \{0,1\}$) βαθμού το πολύ $m-1$:

$$F_2^m = \{a_{m-1}z^{m-1} + a_{m-2}z^{m-2} + \dots + a_2z^2 + a_1z + a_0 : a_i \in \{0,1\}\}.$$

Επιλέγεται ένα ανάγωγο πολώνυμο $f(z)$ βαθμού m , που σημαίνει ότι το $f(z)$ δεν μπορεί να παραγοντοποιηθεί ως γινόμενο δυαδικών πολωνύμων βαθμού μικρότερου από m . Η πρόσθεση των στοιχείων του σώματος είναι η συνήθης πρόσθεση πολωνύμων με άθροισμα modulo 2 των συντελεστών των πολωνύμων. Εφόσον $(a-b) \bmod 2 = (a+b) \bmod 2$, η αφαίρεση ταυτίζεται με την πρόσθεση. Ο πολλαπλασιασμός των στοιχείων εκτελείται modulo του ανάγωγου πολωνύμου $(a(z) \cdot b(z)) \bmod f(z)$.

Ορισμός Γ.3

Έστω $F_q[D]$ ο δακτύλιος πολωνύμων πάνω από το F_q . Τα στοιχεία του $F_q[D]$ είναι τα πολώνυμα $f(D) = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + \dots + a_d D^d = \sum_i a_i D^i$, με συντελεστές $a_i \in F_q$, $0 \leq i \leq d$, δηλαδή $F_q[D] = \{\sum_i a_i D^i, a_i \in F_q\}$.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Παράδειγμα αύξησης της ρυθμαπόδοσης με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου.....	17
Σχήμα 1.2: Παράδειγμα εξοικονόμησης ασύρματων πόρων με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου.....	17
Σχήμα 1.3: Παράδειγμα αποφυγής υποκλοπών με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου.....	18
Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστικά των DTN δικτύων.....	22
Σχήμα 1.5: Παραδείγματα DTN δικτύων.....	23
Σχήμα 1.6: Το νέο στρώμα Bundle. Σύγκριση με το πρωτόκολλο TCP/IP.....	25
Σχήμα 1.7: Η DTN αρχιτεκτονική.....	26
Σχήμα 2.1: Η ελάχιστη τομή μεταξύ S και R είναι ίση με τρία.....	30
Σχήμα 2.2: Οι διαδρομές προς τους τρεις παραλήπτες συμπίπτουν για παράδειγμα στις ακμές BD και GH.....	31
Σχήμα 2.3: Με την προσέγγιση με κωδικοποίηση δικτύου στις ακμές BD και GH αποστέλλονται γραμμικοί συνδυασμοί των εισερχόμενων ροών τους.....	32
Σχήμα 2.4: Ένα δίκτυο με δύο πηγές και τρεις παραλήπτες μαζί με το γραμμικό γράφο του.....	36
Σχήμα 2.5: Οι κόμβοι A,B και C λαμβάνουν πληροφορία από τον κόμβο D.....	50
Σχήμα 2.6: Λόγος του πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο σε περίπτωση δρομολόγησης προς τον πλεονασμό σε περίπτωση εφαρμογής κωδικοποίησης δικτύου για μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (RWP: Random Waypoint Mobility)..	52
Σχήμα 3.1: Ιδιότητες σχημάτων δρομολόγησης των DTN δικτύων.....	68
Σχήμα 3.2: Σύγκριση πλεονασμού αντιγράφων μηνυμάτων επιδημικής και πιθανοτικής δρομολόγησης.....	71

Σχήμα 3.3: Το σχήμα MMF παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση έναντι του Spray and Wait ως συνάρτηση του ποσοστού των χρήσιμων αναμεταδοτών στο δίκτυο. Η σύγκριση πραγματοποιείται για διάφορες περιπτώσεις K ακτίνας κάλυψης των κόμβων και L αρχικών κουπονιών.....	75
Σχήμα 3.4: Ποσοστό «μολυσμένων» κόμβων για διάφορα σχήματα απαλοιφής μηνυμάτων.....	79
Σχήμα 3.5: Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function-CDF) για τρεις στρατηγικές διαχείρισης μνήμης και για απεριόριστη μνήμη.....	80
Σχήμα 3.6: Το φάσμα της προβλεψιμότητας του χρονοπρογραμματισμού των επαφών.....	81
Σχήμα 3.7: Πλεονασμός μηνυμάτων σε συνάρτηση με το μέγεθος της μνήμης στο σχήμα PROPHET με μοντέλο κινητικότητας κοινότητας.....	83
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα περίπτωσης πολυδιαδρομικής κωδικοποίησης δικτύου.....	85
Σχήμα 4.1: Επισκόπηση του περιβάλλοντος προσομοίωσης ONE.....	87
Σχήμα 4.2: Οπτικοποίηση του δικτύου μέσω του προσομοιωτή ONE.....	88
Σχήμα 4.3: Στιγμιότυπο δικτύου με 30 κόμβους και μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων.....	89
Σχήμα 4.4: Στιγμιότυπο δικτύου με 130 κόμβους και μοντέλα κινητικότητας βασισμένα σε χάρτη.....	90
Σχήμα 4.5: Παράδειγμα διαδρομών ενός μηνύματος από τον κόμβο p1 στον κόμβο p2.....	90
Σχήμα 4.6: Παράδειγμα γράφου γειτνίασης κόμβων.....	91
Σχήμα 4.7: Τα πακέτα (package) λογισμικού του ONE.....	92
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής αποφάσεων για τη διαχείριση της μνήμης.....	96
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής για την κωδικοποίηση στον προσομοιωτή ONE.....	99
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής για την αποκωδικοποίηση στον προσομοιωτή ONE..	101

Σχήμα 5.1: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων.....	106
Σχήμα 5.2: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων.....	107
Σχήμα 5.3: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων.....	107
Σχήμα 5.4: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων.....	108
Σχήμα 5.5: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων.....	109
Σχήμα 5.6: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 30 κόμβων..	110
Σχήμα 5.7: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων.....	111
Σχήμα 5.8: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων.....	111
Σχήμα 5.9: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων....	112
Σχήμα 5.10: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων.....	112
Σχήμα 5.11: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων.....	113
Σχήμα 5.12: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 50 κόμβων..	113
Σχήμα 5.13: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων.....	114

Σχήμα 5.14: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων.....	114
Σχήμα 5.15: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα επιδημικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων..	115
Σχήμα 5.16: Πιθανότητα παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων.....	115
Σχήμα 5.17: Μέση καθυστέρηση παράδοσης ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων.....	116
Σχήμα 5.18: Πλεονασμός αντιγράφων ανά μήνυμα ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για σχήμα πιθανοτικής δρομολόγησης σε δίκτυο 100 κόμβων.....	116
Σχήμα 5.19: Λόγος πλεονασμού του σχήματος επιδημικής δρομολόγησης προς τον πλεονασμό του σχήματος επιδημικής δρομολόγησης με κωδικοποίηση δικτύου σε δίκτυο 30 κόμβων.....	120

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου σε ασύρματο δίκτυο με ευρυεκπομπή δεδομένων.....	50
Πίνακας 5.1: Οι παράμετροι της προσομοίωσης στον προσομοιωτή ONE.....	105
Πίνακας A.1.1: Βήματα απαλοιφής Gauss-Jordan.....	123
Πίνακας A.1.2: Αλγόριθμος απαλοιφής Gauss-Jordan.....	123

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] K. Fall, “A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets,” in Intel Research Technical. Report IRB-TR-03-003, Feb 2003.

[2] Forrest Warthman. Delay Tolerant Networks (DTNs) - A tutorial . 2003.

[3] <http://www.ipnsig.org> .

[4] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Fall, H. Weiss, K. Scott. RFC 4838 - Delay-Tolerant Networking Architecture. April 2007.

[5] Tara Small, Zygmunt J. Haas. Resource and Performance Tradeoffs in DelayTolerant Wireless Networks. SIGCOMM’05 Workshops, 2005.

[6] Nagajothy.M, Dr.S.Radha. Network Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Network using Network Coding. INTERNATIONAL CONFERENCE ON “CONTROL, AUTOMATION, COMMUNICATION AND ENERGY CONSERVATION -2009, 4th-6th June 2009.

[7] Majid Ghaderi, Don Towsley and Jim Kurose. Reliability Benefit of Network Coding. 2007.

[8] Christina Fragouli and Emina Soljanin. Network Coding Fundamentals. 2007.

[9] Christina Fragouli and Emina Soljanin. Network Coding Applications. 2007.

[10] <http://code.google.com/p/ncutils/>

[11] Ari Keränen, Jörg Ott, Teemu Kärkkäinen. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. SIMUTools 2009, Rome, Italy.

[12] <http://ic.ucsc.edu/~ptantalo/math21/Winter07/GaussJordan.java>

[13] Ν. ΚΑΔΙΑΝΑΚΗΣ, Σ.ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΣ. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΛΓΕΒΡΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. ΑΘΗΝΑ 2003.

[14] Rudolf Lidl, Harald Niederreiter. Foreword by P. M. Cohn. ENCYCLOPEDIA OF MATHEMATICS AND ITS APPLICATIONS: Finite fields. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1997.

[15] Xiaolan Zhang, Giovanni Neglia, Jim Kurose, Don Towsley. Benefits of Network Coding in Disruption Tolerant Networks. INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE, Rapport de recherche n° 7277, June 2010.

[16] P. A. Chou, T.Wu, and K. Jain, “Practical network coding”, in 51st Allerton Conf. Communication, Control and Computing, Oct. 2003.

[17] Sachin Katti Hariharan Rahul Wenjun Hu Dina Katabi Muriel M’edard Jon Crowcroft. XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding. SIGCOMM’06, September 11–15, 2006, Pisa, Italy.

[18] Christina Fragouli, Dina Katabi, Athina Markopoulou, Muriel M’edard, Hariharan Rahul. Wireless Network Coding: Opportunities & Challenges. 2007 Military Communications Conference (MILCOM), Orlando, FL, October 2007.

[19] Andrea Munari, Francesco Rossetto, Michele Zorzi. Phoenix: Making Cooperation more Efficient through Network Coding in Wireless Networks. 2009 IEEE.

[20] Szymon Chachulski Michael Jennings Sachin Katti Dina Katabi. Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing. SIGCOMM’07, August 27–31, 2007, Kyoto, Japan.

[21] Network Working Group. RFC 1058 – Routing Information Protocol. June 1988.

[22] Network Working Group. RFC 2328 - OSPF Version 2. April 1998.

[23] Himali Saxena, Chunyu Ai, Marco Valero, Yingshu Li, and Raheem Beyah. DSF - A Distributed Security Framework for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2010 - MILCOM 2010.

[24] Network Working Group. RFC 3561 - Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. July 2003.

[25] Levente Buttyan, Laszlo Dora, Mark Felegyhazi, Istvan Vajda: Barter-based cooperation in delay-tolerant personal wireless networks

[26] Anders Lindgren, Avri Doria, Olov Schelen: Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks

[27] Tara Small, Zygmunt J. Haas: Resource and Performance Tradeoffs in Delay - Tolerant Wireless Networks

[28] Xiaolan Zhang, Giovanni Neglia, Jim Kurose, Don Towsley: Performance Modeling of Epidemic Routing

[29] Sanjit Biswas and Robert Morris: ExOR: Opportunistic MultiHop Routing for Wireless Networks

[30] Aruna Balasubramanian, Brian Neil Levine and Arun Venkataramani: DTN Routing as a Resource Allocation Problem

[31] Evan P.C. Jones, Paul A.S. Ward: Routing Strategies for Delay-Tolerant Networks

[32] Paolo Costa, Cecilia Mascolo, Mirco Musolesi, and Gian Pietro Picco: Socially-Aware Routing for Publish-Subscribe in Delay-Tolerant Mobile Ad Hoc Networks

[33] Pan Hui, Jon Crowcroft, Eiko Yoneki : BUBBLE Rap: Social-based Forwarding in Delay Tolerant Networks

[34] Sara Alouf , Iacopo Carreras , Daniele Miorandi , Giovanni Neglia: Embedding Evolution in Epidemic-Style Forwarding

[35] Thrasyvoulos Spyropoulos, Thierry Turletti, and Katia Obraczka: Routing in Delay Tolerant Networks Comprising Heterogeneous Node Populations

[36] Thrasyvoulos Spyropoulos, Konstantinos Psounis and Cauligi Raghavendra: Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks: The Multiple-copy Case

[37] John Burgess, Brian Gallagher, David Jensen, Brian Neil Levine. MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks. INFOCOM 2006.

[38] Flavio Fabbri and Roberto Verdone. A Sociability-Based Routing Scheme for Delay-Tolerant Network. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking Volume 2011, Article ID 251408.

[39] Jörg Widmer, JeanYves Le Boudec. Network Coding for Efficient Communication in Extreme Networks. SIGCOMM'05 Workshops, August 22–26, 2005.

[40] Xinyu Zhang, Baochun Li. Optimized Multipath Network Coding in Lossy Wireless Networks. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 27, NO. 5, JUNE 2009.