

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μετάδοση Πολυμέσων σε Κινητά Ad
Hoc δίκτυα

Συντάκτης
Πλάνης Κωνσταντίνος

Υπεύθυνος Καθηγητής
Μπούρας Χρήστος

Επιβλέπων
Καπούλας Ευάγγελος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2019

© Copyright συγγραφέας Κωνσταντίνος Πλάνης, 2020

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Η ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων δικτύων και η ευρεία χρήση των κινητών συσκευών συντέλεσαν στην ανάπτυξη των κινητών ad hoc δικτύων. Τα δίκτυα αυτά αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε στρατιωτικές εφαρμογές, ωστόσο τη σημερινή εποχή είναι αρκετά δημοφιλή βρίσκοντας πλέον εφαρμογή σε πληθώρα περιπτώσεων. Ορισμένα από τα δυνατά χαρακτηριστικά των κινητών ad hoc δικτύων είναι η αυτονομία και η ανεξαρτησία από σταθερή υποδομή, η ευκολία εγκατάστασης και το χαμηλό κόστος αυτής. Οι κόμβοι στα δίκτυα αυτά είναι ελεύθεροι να κινούνται τυχαία και προς πάσα κατεύθυνση. Επίσης ανά πάσα στιγμή ένας νέος κόμβος μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο ή κάποιος άλλος να αποχωρήσει από αυτό. Είναι λοιπόν φανερό ότι η τοπολογία των κινητών ad hoc δικτύων μεταβάλλεται ραγδαία και απρόβλεπτα.

Η δρομολόγηση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στα δίκτυα αυτά και συνδέεται άμεσα με παραμέτρους όπως η κινητικότητα των κόμβων, η ταχύτητα και η κατεύθυνση της κίνησης τους, η πυκνότητα του δικτύου, κ.α. Για τη δρομολόγηση στα κινητά ad hoc δίκτυα έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρωτόκολλα καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί τη δική του στρατηγική για τον καθορισμό της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ πηγής και προορισμού. Όπως γίνεται αντιληπτό, η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι μια κρίσιμη απόφαση, η οποία έχει σημαντική επίδραση στη μετάδοση των δεδομένων και στην επίδοση του δικτύου.

Η μετάδοση πολυμέσων, και ειδικότερα η μετάδοση video, μέσω ενός ad hoc δικτύου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αρκεί κανείς να σκεφτεί πόσο θα διευκόλυne η ζωντανή μετάδοση video από κάποιο μέλος μιας ομάδας διάσωσης, η οποία επιχειρεί σε μια περιοχή όπου δεν υπάρχει υποδομή δικτύου ή υπήρχε αλλά έχει καταστραφεί στο κέντρο, ώστε αυτό να συντονίσει καλύτερα και να ενισχύσει την προσπάθεια των διασωστών. Η μετάδοση video πάντως (και ειδικά η απευθείας μετάδοση) εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις δικτύου.

Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να εξετάσει ορισμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης και να αποφανθεί για το ποιο (ή ποια) ανταποκρίνεται καλύτερα στο ούτως ή άλλως δύσκολο εγχείρημα της μετάδοσης video μέσω ενός ad hoc δικτύου. Τα πρωτόκολλα που εξετάζονται είναι τα πλέον χαρακτηριστικά reactive πρωτόκολλα, AODV και DSR, και ένα από τα πιο δημοφιλή proactive πρωτόκολλα, το DSDV. Η απόδοση των πρωτοκόλλων αυτών αξιολογείται με βάση το ποσοστό παράδοσης πακέτων και τη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο που επιτυγχάνει το καθένα από αυτά σε δίκτυα με διαφορετικές πυκνότητες κόμβων. Επίσης λαμβάνεται υπόψιν η ποιότητα του ληφθέντος video στο δέκτη

με τη χρήση των μετρικών PSNR και MOS. Σημειώνεται ότι η απόδοση των προαναφερθέντων πρωτοκόλλων αξιολογείται τόσο όταν η μετάδοση του video από την πηγή στον προορισμό είναι η μοναδική μετάδοση που πραγματοποιείται στο δίκτυο, όσο και όταν παράλληλα με τη μετάδοση του video από την πηγή στον προορισμό μεταδίδουν πακέτα και άλλοι κόμβοι στο δίκτυο (background traffic).

Στην πρώτη περίπτωση, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν φανερώνουν ότι το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSDV αποτυγχάνει στη μετάδοση του video τόσο στα αραιά όσο και στα πυκνά δίκτυα που εξετάστηκαν. Αντίθετα, τα πρωτόκολλα AODV και DSR φαίνεται να ανταποκρίνονται στο εγχείρημα αυτό. Η απόδοση και των δυο πρωτοκόλλων παρουσιάζει μικρή βελτίωση, καθώς το δίκτυο γίνεται πυκνότερο. Η ποιότητα του video που λαμβάνεται από τον δέκτη, όταν χρησιμοποιούνται ως πρωτόκολλα δρομολόγησης το AODV και το DSR κρίνεται ικανοποιητική σε σημείο τέτοιο, ώστε να μη δημιουργείται ενόχληση κατά την παρακολούθηση του. Συνολικά, το AODV υπερτερεί του DSR σε όλες τις εξεταζόμενες μετρικές απόδοσης με μικρή ωστόσο διαφορά.

Στη δεύτερη περίπτωση ωστόσο τα αποτελέσματα δεν είναι ενθαρρυντικά. Συγκεκριμένα, όταν εισάγεται επιπρόσθετη κίνηση στο δίκτυο (background traffic), ακόμα και όταν αυτή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή, το DSR παρουσιάζει σημαντική απώλεια πακέτων αλλά και υψηλές καθυστερήσεις. Το AODV σημειώνει καλύτερη απόδοση από το DSR, καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο, ωστόσο και αυτό αποτυγχάνει στη μετάδοση του video, όταν παράλληλα με τον αποστολέα του video μεταδίδουν και άλλοι κόμβοι στο δίκτυο.

Abstract

The radical development of wireless networks and the wide use of mobile devices contributed to the development of mobile ad hoc networks. These networks were initially used in military applications, although nowadays they are quite popular, being applied in a plethora of cases. Certain of the mobile ad hoc networks' strong characteristics are their autonomy and independence from a solid infrastructure, and the fact that their installation is easy and of a low cost. The nodes in these networks are free to move randomly and toward every direction. Furthermore, at any point in time, a new node can enter the network, while another one can leave the network. It is therefore clear that the topology of the mobile ad hoc networks is radically and unpredictably changing.

Routing constitutes one of the greater challenges of these networks and is directly linked to factors such as the node mobility, the speed and direction of their movement, the density of the network and others. For the routing of mobile ad hoc networks, several protocols have been developed, each using its own strategy to determine the best route from the source to the destination. As can be understood, the selection of the appropriate protocol is a critical decision, which influences significantly the data transfer and the network's performance.

The multimedia transmission, and especially video transmission via an ad hoc network is very interesting. One should only think about how easier live video transmission from a member of a rescue team, who is acting in an area without a network infrastructure or in an area where there was a network but was destroyed, could organize and enhance the effort of the rescue team. Video transmission though, and especially live transmission, has especially high network requirements.

The goal of this project is to examine certain routing protocols and to decide which one (or which ones) react better to the - in any case- difficult operation of live video transfer via an ad hoc network. The protocols examined are the most reactive protocols, AODV and DSR, and one of the most popular proactive protocols: DSDV. The performance of the protocols is evaluated based on the percentage of package delivery and the average delay from end to end that each one achieves in networks with various node densities. The quality of the received video is also taken into consideration, measured with PSNR and MOS. It is noted that the performance of the above-mentioned protocols is evaluated both when the video transmission

from source to destination is the only transmission taking place in the network, but also when other nodes in the network are transferring packages (background traffic).

In the first case, the results of the experiments that were conducted show that the routing protocol DSDV fails to transfer the video, both in the sparse and in the dense networks that were examined. On the contrary, the protocols AODV and DSR seem to respond well to this operation. The performance of both protocols presents a slight improvement when the network gets denser. The video quality received by the destination user, when using AODV and DSR routing protocols, is satisfactory to the extent that there is no disturbance when watching the video. Overall, AODV is superior to DSR in all the examined performance measurements with a slight, however, deviation.

In the second case, however, the results are not encouraging. More specifically, when an additional traffic enters the network (background traffic), even when it is not especially high, DSR shows significant package loss, as well as significant delays. AODV performs better than DSR when the traffic in the network rises, although this protocol fails in video transmission too, when other nodes are simultaneously transmitting data in the network.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα (Αναπληρωτή Πρύτανη και Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών) για την ανάθεση της εργασίας αλλά και την επίβλεψη της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Ομοίως, ευχαριστώ τον κ. Βαγγέλη Καπούλα για τη στήριξη και την πολύτιμη βοήθεια του, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	9
1.1	Ασύρματα Δίκτυα	9
1.2	Αδόμητα (Ad Hoc) δίκτυα	10
1.2.1	MANETS	12
1.2.2	VANETS	12
1.2.3	Χαρακτηριστικά αδόμητων δικτύων	14
1.2.4	Εφαρμογές	15
1.2.5	Ιστορική εξέλιξη των Ad Hoc δικτύων	17
1.3	Το πρότυπο IEEE 802.11	18
1.3.1	Η αρχιτεκτονική του 802.11	19
1.3.2	Το πρωτόκολλο υποεπιπέδου MAC του 802.11	20
1.3.3	Υπηρεσίες του προτύπου 802.11	22
1.4	Πολυμέσα	23
1.4.1	Ήχος	23
1.4.2	Εικόνα	24
1.4.3	Βίντεο	26
2	Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	29
2.1	Δρομολόγηση σε αδόμητα δίκτυα	29
2.2	Κατηγορίες πρωτοκόλλων δρομολόγησης	29
2.2.1	Proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης	30
2.2.1.1	DSDV	30
2.2.1.2	OLSR	35
2.2.1.3	WRP	38
2.2.2	Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης	42
2.2.2.1	AODV	42
2.2.2.2	DSR	47
2.2.2.3	TORA	51
2.2.3	Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης	58

2.2.3.1	ZRP	58
2.2.3.2	FSR	63
3	Προηγούμενες Εργασίες	67
3.1	AODV vs DSR	67
3.2	AODV vs DSR vs DSDV	70
3.3	AODV vs DSR vs DSDV	72
3.4	FSR vs AODV vs ZRP	76
3.5	AODV vs DSR vs DSDV vs TORA	78
4	Ανάλυση Πειραμάτων	83
4.1	Περιβάλλον Προσομοίωσης	83
4.2	Εξεταζόμενα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	86
4.3	Εξεταζόμενες μετρικές απόδοσης	87
4.4	Γενικά Χαρακτηριστικά Προσομοιώσεων	89
5	Πειράματα	91
5.1	Πρώτο Πείραμα	91
5.1.1	Χαρακτηριστικά Πειράματος	91
5.1.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	92
5.2	Δεύτερο Πείραμα	97
5.2.1	Χαρακτηριστικά Πειράματος	97
5.2.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	97
5.3	Συγκεντρική Ανάλυση Αποτελεσμάτων	100
6	Μελλοντική Εργασία	102
	Βιβλιογραφία	102

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ασύρματα Δίκτυα

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με συχνότητα φέροντος, η οποία εξαρτάται κάθε φορά από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία λοιπόν, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δε χρησιμοποιεί κάποιο καλώδιο ως μέσο μετάδοσης.

Το πρώτο ασύρματο δίκτυο υπολογιστών εμφανίζεται στη Χαβάη στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν ο ερευνητής Norman Abramson με τους συναδέλφους του από το Πανεπιστήμιο της Χαβάης προσπαθούσαν να συνδέσουν τους χρήστες από τα απομακρυσμένα νησιά με τον κεντρικό υπολογιστή στη Χονολουλού. Το σύστημα που ανέπτυξαν, το οποίο ονομάστηκε ALOHA, χρησιμοποιούσε ραδιοκύματα μικρού εύρους με όλα τα τερματικά χρήστη να μοιράζονται την ίδια συχνότητα για την αποστολή πλαισίων στον κεντρικό υπολογιστή. Έκτοτε τα ασύρματα δίκτυα γνώρισαν σημαντική ανάπτυξη χάρη στα πλεονεκτήματα που προσφέρουν έναντι των ενσύρματων.

Οι χρήστες που παλαιότερα συνήθιζαν να κάθονται σε ένα γραφείο προκειμένου να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο πλέον είναι ελεύθεροι να κινούνται στο χώρο δίχως να χάνουν την πρόσβαση αυτή. Επιπλέον, η επέκταση των δικτύων αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί με το υπάρχον υλικό, σε αντίθεση με τα ενσύρματα στα οποία χρειάζονται νέα καλώδια. Αν, για παράδειγμα, μια εταιρεία προσλάβει νέους εργαζόμενους, τότε σε ένα ενσύρματο δίκτυο θα πρέπει να δημιουργηθεί στο γραφείο του καθενός μια φυσική σύνδεση με το δίκτυο προκειμένου να έχουν και οι νέοι εργαζόμενοι πρόσβαση σε αυτό. Συχνά τα ασύρ-

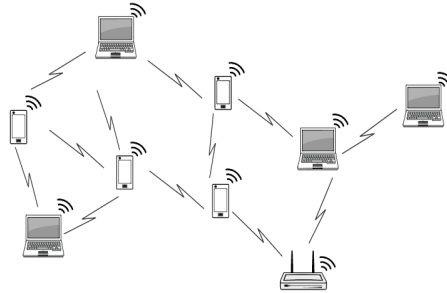
ματα δίκτυα μπορούν να φιλοξενούν περισσότερους χρήστες, αφού το πλήθος των χρηστών δεν περιορίζεται από ένα συγκεκριμένο αριθμό θυρών σύνδεσης. Από την άλλη πλευρά, οι ασύρματες συνδέσεις παρεμποδίζονται από τοίχους, οροφές και έπιπλα που μπλοκάρουν τα ραδιοκύματα, ενώ όσο απομακρύνεται μια συσκευή από το ασύρματο σημείο πρόσβασης η σύνδεση της με το δίκτυο εξασθενεί. Επίσης, ένα ασύρματο δίκτυο είναι ευκολότερο να παραβιαστεί από ένα ενσύρματο, αφού δεν απαιτείται φυσική σύνδεση σε αυτό.

Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα, στις περισσότερες περιπτώσεις δε συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο «δίκτυο» τηλεπικοινωνιακών κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια. Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και επομένως δεν μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών.

1.2 Αδόμητα (Ad Hoc) δίκτυα

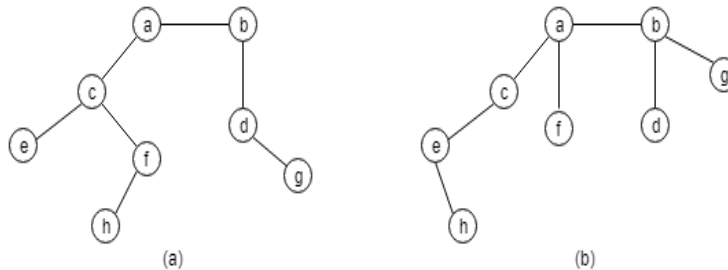
Ο όρος ad hoc προέρχεται από τη λατινική γλώσσα και σημαίνει επί τούτω, γι' αυτό το σκοπό. Ο χαρακτηρισμός αυτός δίνεται σε ένα δίκτυο προκειμένου να δηλώσει ότι αυτό σχηματίζεται προσωρινά και κατά απαίτηση για ένα συγκεκριμένο σκοπό. Τα ad hoc δίκτυα δε στηρίζονται σε προϋπάρχουσες υποδομές. Σε αντίθεση με τα ασύρματα LAN, στα οποία χρησιμοποιούνται τα WAPs, στα δίκτυα αυτά δε γίνεται χρήση κάποιας συσκευής (σταθμού βάσης) για τη σύνδεση των ασύρματων συσκευών επικοινωνίας. Εφόσον δυο κόμβοι βρίσκονται ο ένας στην εμβέλεια της ακτίνας εκπομπής του άλλου μπορούν να επικοινωνούν απευθείας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για την επικοινωνία των δυο ασύρματων κόμβων απαιτείται μόνο ένα άλμα (single hop communication). Ωστόσο, αν ένας κόμβος επιθυμεί να επικοινωνήσει με κάποιον άλλον, ο οποίος δε βρίσκεται στην εμβέλεια της ακτίνας εκπομπής του, τότε πρέπει να χρησιμοποιήσει ενδιάμεσους κόμβους για το σκοπό αυτό. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος ουσιαστικά λειτουργεί ως δρομολογητής, προωθώντας το πακέτο δεδομένων στον πλησιέστερο κόμβο στον παραλήπτη, ο οποίος βρίσκεται στην εμβέλεια της ακτίνας εκπομπής του. Στην περίπτωση αυτή για την επικοινωνία των δυο κόμβων (αποστολέα και παραλήπτη) απαιτούνται περισσότερα από ένα άλματα (multi-hop communication). Έτσι τα ad hoc δίκτυα χαρακτηρίζονται ως ασύρματα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων. Όπως προκύπτει λοιπόν, ένας κόμβος σε

ένα ad hoc δίκτυο μπορεί να επιτελεί το ρόλο του αποστολέα, του παραλήπτη αλλά και του δρομολογητή.



Σχήμα 1.1: Ad hoc δίκτυο

Οι ασύρματοι κόμβοι σε ένα αδόμητο δίκτυο είναι ελεύθεροι να κινούνται κατά βούληση και προς πάσα κατεύθυνση. Συχνά νέοι κόμβοι εισέρχονται στο δίκτυο, ενώ άλλοι το εγκαταλείπουν. Επομένως, η τοπολογία ενός ad hoc δικτύου είναι δυναμική και μεταβάλλεται ραγδαία και απρόβλεπτα. Το χαρακτηριστικό αυτό, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη συχνή αλλαγή της συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων, αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις στα αδόμητα δίκτυα. Βασικές λειτουργίες του δικτύου, όπως είναι για παράδειγμα η δρομολόγηση, πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική του τοπολογία.



Σχήμα 1.2: Δυο διαφορετικά στιγμιότυπα της τοπολογίας ενός ad hoc δικτύου

Τα αδόμητα δίκτυα αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει δικτυακή υποδομή (επειδή ίσως η ανάπτυξη του δικτύου δεν είναι δυνατή ή δεν είναι συμφέρουσα) ή υπήρχε αλλά καταστράφηκε. Τα

δίκτυα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα περιπτώσεων, όπως για παράδειγμα στο στρατό, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (επιχειρήσεις διάσωσης), σε διασκέψεις, σε δίκτυα αισθητήρων, κλπ. Ένα ad hoc δίκτυο μπορεί ασφαλώς να λειτουργεί αυτόνομα, ωστόσο είναι δυνατό να συνδεθεί και με το διαδίκτυο. Αρκεί κάποιος κόμβος του αδόμητου δικτύου να είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο.

1.2.1 MANETS

Τα MANETS, τα οποία συχνά αναφέρονται και ως Multi Hop Wireless Ad Hoc Networks, είναι ένα είδος ad hoc δικτύων. Ένα MANET είναι ένα σύνολο κινητών κόμβων, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων συνδέσεων. Οι κόμβοι αυτοί κινούνται τυχαία προς οποιαδήποτε κατεύθυνση με αποτέλεσμα η συνδεσιμότητα μεταξύ τους να αλλάζει συχνά. Η τοπολογία λοιπόν ενός MANET είναι δυναμική και μεταβάλλεται με απροσδιόριστο τρόπο. Ασφαλώς εξαιτίας της ad hoc φύσης τους η λειτουργία των δικτύων αυτών δεν απαιτεί την ύπαρξη σταθμών βάσης ούτε κάποιας προϋπάρχουσας υποδομής δικτύου. Η ευθύνη για την εκτέλεση των λειτουργιών του δικτύου ανατίθεται στους ίδιους τους ασύρματους κόμβους.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε ένα κινητό ad hoc δίκτυο διαδραματίζει η ακτίνα εκπομπής των κόμβων. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη αυτή είναι, τόσο μικρότερο είναι το μέσο πλήθος των μεταδόσεων που απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων από έναν κόμβο σε έναν άλλον. Μειώνεται δηλαδή ο αριθμός των ενδιαμέσων κόμβων που αναλαμβάνουν την προώθηση των δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Από την άλλη πλευρά, η μικρή ακτίνα εκπομπής μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων, καθώς και τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των μεταδόσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα. Η ακτίνα εκπομπής έχει επίσης σημαντική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου. Συνεπώς θα πρέπει να επιλέγεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, δίχως όμως να χάνεται η συνεκτικότητα του δικτύου.

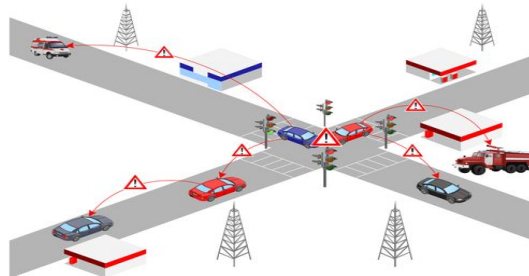
1.2.2 VANETS

Τα δίκτυα VANETS αποτελούν ουσιαστικά μια ειδική κατηγορία των MANETS. Οι κόμβοι που συνθέτουν ένα VANET είναι κινούμενα οχήματα, τα οποία εξοπλίζονται με ειδικές συσκευές. Στα δίκτυα αυτά η κίνηση των κόμβων είναι λιγότερο απρόβλεπτη σε σχέση με αυτή στα MANETS, όπου οι κόμβοι κινούνται τυχαία προς πάσα κατεύθυνση, καθώς τώρα περιορίζεται από τη δομή των αυτοκινητοδρόμων. Συχνά στο δίκτυο εισέρχονται νέα οχήματα, ενώ άλλα

το εγκαταλείπουν. Ασφαλώς η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου δεν προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιας προϋπάρχουσας υποδομής δικτύου. Στα VANETS υπάρχουν τρεις τύποι επικοινωνιών :

- V2V (Vehicle to Vehicle Communication) : επικοινωνία μεταξύ οχημάτων
- V2R (Vehicle to Roadside Communication) : επικοινωνία μεταξύ οχημάτων-υποδομών στο δρόμο
- Inter-Vehicle Communication : επικοινωνία που περιλαμβάνει τους δυο προηγούμενους τύπους (V2V και V2R) και επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ μακρινών σταθμών βάσης μέσω ενδιάμεσων οχημάτων ή και άλλων υποδομών.

Οι υποδομές στο δρόμο (roadside units) μπορεί να είναι φωτεινοί σηματοδότες, πινακίδες σήμανσης, ακόμα και σταθεροί αναμεταδότες, οι οποίοι λειτουργούν ως ακίνητοι κόμβοι του δικτύου και συμβάλλουν στη γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση μηνυμάτων.



Σχήμα 1.3: Δίκτυο VANET

Τα VANETS παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην ασφάλεια των επιβατών. Για παράδειγμα, η εκπομπή ενός προειδοποιητικού μηνύματος από ένα απότομα επιβραδυνόμενο όχημα σε κοντινά του οχήματα ίσως συμβάλει στην αποφυγή ατυχήματος. Ένα όχημα, το οποίο εμπλέκεται σε τροχαίο ή έχει υποστεί βλάβη, μπορεί να ειδοποιήσει μέσω ενός τέτοιου δικτύου κοντινά του οχήματα για βοήθεια. Εκτός από την ασφάλεια των επιβατών, τα VANETS μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην πιο γρήγορη και άνετη μετακίνησή τους. Η μετάδοση πληροφορίας μέσω ενός δικτύου VANET σχετικά με τη συμφόρηση στους δρόμους ή τις διαθέσιμες θέσεις parking διευκολύνει τους οδηγούς και τους επιβάτες των οχημάτων.

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα προαναφερθέντα παραδείγματα, η αξιοπιστία του δικτύου αλλά και η μικρή καθυστέρηση σε αυτό είναι καθοριστικής σημασίας στα VANETS.

1.2.3 Χαρακτηριστικά αδόμητων δικτύων

Δυναμική Τοπολογία

Οι κόμβοι σε ένα αδόμητο δίκτυο είναι ελεύθεροι να κινούνται τυχαία και προς πάσα κατεύθυνση. Επίσης οποιαδήποτε στιγμή ένας νέος κόμβος μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο, ενώ κάποιος άλλος μπορεί να αποχωρήσει. Η τοπολογία λοιπόν ενός αδόμητου δικτύου είναι δυναμική και μεταβάλλεται ραγδαία και απρόβλεπτα. Επομένως και οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων αλλάζουν συχνά.

Κατανεμημένη Λειτουργία

Στα αδόμητα δίκτυα δεν υπάρχει κάποια κεντρική οντότητα, η οποία διαχειρίζεται τη λειτουργία του δικτύου. Αντίθετα, η ευθύνη για την εκτέλεση των λειτουργιών ενός ad hoc δικτύου κατανέμεται στους κόμβους που συμμετέχουν σε αυτό. Οι κόμβοι του δικτύου, δηλαδή, συνεργάζονται μεταξύ τους για την υλοποίηση λειτουργιών, όπως η δρομολόγηση ή η ασφάλεια.

Αυτονομία και ανεξαρτησία από σταθερή υποδομή

Η ανάπτυξη και η λειτουργία ενός ad hoc δικτύου δεν απαιτεί την ύπαρξη σταθερής υποδομής ή κεντρικής διαχείρισης. Οι κινητοί κόμβοι είναι αυτόνομοι και λειτουργούν ως πομποί, δέκτες αλλά και δρομολογητές. Έτσι η υλοποίηση ενός αδόμητου δικτύου είναι πιο οικονομική και πιο εύκολη από εκείνη ενός συμβατικού ασύρματου δικτύου.

Δρομολόγηση μέσω πολλαπλών αλμάτων (multi-hop routing)

Η λειτουργία αυτή είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αδόμητων δικτύων και εφαρμόζεται, όταν ένας κόμβος επιθυμεί να επικοινωνήσει με κάποιον άλλον κόμβο, ο οποίος όμως δε βρίσκεται στην εμβέλεια της ακτίνας εκπομπής του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κόμβος αυτός χρησιμοποιεί ενδιάμεσους κόμβους, οι οποίοι αναλαμβάνουν την προώθηση των δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Έτσι, η επικοινωνία των δυο ασύρματων κόμβων απαιτεί περισσότερα από ένα άλματα

(multi-hop communication). Αντίθετα, όταν ο παραλήπτης βρίσκεται στην εμβέλεια της ακτίνας εκπομπής του αποστολέα η επικοινωνία τους πραγματοποιείται απευθείας (single-hop communication).

Κόμβοι με διαφορετικά χαρακτηριστικά

Οι κόμβοι του αδόμητου δικτύου μπορούν να διαφέρουν σε αρκετά χαρακτηριστικά, όπως είναι για παράδειγμα η υπολογιστική ισχύς, η ακτίνα εκπομπής, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η μνήμη, κ.α. Αν η εμβέλεια της ακτίνας εκπομπής διαφέρει από κόμβο σε κόμβο, τότε οι συνδέσεις που σχηματίζονται μεταξύ αυτών μπορεί να είναι μονοκατευθυντικές (ασύμμετρες).

Περιορισμένο εύρος ζώνης

Τα κινητά ad hoc δίκτυα έχουν μικρότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα.

Περιορισμένη ασφάλεια

Στα αδόμητα δίκτυα η ασφάλεια αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα. Η ευπάθεια των ασύρματων συνδέσεων, η περιορισμένη φυσική προστασία των κόμβων, η δυναμικά μεταβαλλόμενη τοπολογία, η απουσία μιας αρχής πιστοποίησης αλλά και η έλλειψη ενός κεντρικού σημείου ελέγχου επιδρούν αρνητικά στην ασφάλεια του αδόμητου δικτύου.

Επεκτασιμότητα

Η επεκτασιμότητα αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των ad hoc δικτύων καθώς σε πολλές περιπτώσεις (π.χ δίκτυα αισθητήρων) απαιτείται η συμμετοχή πολλών κόμβων στο δίκτυο. Συνεπώς στα δίκτυα αυτά πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί, οι οποίοι διασφαλίζουν ότι η προσθήκη νέων κόμβων στο δίκτυο δε διαταράσσει τη λειτουργία του.

1.2.4 Εφαρμογές

Στρατιωτικές Επιχειρήσεις

Τα ad hoc δίκτυα χρησιμοποιούνται συχνά σε στρατιωτικές εφαρμογές,

όπου είναι αναγκαία η ταχεία ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνίας με περιορισμένες ή μηδενικές υποδομές, σε πιθανώς εχθρικό περιβάλλον. Οι κόμβοι που συμμετέχουν στο δίκτυο μπορεί να είναι στρατιώτες, οι οποίοι κινούνται, ή οχήματα. Σε κάθε περίπτωση εξοπλίζονται με ειδικές ασύρματες συσκευές μέσω των οποίων πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ τους.

Εφαρμογές έρευνας και διάσωσης

Τα αδόμητα δίκτυα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως είναι για παράδειγμα οι σεισμοί, οι πυρκαγιές, οι πλημμύρες κλπ, όπου η υποδομή του δικτύου έχει καταστραφεί. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η επικοινωνία μεταξύ των μελών της ομάδας διάσωσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς απαιτείται οργάνωση και συντονισμός της προσπάθειας τους. Για το σκοπό αυτό λοιπόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ad hoc δίκτυο, η ανάπτυξη του οποίου άλλωστε είναι εύκολη και ταχεία.

Εκπαιδευτικές εφαρμογές

Ένα αδόμητο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία και το διαμοιρασμό δεδομένων μεταξύ των συμμετεχόντων ενός meeting, ενός συνεδρίου, μιας ξενάγησης σε αρχαιολογικό χώρο ή μιας διάλεξης. Για παράδειγμα σε μια αίθουσα διδασκαλίας, όπου πραγματοποιείται μια διάλεξη ενός μαθήματος, ο καθηγητής και οι φοιτητές μέσω των φορητών υπολογιστών τους μπορούν να ανταλλάσσουν, κατά τη διάρκεια της διάλεξης, πληροφορία σχετική με το μάθημα.

Δίκτυα αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια σημαντική εφαρμογή των ad hoc δικτύων. Στα δίκτυα αυτά οι κόμβοι χρησιμοποιούν αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν μετρήσεις διαφόρων φυσικών και περιβαλλοντικών μεγεθών, όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία, ο ήχος, η υγρασία, η πίεση, οι ρύποι κ.α σε διάφορες τοποθεσίες. Η πληροφορία που συλλέγουν οι αισθητήρες ενός κόμβου μεταδίδεται σε άλλους κόμβους ή σε κάποιον κεντρικό σταθμό βάσης. Ο κεντρικός σταθμός βάσης αξιοποιώντας την πληροφορία αυτή μπορεί να έχει διαρκώς μια ολοκληρωμένη εικόνα των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, στην οποία καταγράφονται οι μετρήσεις. Για παράδειγμα το δασαρχείο, ύστερα από την τοποθέτηση αισθητήρων στη δασική περιοχή, μπορεί να ενημερώνεται έγκαιρα για την παρουσία καπνού προλαμβάνοντας την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Οι εφαρ-

μογές των δικτύων αυτών είναι ποικίλες και εκτείνονται ως τον τομέα της ιατρικής, τον τομέα του αυτοματισμού των κατοικιών, το οδικό δίκτυο, κ.α.

Ψυχαγωγία

Η φύση των αδόμητων δικτύων υποστηρίζει την ανάπτυξη πιο πλούσιων και εξελιγμένων παιχνιδιών με πολλούς συμμετέχοντες (multiplayer games), τα οποία ενσωματώνουν τους κινητούς χρήστες στο εικονικό τους περιβάλλον.

1.2.5 Ιστορική εξέλιξη των Ad Hoc δικτύων

Τα πρώτα ad hoc δίκτυα εντοπίζονται στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Τα δίκτυα αυτά, τα οποία ονομάζονταν Packet Radio Networks (PRNet), αναπτύχθηκαν από τον οργανισμό DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency). Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός PRNet δικτύου είναι η χρήση της τεχνικής μεταγωγής πακέτου, η λειτουργία store and forward και η διαμοίραση του μέσου μετάδοσης στους κόμβους του δικτύου. Ουσιαστικά τα PRNet παρείχαν τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων με δυνατότητα κίνησης μέσω ενός κοινού ασύρματου καναλιού. Οι κόμβοι στα δίκτυα αυτά συνεργάζονται προκειμένου ένα μήνυμα να φτάσει στον προορισμό του, αίροντας έτσι τον περιορισμό της περιοχής ραδιοκάλυψης κάθε συσκευής και επιτρέποντας την επικοινωνία χρηστών σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Για την πρόσβαση στο κανάλι, στα PRNet χρησιμοποιούνταν ένας συνδυασμός των πρωτοκόλλων ALOHA και CSMA (Carrier Sense Multiple Access).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ο οργανισμός DARPA αναπτύσσει τα δίκτυα SURANS (Survivable Radio Networks) προκειμένου να επιλύσει κάποια από τα προβλήματα των δικτύων PRNet της προηγούμενης γενιάς. Η προσπάθεια αυτή είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αλγορίθμων για την υποστήριξη δικτύων στα οποία συμμετέχει μεγαλύτερο πλήθος κόμβων, την αύξηση της ανθεκτικότητας του δικτύου σε ηλεκτρονικές επιθέσεις, καθώς και τη μείωση του μεγέθους και της κατανάλωσης των κόμβων.

Η δεκαετία του 1990 σήμανε μια νέα εποχή για τα αδόμητα δίκτυα. Το υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ χρηματοδοτεί το 1994 το πρόγραμμα Global Mobile Information Systems (GloMo), το οποίο είχε ως στόχο την παροχή συνδεδεσιμότητας τύπου Ethernet για χρήση πολυμεσικών εφαρμογών μεταξύ κινητών ασύρματων συσκευών. Εκτός από το GloMo αναπτύσσεται επίσης το δίκτυο Near Term Digital Radio (NTDR), το οποίο χρησιμοποιούσε την τεχνική της συσταδοποίησης (clustering) καθώς και δρομολόγηση κατάσταση ζεύξης (link

state routing). Το 1998 πρωτοεμφανίζεται το Bluetooth, στο οποίο γίνεται χρήση ραδιοκυμάτων για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε μικρές αποστάσεις. Το Bluetooth υποστηρίζει τη σύνδεση πολλών χρηστών σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, μέχρι και οκτώ συσκευές μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε ένα μικρό δίκτυο που ονομάζεται piconet. Μια συσκευή Bluetooth μπορεί να λειτουργεί τόσο ως πελάτης όσο και ως εξυπηρετητής. Για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δυο συσκευών Bluetooth απαιτείται η σύνδεση τους. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται ύστερα από την αποδοχή του αιτήματος σύνδεσης μιας συσκευής από μια δεύτερη συσκευή.

1.3 Το πρότυπο IEEE 802.11

Κατά την εμφάνιση των πρώτων ασύρματων LAN εντοπίζεται πρόβλημα συμβατότητας μεταξύ των δικτύων που πωλούνταν από διαφορετικές εταιρείες. Για παράδειγμα ένας υπολογιστής εξοπλισμένος με ένα ραδιοπομπό μάρκας X δε δούλευε σε έναν χώρο εξοπλισμένο με ένα σταθμό βάσης μάρκας Y. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη ύπαρξης ενός κοινού προτύπου για τα ασύρματα LAN. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η επιτροπή της IEEE αναλαμβάνει τη σχεδίαση ενός τέτοιου προτύπου, το οποίο ονομάστηκε 802.11. Το πρότυπο αυτό όριζε ένα ασύρματο LAN, στο οποίο ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ήταν 2 Mbps. Σχεδόν αμέσως κάποιοι διαμαρτυρήθηκαν για τη χαμηλή αυτή ταχύτητα με αποτέλεσμα πολύ γρήγορα να ξεκινήσουν εργασίες πάνω σε ταχύτερα πρότυπα.

Τον Ιούλιο του 1999 παρουσιάζεται η έκδοση 802.11b, η οποία υποστηρίζει ταχύτητα 11 Mbps. Το πρότυπο αυτό λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz, όπως άλλωστε και το 802.11. Η συγκεκριμένη ζώνη τείνει να είναι πιο συνωστισμένη από αυτή των 5 GHz (όλες οι εκδόσεις 802.11 μεταδίδουν σήματα είτε στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz είτε στη ζώνη συχνοτήτων 5 GHz) και έτσι ενδέχεται να υπάρχουν παρεμβολές, αν σε κοντινή απόσταση βρίσκονται συσκευές που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Αν και η ομάδα εργασίας του 802.11b συγκροτείται αργότερα από αυτή του 802.11a, το πρότυπο αυτό εγκρίνεται και βγαίνει στην αγορά νωρίτερα. Το 802.11a υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως και 54 Mbps και λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz. Παρατηρείται λοιπόν ότι εξασφαλίζει σημαντικά μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης από το 802.11b, ενώ υπάρχουν και λιγότερες παρεμβολές. Από την άλλη πλευρά το 802.11b έχει εμβέλεια περίπου επτά φορές μεγαλύτερη από αυτή του 802.11a.

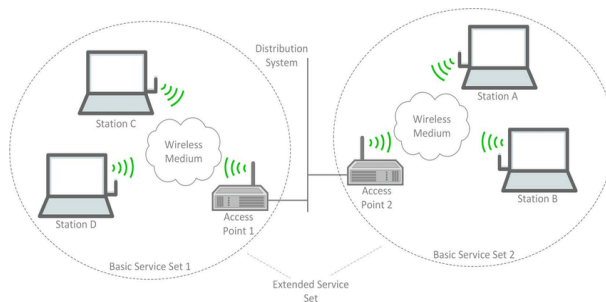
Το 2003 κυκλοφορεί το πρότυπο 802.11g, το οποίο επιχειρεί να συνδυάσει τα θετικά χαρακτηριστικά των εκδόσεων 802.11b και 802.11a. Το πρότυπο αυτό λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz και υποστηρίζει ρυθμο-

ύς μετάδοσης έως και 54 Mbps. Επίσης το 802.11g παρέχει συμβατότητα με οποιαδήποτε συσκευή 802.11b τυχαίνει να βρίσκεται κοντά.

Το 2009 σχεδιάζεται η έκδοση 802.11n, η οποία χρησιμοποιεί έως τέσσερις κεραίες για την ταυτόχρονη μετάδοση έως και τεσσάρων ρευμάτων πληροφορίας. Τα σήματα αυτών των ρευμάτων παρεμβάλλονται μεταξύ τους στον παραλήπτη, όμως μπορούν να διαχωριστούν με τη χρήση τεχνικών επικοινωνίας MIMO (Multiple Input Multiple Output). Η χρήση πολλών κεραιών προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης και καλύτερη εμβέλεια. Το 802.11n επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης τουλάχιστον 100 Mbps και είναι πλήρως συμβατό με τα πρότυπα 802.11b και 802.11g.

1.3.1 Η αρχιτεκτονική του 802.11

Βασικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής του 802.11 είναι το BSS (Basic Service Set). Το BSS αποτελείται από ένα σύνολο ασύρματων σταθμών (STA) και ένα σημείο πρόσβασης (AP) μέσω του οποίου πραγματοποιείται η μεταξύ τους επικοινωνία. Ωστόσο, είναι επίσης δυνατόν οι σταθμοί να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, δίχως να απαιτείται η ύπαρξη σημείου πρόσβασης. Σε αυτή την περίπτωση οι σταθμοί συνθέτουν ένα IBSS (Independent Basic Service Set). Δυο ή περισσότερα BSS μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους, συνδέοντας τα σημεία πρόσβασης τους τυπικά με ένα ενσύρματο δίκτυο, το οποίο ονομάζεται σύστημα διανομής (distribution system). Κατ' αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα EBSS (Extended Basic Service Set). Έτσι μέσω των σημείων πρόσβασης είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ σταθμών που βρίσκονται σε διαφορετικά BSS.



Σχήμα 1.4: Basic Service Set (BSS) και Extended Service Set (ESS)

1.3.2 Το πρωτόκολλο υποεπιπέδου MAC του 802.11

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, για να καθορίσουμε ποιος έχει σειρά για μετάδοση σε ένα κανάλι πολλαπλής πρόσβασης, ανήκουν σε ένα υποεπίπεδο του επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων, το οποίο ονομάζεται υποεπίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης Μέσων ή MAC (Medium Access Control). Το υποεπίπεδο MAC είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα ασύρματα LAN, αφού η ασύρματη επικοινωνία είναι από τη φύση της κανάλι εκπομπής.

Το πρότυπο 802.11 προσπαθεί να αποφύγει τις συγκρούσεις με ένα πρωτόκολλο που ονομάζεται CSMA με Αποφυγή Συγκρούσεων ή CSMA/CA (CSMA with Collision Avoidance). Στο πρωτόκολλο αυτό, όταν κάποιος κόμβος έχει δεδομένα προς αποστολή, ακούει πρώτα το κανάλι, για να δει αν μεταδίδει κανείς άλλος εκείνη τη στιγμή. Αν το κανάλι είναι κατειλημμένο, ο σταθμός περιμένει μέχρι να γίνει αδρανές. Όταν το κανάλι γίνεται αδρανές, κάθε κόμβος που έχει ένα πλαίσιο για αποστολή ξεκινά με μια τυχαία υποχώρηση. Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο CSMA/CD του Ethernet, δεν περιμένει να συμβεί πρώτα σύγκρουση. Για την υποχώρηση αυτή ορίζεται ένας αριθμός υποδοχών. Κάθε κόμβος, δηλαδή, όταν το κανάλι γίνεται αδρανές, αρχίζει να καταμετρά αδρανείς υποδοχές σταματώντας, όταν στέλνονται πλαίσια. Όταν ο μετρητής του φτάσει στο 0, μεταδίδει το πλαίσιο του. Αν το πλαίσιο μεταδοθεί με επιτυχία, ο προορισμός επιστρέφει αμέσως μια επιβεβαίωση. Η απουσία επιβεβαίωσης λαμβάνεται ως ένδειξη σφάλματος, είτε μιας σύγκρουσης είτε κάποιου άλλου σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή ο αποστολέας διπλασιάζει την περίοδο υποχώρησης και δοκιμάζει ξανά, συνεχίζοντας με εκθετική υποχώρηση, όπως στο Ethernet, μέχρι να μεταδοθεί με επιτυχία το πλαίσιο ή μέχρι να φτάσει το μέγιστο πλήθος αναμεταδόσεων.

Ας υποθέσουμε ότι, καθώς ο κόμβος A μεταδίδει ένα πλαίσιο, οι κόμβοι B και C γίνονται έτοιμοι για αποστολή. Οι δυο αυτοί κόμβοι βλέπουν ότι το κανάλι είναι απασχολημένο και περιμένουν μέχρι αυτό να γίνει αδρανές. Λίγο αργότερα από τη στιγμή κατά την οποία ο A λαμβάνει μια επιβεβαίωση, το κανάλι γίνεται αδρανές. Όμως αντί να στείλουν αμέσως ένα πλαίσιο και να συγκρουστούν, οι κόμβοι B και C εκτελούν και οι δυο υποχώρηση. Ο C επιλέγει μια μικρή υποχώρηση και έτσι στέλνει πρώτος. Ο B σταματά την αντίστροφη μέτρηση του όσο ανιχνεύει ότι ο C χρησιμοποιεί το κανάλι και συνεχίζει, αφού ο C λάβει την επιβεβαίωση. Λίγο αργότερα ο B ολοκληρώνει την αντίστροφη μέτρηση του και στέλνει το πλαίσιο. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας ονομάζεται Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού ή DCF (Distributed Coordination Function).

Ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν στα ασύρματα δίκτυα είναι αυτό του κρυμμένου τερματικού. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος B είναι εντός της εμβέλειας των A και C, ενώ ο A είναι εκτός της εμβέλειας του C. Ο κόμβος C

μεταδίδει στον B. Ο A επιθυμεί να μεταδώσει και ο ίδιος στον B. Ανιχνεύοντας το κανάλι ο A δε θα ακούσει τίποτα με αποτέλεσμα να συμπεράνει λανθασμένα ότι μπορεί να αρχίσει να μεταδίδει στον B. Αυτή η απόφαση ασφαλώς οδηγεί σε σύγκρουση. Υπάρχει επίσης και το αντίστροφο πρόβλημα, το πρόβλημα του εκτεθειμένου τερματικού. Έστω ότι ο A μεταδίδει σε κάποιον κόμβο D, ο οποίος είναι εκτός της εμβέλειας του B, και ότι ο κόμβος B θέλει να μεταδώσει στον C. Ο B ανιχνεύοντας το κανάλι ακούει τον κόμβο A και συμπεραίνει εσφαλμένα ότι δεν μπορεί να μεταδώσει στον D. Η απόφαση αυτή σπαταλά μια δυνατότητα μετάδοσης.

Για να μειωθεί η αβεβαιότητα ως προς το ποιος κόμβος μεταδίδει, το πρότυπο 802.11 ορίζει ότι η ανίχνευση καναλιού περιλαμβάνει τόσο φυσική όσο και εικονική ανίχνευση. Η φυσική ανίχνευση ελέγχει απλώς το φυσικό μέσο, για να δει αν υπάρχει έγκυρο σήμα. Στην εικονική ανίχνευση, ο κάθε κόμβος διατηρεί μια λογική εγγραφή για το αν το κανάλι είναι σε χρήση παρακολουθώντας το Διάνυσμα Εκχώρησης Δικτύου ή NAV (Network Allocation Vector). Κάθε πλαίσιο περιλαμβάνει ένα πεδίο NAV που δηλώνει πόσο χρόνο θα χρειαστεί για την ολοκλήρωση της η ακολουθία της οποίας είναι τμήμα το πλαίσιο. Οι κόμβοι που ακούν το πλαίσιο αυτό γνωρίζουν ότι το κανάλι θα είναι απασχολημένο για την περίοδο που δηλώνεται στο πεδίο NAV ανεξάρτητα με το αν μπορούν να ανιχνεύσουν φυσικό σήμα. Για παράδειγμα, αν το πεδίο NAV σε ένα πλαίσιο δεδομένων περιλαμβάνει τον χρόνο που απαιτείται για την αποστολή μιας επιβεβαίωσης, τότε όλοι οι κόμβοι που το ακούν θα αναστείλουν την μετάδοση για την περίοδο επιβεβαίωσης, ανεξάρτητα από το αν μπορούν να ακούσουν την ίδια την επιβεβαίωση.

Ο προαιρετικός μηχανισμός RTS/CTS χρησιμοποιεί το πεδίο NAV, για να αποτρέψει την αποστολή πλαισίων από τερματικά ταυτόχρονα με την αποστολή από κρυφά τερματικά. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος A θέλει να στείλει δεδομένα στον κόμβο B. Ο C είναι ένας κόμβος εντός της εμβέλειας του A. Ο D είναι ένας κόμβος εντός της εμβέλειας του B και εκτός της εμβέλειας του A. Ο κόμβος A μιας και επιθυμεί να μεταδώσει στον B στέλνει σε αυτόν ένα πλαίσιο RTS, ζητώντας άδεια για να του στείλει ένα πλαίσιο. Όταν ο B λάβει την αίτηση αυτή, απαντά με ένα πλαίσιο CTS, για να δείξει ότι το κανάλι είναι ελεύθερο για χρήση. Ο κόμβος A, αφού λάβει το CTS, στέλνει το πλαίσιο του και ξεκινά ένα χρονόμετρο επιβεβαίωσης. Ο B λαμβάνοντας το πλαίσιο δεδομένων απαντά με ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης και η ανταλλαγή ολοκληρώνεται. Ωστόσο, αν το χρονόμετρο επιβεβαίωσης του A λήξει δίχως να φτάσει σε αυτόν επιβεβαίωση, θεωρείται ότι συνέβη σύγκρουση και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται ύστερα από υποχώρηση.

Ας εξετάσουμε την ανταλλαγή αυτή και από την πλευρά των C και D. Ο C βρίσκεται εντός της εμβέλειας του A και έτσι μπορεί να λάβει το πλαίσιο RTS.

Λαμβάνοντας το αντιλαμβάνεται ότι κάποιος πρόκειται να στείλει δεδομένα σε λίγο. Από τις πληροφορίες της αίτησης RTS μπορεί να εκτιμήσει πόσο χρόνο θα χρειαστεί η ακολουθία, συμπεριλαμβανομένης της τελικής επιβεβαίωσης. Έτσι αποφεύγει να μεταδώσει οτιδήποτε μέχρι να ολοκληρωθεί η ανταλλαγή. Αυτό πραγματοποιείται ενημερώνοντας την εγγραφή του για το NAV, έτσι ώστε να δείχνει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο. Ο κόμβος D δεν ακούει το μήνυμα RTS, ακούει όμως το CTS και έτσι ενημερώνει και αυτός κατάλληλα την εγγραφή του για το NAV.

1.3.3 Υπηρεσίες του προτύπου 802.11

Το πρότυπο 802.11 καθορίζει 9 υπηρεσίες που οφείλει να παρέχει κάθε ασύρματο LAN που συμμορφώνεται με αυτό. Οι υπηρεσίες αυτές είναι οι εξής :

- **Συσχέτιση :** Η υπηρεσία αυτή χρησιμοποιείται από τους κινητούς σταθμούς, για να συνδεθούν με τα σημεία πρόσβασης. Ο σταθμός στέλνει μια αίτηση, για να συσχετιστεί με το σημείο πρόσβασης, το οποίο μπορεί είτε να αποδεχτεί, είτε να απορρίψει την αίτηση αυτή. Συνήθως η συσχέτιση χρησιμοποιείται αμέσως μόλις ένας σταθμός μετακινηθεί εντός της εμβέλειας του σημείου πρόσβασης. Με την άφιξη του ο σταθμός μαθαίνει την ταυτότητα και τις δυνατότητες του σημείου πρόσβασης, είτε από τα πλαίσια φάρου, είτε απευθείας με ερώτηση στο σημείο πρόσβασης. Οι δυνατότητες περιλαμβάνουν τους υποστηριζόμενους ρυθμούς μετάδοσης, τις ρυθμίσεις ασφαλείας, τις δυνατότητες διαχείρισης ενέργειας, την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσιών, κ.α.
- **Επανασυσχέτιση :** Επιτρέπει σε έναν σταθμό να αλλάξει το προτιμώμενο σημείο πρόσβασης του.
- **Αποσυσχέτιση :** Είτε ο σταθμός είτε το σημείο πρόσβασης μπορούν επίσης να αποσυσχετιστούν. Ο σταθμός θα πρέπει να χρησιμοποιεί αυτήν την υπηρεσία πριν κλείσει ή φύγει από το δίκτυο. Το σημείο πρόσβασης μπορεί να τη χρησιμοποιήσει πριν απενεργοποιηθεί για λόγους συντήρησης.
- **Πιστοποίηση Ταυτότητας :** Ο χειρισμός της πιστοποίησης γίνεται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την επιλογή του μηχανισμού ασφαλείας. Αν το δίκτυο 802.11 είναι ανοιχτό, μπορεί να το χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε. Διαφορετικά, πριν επιτραπεί στον σταθμό να στείλει πλαίσια μέσω του σημείου πρόσβασης, θα πρέπει να πιστοποιηθεί η ταυτότητα του.

- Ακύρωση πιστοποίησης ταυτότητας : Όταν ένας σταθμός, του οποίου η ταυτότητα έχει ήδη πιστοποιηθεί, θέλει να εγκαταλείψει το δίκτυο, ακυρώνεται η πιστοποίηση του.
- Διανομή : Η υπηρεσία αυτή προσδιορίζει τον τρόπο δρομολόγησης των πλαισίων που φτάνουν στο σημείο πρόσβασης. Αν ο προορισμός βρίσκεται στο τοπικό δίκτυο του σημείου πρόσβασης, τα πλαίσια μπορούν να σταλούν άμεσα μέσω του αέρα. Διαφορετικά θα πρέπει να προωθηθούν μέσω του ενσύρματου δικτύου.
- Ενοποίηση : Η υπηρεσία ενοποίησης χειρίζεται τις μεταφράσεις που απαιτούνται για την αποστολή ενός πλαισίου έξω από το τοπικό δίκτυο 802.11, ή για τη λήψη τους από το εξωτερικό του τοπικού δικτύου 802.11.
- Παράδοση δεδομένων : Αφού ο σκοπός του δικτύου είναι η μετάδοση των δεδομένων, το 802.11 είναι φυσικό να παρέχει μια υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων. Η μετάδοση στο 802.11 δεν είναι εγγυημένα αξιόπιστη. Συνεπώς τα ανώτερα επίπεδα θα πρέπει να ασχοληθούν με την ανίχνευση και την επιδιόρθωση σφαλμάτων.
- Εξασφάλιση Απορρήτου : Για να είναι εμπιστευτικές οι πληροφορίες που στέλνονται μέσω ενός ασύρματου LAN, θα πρέπει να κρυπτογραφηθούν. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με μια υπηρεσία εξασφάλισης απορρήτου, η οποία διαχειρίζεται την κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση.

1.4 Πολυμέσα

Όταν αναφερόμαστε σε μετάδοση πολυμέσων, αναφερόμαστε στη μετάδοση ήχου, εικόνας και βίντεο. Ωστόσο, στα ad hoc δίκτυα η μετάδοση πολυμέσων ενδέχεται να μην είναι ιδιαίτερα αποδοτική μιας και απαιτείται υψηλό εύρος ζώνης και μικρές χρονικές καθυστερήσεις. Τα πολυμεσικά δεδομένα συμπιέζονται και κωδικοποιούνται, ώστε να φτάσουν με την καλύτερη δυνατή ποιότητα στο δέκτη.

1.4.1 Ήχος

Η μετάδοση του ήχου απαιτεί συμπίεση προκειμένου να μειωθεί η ανάγκη σε εύρος ζώνης αλλά και ο χρόνος μεταφοράς. Ωστόσο, επειδή το αυτί είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο και μπορεί να αντιληφθεί μια ηχητική παραμόρφωση λίγων μόλις χιλιοστών του δευτερολέπτου, η συμπίεση πρέπει να είναι υψηλού επιπέδου. Η συμπίεση ήχου μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο τρόπους : την κωδικοποίηση

κυματομορφών (waveform coding) και την αντιληπτική κωδικοποίηση (perceptual coding) . Στην κωδικοποίηση κυματομορφών το σήμα μετασχηματίζεται μαθηματικά μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier στις συνιστώσες συχνότητες του. Στη συνέχεια κωδικοποιείται το πλάτος κάθε συνιστώσας. Στόχος είναι η ακριβής αναπαραγωγή της κυματομορφής στο άλλο άκρο με όσο το δυνατόν λιγότερα bit.

Η αντιληπτική κωδικοποίηση εκμεταλλεύεται ορισμένα ελαττώματα του ανθρώπινου συστήματος ακοής, για να κωδικοποιήσει ένα σήμα με τέτοιο τρόπο, ώστε να ακούγεται το ίδιο σε έναν άνθρωπο ακροατή, ακόμα και αν μοιάζει αρκετά διαφορετικό σε έναν παλμογράφο. Η αντιληπτική κωδικοποίηση βασίζεται στην επιστήμη της ψυχοακουστικής - τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται τον ήχο. Οι δημοφιλείς αλγόριθμοι συμπίεσης MP3 και AAC βασίζονται στην αντιληπτική κωδικοποίηση. Η ικανότητα ενός ήχου σε μια ζώνη συχνοτήτων να κρύβει έναν πιο απαλό ήχο σε μια άλλη ζώνη συχνοτήτων, ο οποίος θα ακουγόταν αν δεν υπήρχε ο δυνατός ήχος, ονομάζεται κάλυψη συχνοτήτων. Στην ιδιότητα αυτή βασίζεται η αντιληπτική κωδικοποίηση. Όσον αφορά τη μετάδοση, είναι αρκετό να κωδικοποιηθεί μόνο η ζώνη συχνοτήτων του δυνατού ήχου και να παραλειφθεί η κωδικοποίηση των συχνοτήτων που καλύπτονται μιας και κανείς δεν θα καταλάβει τη διαφορά. Κάθε συχνότητα έχει ένα κατώφλι ακουστότητας, το οποίο δηλώνει την απαιτούμενη ισχύ που πρέπει να έχει ένας τόνος προκειμένου να είναι αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί. Όπως είναι φανερό, συχνότητες των οποίων η ισχύς βρίσκεται κάτω από το όριο ακουστότητας μπορούν να παραλειφθούν κατά την κωδικοποίηση δίχως ο δέκτης να αντιληφθεί κάποια διαφορά. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται bit . Η βάση του MP3 και του AAC είναι ο μετασχηματισμός Fourier του ήχου έτσι ώστε να ληφθεί η ισχύς σε κάθε συχνότητα και στη συνέχεια η μετάδοση μόνο των συχνοτήτων που δεν καλύπτονται, οι οποίες κωδικοποιούνται με όσο λιγότερα bit γίνεται.

1.4.2 Εικόνα

Το πιο δημοφιλές πρότυπο συμπίεσης στατικών εικόνων είναι το JPEG (Joint Photographic Experts Group), το οποίο αναπτύχθηκε από ειδικούς στη φωτογραφία που εργάστηκαν υπό την αιγίδα των ITU, ISO και IEC. Ο αλγόριθμος αυτός είναι απωλεστικός (lossy) υπό την έννοια ότι η εικόνα που παράγεται μετά από συμπίεση και αποσυμπίεση της αρχικής δεν είναι ίδια με αυτή. Συχνά παρέχει βαθμό συμπίεσης 10:1 ή και μεγαλύτερο για τις φυσικές εικόνες. Στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος JPEG.

Το βήμα 1 της κωδικοποίησης μιας εικόνας σε μορφή JPEG είναι η προετοιμασία των τμημάτων. Ας υποθέσουμε ότι δίνεται ως είσοδος στον αλγόριθμο

μια εικόνα RGB (Red, Green, Blue). Το RGB δεν είναι το καλύτερο χρωματικό μοντέλο για την εφαρμογή συμπίεσης και έτσι μετατρέπεται σε YCbCr, στο οποίο η φωτεινότητα και οι χρωματισμοί διαχωρίζονται. Η συνιστώσα Y αναφέρεται στη φωτεινότητα της εικόνας, η συνιστώσα Cb εκφράζει το πόσο μπλε είναι η εικόνα, ενώ η συνιστώσα Cr δηλώνει το πόσο κόκκινη είναι η εικόνα. Η φωτεινότητα της εικόνας γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι σε σχέση με τον χρωματισμό της. Για τον λόγο αυτό δεν απαιτείται η αποθήκευση του χρωματισμού με εξίσου μεγάλη ακρίβεια. Ουσιαστικά οι χρωματικές συνιστώσες υποδειγματοληπτούνται ομαδοποιώντας pixels. Συνήθως μειώνονται κατά το ήμισυ στον οριζόντιο άξονα και κατά το ήμισυ στον κατακόρυφο άξονα. Ο συνολικός όγκος δεδομένων συμπίεζεται κατά έναν συντελεστή ίσο με 2. Έτσι για κάθε 4 pixels της συνιστώσας Y έχουμε 1 pixel στις συνιστώσες Cb και Cr. Στη συνέχεια κάθε συνιστώσα διαιρείται σε τμήματα των 8x8 pixels.

Το βήμα 2 του αλγορίθμου JPEG είναι η εφαρμογή ενός Διακριτού Μετασχηματισμού Συνημιτόνου ή DCT (Discrete Cosine Transform) σε κάθε ένα από τα τμήματα των 8x8 pixels. Η κεντρική ιδέα είναι ότι οποιοδήποτε τέτοιο τμήμα μπορεί να παραχθεί από το γραμμικό συνδυασμό 64 διαφορετικών χωρικών συχνοτήτων. Η έξοδος του DCT είναι ένας πίνακας 8x8 συντελεστών DCT, στον οποίο κάθε συντελεστής φανερώνει πόσο συνεισφέρει μια συγκεκριμένη συχνότητα (συνημίτονο) στο σχηματισμό του τμήματος. Το στοιχείο DCT(0,0) ονομάζεται DC συντελεστής, ενώ τα υπόλοιπα AC συντελεστές. Συνήθως οι συντελεστές που βρίσκονται κοντά στο στοιχείο DCT(0,0) οι οποίοι αντιστοιχούν σε χαμηλές συχνότητες, είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους συντελεστές που βρίσκονται μακριά από αυτό και αντιστοιχούν σε υψηλές συχνότητες. Δηλαδή οι υψηλές συχνότητες δε συνεισφέρουν σημαντικά στο σχηματισμό της εικόνας, με αποτέλεσμα αν παραλειφθούν, αυτή να μοιάζει σχεδόν ίδια.

Αφού ολοκληρωθεί ο μετασχηματισμός DCT, το JPEG περνά στο βήμα 3 που ονομάζεται κβαντισμός, στο οποίο εξαλείφονται οι λιγότερο σημαντικοί συντελεστές DCT. Αυτός ο απωλεστικός μετασχηματισμός γίνεται με διαίρεση καθενός από τους συντελεστές DCT του 8x8 πίνακα με ένα βάρος που λαμβάνεται από έναν άλλο πίνακα. Αν τα βάρη αυξάνονται απότομα από την αρχή των αξόνων, οι υψηλότερες χωρικές συχνότητες θα τείνουν να εξαφανίζονται (οι συντελεστές τους θα βρίσκονται πολύ κοντά στο 0 και θα κβαντίζονται σε αυτό). Στη συνέχεια (βήμα 4) τακτοποιούνται γραμμικά τα 64 στοιχεία και εφαρμόζεται στη λίστα που προκύπτει κωδικοποίηση τρέχοντος μήκους. Η σάρωση της ομάδας από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω, δε θα συγχέντρωνε όλα τα μηδενικά μαζί, και έτσι χρησιμοποιείται ένα μοτίβο σάρωσης ζιγκ ζαγκ. Η ακολουθία των μηδενικών μπορεί να μειωθεί σε έναν μόνο μετρητή που να δηλώνει το πλήθος τους, μια τεχνική γνωστή ως κωδικοποίηση

τρέχοντος μήκους. Τώρα έχουμε μια λίστα αριθμών, οι οποίοι παριστάνουν την εικόνα (στον μετασχηματισμένο χώρο). Οι αριθμοί αυτοί κωδικοποιούνται με τη μέθοδο Huffman (βήμα 5). Η αποκωδικοποίηση μιας εικόνας JPEG απαιτεί την εκτέλεση του αλγορίθμου σε αντίστροφα βήματα.

1.4.3 Βίντεο

Το ανθρώπινο μάτι έχει την ιδιότητα, όταν εμφανιστεί στον αμφιβληστροειδή μια εικόνα, να διατηρεί την εικόνα αυτή για κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου πριν εξασθενήσει. Αν μια ακολουθία εικόνων σχεδιάζεται γραμμή προς γραμμή με 50 εικόνες/sec, το μάτι δεν παρατηρεί ότι βλέπει διακριτές εικόνες. Όλα τα συστήματα βίντεο εκμεταλλεύονται αυτή την αρχή προκειμένου να παράγουν κινούμενες εικόνες.

Η απλούστερη αναπαράσταση του ψηφιακού βίντεο είναι με τη μορφή μιας ακολουθίας καρτέ (frames), με κάθε καρτέ να αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλέγμα εικονοστοιχείων (pixels). Η χρήση 8 bit ανά pixel για την αναπαράσταση 256 επιπέδων του γκριζου δίνει ασπρόμαυρο βίντεο υψηλής ποιότητας. Για το έγχρωμο βίντεο, πολλά συστήματα χρησιμοποιούν 8 bit για καθένα από τα βασικά χρώματα RGB (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Αυτή η αναπαράσταση είναι δυνατή, επειδή οποιοδήποτε χρώμα μπορεί να κατασκευαστεί από τη γραμμική υπέρθεση κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος σε κατάλληλη ένταση. Στις ψηφιακές οθόνες LCD των υπολογιστών και στις τηλεοράσεις, κάθε διακριτό pixel αποτελείται από κοντινά τοποθετημένα υποπίξελ κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος. Τα καρτέ εμφανίζονται με ρύθμιση της έντασης των υποπίξελ, και το μάτι αναμειγνύει τα χρωματικά συστατικά.

Οι συνηθισμένοι ρυθμοί καρτέ είναι 24 καρτέ/sec, 30 καρτέ/sec και επίσης 25 καρτέ/sec. Τα μεγέθη καρτέ που χρησιμοποιούνται για το βίντεο, το οποίο στέλνεται μέσω του Internet, ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, επειδή τα μεγαλύτερα καρτέ απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, το οποίο μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμο. Το βίντεο χαμηλής ανάλυσης μπορεί να είναι 320x240 pixel, ενώ το βίντεο πλήρους οθόνης είναι 640x480 pixel. Ο λόγος θέασης ή λόγος πλάτους προς ύψος είναι 4:3, ίδιος με εκείνον της τυπικής τηλεόρασης. Τα βίντεο για τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας μπορεί να έχουν ανάλυση 1280x720 pixel. Αυτές οι ευρείας οθόνης εικόνες έχουν λόγο θέασης 16:9. Το τυπικό βίντεο DVD έχει συνήθως ανάλυση 720x480 pixel, και το βίντεο σε δίσκους Blu-ray είναι συνήθως HDTV με ανάλυση 1920x1080 pixel.

Η συμπίεση παίζει σημαντικό ρόλο για την αποστολή βίντεο μέσω του Internet, καθώς ακόμα και ένα βίντεο τυπικής ποιότητας με καρτέ 640x480 pixel, 24 bit χρωματικών πληροφοριών ανά pixel και 30 καρτέ/sec καταλαμβάνει περισσότερα από 200 Mbps (απαιτεί δηλαδή πολύ υψηλό εύρος ζώνης). Ευτυχώς

ο μεγάλος όγκος έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε πολλές τεχνικές και αλγορίθμους συμπίεσης, οι οποίοι κάνουν εφικτή τη μετάδοση βίντεο. Η πιο δημοφιλής κωδικοποίηση είναι η MPEG στις διάφορες μορφές της. Πρόκειται για ένα ανοιχτό πρότυπο, το οποίο συμπιέζει ήχο και βίντεο. Η κωδικοποίηση MPEG εκμεταλλεύεται δυο είδη πλεονασμών που υπάρχουν στις ταινίες : τους χωρικούς και τους χρονικούς. Οι χωρικοί πλεονασμοί μπορούν να αξιοποιηθούν, αν κωδικοποιήσουμε κάθε καρέ χωριστά με το JPEG. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται περιστασιακά, ειδικά όταν απαιτείται τυχαία προσπέλαση σε κάθε καρέ, όπως συμβαίνει κατά το μοντάρισμα παραγωγών βίντεο. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργίας μπορεί να επιτευχθεί επίπεδο συμπίεσης όπως εκείνο του JPEG.

Μπορούμε να επιτύχουμε και πρόσθετη συμπίεση, αν εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι τα διαδοχικά καρέ είναι συχνά σχεδόν πανομοιότυπα. Για τις σκηνές στις οποίες η κάμερα και το φόντο είναι στατικά και στις οποίες κινούνται αργά ένας ή δυο ηθοποιοί, όλα σχεδόν τα εικονοστοιχεία θα είναι πανομοιότυπα από καρέ σε καρέ. Στην περίπτωση αυτή η απλή αφαίρεση κάθε καρέ από το προηγούμενο και η χρήση του JPEG στη διαφορά αποδίδει μια χαρά. Ωστόσο, για σκηνές όπου η κάμερα κινείται ή μεγεθύνει την εικόνα, η τεχνική αυτή αποτυγχάνει πλήρως. Αυτό που χρειάζεται είναι κάποιος τρόπος αντιστάθμισης αυτής της κίνησης. Αυτό ακριβώς είναι που κάνει το MPEG και αυτή είναι και η βασική διαφορά ανάμεσα στο MPEG και το JPEG.

Η έξοδος του MPEG αποτελείται από τρία είδη καρέ:

- Καρέ I (Intracoded) : Αυτόνομες ακίνητες εικόνες κωδικοποιημένες με JPEG.
- Καρέ P (Predictive) : Διαφορά τμήματος προς τμήμα ως προς το προηγούμενο καρέ.
- Καρέ B (Bidirectional) : Διαφορές με το προηγούμενο και το επόμενο καρέ.

Τα καρέ I είναι σημαντικό να εμφανίζονται περιοδικά στο ρεύμα εξόδου για τρεις λόγους. Πρώτον, το MPEG μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση πολυδιανομής με τους θεατές να συντονίζονται, όποτε θέλουν. Αν όλα τα καρέ εξαρτιόνταν από τους προκατόχους τους φτάνοντας μέχρι το πρώτο καρέ, όποιος έχανε το πρώτο καρέ δε θα μπορούσε να αποκωδικοποιήσει κανένα επόμενο καρέ. Δεύτερον, αν λαμβάνονταν εσφαλμένα οποιοδήποτε καρέ, δε θα ήταν δυνατή η περαιτέρω αποκωδικοποίηση : τα πάντα από κει και πέρα θα ήταν ακατανόητες εικόνες. Τρίτον, αν δεν υπήρχαν καρέ I, τότε, όταν χρειαζονταν γρήγορη κίνηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, ο αποκωδικοποιητής θα έπρεπε

να υπολογίσει κάθε καρέ που θα προσπερνούσε, έτσι ώστε να γνωρίζει την πλήρη τιμή του καρέ στο οποίο θα σταματούσε.

Τα καρέ P κωδικοποιούν τις διαφορές μεταξύ καρέ. Βασίζονται στην ιδέα των μακροτμημάτων, τα οποία καλύπτουν για παράδειγμα 16x16 pixels στο χώρο της λαμπρότητας και 8x8 pixels στο χώρο της χρωματικότητας. Το μακροτμήμα κωδικοποιείται με αναζήτηση στο προηγούμενο καρέ για τον εαυτό του ή για κάτι που να είναι ελαφρώς διαφορετικό από αυτό. Αν βρεθεί ένα μακροτμήμα, κωδικοποιείται με βάση τη διαφορά στην τιμή του από το προηγούμενο καρέ. Ο πίνακας διαφορών περνάει στη συνέχεια από μετασχηματισμό συνημιτόνου, κβαντισμό, κωδικοποίηση τρέχοντος μήκους και κωδικοποίηση Huffman, όπως συνήθως. Η τιμή για το μακροτμήμα στο ρεύμα της εξόδου θα είναι το διάνυσμα κίνησης (πόσο κινήθηκε το μακροτμήμα από την προηγούμενη θέση του προς κάθε κατεύθυνση), ακολουθούμενο από την κωδικοποίηση των διαφορών. Αν δεν εντοπιστεί το μακροτμήμα στο προηγούμενο καρέ, κωδικοποιείται η τρέχουσα τιμή, ακριβώς όπως σε ένα καρέ I.

Η αποκωδικοποίηση των καρέ I είναι ίδια με την αποκωδικοποίηση εικόνων JPEG. Η αποκωδικοποίηση των καρέ P απαιτεί να αποθηκεύει προσωρινά ο αποκωδικοποιητής τα προηγούμενα καρέ και μετά να κατασκευάζει το νέο καρέ σε μια περιοχή προσωρινής αποθήκευσης, βασιζόμενος σε πλήρως κωδικοποιημένα μακροτμήματα και μακροτμήματα που περιέχουν διαφορές από τα προηγούμενα καρέ. Το νέο καρέ συναρμολογείται μακροτμήμα προς μακροτμήμα.

Τα καρέ B είναι παρόμοια με τα καρέ P, με τη διαφορά ότι επιτρέπουν στο μακροτμήμα αναφοράς να βρίσκεται είτε σε ένα προηγούμενο είτε σε ένα επόμενο καρέ. Αυτή η πρόσθετη ελευθερία επιτρέπει βελτιωμένη αντιστάθμιση κίνησης και είναι επίσης χρήσιμη, όταν τα αντικείμενα περνούν μπροστά ή πίσω από άλλα αντικείμενα. Για να γίνει η κωδικοποίηση των καρέ B, ο κωδικοποιητής πρέπει να διατηρεί ταυτόχρονα στη μνήμη μια ακολουθία καρέ : τα παλαιότερα, το τρέχον και τα μελλοντικά. Η αποκωδικοποίηση είναι πιο πολύπλοκη και εισάγει κάποια καθυστέρηση. Αυτό συμβαίνει, επειδή ένα δεδομένο καρέ B δεν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί μέχρι να αποκωδικοποιηθούν τα διαδοχικά καρέ στα οποία αυτό βασίζεται. Έτσι, παρά το ότι τα καρέ B δίνουν την καλύτερη συμπίεση, δε χρησιμοποιούνται πάντα, επειδή έχουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και απαιτήσεις προσωρινής αποθήκευσης.

Κεφάλαιο 2

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

2.1 Δρομολόγηση σε αδόμητα δίκτυα

Μια από τις θεμελιώδεις λειτουργίες σε ένα κινητό ad hoc δίκτυο είναι η λειτουργία της δρομολόγησης. Επί της ουσίας πρόκειται για τη διαδικασία που καθορίζει τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει ένα πακέτο που μεταδίδει ένας κόμβος πηγή, προκειμένου να παραδοθεί σε έναν κόμβο προορισμό. Ασφαλώς ένας αλγόριθμος δρομολόγησης στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ δυο κόμβων, δηλαδή αυτής με το μικρότερο κόστος. Οι πληροφορίες δρομολόγησης κάθε κόμβου αποθηκεύονται σε έναν πίνακα (πίνακας δρομολόγησης), τον οποίο αυτός συμβουλευεται κάθε φορά που επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο σε κάποιον προορισμό στο δίκτυο.

Εν τη απουσία κάποιας κεντρικής οντότητας που διαχειρίζεται τη λειτουργία του δικτύου, η δρομολόγηση στα αδόμητα δίκτυα ανατίθεται στους κόμβους που συμμετέχουν σε αυτά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τοπολογία ενός κινητού ad hoc δικτύου είναι δυναμική και μεταβάλλεται ραγδαία και απότομα. Αυτό καθιστά τη δρομολόγηση ένα δύσκολο εγχείρημα, καθώς συνεχώς καταργούνται διαδρομές μεταξύ κόμβων και εγκαθίστανται νέες. Είναι λοιπόν φανερό η ανάγκη ύπαρξης αποτελεσματικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα κινητά ad hoc δίκτυα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου ακολουθεί η κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και η ανάλυση ορισμένων βασικών πρωτοκόλλων από κάθε κατηγορία.

2.2 Κατηγορίες πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των MANETS διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες : τα on-demand ή reactive, τα table-driven ή proactive και τα

υβριδικά πρωτόκολλα. Η κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων γίνεται με βάση το πότε αλλά και το πώς ανακαλύπτονται και συντηρούνται οι διαδρομές μεταξύ των κόμβων στο ad hoc δίκτυο.

2.2.1 Proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης

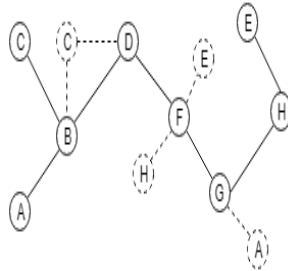
Στα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί μια διαδρομή προς οποιονδήποτε άλλο κόμβο μέσα σε αυτό. Οι πίνακες δρομολόγησης των κόμβων ενημερώνονται περιοδικά καθώς και μετά από κάθε αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου, ενώ η αναζήτηση και ο σχηματισμός διαδρομών πραγματοποιείται προτού απαιτηθεί κάποια μετάδοση από έναν κόμβο σε έναν άλλον. Η στρατηγική αυτή εξασφαλίζει ότι οποιαδήποτε στιγμή ένας κόμβος αποστολέας επιθυμεί να μεταδώσει κάποιο πακέτο σε έναν παραλήπτη, γνωρίζει ένα διαθέσιμο μονοπάτι, μέσω του οποίου μπορεί να προωθήσει το πακέτο σε αυτόν. Κατά τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η καθυστέρηση που θα επέφερε μια διαδικασία αναζήτησης διαδρομής.

Σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας των κόμβων η τοπολογία του δικτύου αλλάζει διαρκώς, με αποτέλεσμα τη συχνή ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μεγάλου όγκου μεταξύ των κόμβων. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και της κατανάλωσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης καθώς και τη δημιουργία μεγάλης συμφόρησης στο δίκτυο. Η συμφόρηση αυτή εισάγει σημαντική καθυστέρηση στο δίκτυο και επιφέρει απώλειες πακέτων, φαινόμενα τα οποία είναι ιδιαίτερα ορατά σε εφαρμογές video και ήχου πραγματικού χρόνου (real time). Τα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης αποδίδουν σαφώς καλύτερα σε δίκτυα με περιορισμένη κινητικότητα κόμβων.

2.2.1.1 DSDV

Στο πρωτόκολλο DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) κάθε κόμβος διατηρεί στον πίνακα δρομολόγησης του μια εγγραφή για κάθε δυνατό προορισμό μέσα στο Ad Hoc δίκτυο. Η εγγραφή αυτή, εκτός από τη διεύθυνση του κόμβου προορισμού, περιλαμβάνει και τον αριθμό ακολουθίας του (sequence number). Ο αριθμός ακολουθίας κάθε κόμβου ορίζεται από τον ίδιο και χρησιμοποιείται για τη διάκριση μεταξύ τρεχουσών και παλιών διαδρομών προς αυτόν. Άλλες πληροφορίες που περιέχει μια εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου είναι η απόσταση αυτού (hop count) από τον προορισμό, καθώς και ο γειτονικός του κόμβος (next hop), στον οποίο πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο που έχει ως τελικό αποδέκτη τον προορισμό. Στο σχήμα 2.1, αποτυπώνεται η τοπολογία ενός κινητού Ad Hoc δικτύου πριν αλλά και μετά τη μετακίνηση των κόμβων A, C, E και H. Ένα στιγμιότυπο του πίνακα δρομολόγησης του κόμβου

Ε πριν τη μετακίνηση των παραπάνω κόμβων απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1: Δυο διαφορετικά στιγμιότυπα ενός κινητού Ad Hoc δικτύου.

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	D	3	S406_A
B	D	2	S128_B
C	D	3	S564_C
D	D	1	S710_D
E	G	3	S392_E
F	-	0	S076_F
G	G	1	S128_G
H	G	2	S050_H

Σχήμα 2.2: Στιγμιότυπο του πίνακα δρομολόγησης του κόμβου F.

Κάθε κόμβος στο δίκτυο ενημερώνει τους γειτονικούς του κόμβους σχετικά με το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης του. Η ενημέρωση αυτή πραγματοποιείται περιοδικά αλλά και άμεσα, όταν ανιχνεύεται κάποια σημαντική αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Μπορεί να φέρει είτε ολόκληρο το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης (full dump updates) είτε μόνο τις εγγραφές εκείνες που τροποποιήθηκαν, αφού στάλθηκε η τελευταία ενημέρωση (incremental updates). Ένας κόμβος, που λαμβάνει μια ενημέρωση, συγκρίνει τις πληροφορίες δρομολόγησης που αυτή φέρει με εκείνες που περιέχει ο πίνακας του. Για κάθε προορισμό μέσα στο δίκτυο προς τον οποίο ο ίδιος δε διαθέτει διαδρομή, αλλά

διαθέτει ο γειτονικός του κόμβος, που απέστειλε την ενημέρωση, δημιουργεί μια εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης του. Εφόσον ο προορισμός είναι προσβάσιμος από τον γειτονικό του κόμβο, αυτομάτως θα είναι προσβάσιμος και από τον ίδιο. Αρκεί μόνο να προωθεί σε αυτόν κάθε πακέτο που έχει ως τελικό αποδέκτη τον προορισμό. Έτσι το πεδίο next hop της εγγραφής συμπληρώνεται με τη διεύθυνση του γειτονικού κόμβου που του γνωστοποίησε τη διαδρομή μέσω της ενημέρωσης και το πεδίο hop count με την απόσταση αυτού από τον προορισμό αυξημένη κατά ένα. Προφανώς, η παραπάνω εγγραφή θα φέρει τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού που υποδεικνύει η ενημέρωση.

Σε περίπτωση που ένας κόμβος γνωρίζει ήδη μια διαδρομή για έναν προορισμό, την αντικαθιστά με αυτή που περιέχεται σε κάποια ενημέρωση που λαμβάνει, αν εκείνη είναι πιο πρόσφατη από τη δική του. Δηλαδή, αν ο αριθμός ακολουθίας του προορισμού στη διαδρομή που φέρει η ενημέρωση είναι μεγαλύτερος από αυτόν της διαδρομής που διατηρεί στον πίνακα δρομολόγησης του. Αν οι δυο αριθμοί είναι ίσοι, τότε επιλέγεται η πιο σύντομη διαδρομή προς τον προορισμό.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι ένας κόμβος του δικτύου λαμβάνει μια ενημέρωση που υποδεικνύει μια διαδρομή για έναν προορισμό, η οποία είναι πιο πρόσφατη ή το ίδιο πρόσφατη αλλά πιο σύντομη από αυτή που ο ίδιος γνωρίζει (ή ακόμα και ότι δε διαθέτει κάποια διαδρομή για το συγκεκριμένο προορισμό στον πίνακα δρομολόγησης του). Στην περίπτωση αυτή, θα ενημερώσει κατάλληλα τον πίνακα δρομολόγησης του και θα μεταδώσει στους γειτονικούς του κόμβους μια ενημέρωση που περιέχει τη διαδρομή αυτή. Ωστόσο, αν σε σύντομο χρονικό διάστημα καταφθάσει στον ίδιο κόμβο μια νέα ενημέρωση, η οποία περιλαμβάνει μια πιο οικονομική διαδρομή προς τον ίδιο προορισμό από αυτή που συμπεριέλαβε στην ενημέρωση που προώθησε λίγο νωρίτερα, τότε θα επαναλάβει την παραπάνω διαδικασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συμφόρησης στο δίκτυο. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο, όταν ένας κόμβος μαθαίνει μια νέα διαδρομή προς κάποιον προορισμό, προτού την συμπεριλάβει σε κάποια ενημέρωση και την προωθήσει στους γειτονικούς του κόμβους, να περιμένει για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα, μήπως καταφθάσει σε αυτόν κάποια ενημέρωση που να περιέχει κάποια πιο συμφέρουσα διαδρομή προς τον ίδιο προορισμό. Πάντως, αν κατά τη διάρκεια του διαστήματος αναμονής πρέπει να μεταδώσει ένα πακέτο σε έναν κόμβο, τότε χρησιμοποιεί τη βέλτιστη διαδρομή προς αυτόν που έχει ανακαλύψει ως τότε, παρόλο που ενδέχεται να μην έχει ενημερώσει ακόμα τους γειτονικούς του κόμβους γι αυτή.

Στο σχήμα 2.3.(a) παρουσιάζεται μια ενημέρωση (full dump) που μεταδίδει ο κόμβος G στον κόμβο F. Το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης του F πριν την επεξεργασία της ενημέρωσης αυτής φαίνεται στο σχήμα 2.3.(b), ενώ στο σχήμα 2.3.(c) φανερώνεται η επίδραση που είχε η επεξεργασία της ενημέρωσης

αυτής στο περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης του συγκεκριμένου κόμβου.

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	A	1	S516_A
B	F	3	S228_B
C	F	4	S564_C
D	F	2	S820_D
E	H	2	S392_E
F	F	1	S204_F
G	-	0	S238_G
H	H	1	S148_H

(a)

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	D	3	S406_A
B	D	2	S238_B
C	D	2	S764_C
D	D	1	S820_D
E	E	1	S502_E
F	-	0	S204_F
G	G	1	S238_G
H	H	1	S160_H

(b)

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	G	2	S516_A
B	D	2	S238_B
C	D	2	S764_C
D	D	1	S820_D
E	E	1	S502_E
F	-	0	S204_F
G	G	1	S238_G
H	H	1	S160_H

(c)

Σχήμα 2.3: Μετάδοση ενημέρωσης από τον κόμβο G στον κόμβο F.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύει μια σημαντική αλλαγή στο δίκτυο, φροντίζει να ενημερώσει αμέσως τους γειτονικούς του κόμβους γι' αυτήν. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η μετακίνηση ενός κόμβου μέσα στο δίκτυο (ή η απενεργοποίησή του), η οποία επιφέρει την απώλεια της σύνδεσής του με κάποιους γειτονικούς του κόμβους. Στην περίπτωση αυτή, κάθε κόμβος που ανιχνεύει την απώλεια της σύνδεσής του με ένα γείτονά του, σημειώνει ως μη έγκυρες όλες τις διαδρομές, στις οποίες αυτός αποτελεί τον επόμενο κόμβο (next hop), στον οποίο πρέπει να προωθηθεί ένα πακέτο που προορίζεται για κάποιον κόμβο μέσα στο δίκτυο. Αυτό πραγματοποιείται θέτοντας σε κάθε τέτοια διαδρομή την απόσταση από τον εκάστοτε προορισμό ίση με άπειρο και αυξάνοντας επίσης τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού αυτού. Η συγκεκριμένη αύξηση τον καθιστά πάντα περιττό αριθμό και είναι η μοναδική περίπτωση στην οποία ο αριθμός ακολουθίας ενός κόμβου δεν αυξάνεται από τον ίδιο τον κόμβο. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση από την αύξηση του αριθμού ακολουθίας προκύπτει πάντα άρτιος αριθμός.

Στη συνέχεια, ο κόμβος που ανιχνεύει την απώλεια σύνδεσης, μεταδίδει ένα μήνυμα ενημέρωσης στους γειτονικούς του κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί ελέγχουν τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού σε κάθε διαδρομή που περιέχει το μήνυμα ενημέρωσης. Αν είναι περιττός αριθμός και οι ίδιοι έχουν πρόσβαση στο συγκεκριμένο προορισμό μέσω του κόμβου που απέστειλε την ενημέρωση, τότε σημειώνουν και εκείνοι ως μη έγκυρη τη διαδρομή τους προς αυτόν. Κατόπιν προωθούν μια ενημέρωση στους δικούς τους γειτονικούς κόμβους, οι οποίοι

πραγματοποιούν τον ίδιο έλεγχο. Σε περίπτωση που και αυτοί χρησιμοποιούν κάποια μη έγκυρη διαδρομή, ενημερώνουν κατάλληλα τους πίνακές τους και μεταδίδουν με τη σειρά τους μια ενημέρωση σε κάθε γειτονικό τους κόμβο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ενημερωθούν όλοι οι κόμβοι του δικτύου που διατηρούν κάποια μη έγκυρη διαδρομή.

Η μετακίνηση ενός κόμβου, εκτός από απώλειες σύνδεσης, μπορεί να επιφέρει και τη δημιουργία νέων συνδέσεων. Κάθε κόμβος που ανιχνεύει τη σύνδεση του με κάποιον κόμβο που μετακινήθηκε στη γειτονιά του, αρχικά αποθηκεύει στον πίνακα δρομολόγησης του τη διαδρομή ενός άλματος για εκείνον. Η διαδρομή αυτή φέρει το νέο αριθμό ακολουθίας του τελευταίου, ο οποίος ορίστηκε από εκείνον ύστερα από την μετακίνηση του. Στη συνέχεια, μεταδίδει στους γειτονικούς του κόμβους μια ενημέρωση, η οποία περιέχει τη νέα αυτή διαδρομή.

Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος G στο σχήμα 2.1 ανιχνεύει την απώλεια της σύνδεσης του με τον κόμβο A. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 2.4.(a), ο G θέτει την απόστασή του από τον A ίση με άπειρο. Κατόπιν μεταδίδει ένα μήνυμα ενημέρωσης στον γειτονικό του κόμβο F με το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησής του. Στα σχήματα 2.4.(b) και 2.4.(c), παρουσιάζεται το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης του F πριν αλλά και μετά την επεξεργασία του μηνύματος ενημέρωσης.

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	A	INF	S517_A
B	F	3	S238_B
C	F	3	S764_C
D	F	2	S820_D
E	F	2	S502_E
F	F	1	S204_F
G	-	0	S238_G
H	F	1	S160_H

(a)

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	G	2	S516_A
B	D	2	S238_B
C	D	2	S764_C
D	D	1	S820_D
E	E	1	S502_E
F	-	0	S204_F
G	G	1	S238_G
H	H	1	S160_H

(b)

Destination	Next Hop	Hop Count	Sequence Number
A	G	INF	S517_A
B	D	2	S238_B
C	D	2	S764_C
D	D	1	S820_D
E	E	1	S502_E
F	-	0	S204_F
G	G	1	S238_G
H	H	1	S160_H

(c)

Σχήμα 2.4: Μετάδοση ενημέρωσης από τον κόμβο G στον κόμβο F για την απώλεια της σύνδεσης του με τον κόμβο A.

2.2.1.2 OLSR

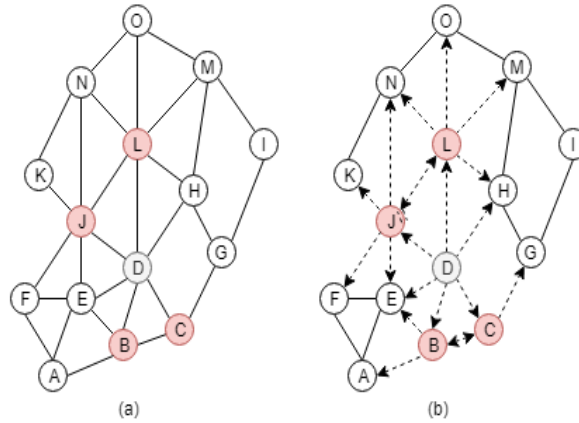
Στο πρωτόκολλο OLSR (Optimized Link-State Routing) σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι MultiPoint Relay κόμβοι. Για κάποιον κόμβο N του δικτύου αυτοί αποτελούν ένα υποσύνολο των γειτονικών του κόμβων, οι οποίοι επιφορτίζονται με την προώθηση των μηνυμάτων του N στο δίκτυο. Κάθε κόμβος διατηρεί μια λίστα με τους γείτονες του, οι οποίοι τον έχουν επιλέξει ως MPR (MPR selectors). Έτσι, κάθε φορά που λαμβάνει ένα broadcast μήνυμα από κάποιον κόμβο που ανήκει στη λίστα αυτή, το μεταδίδει στο υπόλοιπο δίκτυο. Αντίθετα, δεν προωθεί περαιτέρω broadcast μηνύματα που του μεταδίδουν γειτονικοί του κόμβοι, οι οποίοι όμως δεν τον έχουν επιλέξει ως MPR τους. Η ιδέα της χρήσης των MultiPoint Relay κόμβων στηρίζεται στη μείωση του αριθμού των μεταδόσεων που απαιτεί η τεχνική του κατακλυσμού (flooding), καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται περιττές μεταδόσεις του ίδιου πακέτου στον ίδιο κόμβο.

Προτού εξετάσουμε τον αλγόριθμο με τον οποίο κάθε κόμβος επιλέγει το σύνολο των MPR του, θα σταθούμε στη διαδικασία με την οποία αυτός ανακαλύπτει τους γείτονες του (neighbor sensing). Κάθε κόμβος του δικτύου μεταδίδει περιοδικά Hello μηνύματα, τα οποία περιλαμβάνουν τις διευθύνσεις των ήδη γνωστών γειτονικών του κόμβων, καθώς επίσης και το είδος της σύνδεσής (link status) του με αυτούς. Η σύνδεση μεταξύ του κόμβου N και κάποιου γειτονικού του κόμβου K μπορεί να είναι συμμετρική, ασυμμετρική ή MPR. Στην περίπτωση της ασυμμετρικής σύνδεσης ο κόμβος N ακούει τον K , ωστόσο δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμα ότι ισχύει και το αντίστροφο. Τα μηνύματα Hello λαμβάνονται από όλους τους γειτονικούς κόμβους του αποστολέα, ωστόσο δεν προωθούνται περαιτέρω. Με αυτόν τον τρόπο οι συγκεκριμένοι κόμβοι ανακαλύπτουν τους γείτονες ενός αλλά και δύο αλμάτων. Στη γνώση αυτή βασίζεται και η επιλογή των κόμβων που συνθέτουν το σύνολο των MPR τους. Κατά την παραλαβή των Hello μηνυμάτων κάθε κόμβος υπολογίζει επίσης τον πίνακα με τους γειτονικούς του κόμβους που τον έχουν επιλέξει ως MPR (MPR selectors).

Ας εξετάσουμε τώρα τον αλγόριθμο με τον οποίο ο κόμβος N επιλέγει το σύνολο των MPR του. Αρχικά, είναι απαραίτητο κάθε κόμβος που απέχει δυο άλματα (hops) από τον N να έχει μια συμμετρική σύνδεση με κάποιον κόμβο που ανήκει στο σύνολο των MPR του, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μέσω αυτού η αμφίδρομη επικοινωνία του πρώτου με τον N . Για τον λόγο αυτό, ο κόμβος N εντοπίζει πρώτα τους κόμβους δυο αλμάτων που συνδέονται συμμετρικά με ένα μόνο γείτονά του. Κάθε τέτοιος γειτονικός του κόμβος επιλέγεται από τον ίδιο ως MPR. Στη συνέχεια, ο N επιλέγει ως MPR εκείνους τους γείτονες του που συνδέονται συμμετρικά με όσο το δυνατόν περισσότερους κόμβους δυο

αλμάτων, οι οποίοι δεν έχουν καλυφθεί ακόμα. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου καλυφθούν όλοι οι προαναφερθέντες κόμβοι.

Στο σχήμα 2.5.a με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι MPR κόμβοι του D, ενώ στο σχήμα 2.5.b φαίνεται η προώθηση ενός broadcast μηνύματος του D στους κόμβους που απέχουν δυο άλματα από αυτόν. Μέχρι τώρα δεν έχει



Σχήμα 2.5: Οι Multipoint Relay κόμβοι του D.

γίνει καθόλου αναφορά στο μηχανισμό με τον οποίο οι κόμβοι του δικτύου ενημερώνονται για την τοπολογία του. Για το σκοπό αυτό κάθε κόμβος μεταδίδει περιοδικά Topology Control μηνύματα, τα οποία προωθούνται σε όλο το δίκτυο. Τα μηνύματα αυτά περιέχουν τις διευθύνσεις των γειτονικών κόμβων του αποστολέα, οι οποίοι τον έχουν επιλέξει ως MPR (MPR selectors), καθώς και έναν αριθμό ακολουθίας (sequence number) με τον οποίο σχετίζεται το συγκεκριμένο σύνολο κόμβων. Μεταξύ δυο TC μηνυμάτων που αποστέλλονται από τον ίδιο κόμβο πιο πρόσφατη και επομένως πιο έγκυρη πληροφορία περιέχει εκείνο στο οποίο ο αριθμός αυτός έχει την μεγαλύτερη τιμή. Όταν ανιχνεύεται κάποια αλλαγή στο σύνολο των γειτονικών κόμβων του N που τον έχουν επιλέξει ως MPR (MPR selectors), τότε ο N μεταδίδει αμέσως (δηλαδή νωρίτερα από την προκαθορισμένη χρονική στιγμή) ένα TC μήνυμα, προκειμένου να ενημερώσει το δίκτυο για την αλλαγή αυτή. Στο μήνυμα αυτό ο αριθμός ακολουθίας του ενημερωμένου συνόλου των MPR selectors του N θα έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτή που είχε κατά την αμέσως προηγούμενη μετάδοση ενός TC μηνύματος από τον N.

Η πληροφορία, η οποία διαχέεται στο δίκτυο μέσω των TC μηνυμάτων, συμβάλλει στην κατασκευή του πίνακα τοπολογίας κάθε κόμβου. Όταν ο κόμ-

βος N λαμβάνει για πρώτη φορά ένα TC μήνυμα από τον M , δημιουργεί μια εγγραφή στον πίνακα τοπολογίας του για κάθε κόμβο K που έχει επιλέξει τον M ως MPR του. Η εγγραφή αυτή περιέχει τη διεύθυνση του συγκεκριμένου κόμβου, τη διεύθυνση του κόμβου M καθώς και τον αριθμό ακολουθίας που περιλαμβάνει το TC μήνυμα. Ουσιαστικά, αναφέρει στον N ότι ο K είναι άμεσα προσβάσιμος από τον M . Κάθε εγγραφή του πίνακα τοπολογίας θεωρείται έγκυρη για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μετά τη λήξη του οποίου αφαιρείται από τον πίνακα. Γενικά, κάθε φορά που ο N λαμβάνει ένα TC μήνυμα από τον M εντοπίζει στον πίνακα τοπολογίας του τις εγγραφές που αναφέρονται στους κόμβους που έχουν επιλέξει τον M ως MPR τους. Αν ο αριθμός ακολουθίας που περιέχει το TC μήνυμα είναι μικρότερος από αυτόν που περιλαμβάνεται στις εγγραφές αυτές, τότε ο N αγνοεί το μήνυμα. Διαφορετικά, ενημερώνει τον πίνακα τοπολογίας του σύμφωνα με το περιεχόμενο του μηνύματος αυτού. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε νέο MPR selector του M που περιέχει το TC μήνυμα ο κόμβος N δημιουργεί μια νέα εγγραφή στον πίνακα τοπολογίας του. Για όσους υπάρχει ήδη μια εγγραφή, ο N ανανεώνει το χρονικό διάστημα, για το οποίο αυτή θεωρείται έγκυρη. Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός ακολουθίας που εκχωρείται στις εγγραφές αυτές είναι αυτός που περιέχει το TC μήνυμα. Όσες εγγραφές αντιστοιχούν σε MPR selectors του M που δεν αναφέρονται στο TC μήνυμα αφαιρούνται από τον πίνακα τοπολογίας του N .

Κάθε κόμβος N διατηρεί επίσης έναν πίνακα δρομολόγησης. Μια εγγραφή του πίνακα αυτού περιέχει τη διεύθυνση ενός κόμβου προορισμού (destination address), τη διεύθυνση του επόμενου κόμβου, στον οποίο ο N πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο με παραλήπτη τον προορισμό (next hop address), καθώς και την απόσταση του N από αυτόν (hop count). Ο υπολογισμός του πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου βασίζεται στην πληροφορία που αποθηκεύεται στον πίνακα τοπολογίας του και στη λίστα των γειτονικών του κόμβων. Συνεπώς, όταν αλλάζει το περιεχόμενό τους, ο πίνακας δρομολόγησης πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου. Ας εξετάσουμε τώρα τον τρόπο με τον οποίο ο κόμβος N υπολογίζει τον πίνακα δρομολόγησής του.

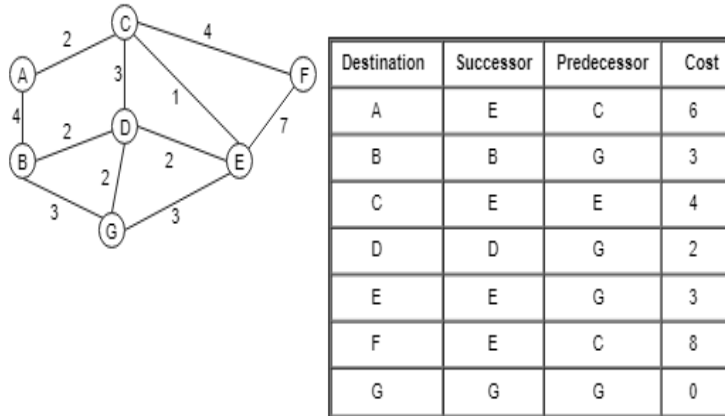
Αρχικά, ο N δημιουργεί μια εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησής του για κάθε γειτονικό του κόμβο K , με τον οποίο η σύνδεση μεταξύ τους δεν είναι ασυμμετρική. Προφανώς, η απόσταση του N από τον K ισούται με ένα άλμα. Στη συνέχεια, ο N εντοπίζει στον πίνακα τοπολογίας του τους κόμβους εκείνους που χρησιμοποιούν ως MPR τους τον κόμβο K . Κάθε τέτοιος κόμβος απέχει δυο άλματα από τον N , ενώ ο επόμενος κόμβος, στον οποίο ο N πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο που προορίζεται για εκείνον, είναι ο K . Γενικά, για κάποιον κόμβο X για τον οποίο γνωρίζει μια διαδρομή, ο N εντοπίζει στον πίνακα τοπολογίας του τους κόμβους που τον έχουν επιλέξει ως MPR (MPR selectors). Αν υποθέσουμε, ότι η απόσταση του X από τον N είναι h ,

τότε η απόσταση του N από κάθε τέτοιο κόμβο είναι $h + 1$. Προκειμένου ο N να μεταδώσει ένα πακέτο στον κόμβο αυτόν, αρκεί να το προωθήσει στον ίδιο κόμβο που θα το προωθούσε, αν το πακέτο προοριζόταν για τον X . Ασφαλώς, ο κόμβος αυτός προσδιορίζεται από το πεδίο next hop της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησης του N που αντιστοιχεί στον κόμβο X . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο N να ανακαλύψει μια διαδρομή για όλους τους δυνατούς προορισμούς μέσα στο δίκτυο.

2.2.1.3 WRP

Στο πρωτόκολλο WRP (Wireless Routing Protocol) κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα απόστασης (distance table), έναν πίνακα δρομολόγησης (routing table), έναν πίνακα κόστους σύνδεσης (link-cost table) και μια λίστα αναμετάδοσης μηνυμάτων (message retransmission list). Ο πίνακας απόστασης του κόμβου i περιέχει την απόσταση κάθε γειτονικού του κόμβου από κάθε προορισμό j μέσα στο δίκτυο καθώς και το αναγνωριστικό του προτελευταίου κόμβου (predecessor) στη διαδρομή προς τον j που υποδηλώνει η απόσταση αυτή. Στον πίνακα δρομολόγησης του i διατηρείται για κάθε κόμβο προορισμό j το αναγνωριστικό του, η ελάχιστη απόσταση του i από τον j , ο επόμενος κόμβος (successor) από τον i στη διαδρομή προς τον j που εγγυάται την ελάχιστη απόσταση αλλά και ο προτελευταίος κόμβος (predecessor) στη διαδρομή αυτή. Στον πίνακα κόστους σύνδεσης του i αποθηκεύεται για κάθε γειτονικό του κόμβο k το κόστος της μετάδοσης μηνυμάτων μέσω αυτού (δηλαδή το κόστος της σύνδεσης $i-k$), όπως επίσης και το πλήθος των περιόδων ενημέρωσης (update periods) που έχουν παρέλθει από τη τελευταία φορά που ο κόμβος i έλαβε ένα μήνυμα δίχως σφάλματα από τον k . Κάθε εγγραφή στη λίστα αναμετάδοσης μηνυμάτων του κόμβου i περιλαμβάνει τον αριθμό ακολουθίας (sequence number) του συγκεκριμένου μηνύματος ενημέρωσης, ένα μετρητή αναμεταδόσεων (retransmission counter) ο οποίος μειώνεται κάθε φορά που ο i μεταδίδει ένα νέο μήνυμα ενημέρωσης, μια λίστα με τις ενημερώσεις που περιλαμβάνει το συγκεκριμένο μήνυμα αλλά και ένα σύνολο από flags που δηλώνουν αν οι κόμβοι στους οποίους μεταδίδεται το μήνυμα αυτό έχουν επιβεβαιώσει την παραλαβή του.

Στο WRP κάθε κόμβος ανταλλάσσει πληροφορίες δρομολόγησης με τους γείτονες του μέσω μηνυμάτων ενημέρωσης. Κάθε τέτοιο μήνυμα προσδιορίζεται από έναν αριθμό ακολουθίας (sequence number), τον οποίο ορίζει ο ίδιος ο αποστολέας του. Οι ενημερώσεις που περιέχει περιλαμβάνουν το αναγνωριστικό ενός κόμβου προορισμού, την ελάχιστη απόσταση του αποστολέα του μηνύματος από εκείνον καθώς και το αναγνωριστικό του προτελευταίου κόμβου (predecessor) στη διαδρομή προς το συγκεκριμένο προορισμό που εγγυάται



Σχήμα 2.6: Ο πίνακας δρομολόγησης του κόμβου G

την απόσταση αυτή. Ένα μήνυμα ενημέρωσης φέρει επίσης μια λίστα κόμβων που οφείλουν να επιβεβαιώσουν την παραλαβή του. Η επιβεβαίωση αυτή πραγματοποιείται με τη μετάδοση ενός μηνύματος ACK από τον παραλήπτη του μηνύματος ενημέρωσης στον αποστολέα του.

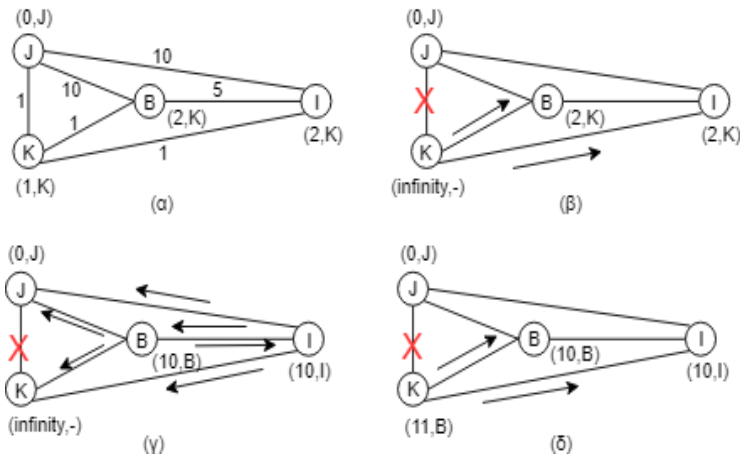
Κάθε κόμβος στο ad hoc δίκτυο μπορεί να ενημερώσει τον πίνακα δρομολόγησης του είτε ύστερα από την παραλαβή ενός μηνύματος ενημέρωσης από κάποιο γείτονα του είτε ύστερα από την ανίχνευση μιας αλλαγής στην τοπολογία της γειτονιάς του (απώλεια σύνδεσης ή δημιουργία νέας). Όταν ο κόμβος i λαμβάνει μια ενημέρωση από τον γειτονικό του κόμβο k σχετικά με τον προορισμό j , ενημερώνει κατάλληλα τον πίνακα απόστασης του. Στη συνέχεια, για κάθε γειτονικό του κόμβο b (εκτός του k) ελέγχει αν η διαδρομή από τον b στον j περιλαμβάνει τον k . Στην περίπτωση αυτή, ο i οφείλει να ενημερώσει την απόσταση του b από τον j καθώς και το αναγνωριστικό του προτελευταίου κόμβου (predecessor) στη διαδρομή από τον b στον j που φανερώνει η απόσταση αυτή. Η απόσταση του b από τον j θα ισούται με το άθροισμα της απόστασης του b από τον k με την απόσταση του k από τον j , ενώ ο προτελευταίος κόμβος στη διαδρομή από τον b στον j θα είναι ο ίδιος με αυτόν στη διαδρομή από τον k στον j . Ο i επιλέγει ως επόμενο κόμβο (successor) για τον προορισμό j εκείνο το γειτονικό του κόμβο μέσω του οποίου εξασφαλίζεται η ελάχιστη απόσταση από τον j . Σημειώνεται ότι ο κόμβος i , αφού επεξεργαστεί μια ενημέρωση που λαμβάνει από το γειτονικό του κόμβο k σχετικά με τον προορισμό j , ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης του για το συγκεκριμένο προορισμό μόνο αν προκύψει κάποια πιο οικονομική διαδρομή προς αυτόν.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κόμβος i μεταδίδει ένα νέο μήνυμα ενημέρωσης σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους. Κατά τον ίδιο τρόπο ενεργεί και όταν ανιχνεύει μια αλλαγή στη σύνδεση του με κάποιο γειτονικό του κόμβο. Κάθε φορά που μεταδίδει ένα τέτοιο μήνυμα, ο i ενημερώνει τη λίστα αναμετάδοσης του. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργεί μια εγγραφή σε αυτή για το νέο μήνυμα ενημέρωσης. Επίσης, μειώνει την τιμή του μετρητή αναμεταδόσεων σε κάθε εγγραφή της λίστας αυτής, ενώ διαγράφει από τη λίστα ενημερώσεων κάθε εγγραφής τις ενημερώσεις εκείνες που περιλαμβάνονται στο νέο μήνυμα ενημέρωσης. Αν αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μείνει κενή η λίστα ενημερώσεων μιας εγγραφής, τότε ο κόμβος i διαγράφει την εγγραφή αυτή (το μήνυμα ενημέρωσης) από τη λίστα αναμετάδοσης του. Όταν ο μετρητής αναμεταδόσεων μιας εγγραφής στη συγκεκριμένη λίστα λάβει μηδενική τιμή, ο κόμβος i αναμεταδίδει το μήνυμα ενημέρωσης στο οποίο αναφέρεται η εγγραφή αυτή. Ειδικότερα, ο i μεταδίδει ένα νέο μήνυμα ενημέρωσης, του οποίου η λίστα ενημερώσεων περιέχει τις ενημερώσεις της αντίστοιχης λίστας στην παραπάνω εγγραφή. Το μήνυμα αυτό φέρει επίσης τη λίστα των κόμβων που δεν επιβεβαίωσαν νωρίτερα την παραλαβή του συγκεκριμένου μηνύματος ενημέρωσης. Σημειώνεται ότι κατά τη μετάδοση του μηνύματος ενημέρωσης αυτού δε μειώνεται η τιμή του μετρητή αναμεταδόσεων κάθε εγγραφής. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, στο πρωτόκολλο WRP δεν υπάρχει κάποιο όριο στο πλήθος των αναμεταδόσεων ενός μηνύματος ενημέρωσης από τον κόμβο i σε κάποιο γειτονικό του κόμβο.

Όταν ο κόμβος i λαμβάνει κάποιο μήνυμα (update message, user message) από το γειτονικό του κόμβο j ουσιαστικά επιβεβαιώνει τη σύνδεση του με αυτόν. Ωστόσο, αν ο i δε λάβει κάποιο μήνυμα από τον j για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, επειδή απλώς ο j δεν έχει κάποιο μήνυμα να του μεταδώσει, θα θεωρήσει λανθασμένα ότι η σύνδεση του με εκείνον έχει χαθεί. Το πρωτόκολλο WRP επιλύει το πρόβλημα αυτό με τη χρήση των μηνυμάτων Hello. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος μεταδίδει περιοδικά μηνύματα Hello στους γειτονικούς του κόμβους προκειμένου αυτοί να επιβεβαιώσουν τη συνδεσιμότητα τους με εκείνον. Αν ο κόμβος i δε λάβει οποιοδήποτε μήνυμα από τον j μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, ανιχνεύει σωστά πλέον την απώλεια της σύνδεσης του με αυτόν. Σε αυτή την περίπτωση, ο i υπολογίζει εκ νέου μια διαδρομή για κάθε προορισμό που επηρεάστηκε από την απώλεια αυτή. Ουσιαστικά, επαναπροσδιορίζει την ελάχιστη απόσταση του από το συγκεκριμένο προορισμό καθώς και τον προτελευταίο κόμβο (predecessor) στη διαδρομή προς αυτόν που εξασφαλίζει την απόσταση εκείνη. Στη συνέχεια, ο i μεταδίδει ένα μήνυμα ενημέρωσης σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους, το οποίο περιέχει τις αλλαγές αυτές.

Στο σχήμα 2.7.α παρουσιάζεται ένα δίκτυο τεσσάρων κόμβων. Ο αριθμός πάνω από κάθε ακμή δηλώνει το κόστος της εκάστοτε σύνδεσης. Η παρένθεση

σε κάθε κόμβο περιέχει την ελάχιστη απόσταση του από τον j αλλά και τον προτελευταίο κόμβο στη διαδρομή προς αυτόν που εξασφαλίζει τη συγκεκριμένη απόσταση.



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα λειτουργίας του αλγορίθμου σε απώλεια σύνδεσης.

Ας εξετάσουμε τώρα τι θα συμβεί, όταν ο κόμβος k ανιχνεύσει την απώλεια της σύνδεσης του με τον κόμβο j . Επειδή οι γειτονικοί του κόμβοι i και b προσεγγίζουν τον j μέσω του ίδιου, ο k θέτει την απόσταση του από τον j ίση με άπειρο. Στη συνέχεια μεταδίδει ένα μήνυμα ενημέρωσης στους i και b . Τα βέλη στο σχήμα 2.7.β φανερώνουν την κατεύθυνση των μηνυμάτων ενημέρωσης. Ο κόμβος b , αφού επεξεργαστεί το μήνυμα αυτό, ενημερώνει κατάλληλα τον πίνακα απόστασης του. Συγκεκριμένα, θέτει την απόσταση του γειτονικού του κόμβου k από τον προορισμό j ίση με άπειρο. Το ίδιο πραγματοποιεί και για κάθε άλλο γειτονικό του κόμβο που προσεγγίζει τον j μέσω του k . Ο κόμβος b επιλέγει τώρα τη σύνδεση $b-j$ για μετάδοση στον προορισμό j . Κατά αντίστοιχο τρόπο, ο i ύστερα από την επεξεργασία του μηνύματος ενημέρωσης επιλέγει τη σύνδεση $i-j$ για μετάδοση στον προορισμό j . Οι κόμβοι i και b μεταδίδουν με τη σειρά τους ένα μήνυμα ενημέρωσης στους γειτονικούς τους κόμβους (σχήμα 2.7.γ) προκειμένου να τους ενημερώσουν σχετικά με τις τροποποιήσεις που πραγματοποίησαν στον πίνακα δρομολόγησής τους. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 2.7.δ, ο κόμβος k , αφού επεξεργαστεί το μήνυμα ενημέρωσης που του μετέδωσε ο b , αποθηκεύει στον πίνακα δρομολόγησής του τη διαδρομή από τον ίδιο στον j μέσω του b . Το μήνυμα ενημέρωσης που έλαβε από τον i (θεωρούμε ότι παραλαμβάνεται δεύτερο) είχε ως αποτέλεσμα την ενημέρωση του πίνακα απόστασης του για τον προορισμό j μέσω του i . Ωστόσο, ο k δεν

τροποποίησε τον πίνακα δρομολόγησης του καθώς δεν προέκυψε κάποια πιο οικονομική διαδρομή για τον j . Για τον ίδιο λόγο, η ενημέρωση που μεταδίδει ο k στους γειτονικούς του κόμβους b και i δεν επηρεάζει τη διαδρομή για τον j που διατηρεί ο καθένας στον πίνακα δρομολόγησης του.

2.2.2 Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης

Στα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης ή on-demand, όπως αλλιώς ονομάζονται, η διαδικασία εύρεσης διαδρομής εκτελείται μόνο όταν ένας κόμβος-πηγή θέλει να στείλει δεδομένα σε έναν κόμβο-προορισμό. Κατά συνέπεια η εύρεση διαδρομής είναι μια διαδικασία, η οποία εκτελείται κατά απαίτηση (on-demand). Οι κόμβοι του δικτύου δεν ενημερώνουν τους πίνακες δρομολόγησης τους για κάθε δυνατό προορισμό μέσα σε αυτό παρά μόνο για όσους είναι απαραίτητο. Έτσι δυο κόμβοι, οι οποίοι δεν ανταλλάσσουν ποτέ δεδομένα, απαλλάσσονται από την άσκοπη κατανάλωση πόρων που απαιτεί η εύρεση και η συντήρηση της μεταξύ τους διαδρομής. Τα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν ως στόχο τη μείωση του overhead που συναντάται στα proactive πρωτόκολλα μειώνοντας το πλήθος των περιοδικών πακέτων ενημέρωσης που στέλνονται στο δίκτυο και υπολογίζοντας τις διαδρομές, εφόσον είναι απαραίτητο. Ωστόσο, ένα σημαντικό ζήτημα των πρωτοκόλλων αυτών είναι η καθυστέρηση που εισάγει η διαδικασία εύρεσης διαδρομής κάθε φορά που κάποιος κόμβος επιθυμεί να μεταδώσει δεδομένα σε ένα νέο προορισμό.

2.2.2.1 AODV

Στο πρωτόκολλο AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) κάθε κόμβος του Ad Hoc δικτύου ορίζει έναν αριθμό ακολουθίας (sequence number), η τιμή του οποίου αυξάνεται κάθε φορά που διαπιστώνεται αλλαγή στην τοπολογία της γειτονιάς του. Οποιαδήποτε εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου εκτός από τη διεύθυνση του κόμβου προορισμού περιέχει και τον αριθμό ακολουθίας του, ο οποίος δηλώνει το πόσο πρόσφατη είναι η διαδρομή που υποδεικνύει η εγγραφή προς τον προορισμό. Μεταξύ δυο κόμβων που διατηρούν στον πίνακα δρομολόγησης τους μια διαδρομή προς τον ίδιο προορισμό πιο πρόσφατη είναι αυτή στην οποία ο αριθμός ακολουθίας του προορισμού έχει μεγαλύτερη τιμή. Ορισμένα επιπλέον πεδία που περιέχει μια εγγραφή ενός πίνακα δρομολόγησης είναι η διεύθυνση του επόμενου κόμβου (next hop), στον οποίο θα πρέπει να προωθηθεί το πακέτο, προκειμένου να φτάσει στον προορισμό, η απόσταση (hop count) του κόμβου που διατηρεί την εγγραφή από τον κόμβο-προορισμό καθώς και η διάρκεια ζωής (lifetime) της.

Κάθε φορά που κάποιος κόμβος επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο σε έναν

προορισμό μέσα στο Ad Hoc δίκτυο ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης του. Αν υπάρχει εγγραφή γι' αυτόν, τότε ο αποστολέας μεταδίδει το πακέτο στο γειτονικό του κόμβο που υποδεικνύει το πεδίο next hop της εγγραφής. Σε διαφορετική περίπτωση, θα ξεκινήσει μια διαδικασία αναζήτησης δρομολογίου (route discovery).

Για να εντοπίσει τον κόμβο προορισμό, ο αποστολέας κατασκευάζει ένα Route Request (RREQ) πακέτο και το μεταδίδει στους γειτονικούς του κόμβους. Κάθε γειτονικός κόμβος ελέγχει, αν διαθέτει εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης του για τον παραλήπτη που αναγράφεται στο πακέτο. Ωστόσο, δεν αρκεί μόνο να περιέχει τέτοια εγγραφή αλλά και ο αριθμός ακολουθίας του προορισμού σε αυτήν να είναι μεγαλύτερος ή ίσος από αυτόν που φέρει το πακέτο αίτησης δρομολογίου. Θα πρέπει δηλαδή ο γειτονικός κόμβος να γνωρίζει κάποια πρόσφατη διαδρομή για τον προορισμό. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, προωθεί με τη σειρά του το πακέτο στους δικούς του γειτονικούς κόμβους. Δύο ή περισσότεροι κόμβοι που λαμβάνουν το πακέτο αίτησης δρομολογίου μπορεί να έχουν ορισμένους κοινούς γείτονες. Αν δεν γνωρίζουν κάποια πρόσφατη διαδρομή για τον προορισμό, τότε κατά την προώθηση του RREQ πακέτου οι κοινοί τους γείτονες θα λάβουν πολλαπλά αντίγραφα του. Προκειμένου αυτό να αποφευχθεί, κάθε πακέτο αίτησης δρομολογίου φέρει εκτός από τον αριθμό ακολουθίας της πηγής και ένα μοναδικό αναγνωριστικό μετάδοσης (**broadcast_id**). Έτσι, κάθε φορά που κάποιος κόμβος λαμβάνει το πακέτο, ελέγχει τα παραπάνω πεδία και σε περίπτωση που έχει ήδη λάβει πακέτο αίτησης δρομολογίου με ίδιες τιμές στα πεδία αυτά, το αγνοεί.

Όταν το πακέτο αίτησης δρομολογίου παραληφθεί από τον ίδιο τον κόμβο προορισμό ή από κάποιον ενδιάμεσο κόμβο, ο οποίος γνωρίζει μια πρόσφατη διαδρομή προς αυτόν, τότε ένα πακέτο απάντησης δρομολογίου πρέπει να αποσταλλεί στον αρχικό κόμβο αποστολέα. Σε αυτό το σημείο προκύπτει το ζήτημα του καθορισμού της διαδρομής μέσω της οποίας το συγκεκριμένο πακέτο θα φτάσει στον αποστολέα.

Καθώς το RREQ πακέτο διαδίδεται από την πηγή προς το Ad hoc δίκτυο σχηματίζεται μια αντίστροφη διαδρομή από κάθε κόμβο που λαμβάνει το πακέτο προς τον κόμβο πηγή. Προκειμένου να σχηματιστεί μια τέτοια διαδρομή, κάθε ενδιάμεσος κόμβος αποθηκεύει τη διεύθυνση του κόμβου, από τον οποίο έλαβε το πακέτο αίτησης δρομολογίου. Με αυτό τον τρόπο γνωρίζει ότι για να στείλει ένα πακέτο πίσω στην πηγή θα πρέπει να το προωθήσει στο συγκεκριμένο κόμβο. Αυξάνοντας κατά ένα τον μετρητή hop count που φέρει το RREQ πακέτο γνωρίζει επίσης την απόσταση του από αυτήν. Έτσι κάθε φορά που είτε ο κόμβος προορισμός είτε κάποιος ενδιάμεσος κόμβος πρέπει να στείλει ένα πακέτο απάντησης δρομολογίου στην πηγή, απλά το μεταδίδει στο γειτονικό του κόμβο, από τον οποίο είχε λάβει το πακέτο αίτησης δρομολογίου. Εκείνος, με

τη σειρά του, το προωθεί στον αντίστοιχο γειτονικό του κόμβο και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πακέτο RREP να παραδοθεί στην πηγή. Όπως είναι φανερό, το πακέτο απάντησης δρομολογίου ακολουθεί το αντίστροφο μονοπάτι από αυτό που ακολούθησε το πακέτο αίτησης δρομολογίου, για να φτάσει στον προορισμό (ή σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο που γνωρίζει μια πρόσφατη διαδρομή προς αυτόν).

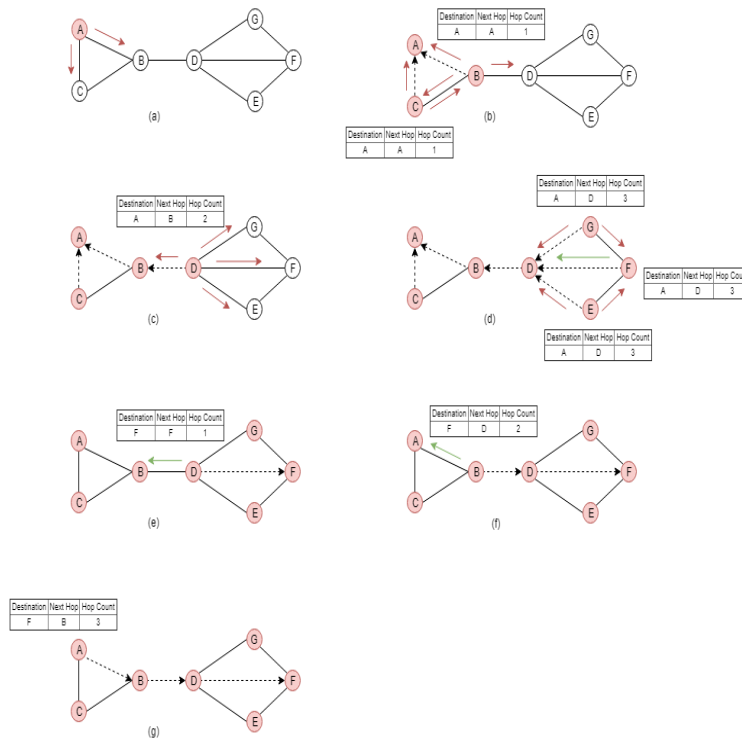
Με τρόπο ανάλογο του σχηματισμού της αντίστροφης διαδρομής που αναφέρθηκε παραπάνω, σχηματίζεται και η ευθεία διαδρομή από κάθε κόμβο που λαμβάνει το πακέτο απάντησης δρομολογίου προς τον προορισμό. Συγκεκριμένα, καθώς το πακέτο διαδίδεται από τον προορισμό (ή τον ενδιάμεσο κόμβο που γνωρίζει μια τρέχουσα διαδρομή προς αυτόν) προς την πηγή, δημιουργείται μια εγγραφή για αυτόν στον πίνακα δρομολόγησης κάθε κόμβου που λαμβάνει το πακέτο. Στο πεδίο next hop της εγγραφής αποθηκεύεται η διεύθυνση του κόμβου που του απέστειλε το πακέτο, ενώ η απόσταση του από τον κόμβο προορισμό προκύπτει από την αύξηση του πεδίου hop count του RREQ πακέτου κατά ένα.

Ένας ενδιάμεσος της πηγής και του προορισμού κόμβος προωθεί προς την πηγή το πρώτο πακέτο απάντησης δρομολογίου που λαμβάνει. Ωστόσο ενδέχεται να φθάσουν σε αυτόν και άλλα τέτοια πακέτα που αναφέρονται στο ίδιο ζεύγος πηγή - προορισμός. Για κάθε ένα από αυτά ελέγχει τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού που φέρει. Αν είναι μεγαλύτερος από εκείνον του πακέτου που προώθησε νωρίτερα, ή είναι ίσος, αλλά η τιμή του πεδίου hop_count που φέρει το τελευταίο πακέτο είναι μικρότερη από αυτή του προηγούμενου, τότε το διαδίδει προς την πηγή και ενημερώνει κατάλληλα τον πίνακα δρομολόγησης του. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, το αγνοεί. Με άλλα λόγια, ένας ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει πολλαπλά πακέτα απάντησης δρομολογίου επιτρέπει να προωθηθούν στην πηγή μόνο όσα περιέχουν πιο πρόσφατες ή πιο σύντομες διαδρομές προς τον προορισμό, από αυτά που έχει ήδη προωθήσει.

Στο σχήμα 2.8.a ο κόμβος A αναζητεί μια διαδρομή για τον κόμβο F καθώς επιθυμεί να του μεταδώσει κάποιο πακέτο. Μεταδίδει, λοιπόν, ένα πακέτο αίτησης διαδρομής στους γειτονικούς του κόμβους για τον συγκεκριμένο προορισμό. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι κόμβοι που έχουν ήδη λάβει το πακέτο αυτό, ενώ τα κόκκινα βέλη στο σχήμα αναπαριστούν την κατεύθυνση των μεταδιδόμενων πακέτων αίτησης διαδρομής. Οι κόμβοι B και C, μιας και δε γνωρίζουν κάποια διαδρομή για τον κόμβο D, προωθούν το πακέτο στους δικούς τους γειτονικούς κόμβους. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 2.8.b, οι δυο αυτοί κόμβοι ουσιαστικά ανταλλάσσουν το πακέτο αίτησης διαδρομής, καθώς είναι γειτονικοί μεταξύ τους. Επειδή και οι δυο κόμβοι έχουν ήδη προωθήσει το συγκεκριμένο πακέτο, αυτή τη φορά το αγνοούν. Προφανώς το ίδιο πράττει και ο κόμβος A.

Κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο αίτησης διαδρομής αποθηκεύει τη διεύθυνση του κόμβου που του το μετέδωσε. Έτσι προσδιορίζει τον κόμβο στον οποίο πρέπει να προωθήσει ένα ένα πακέτο, το οποίο προορίζεται για τον A. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8.c, ο κόμβος D αφού λάβει το πακέτο αίτησης διαδρομής από τον κόμβο B, δημιουργεί μια εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης του για τον A. Η εγγραφή αυτή αναφέρει ότι ο A είναι προσβάσιμος από τον D μέσω του B και ότι απέχει από αυτόν 2 άλματα. Όταν ο κόμβος F λάβει το πακέτο αίτησης διαδρομής που του προώθησε ο D, διαπιστώνει ότι ο κόμβος για τον οποίο ο A αναζητεί διαδρομή είναι ο ίδιος. Πρέπει λοιπόν να αποστείλει ένα πακέτο απάντησης διαδρομής στον κόμβο A. Ο F πλέον γνωρίζει ότι ο A είναι προσβάσιμος από αυτόν μέσω του D και ότι η μεταξύ τους απόσταση είναι 3 άλματα. Προωθεί λοιπόν το πακέτο αίτησης διαδρομής στον κόμβο D. Τα πράσινα βέλη αναπαριστούν την κατεύθυνση του μεταδιδόμενου πακέτου απάντησης διαδρομής. Το πακέτο αυτό ακολουθεί την αντίστροφη διαδρομή από αυτή που ακολουθεί το πακέτο αίτησης διαδρομής, καθώς διαδίδεται από τον κόμβο A στον κόμβο F. Οι διακεκομμένες ακμές φανερώνουν το σχηματισμό της αντίστροφης διαδρομής (reverse path) κατά τη διάδοση του πακέτου αίτησης διαδρομής από τον κόμβο A στον κόμβο F, αλλά και της ευθείας διαδρομής (forward path) κατά τη διάδοση του πακέτου απάντησης διαδρομής από τον κόμβο F στον κόμβο A. Όπως διαπιστώνεται και από τα σχήματα 2.8.d - 2.8.f, το πακέτο απάντησης διαδρομής μεταδίδεται από τον F στον A μέσω της αντίστροφης διαδρομής.

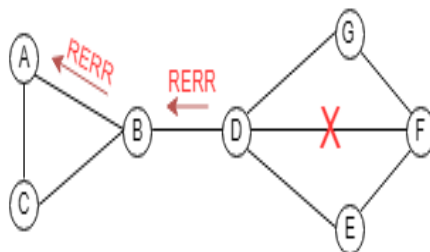
Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των κινητών Ad Hoc δικτύων είναι η δυνατότητα μετακίνησης των κόμβων. Η μετακίνηση αυτή μπορεί να έχει ως συνέπεια την απώλεια συνδέσεων μεταξύ του μετακινούμενου κόμβου και των γειτονικών του. Αν ο κόμβος πηγή μετακινηθεί, τότε η διαδρομή προς έναν συγκεκριμένο προορισμό που είχε ανακαλύψει νωρίτερα ενδέχεται πλέον να μην είναι έγκυρη. Για το λόγο αυτό, αν χρειαστεί να στείλει ένα πακέτο στον προορισμό, θα πρέπει να ξεκινήσει μια νέα διαδικασία αναζήτησης δρομολογίου προς αυτόν. Ας εξετάσουμε τώρα τι θα συμβεί αν κάποιος ενδιαμέσος κόμβος στη διαδρομή από την πηγή προς τον προορισμό ή ακόμα και ο ίδιος ο προορισμός μετακινηθεί. Είναι φανερό, ότι ο αμέσως προηγούμενος κόμβος από αυτόν θα αδυνατεί να του προωθήσει οποιοδήποτε πακέτο στέλνει η πηγή στον προορισμό. Στην περίπτωση αυτή, ο συγκεκριμένος κόμβος θα πρέπει να σημειώσει ως μη έγκυρη τη διαδρομή για τον συγκεκριμένο προορισμό. Έτσι θέτει ίση με άπειρο την τιμή του πεδίου (hop count) της εγγραφής που αναφέρεται στη συγκεκριμένη διαδρομή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πεδίο αυτό δηλώνει την απόσταση του κόμβου που διατηρεί την εγγραφή από τον προορισμό. Παράλληλα ο κόμβος αυτός αυξάνει και τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού στην παραπάνω εγγραφή.



Σχήμα 2.8: Διαδικασία εύρεσης διαδρομής (route discovery)

Στη συνέχεια για να επισημάνει την αποτυχία σύνδεσης (link-failure) παράγει ένα Route Error (RERR) πακέτο, το οποίο μεταδίδει σε όλους τους ενεργούς γείτονες του. Το πακέτο αυτό φέρει το νέο αριθμό ακολουθίας του προορισμού, όπως επίσης και τη νέα απόσταση του κόμβου που στέλνει το πακέτο από τον προορισμό. Διευκρινίζεται ότι ενεργοί γείτονες ενός κόμβου για έναν συγκεκριμένο προορισμό είναι όσοι του έχουν προωθήσει τουλάχιστον ένα πακέτο για τον προορισμό αυτόν μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι κόμβοι αυτοί, λοιπόν, αφού λάβουν το RERR πακέτο ενημερώνουν τους πίνακες δρομολόγησης τους με τις νέες τιμές στα πεδία που αναφέρθηκαν παραπάνω και με την σειρά τους προωθούν το πακέτο στους δικούς τους ενεργούς γείτονες. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πακέτο να παραδοθεί στον κόμβο πηγή, ο οποίος αν χρειαστεί, θα ξεκινήσει μια νέα διαδικασία αναζήτησης δρομολογίου προς τον προορισμό χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά τον νέο αριθμό ακολουθίας του.

Στο σχήμα 2.9, ο κόμβος A χρησιμοποιεί τη διαδρομή που ανακάλυψε νωρίτερα προκειμένου να μεταδώσει πληροφορία στο κόμβο F. Ωστόσο, η σύνδεση του D με τον F έχει πλέον καταργηθεί, με αποτέλεσμα ο D να μην μπορεί να προωθήσει το πακέτο στον F. Ο κόμβος D, αφού σημειώσει ως μη έγκυρη τη διαδρομή ενός άλματος για τον F, μεταδίδει ένα RERR μήνυμα στον κόμβο B. Ο B σημειώνει ως μη έγκυρη τη διαδρομή για τον F, στην οποία ο C αποτελεί τον επόμενο κόμβο από αυτόν και προωθεί το RERR μήνυμα στον A. Ο κόμβος A μιας και έχει πρόσβαση στον F μέσω του B, αφαιρεί από τον πίνακα δρομολόγησης του τη διαδρομή για τον F. Αν ακόμα πρέπει να μεταδώσει κάποιο πακέτο στον F, τότε εκκινεί μια νέα διαδικασία εύρεσης διαδρομής για εκείνον.



Σχήμα 2.9: Απώλεια σύνδεσης των κόμβων D και F

2.2.2.2 DSR

Στο πρωτόκολλο DSR (Dynamic Source Routing) ο κόμβος αποστολέας τοποθετεί στην κεφαλίδα του προς αποστολή πακέτου την πλήρη διαδρομή που αυτό θα ακολουθήσει. Ουσιαστικά αναφέρονται στην κεφαλίδα οι διευθύνσεις των ενδιαμέσων κόμβων, από τους οποίους θα διέλθει το πακέτο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο, ελέγχει τη διευθύνη που αναγράφεται στο πεδίο του παραλήπτη. Αν δεν είναι ο ίδιος ο παραλήπτης, απλά το μεταδίδει στον επόμενο. Έτσι το πακέτο τελικά φτάνει στον προορισμό του, όπου και παραδίδεται στο επίπεδο δικτύου του παραλήπτη.

Κάθε κινητός κόμβος που συμμετέχει στο Ad Hoc δίκτυο διατηρεί στη μνήμη του τις διαδρομές προς άλλους κόμβους, τις οποίες γνωρίζει. Έτσι, κάθε φορά που επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο, ελέγχει αν υπάρχει εγγραφή στη μνήμη που να περιέχει διαδρομή προς τον παραλήπτη. Αν υπάρχει τέτοια εγγραφή, η διαδικασία προχωρά, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Ωστόσο, σε

περίπτωση που δεν υπάρχει καθορισμένη διαδρομή στην μνήμη, εφαρμόζεται η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής (route discovery).

Όταν απαιτείται η εύρεση μιας διαδρομής από ένα κόμβο σε έναν άλλον, ο κόμβος αποστολέας μεταδίδει ένα Route Request (RREQ) πακέτο προς τους γειτονικούς του κόμβους. Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει τις διευθύνσεις του αποστολέα και του παραλήπτη αλλά και μια αρχικά κενή λίστα κόμβων. Κάθε γειτονικός κόμβος, αν αντιληφθεί ότι το πακέτο δεν προορίζεται για εκείνον, το προωθεί με τη σειρά του στους δικούς του γειτονικούς κόμβους, αφού πρώτα καταχωρίσει τη διεύθυνση του στη λίστα. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το RREQ πακέτο να παραδοθεί στον παραλήπτη (ή σε κάποιον κόμβο που γνωρίζει μια διαδρομή γι' αυτόν).

Αν η διαδικασία αναζήτησης επιτύχει, ένα Route Reply (RREP) πακέτο αποστέλλεται από τον παραλήπτη στον αποστολέα. Το περιεχόμενο αυτού του πακέτου είναι ένα αντίγραφο της λίστας των κόμβων που φέρει το RREQ πακέτο, το οποίο φτάνει στον παραλήπτη. Προφανώς πρόκειται για την ακολουθία των ενδιάμεσων κόμβων από τους οποίους διήλθε το πακέτο μέχρι να φτάσει σε αυτόν. Η αποστολή του RREP πακέτου μπορεί να υλοποιηθεί είτε μέσω μιας ήδη καταχωρημένης στη μνήμη του παραλήπτη διαδρομής προς τον αποστολέα, είτε μέσω της διαδρομής που προκύπτει αντιστρέφοντας την προαναφερθείσα λίστα των κόμβων. Σε κάθε περίπτωση με την παραλαβή του RREP πακέτου, ο αποστολέας αποθηκεύει στη μνήμη του τη διαδρομή προς το συγκεκριμένο παραλήπτη. Διευκρινίζεται ότι η διαδικασία εύρεσης διαδρομής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ανακάλυψη (και αποθήκευση) περισσότερων από μιας διαδρομής για τον ίδιο προορισμό. Έτσι, σε περίπτωση που μια διαδρομή για τον συγκεκριμένο κόμβο αποτύχει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως κάποια εναλλακτική. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η καθυστέρηση καθώς και η αύξηση του φορτίου δρομολόγησης που θα επέφερε μια νέα διαδικασία εύρεσης διαδρομής.

Κάθε RREQ πακέτο διαθέτει ένα μοναδικό request id, το οποίο καθορίζεται από τον κόμβο που επιθυμεί να ανακαλύψει μια διαδρομή. Οι κόμβοι που συνθέτουν το Ad Hoc δίκτυο διατηρούν για κάθε RREQ που δέχονται ένα ζεύγος, που περιλαμβάνει τη διεύθυνση του αποστολέα και το id του συγκεκριμένου request. Έτσι, κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει ένα RREQ, ελέγχει αν το ζεύγος {διεύθυνση αποστολέα, request id} υπάρχει στη λίστα με τα RREQ που δέχτηκε πρόσφατα. Αν υπάρχει, αγνοεί το πακέτο και δεν το προωθεί στο δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο δε λαμβάνονται υπόψη αντίγραφα του ίδιου request που καταφθάνουν στον κόμβο ετεροχρονισμένα από διαφορετικές διαδρομές. Ένα RREQ πακέτο αγνοείται επίσης, όταν ο κόμβος που το παραλαμβάνει αναφέρεται ήδη στη λίστα των κόμβων που φέρει το πακέτο. Έτσι εξασφαλίζεται ότι το πακέτο δε θα διέλθει ξανά από κόμβο που διήλθε

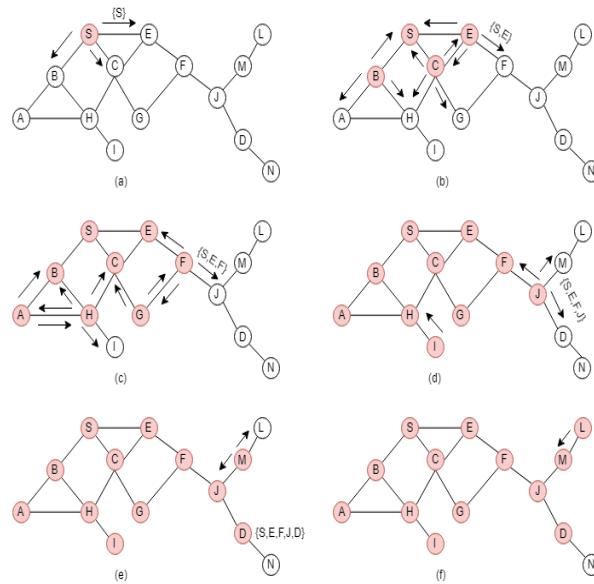
προηγούμενως και ότι θα αποφευχθεί ο σχηματισμός κύκλου.

Στο σχήμα 2.10.a, ο κόμβος S αναζητεί μια διαδρομή για τον κόμβο D. Μεταδίδει έτσι ένα πακέτο αίτησης διαδρομής (RREQ) στους γειτονικούς του κόμβους για το συγκεκριμένο προορισμό. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι κόμβοι που έχουν ήδη λάβει το πακέτο αυτό, ενώ τα βέλη στο σχήμα αναπαριστούν την κατεύθυνση των μεταδιδόμενων πακέτων αίτησης διαδρομής. Οι κόμβοι E, C και B μιας και δε διαθέτουν στη μνήμη τους κάποια διαδρομή για τον κόμβο D, προωθούν το πακέτο αίτησης διαδρομής στους δικούς τους γειτονικούς κόμβους. Πρώτα όμως επισυνάπτουν την IP διεύθυνση τους στη λίστα των κόμβων που περιέχει το πακέτο. Στο σχήμα 2.10.c, ο κόμβος G προωθεί το πακέτο αίτησης διαδρομής που έλαβε από τον C στους γειτονικούς του κόμβους, καθώς δε γνωρίζει κάποια διαδρομή για τον D. Ωστόσο, οι κόμβοι C και F, που γίνονται αποδέκτες του πακέτου, το έχουν ήδη προωθήσει. Έτσι, αυτή τη φορά το αγνοούν. Όταν ο κόμβος D λάβει το πακέτο αίτησης διαδρομής που του προώθησε ο J, διαπιστώνει ότι ο κόμβος για τον οποίο ο S αναζητεί μια διαδρομή είναι ο ίδιος. Τοποθετεί λοιπόν την IP διεύθυνση του στη λίστα των κόμβων που φέρει το πακέτο και δεν το προωθεί περαιτέρω. Στη συνέχεια, ο κόμβος D μεταδίδει στον S ένα πακέτο απάντησης διαδρομής, το οποίο περιέχει ένα αντίγραφο της παραπάνω λίστας. Η διαδρομή που πρόκειται να ακολουθήσει το πακέτο είναι η D-J-E-F-S, η οποία προκύπτει αντιστρέφοντας την ακολουθία των κόμβων που περιέχει η λίστα αυτή.

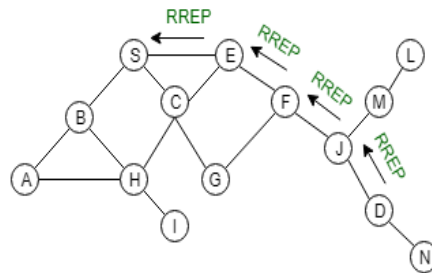
Κάθε κόμβος, που προωθεί ένα πακέτο στον επόμενο κόμβο που υποδεικνύει μια διαδρομή, είναι υπεύθυνος για την επιβεβαίωση της παραλαβής του από αυτόν. Αν η παραλαβή αυτή δεν επιβεβαιωθεί μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε το πακέτο αναμεταδίδεται. Σε περίπτωση που η σύνδεση των δυο κόμβων έχει καταργηθεί, το όριο των δυνατών αναμεταδόσεων εξαντλείται. Τότε ένα μήνυμα Route Error (RERR) στέλνεται στον αρχικό αποστολέα γνωστοποιώντας του τη σύνδεση που δημιουργεί πρόβλημα στην προώθηση του πακέτου. Την αποστολή αυτού του μηνύματος αναλαμβάνει προφανώς ο κόμβος που αδυνατεί να επιβεβαιώσει την παραλαβή του πακέτου.

Κάθε κόμβος που λαμβάνει το RERR μήνυμα, καθώς αυτό διαδίδεται προς τον αρχικό αποστολέα, αφαιρεί από την μνήμη του όλες τις διαδρομές που περιέχουν τη συγκεκριμένη σύνδεση. Ο αρχικός αποστολέας, προκειμένου να επαναλάβει τη μετάδοση του πακέτου (ή να αποστείλει κάποιο νέο πακέτο), θα πρέπει να αναζητήσει στη μνήμη του μια εναλλακτική διαδρομή προς τον συγκεκριμένο προορισμό. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοια διαδρομή, θα επιχειρήσει να ανακαλύψει μια νέα με τη διαδικασία route discovery που περιγράφηκε παραπάνω.

Η παραπάνω διαδικασία που ονομάζεται συντήρηση διαδρομής απεικονίζεται στο σχήμα 2.11. Σε αυτό ο κόμβος S επιθυμεί να μεταδώσει ένα πακέτο στον

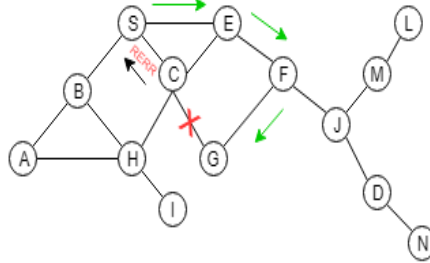


Σχήμα 2.10: Διαδικασία εύρεσης διαδρομής (route discovery).



Σχήμα 2.11: Μετάδοση απάντησης διαδρομής (route reply) από τον προορισμό στην πηγή.

κόμβο G μέσω της διαδρομής S-C-G, η οποία θεωρούμε ότι του είναι γνωστή. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12, η σύνδεση του κόμβου C με τον G έχει καταργηθεί, με αποτέλεσμα ο C να μην μπορεί να προωθήσει το πακέτο στον G. Έτσι, ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 2.12: Απώλεια σύνδεσης και συντήρηση διαδρομής (route maintenance).

2.2.2.3 TORA

Το πρωτόκολλο TORA (Temporary Ordered Routing Algorithm) ανήκει στην οικογένεια των αλγορίθμων αντιστροφής-σύνδεσης (link reversal algorithms). Οι αλγόριθμοι αυτοί θεωρούν το δίκτυο ως ένα συνδεδεμένο γράφημα και μεταθέτουν το πρόβλημα της δρομολόγησης στη δημιουργία ενός προσανατολισμένου στον προορισμό-κατευθυνόμενου ακυκλικού γραφήματος (DAG). Όταν αυτό κατασκευαστεί, θα υπάρχει ένα ακυκλικό μονοπάτι μεταξύ οποιουδήποτε κόμβου του δικτύου και του προορισμού. Ας υποθέσουμε ότι το δίκτυο μοντελοποιείται από το γράφημα $G = (V, E)$. Για κάθε ζεύγος κόμβων $i, j \in V$, οι οποίοι είναι γειτονικοί, η σύνδεση $(i, j) \in E$ μπορεί να έχει κατεύθυνση είτε από τον i στον j , είτε από τον j στον i , είτε να μην έχει καθόλου κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση, ο κόμβος j θεωρείται προς την κυκλοφορία γείτονας (downstream neighbor) του κόμβου i , ενώ στη δεύτερη ο j θεωρείται αντίθετος προς την κυκλοφορία (upstream neighbor) γείτονας του i .

Στο πρωτόκολλο TORA κάθε κόμβος i έχει ένα ύψος h_i , το οποίο αναπαρίσταται ως μια πεντάδα $(t_i, oid_i, r_i, d_i, i)$. Τα πρώτα τρία σύμβολα συνιστούν το επίπεδο αναφοράς (reference level), ενώ τα δυο τελευταία αποτελούν τη μετατόπιση (offset) σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς. Ένα νέο επίπεδο αναφοράς ορίζεται κάθε φορά που η κατάργηση της σύνδεσης ενός κόμβου με κάποιον γειτονικό του κόμβο έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια του τελευταίου προς την κυκλοφορία γείτονα του. Το σύμβολο t_i φανερώνει τη χρονική στιγμή στην οποία διαπιστώνεται η απώλεια σύνδεσης, ενώ το oid_i υποδεικνύει τον κόμβο που ορίζει το νέο επίπεδο αναφοράς. Το r_i είναι ένα bit, το οποίο διαιρεί το επίπεδο αναφοράς σε δυο υποεπίπεδα. Η τιμή d_i είναι ένας ακέραιος, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη διάταξη των κόμβων σε σχέση με το κοινό επίπεδο αναφοράς τους. Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται η τιμή αυτή εξετάζεται στη

συνέχεια.

Κάθε κόμβος i (εκτός του προορισμού) διατηρεί έναν πίνακα, στον οποίο αποθηκεύει τα ύψη των γειτονικών του κόμβων για ένα συγκεκριμένο προορισμό στο δίκτυο. Με βάση τα ύψη αυτά αλλά και το δικό του, ο i προσδιορίζει το είδος της σύνδεσης του με κάθε γειτονικό του κόμβο. Πιο συγκεκριμένα, αν ο j είναι ένας γειτονικός κόμβος του i και $h_i > h_j$, τότε η σύνδεση των δυο κόμβων έχει κατεύθυνση από τον i στον j . Αντίθετα, αν $h_i < h_j$, τότε η σύνδεση έχει κατεύθυνση από τον j στον i . Αν πάλι το ύψος του j είναι NULL, τότε η σύνδεση του i με τον j δεν έχει κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση ο i σημειώνει ότι ο j είναι downstream γείτονας του, ενώ στη δεύτερη ότι είναι upstream γείτονας του.

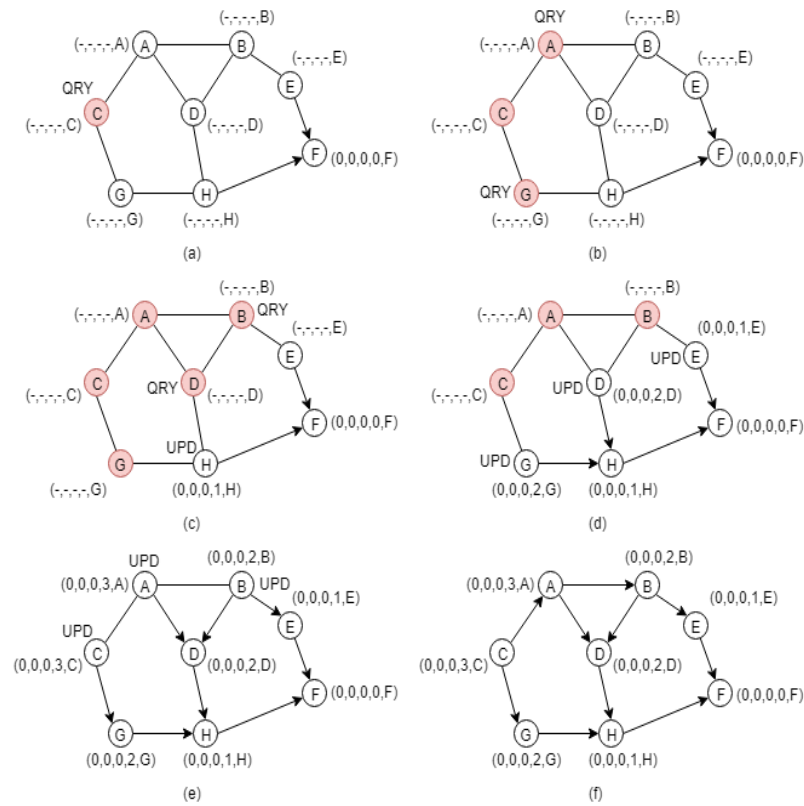
Στο πρωτόκολλο TORA ουσιαστικά επιτελούνται τρεις βασικές λειτουργίες, οι οποίες εξετάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Η πρώτη λειτουργία, αυτή της δημιουργίας διαδρομής (route creation) βασίζεται στη χρήση των πακέτων QRY και UPD. Ένα πακέτο QRY περιέχει τη διεύθυνση του κόμβου προορισμού (destination id) για τον οποίο εκτελείται ο αλγόριθμος, ενώ ένα UPD πακέτο εκτός από τη συγκεκριμένη διεύθυνση περιέχει και το ύψος του κόμβου που προωθεί το πακέτο. Στο σχήμα 2.13.a ο κόμβος C αναζητεί μια διαδρομή για τον κόμβο F. Αρχικά, το ύψος όλων των κόμβων εκτός του προορισμού F τίθεται ίσο με NULL, ενώ το ύψος του F τίθεται ίσο με μηδέν. Οι E και H, μιας και είναι γειτονικοί κόμβοι με τον προορισμό, διατηρούν το ύψος του στον πίνακα, στον οποίο αποθηκεύουν τα ύψη των γειτονικών τους κόμβων. Επειδή το ύψος τους έχει τιμή NULL και το ύψος του F έχει τιμή μηδέν, η σύνδεση του E με τον F έχει κατεύθυνση από τον E στον F και η σύνδεση του H με τον F έχει κατεύθυνση από τον H στον F. Όλες οι υπόλοιπες συνδέσεις αρχικά δεν έχουν κατεύθυνση.

Ο κόμβος C μεταδίδει λοιπόν ένα QRY πακέτο στους γειτονικούς του κόμβους και ενεργοποιεί το σήμα route_required, το οποίο διατηρεί. Κάθε κόμβος που έχει ενεργοποιημένο το σήμα αυτό, αναπαρίσταται στο σχήμα με κόκκινο χρώμα. Οι κόμβοι A και G, οι οποίοι λαμβάνουν το QRY πακέτο, επειδή δε διαθέτουν κάποιον προς την κυκλοφορία γείτονα (downstream neighbor) και έχουν απενεργοποιημένο το σήμα route_required, προωθούν το πακέτο στους δικούς τους γειτονικούς κόμβους και ενεργοποιούν το σήμα αυτό. Οι B, D και H γίνονται τώρα αποδέκτες του QRY πακέτου. Οι δυο πρώτοι κόμβοι, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μεταδίδουν το QRY πακέτο στους γειτονικούς τους κόμβους και ενεργοποιούν το σήμα route_required. Ωστόσο, ο H διαθέτει έναν προς την κυκλοφορία γείτονα και μάλιστα αυτός είναι ο ίδιος ο προορισμός. Στην περίπτωση αυτή, ο H δίνει στο ύψος του την τιμή του ύψους του F αυξημένη κατά ένα. Στη συνέχεια μεταδίδει ένα UPD πακέτο στους γειτονικούς του κόμβους. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα UPD πακέτο

αρχικά αποθηκεύει το ύψος του γειτονικού του κόμβου, το οποίο περιέχεται σε αυτό. Αν το σήμα `route_required`, το οποίο διαθέτει, είναι ενεργοποιημένο, τότε θέτει το ύψος του ίσο με το αυξημένο κατά ένα ύψος που περιλαμβάνει το πακέτο. Στη συνέχεια απενεργοποιεί το παραπάνω σήμα και μεταδίδει ένα UPD πακέτο στους γειτονικούς του κόμβους. Το ύψος των κόμβων D και G, όπως προκύπτει από τα παραπάνω, λαμβάνει την τιμή (0,0,0,2,D) και (0,0,0,2,H) αντίστοιχα. Επομένως, η σύνδεση των κόμβων αυτών με τον H έχει κατεύθυνση από τους ίδιους προς εκείνον.

Η προώθηση του QRY πακέτου από τον κόμβο B στους γειτονικούς του κόμβους έχει ως αποτέλεσμα την παραλαβή του από τους κόμβους E και D. Ωστόσο, ο κόμβος D, όπως άλλωστε φανερώνει και το ενεργοποιημένο σήμα `route_required`, έχει ήδη προωθήσει το συγκεκριμένο πακέτο. Συνεπώς, αυτή τη φορά το αγνοεί. Από την άλλη πλευρά, ο E εκχωρεί στο ύψος του την τιμή του ύψους του F αυξημένη κατά ένα και μεταδίδει ένα UPD πακέτο στον κόμβο B. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος B λαμβάνει πρώτα το συγκεκριμένο UPD πακέτο και έπειτα αυτό που του μεταδίδει ο κόμβος D. Σε αυτή την περίπτωση, το ύψος του B τίθεται ίσο με (0,0,0,2,B). Όταν ο B λάβει το πακέτο UPD που του μεταδίδει ο D, μιας και το σήμα `route_required`, είναι πλέον απενεργοποιημένο, απλά αποθηκεύει το ύψος του D που περιέχει το μήνυμα. Αντίθετα, όταν ο κόμβος A λάβει το ίδιο πακέτο από τον D δίνει στο ύψος του την τιμή (0,0,0,3,A) και προωθεί ένα UPD πακέτο στους γειτονικούς του κόμβους. Σημειώνεται ότι, αν αντί για το UPD πακέτο του κόμβου E κατέφθανε πρώτα στον B αυτό του κόμβου D, η σύνδεση του A με τον B θα είχε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που έχει στο σχήμα 2.13.e. Ο κόμβος C αφού λάβει το UPD πακέτο που του μετέδωσε ο G, θέτει το ύψος του ίσο με (0,0,0,3,C) και ενημερώνει τους A και G για την τιμή αυτή. Με βάση την πληροφορία που αποθηκεύεται στον πίνακα στον οποίο διατηρεί τα ύψη των γειτονικών του κόμβων, κάθε κόμβος προσδιορίζει την κατεύθυνση της σύνδεσης (upstream ή downstream) του με αυτούς σε σχέση πάντα με τον προορισμό F. Το αποτέλεσμα της δημιουργίας διαδρομής, όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα 2.13.f, είναι η κατασκευή ενός κατευθυνόμενου ακυκλικού γραφήματος, το οποίο είναι προσανατολισμένο στον προορισμό F.

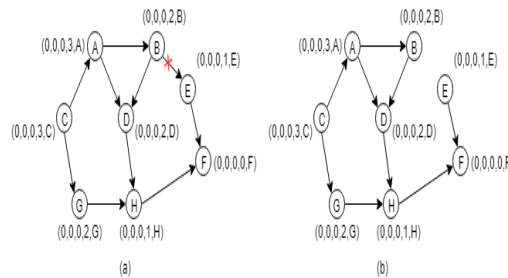
Η δεύτερη λειτουργία που υλοποιείται στο πρωτόκολλο TORA είναι αυτή της συντήρησης διαδρομής (route maintenance), η οποία εξετάζεται στη συνέχεια. Ας υποθέσουμε ότι η σύνδεση του κόμβου B με τον E καταργείται. Παρατηρώντας το σχήμα 2.14.b, διαπιστώνεται ότι όλοι οι κόμβοι εξακολουθούν να έχουν έναν τουλάχιστον προς την κυκλοφορία (downstream) γείτονα. Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν απαιτείται κάποια ενέργεια. Αν ωστόσο καταργηθεί και η σύνδεση του D με τον H, τότε ο κόμβος D χάνει τον τελευταίο προς την κυκλοφορία γείτονα του (σχήμα 2.15.a). Σε αυτή την



Σχήμα 2.13: Δημιουργία διαδρομής (route creation).

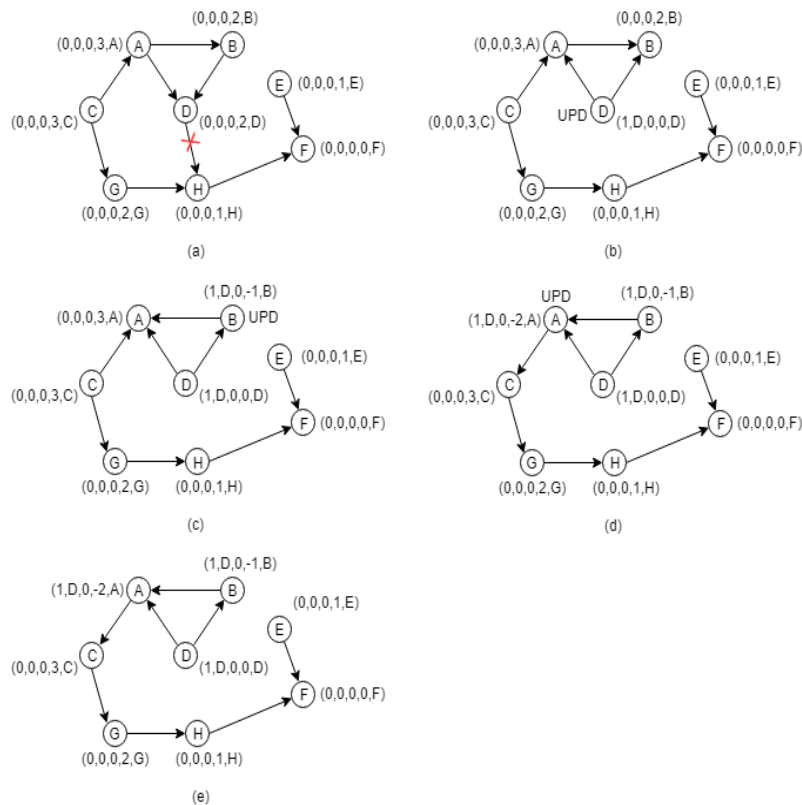
περίπτωση ο D ορίζει ένα νέο επίπεδο αναφοράς. Το ύψος του λαμβάνει τώρα την τιμή $(1, D, 0, 0, D)$. Προκειμένου να ενημερώσει τους γειτονικούς του κόμβους σχετικά με το νέο του ύψος, ο D μεταδίδει ένα UPD πακέτο σε αυτούς. Όταν ο κόμβος B (ή ο A) λάβει το πακέτο, παρατηρεί ότι το ύψος του έχει πλέον μικρότερη τιμή από αυτό του κόμβου D. Έτσι, η κατεύθυνση της μεταξύ τους σύνδεσης αντιστρέφεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο B (σε αντίθεση με τον A) να χάνει τον τελευταίο προς την κυκλοφορία γείτονα του. Ο κόμβος αυτός ελέγχει, αν όλοι οι γειτονικοί του κόμβοι έχουν το ίδιο επίπεδο αναφοράς. Επειδή αυτό δεν ισχύει, ο B ορίζει ως νέο επίπεδο αναφοράς του εκείνο με τη μεγαλύτερη τιμή (δηλαδή το $(1, D, 0, 0)$) και επιλέγει το ύψος του, έτσι ώστε να είναι μικρότερο από το ύψος κάθε γειτονικού του κόμβου με το συγκεκριμένο επίπεδο αναφοράς. Τελικά ο B δίνει στο ύψος του την τιμή $(1, D, 0, -1, B)$ και

μεταδίδει ένα UPD πακέτο στους γειτονικούς του κόμβους. Τώρα η κατεύθυνση της σύνδεσης του κόμβου A με τον κόμβο B αντιστρέφεται και ο κόμβος A καταλήγει δίχως κάποιον προς την κυκλοφορία γειτονικό κόμβο (σχήμα 2.15.c). Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, το ύψος του A λαμβάνει την τιμή $(1,D,0,-2,A)$. Η διαδικασία της συντήρησης διαδρομής ολοκληρώνεται, καθώς όλοι οι κόμβοι έχουν τουλάχιστον έναν προς την κυκλοφορία γείτονα.



Σχήμα 2.14: Απώλεια σύνδεσης δίχως επίπτωση στη συνδεσιμότητα των κόμβων με τον προορισμό.

Ας εξετάσουμε τώρα τι πρόκειται να συμβεί, όταν η σύνδεση του κόμβου A με τον C καταργηθεί. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 2.16.a, ο A χάνει τον τελευταίο προς την κυκλοφορία γειτονικό του κόμβο. Ο κόμβος αυτός, λοιπόν, ορίζει ένα νέο επίπεδο αναφοράς και έτσι το ύψος του ισούται τώρα με $(2,A,0,0,A)$. Στη συνέχεια μεταδίδει ένα UPD μήνυμα στους κόμβους B και D. Ύστερα από την επεξεργασία του μηνύματος αυτού ο κόμβος B διαπιστώνει ότι το ύψος του είναι πλέον μικρότερο από αυτό του κόμβου A, επομένως η σύνδεση τους έχει κατεύθυνση από τον A στον B. Ο κόμβος B, δηλαδή, χάνει τον τελευταίο προς την κυκλοφορία γείτονα του. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο κόμβος αυτός ορίζει ως νέο επίπεδο αναφοράς του το επίπεδο αναφοράς του υψηλότερου γειτονικού του κόμβου. Το ύψος του επιλέγεται, έτσι ώστε να είναι μικρότερο σε σχέση με το ύψος κάθε κόμβου που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο επίπεδο αναφοράς. Έτσι λαμβάνει την τιμή $(2,A,0,-1,B)$, η οποία διαδίδεται στους γειτονικούς κόμβους του B. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16.c, ο κόμβος D είναι εκείνος που καταλήγει τώρα δίχως κανέναν προς την κυκλοφορία γείτονα. Ωστόσο, αυτή τη φορά όλοι οι γείτονες του έχουν το ίδιο επίπεδο αναφοράς και επίσης το bit r είναι απενεργοποιημένο. Σε αυτή την περίπτωση, ο κόμβος D ορίζει ένα υψηλότερο υποεπίπεδο ενεργοποιώντας το συγκεκριμένο bit. Το νέο του ύψος, το οποίο ισούται με $(2,A,1,0,D)$, γνωστοποιείται στους γειτονικούς του κόμβους μέσω ενός UPD μηνύματος. Ο κόμβος B, έπειτα από

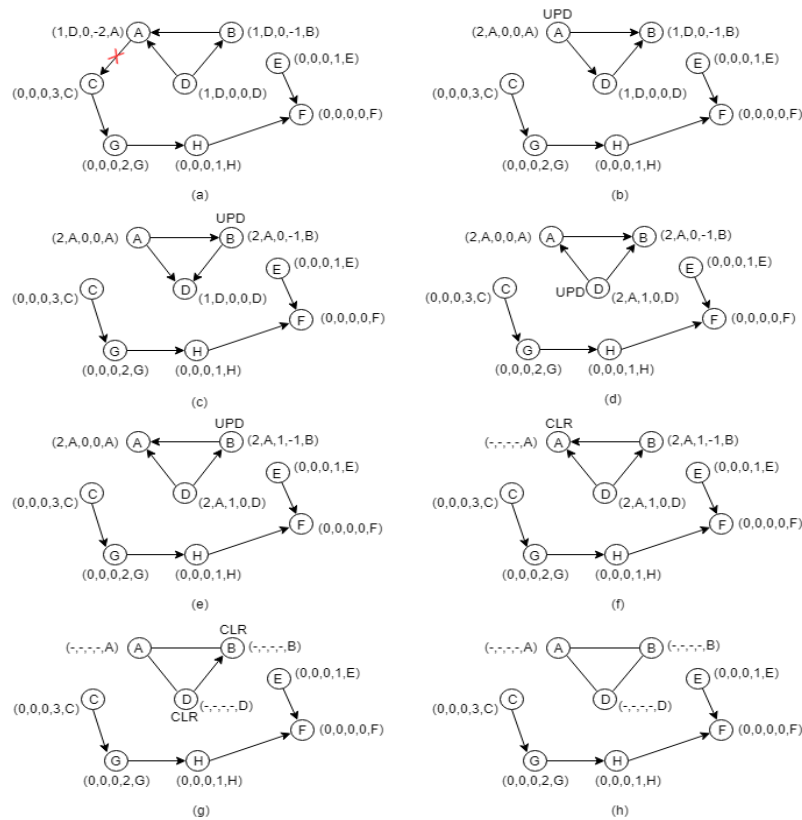


Σχήμα 2.15: Συντήρηση διαδρομής (route maintenance).

την επεξεργασία του μηνύματος αυτού και την αντιστροφή της σύνδεσης του με τον κόμβο D, χάνει ξανά τον τελευταίο προς την κυκλοφορία γείτονα του. Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί, ο κόμβος αυτός δίνει στο ύψος του την τιμή (2,A,1,-1,B) και στη συνέχεια ενημερώνει τους γείτονες του γι' αυτό.

Όταν ο A λάβει την ενημέρωση, διαπιστώνει και πάλι την απώλεια του τελευταίου προς την κυκλοφορία γειτονικού του κόμβου. Όμως αυτή τη φορά όλοι οι γείτονες του έχουν το ίδιο επίπεδο αναφοράς και το bit r ενεργοποιημένο (σχήμα 2.16.e). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο A έχει ανιχνεύσει μια αποκοπή στο δίκτυο (network partition), συνεπώς εκκινείται μια διαδικασία διαγραφής διαδρομών (route erasure). Πιο συγκεκριμένα, ο A θέτει το ύψος του αλλά και το ύψος των γειτονικών του κόμβων ίσο με NULL και επαναπροσδιορίζει το είδος της σύνδεσης του με αυτούς. Στη συνέχεια μεταδίδει σε εκείνους ένα CLR

μήνυμα. Το μήνυμα αυτό περιέχει τη διεύθυνση του κόμβου προορισμού καθώς και το επίπεδο αναφοράς του κόμβου A. Οι κόμβοι B και D που λαμβάνουν το CLR μήνυμα, επειδή έχουν το ίδιο επίπεδο αναφοράς με αυτό που περιέχεται στο μήνυμα, θέτουν το ύψος τους ίσο με NULL. Την ίδια τιμή αποθηκεύουν επίσης στο ύψος κάθε γειτονικού τους κόμβου με το συγκεκριμένο επίπεδο αναφοράς. Στη συνέχεια προσδιορίζουν εκ νέου το είδος της σύνδεσης τους με αυτούς και προωθούν με τη σειρά τους το CLR πακέτο. Τελικά, όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα 2.16.h, το ύψος όλων των κόμβων (σε σχέση με τον προορισμό F) στο τμήμα του δικτύου που αποκόπηκε τίθεται ίσο με NULL και οι συνδέσεις μεταξύ τους πλέον δεν έχουν κατεύθυνση.



Σχήμα 2.16: Διαγραφή διαδρομής (route erasure).

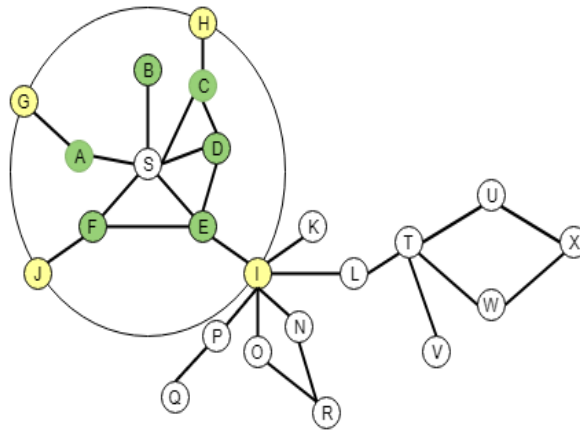
2.2.3 Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Τα υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης επιχειρούν να εξαλείψουν τις αδυναμίες των proactive και reactive πρωτοκόλλων συνδυάζοντας τα θετικά τους χαρακτηριστικά. Δυο χαρακτηριστικά υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι το ZRP και το FSR.

2.2.3.1 ZRP

Το πρωτόκολλο ZRP (Zone Routing Protocol), όπως άλλωστε υποδηλώνει και το όνομα του, στηρίζει τη λειτουργία του στις ζώνες δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος στο δίκτυο διαθέτει μια τέτοια ζώνη, η οποία περιλαμβάνει τους κόμβους των οποίων η ελάχιστη απόσταση από αυτόν είναι το πολύ r . Σημειώνεται, ότι η απόσταση μετρείται σε άλματα (hops) και ότι με r συμβολίζεται η ακτίνα της ζώνης δρομολόγησης.

Στο σχήμα 2.17, η ακτίνα επιλέγεται να είναι ίση με δυο. Στη ζώνη δρομολόγησης του S ανήκουν όλοι οι χρωματισμένοι κόμβοι. Αυτοί που ζωγραφίζονται με κίτρινο χρώμα έχουν ελάχιστη απόσταση από τον S ίση με την ακτίνα της ζώνης και ονομάζονται περιφερειακοί, ενώ αυτοί που ζωγραφίζονται με πράσινο χρώμα έχουν ελάχιστη απόσταση από τον S μικρότερη από την ακτίνα και ονομάζονται εσωτερικοί.



Σχήμα 2.17: Η ζώνη δρομολόγησης του κόμβου S .

Σε ένα Ad-Hoc δίκτυο οι κόμβοι συνήθως επικοινωνούν περισσότερο με κόμβους που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τους ίδιους και λιγότερο με κόμβους που είναι απομακρυσμένοι από αυτούς. Το πρωτόκολλο ZRP θεωρεί

ότι οι διαδρομές προς όλους τους προορισμούς που βρίσκονται εντός της ζώνης δρομολόγησης ενός κόμβου πρέπει να υπολογίζονται εκ των προτέρων. Με τον τρόπο αυτό, όταν ο συγκεκριμένος κόμβος πρέπει να αποστείλει ένα πακέτο σε κάποιον από αυτούς, η διαδρομή είναι άμεσα διαθέσιμη και έτσι αποφεύγεται η καθυστέρηση που θα επέφερε μια διαδικασία εύρεσης της. Ο κόμβος αυτός λοιπόν χρησιμοποιεί εντός της ζώνης δρομολόγησης του ένα proactive πρωτόκολλο, το οποίο ονομάζεται IARP. Αντίθετα, για τους κόμβους που βρίσκονται εκτός της ζώνης δρομολόγησης του χρησιμοποιείται ένα reactive πρωτόκολλο, το IERP. Μιας και το ZRP επιχειρεί να συνδυάσει τα θετικά χαρακτηριστικά τόσο των proactive όσο και των reactive πρωτοκόλλων δρομολόγησης θεωρείται ένα υβριδικό πρωτόκολλο.

Με τη χρήση του IARP κάθε κόμβος γνωρίζει τους κόμβους που ανήκουν στη ζώνη δρομολόγησης του, καθώς και την ελάχιστη απόσταση του από αυτούς. Ουσιαστικά, το πρωτόκολλο αυτό επιφορτίζεται με την εύρεση και τη διατήρηση διαδρομών προς τους κόμβους που βρίσκονται εντός της ζώνης ενός κόμβου. Στην πραγματικότητα, δεν αποτελεί κάποιο ξεχωριστό πρωτόκολλο, οπότε για την εκτέλεση των λειτουργιών του μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο proactive πρωτοκόλλο (είτε Link State είτε Distance Vector). Όποιο και να επιλεγεί, θα πρέπει να τροποποιηθεί, ώστε η λειτουργία του να περιορίζεται εντός της ζώνης δρομολόγησης κάθε κόμβου. Για την ανίχνευση ενός νέου γειτονικού κόμβου ή μιας απώλειας σύνδεσης το ZRP βασίζεται στο Neighbor Discovery Protocol NDP, το οποίο παρέχεται από το επίπεδο MAC. Στο NDP κάθε κόμβος μεταδίδει περιοδικά HELLO μηνύματα στους γειτονικούς του κόμβους. Όταν, λοιπόν, ένας κόμβος λάβει ένα τέτοιο μήνυμα από έναν άλλο κόμβο, διαπιστώνει ότι είναι γειτονικός του. Αν ωστόσο παρέλθει κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα δίχως να λάβει κάποιο HELLO μήνυμα από αυτόν, θεωρεί ότι η σύνδεση μεταξύ τους έχει χαθεί. Σε περίπτωση που το επίπεδο MAC δεν περιέχει το NDP, η λειτουργικότητα του παρέχεται από το IARP.

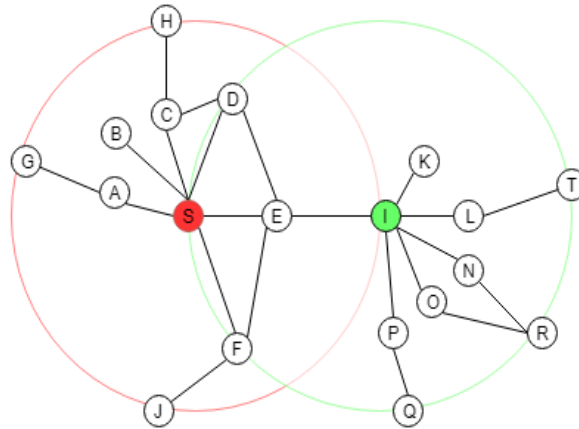
Από την άλλη πλευρά, το πρωτόκολλο IERP είναι υπεύθυνο για την εύρεση και τη διατήρηση διαδρομής μεταξύ ενός κόμβου και κάποιου προορισμού που βρίσκεται εκτός της ζώνης δρομολόγησης του. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος X επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο στον Y. Αρχικά, ο X ελέγχει αν ο συγκεκριμένος προορισμός βρίσκεται εντός της ζώνης δρομολόγησης του. Αν πράγματι βρίσκεται, τότε η διαδρομή προς αυτόν είναι γνωστή και εξασφαλίζεται από το πρωτόκολλο IARP. Σε αντίθετη περίπτωση, ο X εκκινεί μια διαδικασία εύρεσης διαδρομής προς τον Y. Βασικό τμήμα της διαδικασίας αυτής είναι η τεχνική της εκπομπής συνοριακών κόμβων (bordercasting), η οποία προτιμάται αντί αυτής του κατακλυσμού. Χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή, που παρέχεται από το πρωτόκολλο BRP, ο κόμβος X προωθεί ένα πακέτο αίτησης διαδρομής στους

περιφερειακούς του κόμβους. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω της IP μετάδοσης unicast, είτε μέσω της IP πολλαπλής μετάδοσης multicast. Ουσιαστικά αυτό που απαιτείται είναι τα μηνύματα να φτάνουν στους περιφερειακούς κόμβους δίχως να επεξεργάζονται στο επίπεδο δρομολόγησης των ενδιάμεσων κόμβων. Κάθε κόμβος, που λαμβάνει το πακέτο αίτησης διαδρομής, ελέγχει αν ο Y βρίσκεται στη ζώνη δρομολόγησης του. Στην περίπτωση αυτή, αποστέλλει ένα πακέτο απάντησης διαδρομής στον X, το οποίο υποδεικνύει τη διαδρομή προς τον Y. Διαφορετικά, προωθεί το πακέτο αίτησης διαδρομής στους δικούς του περιφερειακούς κόμβους.

Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος S στο σχήμα 2.17 πρέπει να αποστείλει ένα πακέτο στον X. Αρχικά, ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης, που παρέχεται από το IARP, προκειμένου να διαπιστώσει αν ο κόμβος αυτός βρίσκεται μέσα στη ζώνη δρομολόγησης του. Επειδή δε βρίσκεται, προωθεί ένα πακέτο αίτησης διαδρομής στους περιφερειακούς του κόμβους. Στο πακέτο αυτό ο κόμβος S επισυνάπτει την IP διεύθυνση του. Οι κόμβοι G-J εξετάζουν με τη σειρά τους, αν διαθέτουν κάποια διαδρομή προς τον X στον πίνακα δρομολόγησης τους. Ωστόσο, κανένας από αυτούς δε διαθέτει. Έτσι μεταδίδουν και οι ίδιοι το πακέτο αίτησης διαδρομής στους περιφερειακούς τους κόμβους, αφού πρώτα επισυνάψουν την IP διεύθυνση τους σε αυτό. Συγκεκριμένα, ο κόμβος I προωθεί την αίτηση διαδρομής στους κόμβους Q, R και T. Ο κόμβος T, αφού λάβει την αίτηση αυτή, διαπιστώνει ότι ο X βρίσκεται εντός της ζώνης δρομολόγησης του. Συνεπώς γνωρίζει μια διαδρομή προς αυτόν. Τη διαδρομή αυτή την προσαρτά σε εκείνη που περιέχεται στο πακέτο αίτησης διαδρομής. Έτσι, σχηματίζεται η πλήρης διαδρομή από τον κόμβο S στον κόμβο X, την οποία ο T συμπεριλαμβάνει στο πακέτο απάντησης διαδρομής που αποστέλλει στον S. Ο κόμβος T μπορεί να χρησιμοποιήσει τη διαδρομή που προκύπτει αντιστρέφοντας την ακολουθία IP διευθύνσεων που περιλαμβάνει το πακέτο αίτησης διαδρομής προκειμένου να αποστείλει στον S το πακέτο απάντησης διαδρομής.

Παρατηρώντας το δίκτυο του σχήματος 2.17, διαπιστώνουμε ότι οι ζώνες δρομολόγησης των κόμβων S και I επικαλύπτονται (σχήμα 2.18). Για παράδειγμα, οι κόμβοι F και D είναι εσωτερικοί κόμβοι του S αλλά και περιφερειακοί του I. Έτσι, όταν ο κόμβος I μεταδίδει την παραπάνω αίτηση διαδρομής στους περιφερειακούς του κόμβους, αυτή εισέρχεται στη ζώνη δρομολόγησης του S. Η ζώνη αυτή ωστόσο έχει ήδη καλυφθεί κατά την προώθηση της αίτησης διαδρομής από τον S στους περιφερειακούς του κόμβους. Οι αιτήσεις διαδρομής που επιστρέφουν σε καλυμμένες ζώνες είναι περιττές και έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υπερβολικής συμφόρησης. Μάλιστα, η συμφόρηση αυτή είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα προέκυπτε, αν χρησιμοποιούνταν η τεχνική του κατακλυσμού αντί της εκπομπής συνοριακών κόμβων. Προκειμένου να λύσει το πρόβλημα αυτό, το πρωτόκολλο ZRP χρησιμοποιεί μηχανισμούς ελέγχου των

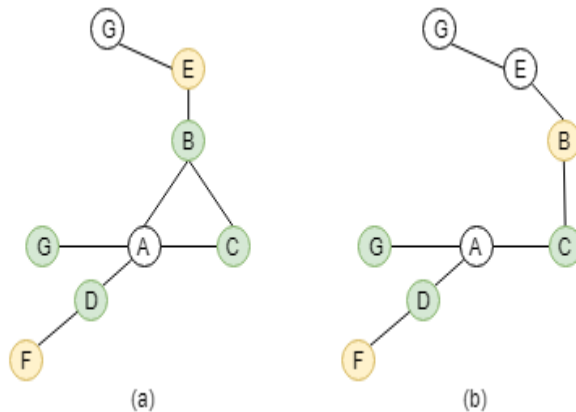
αιτήσεων. Οι μηχανισμοί αυτοί κατευθύνουν τις αιτήσεις διαδρομών μακριά από ήδη καλυμμένες περιοχές του δικτύου και αποτρέπουν την παράδοση τους σε περιφερειακούς κόμβους που βρίσκονται σε τέτοιες περιοχές. Η ανίχνευση αίτησης, ο πρόωρος τερματισμός και η τυχαία καθυστέρηση προώθησης αίτησης είναι τέτοιοι μηχανισμοί.



Σχήμα 2.18: Επικάλυψη των ζωνών δρομολόγησης των κόμβων S και I.

Η απώλεια της σύνδεσης δυο γειτονικών κόμβων σε μια διαδρομή έχει ως αποτέλεσμα τη διακοπή της ροής των δεδομένων κατά μήκος της διαδρομής αυτής. Ένα reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης σημειώνει αμέσως ως μη έγκυρη κάθε διαδρομή που περιλαμβάνει τη σύνδεση αυτή και εκκινεί μια νέα διαδικασία εύρεσης (ή επιδιόρθωσης) διαδρομής προς τον εκάστοτε προορισμό. Μέχρις ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, κάθε εισερχόμενο πακέτο με παραλήπτη κάποιον από τους παραπάνω προορισμούς, είτε απορρίπτεται, είτε καθυστερείται. Αυτό ασφαλώς επιδρά αρνητικά στην απόδοση του πρωτοκόλλου. Επειδή η ζώνη δρομολόγησης παρέχει σε κάθε κόμβο πληροφορίες για την τοπολογία όχι μόνο της άμεσης αλλά και της ευρύτερης γειτονιάς του, πολλές απώλειες σύνδεσης στο πρωτόκολλο ZRP μπορούν να παρακαμφθούν αμέσως. Αν ο πρώην γειτονικός του κόμβος παραμένει εντός της ζώνης δρομολόγησης του, τα εισερχόμενα πακέτα μπορούν να παραδοθούν σε εκείνον μέσω μιας εναλλακτικής διαδρομής πολλαπλών αλμάτων (multihop path). Στο σχήμα 2.19.b, η μετακίνηση του κόμβου B έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της σύνδεσης του με τον κόμβο A. Ωστόσο, ο κόμβος B παραμένει εντός της ζώνης δρομολόγησης του A. Ο κόμβος A αξιοποιώντας τη γνώση της τοπολογίας της ζώνης δρομολόγησης του χρησιμοποιεί τη διαδρομή από τον ίδιο στον B μέσω του C

προκειμένου να παρακάμψει την παραπάνω απώλεια σύνδεσης.



Σχήμα 2.19: Απώλεια σύνδεσης των κόμβων A και B.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση, όπου δυο κόμβοι πλησιάζουν ο ένας τον άλλον με αποτέλεσμα την εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης μεταξύ τους. Κάθε διαδρομή, στην οποία μεταξύ τους παρεμβάλλεται μια ακολουθία κόμβων, μπορεί πλέον να γίνει πιο σύντομη. Για το λόγο αυτό κάθε κόμβος ελέγχει, αν για τη διαδρομή που φέρει ένα εισερχόμενο πακέτο (source routing) μπορεί να προκύψει κάποια συντόμευση μέσω της ζώνης δρομολόγησης του. Ουσιαστικά εξετάζοντας τη διαδρομή που υποδεικνύει το πακέτο ότι πρέπει να ακολουθήσει (source route), ένας κόμβος προσδιορίζει τον πλησιέστερο κόμβο στον προορισμό, ο οποίος αποτελεί γείτονα του. Σε αρκετές περιπτώσεις ένα ολόκληρο τμήμα της διαδρομής (μια ακολουθία κόμβων) μπορεί να αντικατασταθεί από μόνο έναν κόμβο. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι κατά την προώθηση ενός πακέτου οι κόμβοι μπορούν να λάβουν οι ίδιοι αποφάσεις, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η βέλτιστη διαδρομή προς τον εκάστοτε προορισμό.

Σε κάθε περίπτωση, όταν το πρωτόκολλο IARP ανιχνεύει μια αλλαγή στην τοπολογία της ζώνης δρομολόγησης ενός κόμβου, ειδοποιεί το πρωτόκολλο IERP. Για κάθε IERP διαδρομή που επηρεάζεται από τη συγκεκριμένη αλλαγή, προσδιορίζεται μια νέα εναλλακτική διαδρομή μέσω της ζώνης δρομολόγησης του κόμβου. Η διαδρομή αυτή ελαχιστοποιεί την απόσταση από τον εκάστοτε προορισμό. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται οι απώλειες σύνδεσης και εξασφαλίζεται η χρήση βέλτιστων διαδρομών από τους κόμβους.

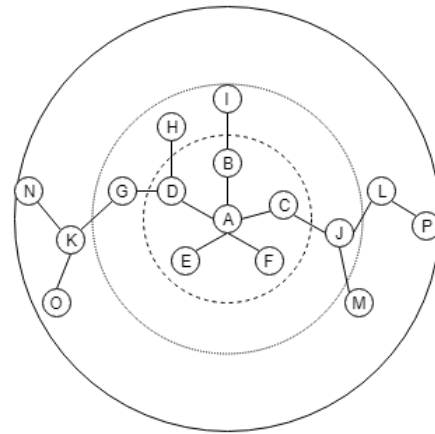
2.2.3.2 FSR

Στο πρωτόκολλο FSR (Fisheye State Routing) κάθε κόμβος διατηρεί μια λίστα με τους γειτονικούς του κόμβους. Μια εγγραφή στη λίστα του κόμβου i περιέχει το αναγνωριστικό κάθε γειτονικού του κόμβου, καθώς και τη χρονική στιγμή στην οποία έλαβε το τελευταίο μήνυμα από αυτόν. Εκτός από τη λίστα αυτή κάθε κόμβος διατηρεί επίσης έναν πίνακα τοπολογίας και έναν πίνακα δρομολόγησης. Στον πίνακα τοπολογίας του κόμβου i αποθηκεύεται πληροφορία, η οποία αποκτάται μέσω των link state μηνυμάτων που λαμβάνει ο i από τους γειτονικούς του κόμβους. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε κόμβο j μέσα στο δίκτυο ο i διατηρεί στον πίνακα αυτόν μια εγγραφή, η οποία περιλαμβάνει μια λίστα με τους γειτονικούς κόμβους του j . Η εγγραφή αυτή φέρει επίσης τον αριθμό ακολουθίας του j , καθώς και τη χρονική στιγμή στην οποία πραγματοποιήθηκε η τελευταία ενημέρωσή της. Με βάση την πληροφορία που αποθηκεύεται στον πίνακα τοπολογίας του, ο i κατασκευάζει τον πίνακα δρομολόγησης του. Κάθε εγγραφή στον πίνακα αυτόν περιέχει το αναγνωριστικό ενός κόμβου προορισμού j , την απόσταση του i από τον j αλλά και το αναγνωριστικό του γειτονικού κόμβου του i (next hop) στον οποίο αυτός πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο που προορίζεται για τον j .

Η ονομασία του πρωτοκόλλου προέρχεται από την τεχνική fisheye, η οποία προτάθηκε από τους Kleinrock και Stevens με σκοπό τη μείωση του μεγέθους της πληροφορίας που απαιτείται για την αναπαράσταση γραφικών δεδομένων. Το μάτι του ψαριού συλλαμβάνει με υψηλή λεπτομέρεια τα εικονοστοιχεία κοντά στο σημείο εστίασης. Ωστόσο, η λεπτομέρεια μειώνεται, καθώς αυξάνεται η απόσταση από το σημείο εστίασης. Η παρατήρηση αυτή συνδέεται με το εξεταζόμενο πρωτόκολλο, υπό την έννοια ότι, όσο πιο κοντά βρίσκεται ένας κόμβος στον κόμβο i , τόσο πιο ακριβείς και έγκυρες είναι οι πληροφορίες δρομολόγησης που διατηρεί ο i για τον ίδιο. Έτσι, οι πληροφορίες στον πίνακα δρομολόγησης του i δεν είναι τόσο ακριβείς για τους κόμβους που απέχουν μεγάλη απόσταση από αυτόν.

Στο κινητό ασύρματο δίκτυο του σχήματος 2.20 κάθε ένας από τους τρεις κύκλους συμβολίζει ένα πεδίο (fisheye scope), το οποίο ορίζεται σε σχέση με τον κόμβο A . Κάθε πεδίο αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων, το οποίο απέχει συγκεκριμένη απόσταση από τον A . Τα τρία πεδία του σχήματος περικλείουν αντίστοιχα τους κόμβους που απέχουν ένα, δυο ή περισσότερα άλματα από τον κόμβο A .

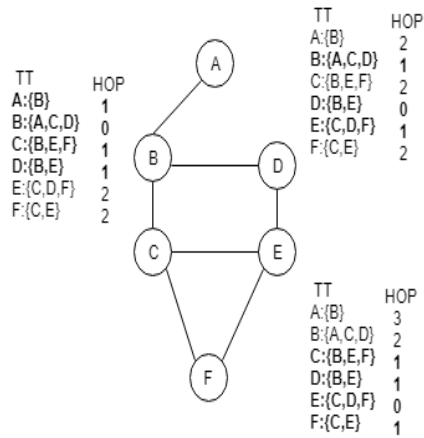
Στο πρωτόκολλο FSR κάθε κόμβος μεταδίδει περιοδικά link state μηνύματα στους γειτονικούς του κόμβους. Τα μηνύματα αυτά περιέχουν εγγραφές του πίνακα τοπολογίας του, οι οποίες είτε δημιουργήθηκαν είτε ανανεώθηκαν πρόσφατα. Κάθε τέτοια εγγραφή έχει ενεργοποιημένο ένα σήμα `need_to_send`,



Σχήμα 2.20: Τα fisheye πεδία (fisheye scopes) του κόμβου A

το οποίο φανερώνει στον εκάστοτε κόμβο ότι πρέπει να τη συμπεριλάβει σε ένα link state μήνυμα. Προτού ο κόμβος i μεταδώσει στους γείτονες του ένα link state μήνυμα, το οποίο περιέχει μια εγγραφή που αντιστοιχεί στον κόμβο j , αυξάνει τον αριθμό ακολουθίας του j στην εγγραφή αυτή. Μετά την αποστολή του μηνύματος αυτού ο κόμβος i απενεργοποιεί το σήμα `need_to_send` στη συγκεκριμένη εγγραφή. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του FSR είναι ότι κάθε κόμβος χρησιμοποιεί διαφορετικές περιόδους για τη μετάδοση των εγγραφών αυτών ανάλογα με την απόσταση του κόμβου, στον οποίο αντιστοιχεί η εγγραφή από τον ίδιο. Με άλλα λόγια, η συχνότητα μετάδοσης των εγγραφών του πίνακα τοπολογίας του i καθορίζεται από το πεδίο (fisheye scope) στο οποίο ανήκει ο κόμβος που αναφέρεται η εγγραφή. Με τη μεγαλύτερη συχνότητα ο i μεταδίδει τις εγγραφές που αντιστοιχούν στους πλησιέστερους κόμβους του. Η τεχνική αυτή αποσκοπεί στη μείωση του μεγέθους των link state μηνυμάτων και συνολικά του απαιτούμενου φορτίου (routing update overhead) για την εύρεση και τη διατήρηση διαδρομών, δίχως να επηρεάζεται σημαντικά η ποιότητα της δρομολόγησης.

Όταν ο κόμβος j λαμβάνει ένα link state μήνυμα από τον i , ελέγχει αν αυτός βρίσκεται στη λίστα των γειτονικών του κόμβων. Αν πράγματι υπάρχει μια εγγραφή για τον i στη συγκεκριμένη λίστα, τότε ο j ενημερώνει τη χρονική στιγμή στην οποία έλαβε το τελευταίο μήνυμα από αυτόν. Διαφορετικά, ο j έχει ανιχνεύσει ένα νέο γειτονικό κόμβο. Δημιουργεί λοιπόν μια εγγραφή για τον i στη λίστα του. Στη συνέχεια, ο κόμβος j επεξεργάζεται την πληροφορία που περιέχει το link state μήνυμα. Ας θεωρήσουμε ότι η n -οστή εγγραφή που φέρει



Σχήμα 2.21: Μείωση του μεγέθους των link state μηνυμάτων με χρήση της τεχνικής fisheye.

το μήνυμα αναφέρεται στον κόμβο k . Ο κόμβος i ελέγχει αν υπάρχει εγγραφή για τον k στον πίνακα τοπολογίας του. Σε περίπτωση που υπάρχει, συγκρίνει τον αριθμό ακολουθίας του k στην εγγραφή αυτή με τον αριθμό ακολουθίας του ίδιου κόμβου στην εγγραφή του link state μηνύματος. Αν ο τελευταίος είναι μεγαλύτερος, ο i ενημερώνει τον πίνακα τοπολογίας του για τον k με την πληροφορία που φέρει το link state μήνυμα. Σε αντίθετη περίπτωση, η πληροφορία που περιέχει το συγκεκριμένο μήνυμα για τον k είναι παλαιότερη από εκείνη που διαθέτει ο i , οπότε αυτός δε χρειάζεται να ενημερώσει τον πίνακα τοπολογίας του. Αν ο i δεν έχει καθόλου γνώση των γειτονικών κόμβων του k , τότε δημιουργεί μια εγγραφή για τον ίδιο στον πίνακα τοπολογίας του. Η εγγραφή αυτή συμπληρώνεται με την πληροφορία που φέρει το link state μήνυμα για τον k . Σε κάθε μια από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, ο κόμβος i πρέπει να συμπεριλάβει σε ένα link state μήνυμα την εγγραφή για τον k που διαθέτει στον πίνακα τοπολογίας του. Ενεργοποιεί λοιπόν το σήμα `need_to_send` στη συγκεκριμένη εγγραφή.

Ο κόμβος i , αν δε λάβει ένα link state μήνυμα από τον γειτονικό του κόμβο j για κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, θεωρεί ότι η σύνδεση του με τον j έχει χαθεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο i διαγράφει τον j από τη λίστα με τους γειτονικούς του κόμβους, ενώ τον αφαιρεί και από την εγγραφή του στον πίνακα τοπολογίας του.

Όπως έχει αναφερθεί, ο πίνακας δρομολόγησης του κόμβου i κατασκευάζεται με βάση την πληροφορία που του παρέχει ο πίνακα τοπολογίας του. Κάθε

φορά που ανανεώνεται το περιεχόμενο αυτού, ο κόμβος i υπολογίζει εκ νέου τον πίνακα δρομολόγησης του. Επί της ουσίας, ο στόχος είναι η δημιουργία ενός δέντρου συντομότερης διαδρομής (shortest path tree) με ρίζα τον κόμβο i . Για την κατασκευή του δέντρου αυτού θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Dijkstra, αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε άλλος αλγόριθμος εύρεσης συντομότερης διαδρομής. Προτού όμως προχωρήσουμε με τον αλγόριθμο αυτό, θα εξετάσουμε τη βοηθητική συνάρτηση $weight(x, y)$. Η συγκεκριμένη συνάρτηση υπολογίζει το κόστος της σύνδεσης του κόμβου x με τον κόμβο y . Επειδή ως μετρική κόστους χρησιμοποιείται η απόσταση, δηλαδή το πλήθος των αλμάτων (hops) που μεσολαβούν μεταξύ δυο κόμβων, η συνάρτηση αυτή επιστρέφει 1, όταν υπάρχει απευθείας σύνδεση του κόμβου x με τον y και ∞ σε αντίθετη περίπτωση. Στον αλγόριθμο Dijkstra, ο κόμβος i διατηρεί μια λίστα P με το σύνολο των κόμβων, για τους οποίους έχει ανακαλύψει την πιο σύντομη διαδρομή. Η λίστα αυτή αρχικά περιέχει μόνο τον i . Ο αλγόριθμος εκτελείται επαναληπτικά μέχρις ότου $P = V$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων του δικτύου. Σε κάθε επανάληψη ο i αναζητά έναν κόμβο j , ο οποίος ελαχιστοποιεί την ποσότητα $D_i(k) + weight(k, j)$, όπου $j \in V - P$, $k \in TT_i$ και $weight(k, j) \neq \infty$. Με $D_i(k)$ συμβολίζεται η απόσταση του κόμβου i από τον k , ενώ με TT_i ο πίνακας τοπολογίας του i . Όταν βρεθεί ο j , τότε καταχωρείται στη λίστα P . Η απόσταση του i από τον j θα είναι $D_i(k) + weight(k, j)$, ενώ ο επόμενος κόμβος από αυτόν στη διαδρομή προς τον j θα είναι ο ίδιος με εκείνον στη διαδρομή προς τον k .

Chapter 3

Προηγούμενες Εργασίες

Στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνονται ορισμένες σημαντικές ερευνητικές εργασίες (papers), οι οποίες αξιολογούν την απόδοση ορισμένων βασικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα κινητά ad hoc δίκτυα. Σε όλες τις εργασίες η αξιολόγηση αυτή στηρίζεται σε προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους συγγραφείς με τη χρήση κάποιου από τους γνωστούς προσομοιωτές δικτύων. Στο πλαίσιο αυτών των εργασιών εξετάζονται διάφορες μετρικές απόδοσης για τα εκάστοτε πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία δοκιμάζονται σε ποικίλα σενάρια δικτύων. Κάθε paper στο κεφάλαιο αυτό αναφέρεται με τον αριθμό της στις παραπομπές (βιβλιογραφία). Διευκρινίζεται ότι για κάθε μια από αυτές αναφέρονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και οι βασικές παρατηρήσεις των συγγραφέων, συνεπώς περισσότερες λεπτομέρειες για σχεδιαστικά ζητήματα και ζητήματα υλοποίησης θα πρέπει να αναζητούνται στις ίδιες. Όλες οι εργασίες κρίθηκαν σημαντικές στην κατανόηση των αλγορίθμων δρομολόγησης, στον εντοπισμό των μεταξύ τους διαφορών καθώς και στην ανάδειξη των θετικών και αρνητικών χαρακτηριστικών τους.

3.1 AODV vs DSR

Στο [1] αναλύεται και συγκρίνεται η απόδοση δυο δημοφιλών πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα κινητά ad hoc δίκτυα, του DSR και του AODV. Τα δυο αυτά πρωτόκολλα, αν και μοιράζονται αρκετά κοινά χαρακτηριστικά, αφού ανήκουν στα reactive (ή on demand) πρωτόκολλα δρομολόγησης, εμφανίζουν σύμφωνα με τα πειράματα που πραγματοποίησαν οι συγγραφείς αρκετές διαφορές στην απόδοσή τους. Με τη χρήση του προσομοιωτή δικτύου ns-2 εξετάζεται για κάθε πρωτόκολλο το ποσοστό παράδοσης πακέτων, η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, το φορτίο δρομολόγησης και το φορτίο MAC σε δυο διαφορετικά

δίκτυα. Το πρώτο δίκτυο είναι διαστάσεων $1500m \times 300m$ και αποτελείται από 50 κόμβους, ενώ το δεύτερο είναι διαστάσεων $2200m \times 600m$ και αποτελείται από 100 κόμβους. Το μοντέλο κίνησης που επιλέχθηκε είναι το random waypoint model. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος των παραπάνω δικτύων κινείται προς ένα συγκεκριμένο προορισμό με μια τυχαία ταχύτητα. Όταν φτάσει στον προορισμό αυτό, μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα (pause time) μέχρις ότου ξεκινήσει να κινείται προς κάποιο νέο προορισμό.

Όσον αφορά το πρώτο δίκτυο, οι συγγραφείς αυξάνοντας κάθε φορά το χρονικό διάστημα παύσης (άρα μειώνοντας την κινητικότητα των κόμβων) εξετάζουν την απόδοση των πρωτοκόλλων DSR και AODV, όταν το πλήθος των κόμβων πηγών είναι 10, 20, 30 και 40. Σημειώνεται ότι στις τρεις πρώτες περιπτώσεις ο ρυθμός μετάδοσης των πακέτων είναι 4 πακέτα/sec, ενώ στην τελευταία περίπτωση είναι 3 πακέτα/sec. Όπως παρατήρησαν, το ποσοστό παράδοσης πακέτων είναι παρόμοιο για τα δυο εξεταζόμενα πρωτόκολλα, όταν το πλήθος των κόμβων πηγών είναι 10 και 20. Όταν το πλήθος των κόμβων που μεταδίδουν πακέτα είναι 30 και 40, το πρωτόκολλο AODV αποδίδει καλύτερα, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι υψηλή. Το DSR αντίθετα επιτυγχάνει μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων από το AODV σε συνθήκες χαμηλής κινητικότητας.

Όσον αφορά τη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο η απόδοση των δυο πρωτοκόλλων επίσης δεν εμφανίζει διαφορές, όταν το πλήθος των κόμβων πηγών είναι 10 και 20. Ωστόσο, όταν το πλήθος αυτό αυξάνεται στους 30 και 40 κόμβους το AODV εξασφαλίζει μικρότερη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (περίπου 25%) σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας. Το DSR από την άλλη εγγυάται περίπου 30-40% μικρότερη καθυστέρηση από το AODV, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή.

Το φορτίο δρομολόγησης σε κάθε περίπτωση είναι μικρότερο στο πρωτόκολλο DSR απ' ό,τι στο AODV, περίπου δυο με τρεις φορές, με τον παράγοντα αυτόν να αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων πηγών. Αντίθετα, το πρωτόκολλο AODV έχει παρόμοιο ή ελαφρώς μικρότερο φορτίο MAC από το DSR, όταν το χρονικό διάστημα παύσης είναι μικρό. Καθώς το χρονικό διάστημα αυτό αυξάνεται, το φορτίο MAC γίνεται μικρότερο στο πρωτόκολλο DSR. Σημειώνεται ότι με τη μείωση της κινητικότητας των κόμβων το φορτίο MAC παραμένει σχεδόν σταθερό στο AODV, σε αντίθεση με το DSR, όπου μειώνεται σημαντικά. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής, όταν το πλήθος των κόμβων πηγών είναι μεγάλο.

Στο δεύτερο δίκτυο που εξετάζεται στο [1] παραλείπεται η περίπτωση στην οποία το πλήθος των κόμβων πηγών είναι 30. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδουν οι πηγές ορίζεται να είναι 4 πακέτα/sec, όταν το πλήθος τους είναι 10 και 20, ενώ στην περίπτωση των 40 πηγών ο ρυθμός αυτός μειώνεται σε 2 πακέτα/sec.

Τα πρωτόκολλα DSR και AODV επιτυγχάνουν παρόμοιο ποσοστό παράδοσης πακέτων, όταν το πλήθος των κόμβων που μεταδίδουν είναι μικρό (10 κόμβοι). Ωστόσο, καθώς το πλήθος αυτό αυξάνεται (20, 30 κόμβοι), η απόδοση του DSR υποβαθμίζεται σημαντικά σε σχέση με αυτή του AODV. Οι σημαντικότερες διαφορές στο ποσοστό των πακέτων που παραδίδει κάθε πρωτόκολλο εντοπίζονται σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας, όπου το AODV αποδίδει σαφώς καλύτερα. Το DSR επιτυγχάνει καλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων από το AODV μόνο όταν η κινητικότητα στο δίκτυο είναι πολύ χαμηλή.

Η απόδοση των δυο πρωτοκόλλων όσον αφορά τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές, όταν το πλήθος των πηγών είναι μικρό. Ωστόσο, η απόδοση του DSR μειώνεται και πάλι αισθητά σε σχέση με αυτή του AODV, όταν το πλήθος αυτό αυξάνεται. Το AODV σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας των κόμβων και ειδικά όταν το πλήθος των πηγών είναι μεγάλο (30 κόμβοι), εγγυάται αρκετά μικρότερη καθυστέρηση από το DSR. Καθώς μειώνεται η κινητικότητα των κόμβων, η απόδοση του DSR πλησιάζει αυτή του AODV. Όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι πλέον αρκετά μικρή, το DSR εξασφαλίζει μικρότερη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση από το AODV.

Όσον αφορά το φορτίο δρομολόγησης, η διάφορα στην απόδοση των δυο πρωτοκόλλων δεν είναι τόσο εμφανής στο δίκτυο των 100 κόμβων όσο ήταν σε αυτό των 50 κόμβων. Όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι υψηλή, το φορτίο δρομολόγησης στο AODV είναι περίπου διπλάσιο από αυτό στο DSR στις περιπτώσεις των 10 και 20 κόμβων πηγών και περίπου 15% υψηλότερο στην περίπτωση των 40 κόμβων πηγών. Και στα δυο πρωτόκολλα πάντως το φορτίο δρομολόγησης μειώνεται με την αύξηση του χρονικού διαστήματος παύσης (μείωση της κινητικότητας). Το φορτίο MAC στο πρωτόκολλο DSR, σε αντίθεση με όσα αναφέρθηκαν για το δίκτυο των 50 κόμβων, είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό στο AODV για όλες τις περιπτώσεις πλην αυτών στις οποίες το χρονικό διάστημα παύσης είναι αρκετά μεγάλο.

Συνοψίζοντας, όταν το πλήθος των κόμβων πηγών είναι μικρό, η απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης DSR και AODV σε σχέση με το ποσοστό παράδοσης πακέτων και την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση είναι παρόμοια, ανεξάρτητα από την κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο. Η αύξηση του πλήθους αυτού υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση του DSR σε σχέση με αυτή του AODV σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας των κόμβων. Καθώς μειώνεται η κινητικότητα, η απόδοση του DSR βελτιώνεται και σταδιακά ξεπερνά την απόδοση του AODV. Το φορτίο δρομολόγησης είναι πάντοτε μικρότερο στο πρωτόκολλο DSR. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι αιτήσεις διαδρομής έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο φορτίο δρομολόγησης στο πρωτόκολλο AODV, ενώ στο DSR την έχουν οι απαντήσεις διαδρομής. Επίσης σημειώνεται

ότι το φορτίο δρομολόγησης μετράται σε πακέτα και όχι σε bytes. Σε αντίθετη περίπτωση οι διαφορές μεταξύ των δυο πρωτοκόλλων όσον αφορά τη συγκεκριμένη μετρική θα ήταν αρκετά μικρότερες. Τέλος, το AODV εξασφαλίζει μικρότερο φορτίο MAC από το DSR σε όλες τις περιπτώσεις πλην αυτών στις οποίες η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή. Για τον υπολογισμό της μετρικής αυτής λαμβάνονται υπόψιν τόσο τα πακέτα δρομολόγησης όσο και τα πακέτα ελέγχου στο επίπεδο MAC. Λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τα πακέτα ελέγχου το AODV εξασφαλίζει πάντα μικρότερο φορτίο MAC από το DSR.

3.2 AODV vs DSR vs DSDV

Στο [2] εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους του πακέτου, της κινητικότητας των κόμβων του δικτύου αλλά και του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ των διαδοχικών μεταδόσεων στην απόδοση των πρωτοκόλλων DSDV, AODV και DSR. Οι μετρικές απόδοσης που αξιολογούνται είναι η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση, η ρυθμοαπόδοση, το ποσοστό παράδοσης πακέτων και το φορτίο δρομολόγησης. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται στον προσομοιωτή δικτύου ns-2 και καθεμία διαρκεί 10 sec. Σε ένα δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 25 κόμβους, ένας κόμβος πηγή μεταδίδει πακέτα σε κάποιον κόμβο προορισμό. Ο κόμβος προορισμός κινείται μέσα στο δίκτυο με αποτέλεσμα η διαδρομή από τον κόμβο πηγή προς αυτόν να αλλάζει.

Οι συγγραφείς [2] παρατήρησαν ότι, όταν το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των διαδοχικών μεταδόσεων από την πηγή είναι αρκετά μικρό (0,015 sec), το πρωτόκολλο AODV επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων, τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση και το μικρότερο φορτίο δρομολόγησης από τα άλλα δυο εξεταζόμενα πρωτόκολλα. Το πρωτόκολλο DSR, το οποίο εξασφαλίζει την μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, αποδίδει σαφώς καλύτερα από το πρωτόκολλο DSDV όσον αφορά τις παραπάνω μετρικές. Η αύξηση του παραπάνω χρονικού διαστήματος (0,15 sec) βελτιώνει σημαντικά το ποσοστό παράδοσης πακέτων στα πρωτόκολλα AODV και DSR και λιγότερο στο DSDV. Παρόλο που το συγκεκριμένο πρωτόκολλο επιτυγχάνει τη μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο υστερεί σημαντικά από τα άλλα δυο σε όλες τις υπόλοιπες μετρικές απόδοσης. Το ποσοστό παράδοσης πακέτων, όπως και η ρυθμοαπόδοση, εξακολουθούν να είναι βέλτιστα στο AODV, ωστόσο το DSR εξασφαλίζει μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο αλλά και μικρότερο φορτίο δρομολόγησης. Πάντως οι αποδόσεις των δυο πρωτοκόλλων είναι αρκετά κοντινές. Το DSR υπερτερεί των AODV και DSDV σε όλες τις εξεταζόμενες μετρικές απόδοσης, όταν το χρονικά διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των διαδοχικών μεταδόσεων αυξάνεται ακόμα περισσότερο (1.5 sec). Στη συγκε-

κριμένη περίπτωση, το φορτίο δρομολόγησης στο AODV είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα, ενώ και η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι σημαντική συγκριτικά με αυτή του DSDV και ιδίως του DSR. Το πρωτόκολλο DSDV εξακολουθεί να υστερεί στο ποσοστό παράδοσης πακέτων και στη ρυθμοαπόδοση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η απόδοση του DSDV δε μεταβάλλεται καθόλου, καθώς αυξάνεται το μέγεθος του πακέτου. Αντίθετα, η συγκεκριμένη αύξηση υποβαθμίζει την απόδοση των πρωτοκόλλων AODV και DSR, καθώς όπως αναφέρεται στο [2], συντελεί στην ελάττωση του ποσοστού παράδοσης πακέτων και της ρυθμοαπόδοσης αλλά και στην αύξηση του φορτίου δρομολόγησης. Μόνο η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο βελτιώνεται ελαφρώς με την αύξηση του μεγέθους του πακέτου. Όταν το μέγεθος αυτό είναι μικρό (100 bytes), το πρωτόκολλο AODV υπερτερεί του DSR σε όλες τις μετρικές απόδοσης πλην της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Η μετρική αυτή είναι καλύτερη στο πρωτόκολλο DSDV, το οποίο όμως υστερεί σημαντικά σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα στις υπόλοιπες μετρικές απόδοσης. Το πρωτόκολλο DSR παρουσιάζεται πιο αποδοτικό, όταν το μέγεθος του πακέτου αυξάνεται στα 500 bytes με μικρή ωστόσο διαφορά από το AODV. Το DSDV, αν και εξασφαλίζει την μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, εξακολουθεί να έχει πολύ χαμηλή απόδοση και σε αυτή την περίπτωση. Η περαιτέρω αύξηση στο μέγεθος του πακέτου (1 Kbyte) καθιστά το AODV το πρωτόκολλο με το μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων, τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση και το μικρότερο φορτίο δρομολόγησης από τα άλλα δυο εξεταζόμενα πρωτόκολλα. Ωστόσο, η μικρότερη καθυστέρηση σημειώνεται στο DSR. Στο DSDV, αν και η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο δεν είναι σημαντική, η απώλεια πακέτων είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα το πρωτόκολλο να αδυνατεί να πλησιάσει την απόδοση των AODV και DSR.

Καθώς η κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο αυξάνεται, τόσο το ποσοστό παράδοσης πακέτων όσο και η ρυθμοαπόδοση μειώνονται ελαφρώς σε όλα τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ακόμα, το φορτίο που απαιτείται για τη δρομολόγηση αυξάνεται με την αύξηση της κινητικότητας των κόμβων. Αντίθετα, η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο μειώνεται. Σε συνθήκες χαμηλής και μέτριας κινητικότητας η απόδοση των AODV και DSR σε σχέση με το ποσοστό παράδοσης πακέτων, τη ρυθμοαπόδοση και τη μέση καθυστέρηση είναι σχεδόν ίδια. Για την ακρίβεια, το AODV επιτυγχάνει ελαφρώς καλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων και ρυθμοαπόδοση, ενώ το DSR εξασφαλίζει ελάχιστα μικρότερη μέση καθυστέρηση. Όταν μάλιστα η κινητικότητα των κόμβων γίνεται ιδιαίτερα υψηλή, τα δυο αυτά πρωτόκολλα έχουν ακριβώς την ίδια απόδοση στις παραπάνω μετρικές. Το φορτίο δρομολόγησης στο AODV είναι αυτό που ξεχωρίζει το συγκεκριμένο πρωτόκολλο από το DSR μιας και σε κάθε

περίπτωση είναι μικρότερο. Το πρωτόκολλο DSDV υστερεί σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα σε όλες τις μετρικές απόδοσης που αξιολογούνται στο [2] για όλες τις συνθήκες κινητικότητας που εξετάζονται.

3.3 AODV vs DSR vs DSDV

Στο [3] οι συγγραφείς μέσω των προσομοιώσεων που πραγματοποίησαν στον προσομοιωτή δικτύου ns-2 επιχειρούν να αξιολογήσουν την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης DSDV, AODV και DSR τόσο σε τυχαία όσο και σε ρεαλιστικά σενάρια δικτύων.

Στην πρώτη περίπτωση, κάθε ένας από τους 50 κόμβους του δικτύου επιλέγει τυχαία ορισμένα σημεία σε έναν τετραγωνικό χώρο διαστάσεων $1km \times 1km$. Κάθε φορά που φθάνει σε ένα τέτοιο σημείο, αφού πρώτα παρέλθει ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα παύσης, ξεκινά να κινείται προς το επόμενο με μια ταχύτητα V ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, \dots, V_{max}]$. Σε αντίθεση με άλλες εργασίες, όπου η κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο μετράται με βάση τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος παύσης, στη συγκεκριμένη εκφράζεται ως η μέση σχετική ταχύτητα μεταξύ όλων των κόμβων του δικτύου. Όπως γίνεται αντιληπτό, αυτή εξαρτάται από το μέγεθος της V_{max} . Οι συγγραφείς εκτελούν δυο σετ προσομοιώσεων. Στο πρώτο εξετάζεται για κάθε πρωτόκολλο η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, η ρυθμοαπόδοση και το overhead τόσο σε πακέτα ελέγχου όσο και σε bytes, όταν η κινητικότητα στο δίκτυο μεταβάλλεται και το offered load παραμένει σταθερό, ενώ στο δεύτερο εξετάζονται οι ίδιες μετρικές καθώς μεταβάλλεται τόσο η κινητικότητα όσο και το offered load. Σε όλες τις προσομοιώσεις, 15 κόμβοι πηγές (CBR sources) μεταδίδουν πακέτα σε ορισμένους κόμβους προορισμούς μέσα στο δίκτυο, οι οποίοι επιλέγονται με τυχαίο τρόπο. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 5 πακέτα/sec στο πρώτο σετ, ενώ στο δεύτερο κυμαίνεται από 5-20 πακέτα/sec. Το μέγεθος του πακέτου είναι 64 bytes.

Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι η αύξηση της κινητικότητας στο δίκτυο επιφέρει την αύξηση της μέσης καθυστέρησης από άκρο σε άκρο σε όλα τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ωστόσο, τη μεγαλύτερη επίδραση την έχει στο πρωτόκολλο AODV, το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση για τις υψηλές τιμές της κινητικότητας. Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο [3], το DSR εξασφαλίζει μικρότερη μέση καθυστέρηση από το AODV, όταν η κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο είναι υψηλή χάρη στον τρόπο με τον οποίο το συγκεκριμένο πρωτόκολλο ανιχνεύει διαδρομές. Συγκεκριμένα, η διαδικασία εύρεσης διαδρομής στο DSR επιτρέπει την ανίχνευση και αποθήκευση περισσότερων διαδρομών σε σχέση με το AODV, στο οποίο ανιχνεύεται μια

διαδρομή για κάθε πακέτο αίτησης διαδρομής. Το DSDV, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή, εγγυάται σχεδόν την ίδια μέση καθυστέρηση με το DSR, ωστόσο καθώς αυτή αυξάνεται η μέση καθυστέρηση στο DSDV γίνεται μικρότερη από αυτή στο DSR.

Η ρυθμοαπόδοση στα πρωτόκολλα AODV και DSR μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η κινητικότητα. Το AODV πάντως επιτυγχάνει λίγο καλύτερη ρυθμοαπόδοση από το DSR όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι υψηλή. Αντίθετα, στο DSDV η αύξηση της κινητικότητας έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση στη ρυθμοαπόδοση. Όταν η κινητικότητα είναι αρκετά υψηλή, η ρυθμοαπόδοση μειώνεται έως και 40%. Το γεγονός αυτό αποδίδεται από τους συγγραφείς στη δυσκολία εύρεσης διαδρομών που αντιμετωπίζει το πρωτόκολλο σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας.

Όπως αναμενόταν, η αύξηση της κινητικότητας των κόμβων στο δίκτυο επιφέρει την αύξηση του packet overhead τόσο στο πρωτόκολλο AODV όσο και στο DSR. Το ίδιο όμως δεν ισχύει και στην περίπτωση του DSDV, όπου η συγκεκριμένη μετρική ανεξάρτητα της κινητικότητας παραμένει σταθερή. Όπως αναφέρεται στο [3], το γεγονός αυτό φανερώνει την αδυναμία του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου να προσαρμοστεί στην αύξηση της κινητικότητας. Τα πρωτόκολλα AODV και DSR από την άλλη ανιχνεύουν τις απώλειες συνδέσεων στις οποίες αυτή συντελεί και προσπαθούν να τις αντιμετωπίσουν, με αποτέλεσμα την αύξηση του πλήθους των πακέτων ελέγχου. Το DSR πάντως σημειώνει μικρότερο packet overhead από το AODV, κάτι που αποδίδεται στα πακέτα HELLO που μεταδίδει περιοδικά το τελευταίο. Ωστόσο, το AODV εγγυάται μικρότερο byte overhead από το DSR φανερώνοντας έτσι την επίδραση που έχει το source routing στη μετρική αυτή. Το πρωτόκολλο DSDV έχει το υψηλότερο byte overhead, καθώς οι ενημερώσεις συχνά φέρουν ολόκληρο το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης. Αυτό συναντάται, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι υψηλή και σε κάθε ενημέρωση πρέπει να ενημερωθούν πολλές διαδρομές.

Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης πακέτων από τους κόμβους του δικτύου επιφέρει την αύξηση της μέσης καθυστέρησης για όλα τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα. Σύμφωνα με τους συγγραφείς αυτό οφείλεται στο ότι πλέον στοιβάζονται περισσότερα πακέτα προς μετάδοση στους buffers. Το AODV παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα, όταν η κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο είναι υψηλή. Η απόδοση του πάντως σε σχέση με τη συγκεκριμένη μετρική δε διαφέρει σημαντικά από αυτή του DSR για μικρές τιμές της κινητικότητας. Η αδυναμία του DSDV να προσαρμοστεί στην υψηλή κινητικότητα των κόμβων του δικτύου γίνεται όλο και πιο έμφανη με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα, οι συγγραφείς αναφέρουν τη σημαντική αύξηση που σημειώνει η μέση καθυστέρηση

ση σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας, όταν ο ρυθμός μετάδοσης μεταβάλλεται από 5 πακέτα/sec σε 10 πακέτα/sec. Αυτό που προκαλεί ωστόσο το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι ότι, όταν ο ρυθμός μετάδοσης είναι ιδιαίτερα υψηλός (20 πακέτα/sec), η μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση σε όλα τα πρωτόκολλα σημειώνεται, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή. Η ερμηνεία που δίνεται στο γεγονός αυτό είναι η εξής : όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι μικρή, οι αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου είναι περιορισμένες, συνεπώς οι διαδρομές που αποθηκεύονται στους κόμβους έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, αυξημένη κίνηση να μεταδίδεται μέσω των ίδιων διαδρομών για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι σχηματίζονται μεγάλες ουρές στους κόμβους που συντελούν στην αύξηση της καθυστέρησης. Από την άλλη πλευρά, σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας σχηματίζονται διαρκώς νέες διαδρομές, με συνέπεια η κίνηση να κατανέμεται σε μεγαλύτερο πλήθος κόμβων και οι καθυστερήσεις να είναι μικρότερες.

Σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης το πρωτόκολλο DSDV παρουσιάζει τη μικρότερη ρυθμοαπόδοση, καθώς αυξάνεται η κινητικότητα των κόμβων. Αυτό αποδίδεται από τους συγγραφείς στις απώλειες πακέτων κατά μήκος των μη επικαιροποιημένων διαδρομών. Το DSR με την αύξηση της κινητικότητας επίσης σημειώνει σημαντική μείωση στη ρυθμοαπόδοση στους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ενώ το AODV στις ίδιες συνθήκες εξασφαλίζει τη μικρότερη απώλεια πακέτων και επομένως τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση. Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης πακέτων οδηγεί σε σημαντική αύξηση του byte overhead. Η μετρική αυτή λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή, καθώς το πλήθος των πακέτων που παραδίδονται στους κόμβους προορισμούς είναι μεγάλο και κάθε πακέτο περιέχει την πλήρη διαδρομή που πρόκειται να ακολουθήσει (source routing). Το byte overhead μειώνεται, όταν η κινητικότητα είναι μέτρια, καθώς η ρυθμοαπόδοση υφίσταται μείωση, ενώ αυξάνεται εκ νέου σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας, αφού απαιτούνται περισσότερα πακέτα ελέγχου για την εύρεση διαδρομών.

Οι συγγραφείς επιδιώκοντας να δώσουν έναν πιο ρεαλιστικό χαρακτήρα στα πειράματα τους εξετάζουν τρία διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης.

Το πρώτο σενάριο μοντελοποιεί μια σύσχεψη (ένα σεμινάριο ή κάποια παρόμοια δραστηριότητα), στην οποία συμμετέχουν 50 άτομα. Δυο άτομα από αυτά (CBR sources) μεταδίδουν με ρυθμό 4 packets/sec σε έξι παραλήπτες. Στο συγκεκριμένο σενάριο μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαφορετικές ζώνες. Η πρώτη ζώνη είναι αυτή του ομιλητή, ο οποίος κινείται αμφίπλευρα με αποτέλεσμα να αλλάζει συχνά ο πλησιέστερος γείτονας του στο κοινό. Η δεύτερη είναι η ζώνη του κοινού, στην οποία τα άτομα είναι περισσότερο στατικά, ενώ η τρίτη ζώνη είναι αυτή της εισόδου, όπου άτομα εκτός της αίθουσας προσπαθούν να αποφασίσουν, αν θα συμμετέχουν ή όχι στο σεμινάριο. Στο συγκεκριμένο

σενάριο η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα οι διαδρομές που αποθηκεύονται στους κόμβους να έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, το μήκος τους είναι κατά κύριο λόγο μεγάλο, ενώ η κίνηση, όπως είναι φυσικό, είναι συγκεντρωμένη στον ομιλητή. Τα πρωτόκολλα AODV και DSR αποδίδουν αρκετά καλά στο εξεταζόμενο σενάριο επιτυγχάνοντας πολύ υψηλό ποσοστό παράδοσης πακέτων και ρυθμοαπόδοση. Το DSR εξασφαλίζει καλύτερη μέση καθυστέρηση και σημαντικά μικρότερο packet overhead από το AODV, ενώ το χαμηλό φορτίο του δικτύου δεν αποκαλύπτει το μειονέκτημα του σε σχέση με το byte overhead. Το πρωτόκολλο DSDV, αν και η κινητικότητα των κόμβων είναι χαμηλή, συνολικά δεν μπορεί να πλησιάσει την απόδοση των δυο άλλων πρωτοκόλλων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που εντοπίζεται στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι η σημαντική απώλεια πακέτων που παρουσιάζει.

Το δεύτερο σενάριο μοντελοποιεί την κάλυψη μιας εκδήλωσης από μια ομάδα 50 ατόμων (π.χ την κάλυψη ενός αθλητικού ή πολιτικού γεγονότος από μια ομάδα ρεπόρτερ). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, 9 άτομα (CBR sources) μεταδίδουν με ρυθμό 4 packets/sec σε 45 παραλήπτες. Καθώς οι κόμβοι κινούνται στο δίκτυο, σχηματίζονται συστάδες που αποτελούνται από περίπου 10 κόμβους. Η τοπολογία του δικτύου στο σενάριο αυτό αλλάζει συχνά, καθώς η κινητικότητα των κόμβων είναι υψηλή. Οι διαδρομές που αποθηκεύονται στους κόμβους έχουν σχετικά μικρό μήκος, ενώ η κίνηση απλώνεται σε όλο το δίκτυο προκειμένου να αποφευχθεί η συμφόρηση σε αυτούς. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι και τα τρία εξεταζόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης επιτυγχάνουν υψηλή ρυθμοαπόδοση στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης. Το DSR επιτυγχάνει πάντως την υψηλότερη με μικρή ωστόσο διαφορά από το AODV. Από την άλλη πλευρά, το AODV εξασφαλίζει τη μικρότερη μέση καθυστέρηση. Κατά τη μετάδοση ενός πακέτου εντός μιας συστάδας, ο αποστολέας και ο παραλήπτης είναι συχνά γειτονικοί κόμβοι. Στο πρωτόκολλο AODV, ο μηχανισμός των μηνυμάτων HELLO εξασφαλίζει για κάθε κόμβο την a-priori γνώση των γειτονικών του κόμβων. Επομένως, στην προαναφερθείσα περίπτωση αποφεύγεται η καθυστέρηση που επιβάλλει η διαδικασία εύρεσης διαδρομής. Το μειονέκτημα του DSR σε σχέση με το byte overhead δε γίνεται ορατό ούτε σε αυτή την περίπτωση, καθώς όπως υποστηρίζουν οι συγγραφείς το μήκος των διαδρομών είναι αρκετά μικρό. Στο πρωτόκολλο DSDV σε οποιαδήποτε αλλαγή της τοπολογίας ενημερώνονται όλοι οι κόμβοι του δικτύου. Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης οι αλλαγές στην τοπολογία είναι συχνές με συνέπεια το DSDV να παρουσιάζει μεγάλο packet overhead και byte overhead. Ωστόσο, το πρωτόκολλο αυτό εξασφαλίζει υψηλή ρυθμοαπόδοση και μικρή μέση καθυστέρηση, καθώς το φορτίο (offered traffic load) του δικτύου είναι χαμηλό.

Το τρίτο σενάριο προσομοίωσης αναπαριστά μια επιχείρηση διάσωσης σε μια περιοχή που έχει υποστεί φυσική καταστροφή. Στην περιοχή επιχειρούν 3

ομάδες διάσωσης και δυο οχήματα (αυτοκίνητα,ελικόπτερα,κλπ). Η επικοινωνία μεταξύ των τριών ομάδων πραγματοποιείται μόνο μέσω των δυο οχημάτων. Τα οχήματα κινούνται μπρος πίσω με ταχύτητα 20 m/s, ενώ τα άτομα κινούνται τυχαία εντός της ομάδας με ταχύτητα 1 m/s . Στην περίπτωση αυτή 38 κόμβοι μεταδίδουν με ρυθμό 4 packets/sec σε 87 παραλήπτες. Το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνει ποικίλες κινητικότητες (το 95% των κόμβων έχουν χαμηλή κινητικότητα και το 5% πολύ υψηλή), ενώ στο δίκτυο εμφανίζονται συχνά αποκοπές (network partitions). Στο γεγονός αυτό αποδίδεται το αρκετά χαμηλό ποσοστό παράδοσης πακέτων που εξασφαλίζουν όλα τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Η πιο σημαντική απώλεια πακέτων πάντως σημειώνεται στο DSDV (περίπου 70%). Το πρωτόκολλο AODV εγγυάται ελαφρώς μικρότερη καθυστέρηση από το DSR, καθώς σύμφωνα με τους συγγραφείς οι διαδρομές προς τους γειτονικούς κόμβους είναι άμεσα διαθέσιμες χάρη στον μηχανισμό των μηνυμάτων HELLO. Αν και η μικρότερη μέση καθυστέρηση σημειώνεται στο DSDV, αυτή οφείλεται κυρίως στο πολύ χαμηλό ποσοστό παράδοσης πακέτων στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Το σχετικά μεγάλο μήκος των διαδρομών στο σενάριο αυτό έχει ως αποτέλεσμα το byte overhead στο πρωτόκολλο DSR να είναι αυξημένο. Στο AODV το packet overhead είναι ιδιαίτερα υψηλό σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα.

3.4 FSR vs AODV vs ZRP

Στο [4] οι συγγραφείς συγκρίνουν την απόδοση τριων διαφορετικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης : του AODV, του FSR και του ZRP. Οι μετρικές απόδοσης που αξιολογούν είναι η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (average end to end delay), το ποσοστό παράδοσης πακέτων (packet delivery ratio), η ρυθμοαπόδοση (throughput) και η μέση διακύμανση της καθυστέρησης (jitter). Οι παρατηρήσεις των συγγραφέων προέρχονται από τις προσομοιώσεις που πραγματοποίησαν στον προσομοιωτή δικτύου Qualnet version 5.0. Τα σενάρια προσομοίωσης που εξετάζονται είναι δυο και μοιράζονται το ίδιο μοντέλο κίνησης, το οποίο είναι το random waypoint model. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό κάθε κόμβος στο δίκτυο επιλέγει τυχαία ένα σημείο και κινείται προς αυτό με μια επίσης τυχαία ταχύτητα. Όταν φτάσει στο σημείο αυτό, παραμένει ακίνητος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (pause time), μετά την πάροδο του οποίου επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία. Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης σε ένα δίκτυο 50 κόμβων αξιολογείται η απόδοση των AODV, FSR και ZRP, καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα παύσης. Η αύξηση του χρονικού διαστήματος αυτού ασφαλώς συνεπάγεται μείωση της κινητικότητας των κόμβων στο δίκτυο. Στο δεύτερο σενάριο που εξετάζεται στο [4], ελέγχεται η απόδοση

των πρωτοκόλλων, όταν το μήκος του χρονικού διαστήματος παύσης παραμένει σταθερό, όμως αυξάνεται το πλήθος των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο.

Το πρωτόκολλο FSR εμφανίζει τη μικρότερη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Καθώς το χρονικό διάστημα παύσης αυξάνεται, η μέση καθυστέρηση τόσο στο FSR όσο και στο AODV αρχικά αυξάνεται. Ωστόσο, στη συνέχεια καθώς η κινητικότητα των κόμβων ελαττώνεται σημαντικά η μέση καθυστέρηση αρχίζει να μειώνεται και στα δυο πρωτόκολλα. Αντίθετα στο πρωτόκολλο ZRP, για τις συγκεκριμένες τιμές του χρονικού διαστήματος παύσης παραμένει σταθερή. Το ZRP πάντως παρουσιάζει μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο σε σχέση με το AODV, το οποίο αποδίδει καλύτερα μόνο όταν η κινητικότητα είναι πολύ χαμηλή. Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης η μικρότερη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο επιτυγχάνεται από το πρωτόκολλο ZRP. Το AODV αρχικά (20 κόμβοι) εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή καθυστέρηση, η οποία ωστόσο μειώνεται δραστικά με την αύξηση του πλήθους των κόμβων του δικτύου από 20 σε 40. Τόσο στο FSR όσο και στο ZRP παρατηρείται ότι η μέση καθυστέρηση αυξάνεται καθώς πληθαίνουν οι κόμβοι που συμμετέχουν στο δίκτυο. Η αύξηση αυτή, η οποία δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, παρουσιάζεται πάντως πιο ομαλή στο πρωτόκολλο ZRP.

Το AODV στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης εξασφαλίζει σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε τιμή του χρονικού διαστήματος παύσης που εξετάζεται, το πρωτόκολλο αυτό δεν παραδίδει ποτέ λιγότερο από το 60% των πακέτων που παράγει μια πηγή του δικτύου. Αντίθετα, το FSR δεν καταφέρνει ποτέ να παραδώσει περισσότερο από το 40% των παραγόμενων πακέτων, ενώ το ZRP αδυνατεί να εξασφαλίσει ποσοστό παράδοσης πακέτων μεγαλύτερο του 25%. Η απόδοση του πρωτοκόλλου αυτού, καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα παύσης, αρχικά υποβαθμίζεται και στη συνέχεια, όταν αυτό λάβει πλέον μεγάλες τιμές, σταθεροποιείται. Τα άλλα δυο εξεταζόμενα πρωτόκολλα αποδίδουν καλύτερα σε συνθήκες χαμηλής κινητικότητας. Αναμφισβήτητα και στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης το AODV επιτυγχάνει αρκετά μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων (σε ορισμένες περιπτώσεις πλησιάζει το 90%), το οποίο δε φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την αύξηση των κόμβων στο δίκτυο. Η απόδοση των άλλων δυο πρωτοκόλλων σε σχέση με τη συγκεκριμένη μετρική κρίνεται μάλλον κακή από τους συγγραφείς, καθώς σε καμία περίπτωση (για κανένα εξεταζόμενο πλήθος κόμβων) δεν καταφέρνουν να εξασφαλίσουν ποσοστό παράδοσης πακέτων υψηλότερο από 40%.

Η μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης επιτυγχάνεται από το πρωτόκολλο AODV. Το πρωτόκολλο αυτό παρουσιάζει εντυπωσιακή αύξηση στη ρυθμοαπόδοση, όταν το χρονικό διάστημα παύσης αυξάνεται

από 20 sec σε 40 sec. Το FSR αποδίδει μεν καλύτερα από το ZRP, ωστόσο δεν μπορεί να πλησιάσει την απόδοση του AODV. Η αύξηση του χρονικού διαστήματος παύσης από 60 sec σε 80 sec αλλά και από 80 sec σε 100 sec δεν έχει καμία επίδραση στη ρυθμοαπόδοση που εξασφαλίζει το ZRP. Και στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης το AODV είναι το πρωτόκολλο με τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση, η οποία ωστόσο παρουσιάζει κατακόρυφη μείωση, όταν το πλήθος των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο αυξάνεται από 80 σε 100. Το FSR υπερτερεί σε κάθε περίπτωση (για κάθε εξεταζόμενο πλήθος κόμβων) του ZRP πλην της προαναφερθείσας.

Από την άλλη πλευρά, το πρωτόκολλο ZRP εμφανίζει τη χαμηλότερη μέση διακύμανση καθυστέρησης για τα διάφορα χρονικά διαστήματα παύσης που εξετάζονται. Και σε αυτή την περίπτωση πάντως παρατηρείται, ότι καθώς το χρονικό διάστημα παύσης αυξάνεται από 60 sec σε 80 sec αλλά και από 80 sec σε 100 sec, η απόδοση του ZRP δε μεταβάλλεται. Σε σχέση με το AODV, το FSR παρουσιάζει αρκετά μικρότερη μέση διακύμανση της καθυστέρησης. Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης το ZRP εξακολουθεί να αποδίδει καλύτερα από τα άλλα δυο εξεταζόμενα πρωτόκολλα. Πάντως η απόδοση του FSR είναι αρκετά κοντά σε αυτή του ZRP, όταν το πλήθος των κόμβων είναι μικρό (20,40 κόμβοι). Το AODV σημειώνει πολύ υψηλή μέση διακύμανση της καθυστέρησης, όταν στο δίκτυο συμμετέχουν 20 κόμβοι. Η μετρική αυτή πάντως βελτιώνεται δραστικά ύστερα από την αύξηση του πλήθους των κόμβων του δικτύου σε 40. Παρ' όλα αυτά η απόδοση του AODV υστερεί σε σχέση με αυτή των άλλων δυο εξεταζόμενων πρωτοκόλλων.

3.5 AODV vs DSR vs DSDV vs TORA

Στο [5] οι συγγραφείς με βάση τις προσομοιώσεις που πραγματοποίησαν αξιολογούν την απόδοση τεσσάρων ad hoc πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι το DSDV, το TORA, το DSR και το AODV. Όπως επισημαίνουν οι συγγραφείς, στην υλοποίηση του πρωτοκόλλου AODV αποφασίστηκε η κατάργηση του μηχανισμού των περιοδικών μηνυμάτων Hello που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο και η ανίχνευση των απωλειών σύνδεσης πραγματοποιείται από το link layer του 802.11. Επίσης, στην υλοποίηση του DSDV αποφασίστηκε κάθε φορά που κάποιος κόμβος λαμβάνει ένα νέο αριθμό ακολουθίας για κάποιον προορισμό στο δίκτυο, να μεταδίδει άμεσα μια ενημέρωση. Περισσότερες λεπτομέρειες για την υλοποίηση κάθε πρωτοκόλλου αναφέρονται αναλυτικά στο [5].

Ο προσομοιωτής δικτύου που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ns-2, στον οποίο ωστόσο έγιναν ορισμένες απαραίτητες τροποποιήσεις προκειμένου η προσομο-

ίωση των κινητών ασύρματων δικτύων να είναι ακριβής και έγκυρη. Το ad hoc δίκτυο που εξετάζουν οι συγγραφείς αποτελείται από 50 ασύρματους κόμβους, οι οποίοι κινούνται σε μια ορθογώνια περιοχή διαστάσεων $1500m \times 300m$. Το μοντέλο κίνησης που επιλέχτηκε είναι το random waypoint model. Σύμφωνα με αυτό κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία έναν προορισμό στο δίκτυο και κινείται προς αυτόν με μια επίσης τυχαία ταχύτητα, η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα στο $[0, \dots, V_{max}]$. Όταν ο κόμβος αυτός φτάσει στον προορισμό του, παραμένει ακίνητος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (pause time). Όταν αυτό παρέλθει, επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία. Οι πηγές είναι constant bit rate (CBR sources) και ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδουν είναι 4 packets/sec. Ακόμα, το μέγεθος του πακέτου ορίζεται να είναι 64 bytes.

Αρχικά οι συγγραφείς συγκρίνουν την απόδοση των τεσσάρων πρωτοκόλλων σε σχέση με το ποσοστό παράδοσης πακέτων και το φορτίο δρομολόγησης, καθώς μειώνεται η κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με την αύξηση του χρονικού διαστήματος παύσης που χρησιμοποιείται στο random waypoint model. Η μέγιστη ταχύτητα (V_{max}) με την οποία μπορεί να κινηθεί ένας κόμβος ορίζεται να είναι ίση με 20 m/s. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το πλήθος των κόμβων που μεταδίδουν (CBR sources) ισούται με 20.

Κάθε ένα από τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα επιτυγχάνει καλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων, όταν η κινητικότητα στο δίκτυο είναι χαμηλή. Τα πρωτόκολλα DSR και AODV πάντως ανεξάρτητα από την κινητικότητα παραδίδουν περισσότερο από το 95% των παραγόμενων πακέτων. Το DSDV είναι ευάλωτο σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας ($pausetime < 300$ sec), και σε ορισμένες περιπτώσεις το ποσοστό των πακέτων που παραδίδει με επιτυχία μπορεί να είναι μικρότερο από 70%. Ωστόσο, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι μέτρια ή χαμηλή ($pausetime \geq 300$ sec) το πρωτόκολλο αυτό εξασφαλίζει αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό παράδοσης πακέτων (μεγαλύτερο από 90%), το οποίο είναι μεγαλύτερο από αυτό που εγγυάται το TORA. Το φορτίο δρομολόγησης στο πρωτόκολλο DSDV παραμένει σχεδόν σταθερό, καθώς αυξάνεται η τιμή του χρονικού διαστήματος παύσης. Αντίθετα στα υπόλοιπα (on demand) πρωτόκολλα η μείωση της κινητικότητας στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου δρομολόγησης. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι το πλήθος των πακέτων που απαιτούνται για τη δρομολόγηση διαφέρει αρκετά από πρωτόκολλο σε πρωτόκολλο. Ενδεικτική είναι η πάρα πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ του φορτίου δρομολόγησης στο DSR, το οποίο επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση, και του φορτίου δρομολόγησης στο πρωτόκολλο TORA, το οποίο παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση. Η διαφορά αυτή σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας υπερβαίνει τα 120.000 πακέτα. Στις ίδιες συνθήκες η απόδοση του AODV υστερεί σε σχέση με αυτή του DSDV. Αντίθετα, όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι

μέτρια ή χαμηλή ($pausetime \geq 300$ sec), το AODV εξασφαλίζει μικρότερο φορτίο δρομολόγησης από το DSDV.

Στη συνέχεια στο [5] εξετάζεται η απόδοση των τεσσάρων πρωτοκόλλων σε σχέση με το ποσοστό παράδοσης πακέτων και το φορτίο δρομολόγησης ως συνάρτηση τόσο της κινητικότητας των κόμβων όσο και του πλήθους των κόμβων πηγών (traffic sources). Το πλήθος αυτό λαμβάνει τις τιμές 10, 20 και 30. Προφανώς η αύξηση του έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του προσφερόμενου φορτίου (offered load) στο δίκτυο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, το ποσοστό παράδοσης πακέτων στα πρωτόκολλα AODV και DSR είναι ανεξάρτητο του πλήθους των κόμβων πηγών. Στα πρωτόκολλα αυτά παραδίδεται επιτυχώς παραπάνω από το 95% των παραγόμενων πακέτων σε κάθε περίπτωση. Η αύξηση του προσφερόμενου φορτίου στο δίκτυο δε φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στο ποσοστό παράδοσης πακέτων που επιτυγχάνει το DSDV. Το πρόβλημα στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εντοπίζεται όταν η κινητικότητα στο δίκτυο είναι υψηλή. Πιο συγκεκριμένα, όταν το διάστημα παύσης είναι μικρότερο από 300 sec στο DSDV παραδίδεται επιτυχώς περίπου το 70% των παραγόμενων πακέτων. Αντίθετα, σε συνθήκες χαμηλής και μέτριας κινητικότητας ($pausetime \geq 300$ sec) για κάθε πλήθος πηγών που εξετάζεται το ποσοστό παράδοσης πακέτων δεν υποχωρεί κάτω από το 92%. Οι συγγραφείς θεωρούν ότι οι μη ανανεωμένες εγγραφές υποδεικνύουν στους κόμβους να προωθήσουν πακέτα μέσω συνδέσεων που έχουν καταργηθεί. Σε αυτή την περίπτωση το επίπεδο MAC αδυνατεί να παραδώσει τα πακέτα αυτά. Ένας κόμβος στο DSDV διατηρεί μια μόνο διαδρομή για κάθε προορισμό στο δίκτυο. Αυτό καθιστά αδύνατη την παράδοση των προαναφερθέντων πακέτων στους προορισμούς τους μέσω εναλλακτικών διαδρομών, με αποτέλεσμα να απορρίπτονται. Το πρωτόκολλο TORA αποδίδει αρκετά καλά, όταν το πλήθος των κόμβων πηγών είναι 10 και 20, καθώς ακόμα και όταν η κινητικότητα είναι πολύ υψηλή, παραδίδεται παραπάνω από το 90% των πακέτων. Αντίθετα, η αύξηση του πλήθους των κόμβων πηγών σε 30 επιφέρει σημαντική υποβάθμιση στο ποσοστό παράδοσης πακέτων που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο αυτό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε συνθήκες πολύ υψηλής κινητικότητας παραδίδεται περίπου μόλις το 40% των πακέτων.

Το φορτίο δρομολόγησης στα πρωτόκολλα AODV, DSR και TORA αυξάνεται μαζί με την αύξηση του πλήθους των κόμβων πηγών. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη μιας και τα πρωτόκολλα αυτά είναι on demand. Πιο συγκεκριμένα υποστηρίζουν ότι, καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων πηγών, αυξάνονται επίσης και οι κόμβοι προορισμοί στο δίκτυο. Επομένως πρέπει να διατηρούνται περισσότερες διαδρομές με αποτέλεσμα να απαιτούνται και περισσότερα πακέτα δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο DSR πάντως εξασφαλίζει σε κάθε περίπτωση σημαντικά μικρότερο φορτίο δρο-

μολόγησης από το AODV. Χαρακτηριστικά στη μέγιστη δυνατή κινητικότητα στο δίκτυο το DSR εγγυάται περίπου 5 φορές μικρότερο φορτίο δρομολόγησης. Στο πρωτόκολλο TORA σημειώνεται δραστική αύξηση του φορτίου δρομολόγησης, όταν μεταδίδουν 30 κόμβοι στο δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση πάντως το πλήθος των πακέτων που απαιτούνται για τη δρομολόγηση είναι μεγαλύτερο στο πρωτόκολλο αυτό σε σχέση με το αντίστοιχο πλήθος στο DSR και στο AODV. Από την άλλη πλευρά, το φορτίο δρομολόγησης στο DSDV είναι ανεξάρτητο του πλήθους των κόμβων πηγών. Δηλαδή για κάθε ένα από τα τρία πλήθη πηγών που εξετάζεται, στις ίδιες συνθήκες κινητικότητας, το φορτίο δρομολόγησης στο DSDV είναι το ίδιο. Το πρωτόκολλο αυτό επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη μετρική αυτή μετά το DSR.

Με τη βοήθεια ενός εσωτερικού μηχανισμού του προσομοιωτή, ο οποίος γνωρίζει κάθε στιγμή το μήκος της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δυο οποιονδήποτε κόμβων του δικτύου, οι συγγραφείς εξετάζουν αν οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται σε κάθε πρωτόκολλο είναι βέλτιστες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, στις οποίες το πλήθος των κόμβων πηγών επιλέχθηκε να είναι ίσο με 20, φανερώνουν ότι τα πρωτόκολλα DSDV και DSR χρησιμοποιούν διαδρομές που κατά κύριο λόγο είναι βέλτιστες ή διαφέρουν πολύ λίγο από τις βέλτιστες. Αντίθετα, στα πρωτόκολλα δρομολόγησης AODV και TORA πολλά πακέτα δρομολογούνται μέσω διαδρομών, οι οποίες απέχουν ακόμα και παραπάνω από 4 άλματα από τις βέλτιστες. Η αύξηση της κινητικότητας στο δίκτυο δε φαίνεται να επηρεάζει την εύρεση των βέλτιστων διαδρομών στα πρωτόκολλα DSDV και DSR. Από την άλλη πλευρά τόσο στο TORA όσο και στο AODV η κινητικότητα των κόμβων στο δίκτυο έχει σημαντική επίδραση στη χρήση των πιο σύντομων διαδρομών. Όταν αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλή, το μήκος των διαδρομών που ακολουθούν τα πακέτα δεδομένων είναι πολύ κοντά στο βέλτιστο (ή είναι βέλτιστο).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση στην οποία η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινηθεί ένας κόμβος μέσα στο δίκτυο μεταβάλλεται από 20 m/s σε 1 m/s. Όλα τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης, ανεξάρτητα από το χρονικό διάστημα παύσης, παραδίδουν παραπάνω από το 98.5% των πακέτων, όταν το πλήθος των πηγών είναι 20. Το DSDV, το οποίο παρουσίαζε περίπου 30% απώλεια πακέτων για τις μικρές τιμές του χρονικού διαστήματος παύσης, όταν η μέγιστη ταχύτητα κίνησης των κόμβων ήταν 20 m/s, στο συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση. Στο DSDV το φορτίο δρομολόγησης, το οποίο και σε αυτή την περίπτωση παραμένει σταθερό, καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα παύσης, δε μεταβάλλεται, όταν η μέγιστη ταχύτητα των κόμβων ορίζεται να είναι 1 m/s. Ωστόσο, σε όλα τα υπόλοιπα πρωτόκολλα δρομολόγησης η μετρική αυτή παρουσιάζει αισθητή βελτίωση. Η αύξηση του χρονικού διαστήματος παύσης δεν έχει πλέον τόσο σημαντική επίδραση στη με-

ίωση των πακέτων που χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση στα πρωτόκολλα AODV και DSR. Το DSR εξακολουθεί να εγγυάται σημαντικά μικρότερο φορτίο δρομολόγησης από το AODV, η απόδοση του οποίου πάντως σε σχέση με τη μετρική αυτή υπερτερεί του DSDV στο συγκεκριμένο σενάριο. Το φορτίο δρομολόγησης παραμένει μέγιστο στο πρωτόκολλο TORA.

Κεφάλαιο 4

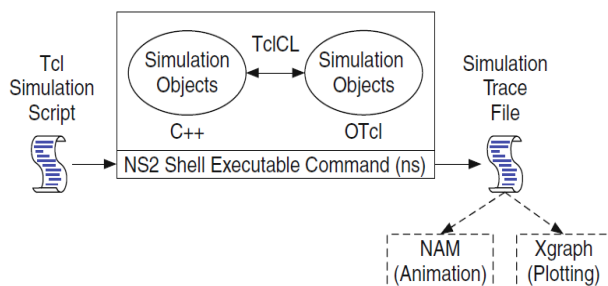
Ανάλυση Πειραμάτων

4.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση των κινητών ad hoc δικτύων (MANETS) έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία. Ορισμένοι από τους πιο σημαντικούς προσομοιωτές δικτύων (network simulators) είναι οι ns-2, ns-3, OMNET++ και GlomoSim. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για την εκτέλεση των απαιτούμενων πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής δικτύου ns-2.

Ο ns-2 (Network Simulator-2) είναι ένας προσομοιωτής δικτύου ανοιχτού κώδικα (open source), ο οποίος πρωτοεμφανίστηκε τον Νοέμβριο του 1996. Η τελευταία έκδοση του (ns-2.35), η οποία χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, κυκλοφόρησε το 2011. Ο σημαντικός αριθμός επεκτάσεων που έχει σχεδιαστεί για τον ns-2 έως και σήμερα, τον καθιστούν ίσως τον πιο διαδεδομένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο προσομοιωτή δικτύου για ερευνητική εργασία.

Ο ns-2 είναι ένας προσομοιωτής διακριτών συμβάντων, ικανός να προσομοιώνει τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα δίκτυα, όπως τα ασύρματα LAN και τα MANETS. Η υλοποίηση του στηρίζεται στις γλώσσες προγραμματισμού C++ και OTcl (Object Tool Command Language). Θα λέγαμε ότι ο ns-2 χρησιμοποιεί στο προσκήνιο την OTcl και στο παρασκήνιο την C++. Επί της ουσίας, ο χρήστης περιγράφει την τοπολογία του δικτύου, καθορίζει τα events (π.χ κίνηση κόμβου, έναρξη μετάδοσης, κλπ) που πρόκειται να συμβούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και παραμετροποιεί τα αντικείμενα προσομοίωσης σε γλώσσα OTcl. Από την άλλη πλευρά το τμήμα σε C++ αφορά κυρίως εσωτερικούς μηχανισμούς των αντικείμενων προσομοίωσης. Το τμήμα σε C++ αλληλεπιδρά με το τμήμα σε OTcl μέσω TclCL. Η βασική και απλοποιημένη αρχιτεκτονική του ns-2 φαίνεται στην εικόνα ζ.



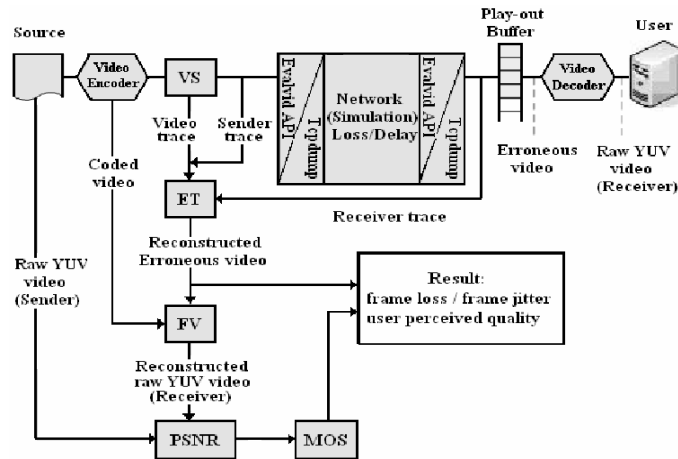
Σχήμα 4.1: Η βασική αρχιτεκτονική του ns-2

Στην έξοδο του ο ns-2 παράγει ένα tracefile, στο οποίο καταγράφονται τα γεγονότα (αποστολές/παραδόσεις/απώλειες πακέτων, κίνηση κόμβων, κλπ) που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το αρχείο αυτό επιδέχεται ανάλυση από την οποία προκύπτουν χρήσιμα στοιχεία για την επίδοση του δικτύου, την απόδοση των πρωτοκόλλων, κλπ. Ο προσομοιωτής δικτύου ns-2 περιλαμβάνει επίσης έναν network animator (NAM), ο οποίος χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση του δικτύου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Η διεπαφή NAM περιέχει χαρακτηριστικά ελέγχου που επιτρέπουν στους χρήστες να «τρέξουν» την προσομοίωση, να τη σταματήσουν ή να κάνουν μια μικρή παύση. Το εργαλείο xgraph του ns-2 χρησιμοποιείται για την κατασκευή γραφικών παραστάσεων.

Οι τελευταίες εκδόσεις του προσομοιωτή δικτύου ns-2 εκτελούνται μόνο σε περιβάλλον Linux. Για τον λόγο αυτό αρχικά εγκαταστάθηκε σε περιβάλλον windows 10 -64 bits η εικονική μηχανή Oracle VM VirtualBox και έπειτα εγκαταστάθηκε στην εικονική μηχανή η έκδοση 18.04 του λειτουργικού συστήματος Ubuntu (Ubuntu 18.04 LTS). Στη συνέχεια ακολούθησε η λήψη και η εγκατάσταση του προσομοιωτή δικτύου ns-2, και συγκεκριμένα της έκδοσης ns-2.35, στην εικονική μας μηχανή.

Η μετάδοση video στα δίκτυα που προσομοιώνει ο ns-2 επιτυγχάνεται με τη χρήση του εργαλείου EvalVid. Το EvalVid προσφέρει το πλαίσιο εκείνο και τα εργαλεία για την αξιολόγηση της ποιότητας του video που μεταδίδεται μέσω ενός προσομοιωμένου κινητού ad hoc δικτύου, καθώς εκτός από τη δυνατότητα υπολογισμού βασικών QOS παραμέτρων (packet loss, delay, jitter, κλπ) παρέχει επίσης τη δυνατότητα υπολογισμού μετρικών όπως το PSNR (Peak Signal to Noise Ration), το MOS (Mean Opinion Score), κ.α. Στην εικόνα ξ.ξ παρουσιάζεται η δομή του EvalVid. Θα εξετάσουμε τα δομικά στοιχεία του περιγράφοντας παράλληλα τα βήματα που εκτελέστηκαν στη συγκεκριμένη

διπλωματική εργασία.



Σχήμα 4.2: Η δομή του EvalVid

Αρχικά, το YUV video κωδικοποιείται σε m4v και καθορίζονται παράμετροι του video όπως το frames/sec (fps), το μέγεθος του GOP, το bitrate, κλπ. Στη συνέχεια το m4v αρχείο μετατρέπεται σε mp4, το οποίο εκτός από τα frames του video περιέχει και ένα hint track που υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο τα frames σπάνε σε πακέτα για μετάδοση με το πρωτόκολλο RTP. Στο σημείο αυτό χρησιμοποιείται το εργαλείο mp4trace του EvalVid, το οποίο στέλνει το hinted mp4 αρχείο σε έναν συγκεκριμένο προορισμό. Επί της ουσίας το εργαλείο αυτό παράγει ένα video trace file, το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα frames του video, όπως τον τύπο του κάθε frame, το πλήθος των πακέτων από τα οποία αποτελείται καθώς και τη χρονική στιγμή που μεταδίδεται. Ένα παράδειγμα τέτοιου αρχείου φαίνεται στην εικόνα x. Το αρχείο αυτό θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από τον προσομοιωτή ns-2 ως traffic source. Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση της μετάδοσης του video από τον ns-2, το εργαλείο etmp4 του EvalVid αναλαμβάνει την ανακατασκευή του video που μεταδόθηκε, ακριβώς όπως λαμβάνεται από τον δέκτη. Εκτός από το ανακατασκευασμένο video το εργαλείο αυτό παράγει χρήσιμα στοιχεία σχετικά με την απώλεια πακέτων (ή frames), την καθυστέρηση ανά πακέτο (ή frame), κ.α. Έπειτα, ακολουθεί η αποκωδικοποίηση του ληφθέντος mp4 video, ώστε να προκύψει το YUV video που λαμβάνει ο δέκτης. Τώρα το ληφθέν YUV video μπορεί να συγκριθεί με το αρχικό και με τη βοήθεια των εργαλείων του EvalVid να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το PSNR, το MOS και άλλες ποιοτικές μετρικές.

Frame Number	Frame Type	Frame Size	Number of UDP-packets	Sender Time
0	H	29	1 segment at	33 ms
1	I	3036	4 segments at	67 ms
2	P	659	1 segment at	99 ms
3	B	357	1 segment at	132 ms
4	B	374	1 segment at	165 ms
...

Σχήμα 4.3: Παράδειγμα ενός video trace file

4.2 Εξεταζόμενα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάζονται τα πρωτόκολλα δρομολόγησης AODV, DSR και DSDV ως προς την απόδοση τους στη μετάδοση video μέσω ενός κινητού ad hoc δικτύου. Στο κεφάλαιο 2 προηγήθηκε η αναλυτική περιγραφή και των τριών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Η ενότητα αυτή εστιάζει στην καταγραφή των κυριότερων διαφορών που παρουσιάζουν τα πρωτόκολλα αυτά μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1, στη συνέχεια θα βοηθήσουν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας.

	AODV	DSR	DSDV
Reactive	✓	✓	✗
Proactive	✗	✗	✓
Υποστήριξη πολλαπλής διανομής (Multicasting)	✓	✗	✗
Αποφυγή ατέρμονων βρόγχων	✓	✓	✓
Αποθήκευση Διαδρομών	Πίνακας Δρομολόγησης	Κρυφή Μνήμη	Πίνακας Δρομολόγησης
Υποστήριξη πολλαπλών διαδρομών	✗	✓	✗
Source Routing	✗	✓	✗
Μέθοδος δρομολόγησης	Νέοτερο και συντομότερο μονοπάτι	Συντομότερο μονοπάτι	Συντομότερο μονοπάτι
Υποστήριξη αμφίδρομων συνδέσεων	✓	✓	✗
Ενημέρωση πληροφοριών δρομολόγησης	Όποτε απαιτείται	Όποτε απαιτείται	Περιοδικά και όποτε απαιτείται
Περιοδικά Hello μηνύματα	✓	✗	✗

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων πρωτοκόλλων

4.3 Εξεταζόμενες μετρικές απόδοσης

Η αξιολόγηση της απόδοσης των εξεταζόμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε αυτή τη διπλωματική εργασία βασίζεται τόσο σε ποσοτικές όσο και σε ποιοτικές μετρικές. Οι ποσοτικές μετρικές που εξετάζονται είναι οι εξής :

Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet Delivery Ratio)

Το ποσοστό παράδοσης πακέτων ορίζεται ως ο λόγος των πακέτων που παραδίδονται στους προορισμούς τους προς τον συνολικό αριθμό των πακέτων που παράγονται από τις πηγές. Η συγκεκριμένη μετρική είναι ιδιαίτερα σημαντική, ιδίως στα ασύρματα δίκτυα, όπου οι απώλειες πακέτων είναι αυξημένες. Αν μια εφαρμογή χρησιμοποιεί το UDP ως πρωτόκολλο μετάδοσης, όπως οι περισσότερες εφαρμογές πολυμέσων, τότε οι υψηλές απώλειες πακέτων υποβαθμίζουν την ποιότητα στον δέκτη.

Μέση Από Άκρο σε Άκρο Καθυστέρηση (Average End to End Delay)

Η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση ενός πακέτου περιλαμβάνει όλες τις πιθανές καθυστερήσεις που μπορούν να οφείλονται στη διαδικασία αναζήτησης διαδρομής (route discovery), στο διάστημα αναμονής του πακέτου στις ουρές αναμονής των κόμβων, στις αναμεταδόσεις πακέτων στο επίπεδο MAC και στο χρόνο διάδοσης (propagation time). Η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση υπολογίζεται από το άθροισμα των από άκρο σε άκρο καθυστερήσεων των πακέτων που παραδίδονται στους προορισμούς τους διαιρεμένο με το πλήθος των πακέτων αυτών. Η μετρική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου η τιμή της απαιτείται να είναι μικρή.

Διευκρινίζεται ότι στο πλαίσιο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν το ποσοστό παράδοσης πακέτων και η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση εξετάζονται για τα πακέτα του video.

Οι ποιοτικές μετρικές που λαμβάνονται υπ όψιν για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι οι ακόλουθες :

Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

Το PSNR αποτελεί ίσως την πιο δημοφιλή μετρική για την αξιολόγηση της ποιότητας του ληφθέντος video. Ουσιαστικά πρόκειται για τον λόγο της μέγιστης δυνατής ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου. Ο μαθηματικός ορισμός του PSNR δίνεται από την εξίσωση 1.1.

$$PSNR(n) = 20 \log_{10} \frac{V_{peak}}{\sqrt{\frac{1}{N_{col}N_{row}} \sum_{i=0}^{N_{col}} \sum_{j=0}^{N_{row}} [Y_S(n, i, j) - Y_D(n, i, j)]^2}}, \quad (4.1)$$

όπου η μεταβλητή n προσδιορίζει ένα συγκεκριμένο frame του video, Y_S και Y_D είναι οι συνιστώσες φωτεινότητας του μεταδοθέντος frame και του frame που λαμβάνεται από το δέκτη, $V_{peak} = 2^{k-1}$ και k είναι ο αριθμός των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση ενός pixel του frame. Η ποσότητα στον παρονομαστή είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Squared Error). Επομένως, η (1.1) μπορεί να γραφτεί και ως :

$$PSNR(n) = 20 \log_{10} \frac{V_{peak}}{\sqrt{MSE}} \quad (4.2)$$

Για τον υπολογισμό του PSNR του ληφθέντος video απαιτείται η εύρεση του PSNR για κάθε frame του ξεχωριστά και στη συνέχεια η εξαγωγή

του μέσου όρου τους. Οι τιμές που λαμβάνει το PSNR μετριούνται σε db και εκφράζονται συνήθως στη λογαριθμική κλίμακα. Τυπικές τιμές του PSNR για ένα ποιοτικό βίντεο είναι από 30 db και άνω, ενώ για τιμές από 20 db και κάτω το αποκωδικοποιημένο video παρουσιάζει έντονο θόρυβο.

Mean Opinion Score (MOS)

Η μετρική MOS είναι μια υποκειμενική μετρική, η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας του video από τον τελικό χρήστη. Επί της ουσίας φανερώνει την εμπειρία που αποκόμισε ο χρήστης, ο οποίος βαθμολογεί σε μια κλίμακα από το 1 (χειρότερη) έως το 5 (καλύτερη) την ποιότητα του ληφθέντος video. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των τιμών του PSNR στην κλίμακα MOS. Κατά αυτόν τον τρόπο η αξιολόγηση της ποιότητας του video χάνει τον υποκειμενικό της χαρακτήρα και γίνεται πλέον αντικειμενική. Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται κατά την πειραματική διαδικασία για την εκτίμηση της τιμής της μετρικής MOS.

PSNR [dB]	MOS
>37	5 (Excellent)
31-37	4 (Good)
25-31	3 (Fair)
20-25	2 (Poor)
<20	1 (Bad)

Πίνακας 4.2: Αντιστοίχιση PSNR-MOS

4.4 Γενικά Χαρακτηριστικά Προσομοιώσεων

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οι διαστάσεις του δικτύου είναι 500 m x 500 m, ενώ η ακτίνα εκπομπής των κόμβων ορίστηκε στα 100 m. Το πρωτόκολλο MAC που επιλέχθηκε είναι το 802.11 και ο μέγιστος αριθμός πακέτων σε ουρά αναμονής είναι 50. Ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο ένας κόμβος μπορεί να μεταδώσει μέσα από το ασύρματο κανάλι (χωρητικότητα καναλιού) ορίζεται να είναι 8 Mbps.

Το μοντέλο κίνησης των κόμβων, το οποίο επιλέχθηκε είναι το εξής : κάθε κόμβος διαλέγει τυχαία έναν προορισμό μέσα στο δίκτυο και κινείται προς αυτόν με μια επίσης τυχαία ταχύτητα, η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα (0,6] m/s.

Όταν ο κόμβος καταφθάνει στον προορισμό του, παραμένει ακίνητος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (pause time), μετά το πέρας του οποίου αρχίζει να κινείται προς κάποιον νέο τυχαίο προορισμό μέσα στο δίκτυο. Το χρονικό διάστημα παύσης (pause time) στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέγεται να είναι 60 sec.

Το video που μεταδίδει ο κόμβος πηγή στον κόμβο προορισμό έχει διάρκεια 300 sec (5 min). Το video bitrate είναι 498 Kbps, ενώ το framerate είναι 24 fps. Οι διαστάσεις του frame είναι 352 x 288 pixels. Η μετάδοση του video πραγματοποιείται με χρήση των πρωτοκόλλων RTP/UDP και το μέγιστο μέγεθος ενός πακέτου ορίζεται να είναι 1024 bytes. Έτσι, όταν για παράδειγμα πρέπει να μεταδοθεί ένα video frame μεγέθους 2050 bytes, αυτό σπάει σε τρία πακέτα μεγέθους 1024, 1024 και 2 bytes αντίστοιχα. Η πηγή μεταδίδει με ρυθμό 24 frames/sec.

Στα πειράματα, στα οποία υπάρχει background traffic στο δίκτυο αυτή επιλέγεται να είναι CBR (Constant Bit Rate) με πρωτόκολλα μεταφοράς το UDP, όπου το μέγεθος κάθε πακέτου είναι 512 bytes και ο ρυθμός μετάδοσης είναι 2 packets/sec. Η χρονική διάρκεια κάθε προσομοίωσης είναι 305 sec.

Κεφάλαιο 5

Πειράματα

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά περιγράφεται αναλυτικά καθένα από τα δυο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μέσω γραφικών παραστάσεων και πινάκων τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων, τα οποία αφορούν την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης AODV, DSR και DSDV σε σχέση με τις μετρικές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο τέλος, τα αποτελέσματα αυτά αναλύονται και ερμηνεύονται κατάλληλα.

5.1 Πρώτο Πείραμα

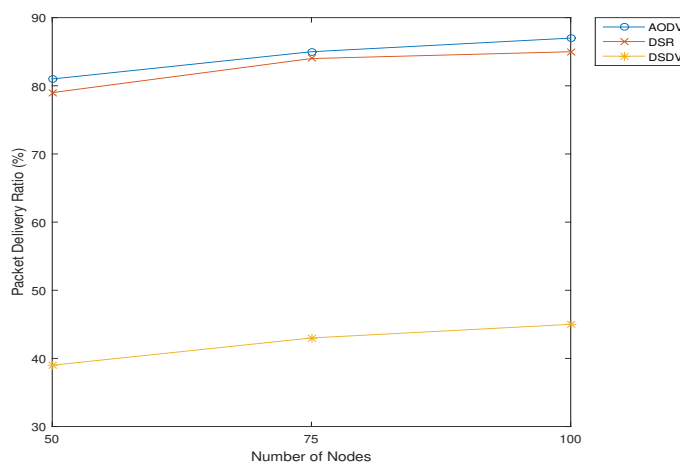
5.1.1 Χαρακτηριστικά Πειράματος

Στο πρώτο πείραμα ερευνάται η επίδραση της πυκνότητας του δικτύου (network density) στην απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης AODV, DSR και DSDV σε σχέση πάντα με τις εξεταζόμενες μετρικές και κατ'επέκταση στη μετάδοση του video. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τρία διαφορετικά δίκτυα, τα οποία αποτελούνται από 50, 75 και 100 κόμβους αντίστοιχα. Σε κάθε ένα από τα δίκτυα αυτά επιλέγεται τυχαία ένα ζεύγος κόμβων, το οποίο θα αποτελέσει το ζεύγος πηγή - προορισμός (source - destination) για τη μετάδοση του video. Διευκρινίζεται ότι καθ'όλη τη διάρκεια μετάδοσης του video από την πηγή στον προορισμό (και γενικά καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης) κανένας άλλος κόμβος στο εκάστοτε δίκτυο δε μεταδίδει οτιδήποτε. Ωστόσο, όλοι οι κόμβοι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι ελεύθεροι να κινούνται, σύμφωνα πάντα με το μοντέλο κίνησης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για καθένα από τα προαναφερθέντα δίκτυα, εξετάζονται 10 διαφορετικά σενάρια κίνησης των κόμβων σε αυτά, προκειμένου τα αποτελέσματα που λαμβάνονται να είναι πιο αξιόπιστα.

βάνουμε (ύστερα από την εξαγωγή του μέσου όρου) να είναι όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικά και αντιπροσωπευτικά.

5.1.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.1 παρουσιάζεται το ποσοστό παράδοσης πακέτων που επιτυγχάνει κάθε ένα από τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου. Η αύξηση αυτή πραγματοποιείται με την αύξηση του πλήθους των κόμβων που συνθέτουν το δίκτυο, το οποίο εκτείνεται σε μια περιοχή 500 m x 500 m. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.1 x, και τα τρία πρωτόκολλα δρομολόγησης αποδίδουν χειρότερα όσον αφορά το ποσοστό παράδοσης πακέτων στο αραιό δίκτυο των 50 κόμβων. Οι διαφορές ωστόσο που παρατηρούνται δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς μεταξύ του πιο αραιού και του πιο πυκνού δικτύου που εξετάστηκαν εντοπίζεται μια διαφορά της τάξης του 6-8% στο ποσοστό παράδοσης πακέτων και για τα τρία πρωτόκολλα.

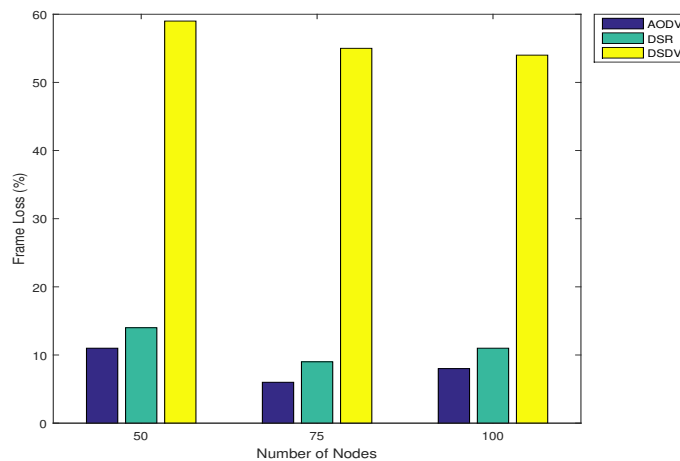


Σχήμα 5.1: Packet Delivery Ratio vs Network Density

Το πρωτόκολλο DSDV, το οποίο είναι ένα proactive πρωτόκολλο δρομολόγησης, παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή απόδοση παρουσιάζοντας απώλεια πακέτων σε ποσοστό 55% στο πυκνό δίκτυο των 100 κόμβων. Από την άλλη πλευρά, στο ίδιο δίκτυο τα reactive πρωτόκολλα AODV και DSR ανταποκρίνονται σαφώς καλύτερα παραδίδοντας επιτυχώς στον προορισμό τους το 87% και το 85% των πακέτων αντίστοιχα. Το AODV σε κάθε περίπτωση επιτυγχάνει το

καλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων σε σχέση με τα άλλα δυο πρωτόκολλα, ωστόσο οι διαφορές του με το DSR είναι πολύ μικρές. Το DSDV δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να πλησιάσει την απόδοση των άλλων δυο πρωτοκόλλων.

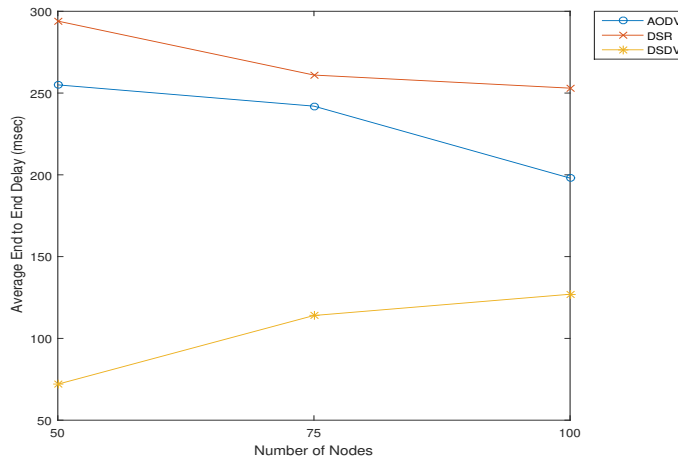
Στο διάγραμμα του σχήματος 5.2 αποτυπώνεται η απώλεια των frames του video που παρουσιάζει ο κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης σε καθένα από τα εξεταζόμενα δίκτυα. Διευκρινίζεται ότι το εργαλείο etmp4 του evalvid, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απώλειας αυτής, θεωρεί ότι ένα frame παραδίδεται στον προορισμό του, αν μια συγκεκριμένη ποσότητα πληροφορίας του frame ληφθεί επιτυχώς από τον ίδιο. Παρατηρώντας το ποσοστό των frames που αδυνατεί να μεταδώσει επιτυχώς το DSDV, το οποίο στην περίπτωση του αραιού δικτύου αγγίζει το 60%, εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι το συγκεκριμένο πρωτόκολλο κρίνεται ακατάλληλο για τη μετάδοση του video. Αντιθέτως, τα reactive πρωτόκολλα AODV και DSR φαίνεται να αποδίδουν καλά στο συγκεκριμένο εγχείρημα. Ιδιαίτερα το AODV, όταν το δίκτυο γίνεται πυκνό (75, 100 κόμβοι), παραδίδει με επιτυχία σχεδόν το 95% των πλαισίων του video.



Σχήμα 5.2: Frame Loss vs Network Density

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης DSDV, αν και παρουσιάζει πολύ σημαντική απώλεια πακέτων, εξασφαλίζει σε κάθε περίπτωση τη μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο σε σχέση με τους AODV και DSR. Οι δυο αυτοί reactive αλγόριθμοι δρομολόγησης, όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα του σχήματος 5.3, βελτιώνουν την καθυστέρηση που εισάγουν στην παράδοση ενός πακέτου από την πηγή στον προορισμό, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου. Ο AODV φαίνεται να εγγυάται σε κάθε περίπτωση μικρότερη καθυστέρηση από

το DSR. Ωστόσο, όπως και στο ποσοστό παράδοσης πακέτων, οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δυο πρωτοκόλλων είναι μικρές. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται στο πυκνό δίκτυο των 100 κόμβων, όπου το AODV εξασφαλίζει καθυστέρηση 55 msec μικρότερη από το DSR.



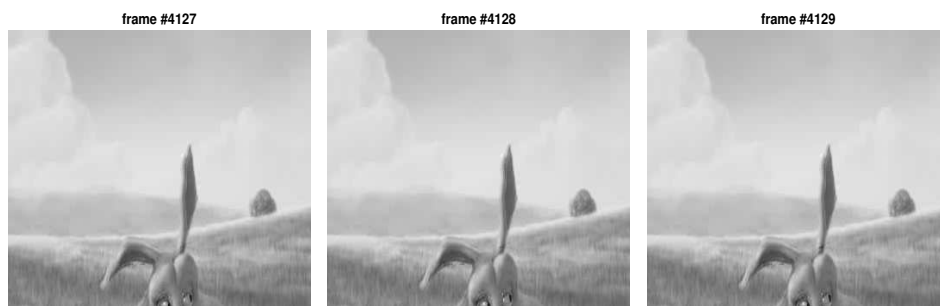
Σχήμα 5.3: Average end to end Delay vs Network Density

Για τον υπολογισμό του PSNR του ληφθέντος video απαιτείται το πλήθος των frames σε αυτό να είναι ίσο με το πλήθος των frames στο αρχικό video. Ωστόσο, όπως διαπιστώνεται και από το διάγραμμα 5.2, κατά τη μετάδοση του video από την πηγή στον προορισμό, παρατηρούνται απώλειες πλαισίων (frame losses). Ο αποκωδικοποιητής ffmpeg προκειμένου να επιλύσει το συγκεκριμένο πρόβλημα αντικαθιστά κάθε χαμένο frame με το τελευταίο επιτυχώς αποκωδικοποιημένο frame. Έτσι, το YUV video που παράγεται στην έξοδο του ffmpeg έχει πλέον τον ίδιο αριθμό πλαισίων με το αρχικό video και επομένως τώρα μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

Στην εικόνα 5.4.d παρουσιάζονται τρια διαδοχικά frames του video που μεταδίδει ο αποστολέας. Στις εικόνες 5.4.1, 5.4.2 και 5.4.3 παρουσιάζονται τα ίδια frames, όταν λαμβάνονται από τον παραλήπτη με PSNR 23 dB, 30 dB και 43 dB αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, η ποιότητα των τριών frames στην πρώτη περίπτωση είναι αρκετά χαμηλή. Στη δεύτερη περίπτωση, η ποιότητα των frames βελτιώνεται αισθητά, ωστόσο γίνονται ακόμη αντιληπτές ορισμένες μικρές διαφορές με τα frames της εικόνας (κυρίως στα μάτια και στα αυτιά του χαρακτήρα). Αντίθετα, όταν τα 3 διαδοχικά frames λαμβάνονται από τον παραλήπτη με PSNR 43 dB, η ποιότητα τους είναι εξαιρετική και το μάτι δεν αντιλαμβάνεται τη διαφορά τους με τα frames της εικόνας 5.4.d.



(a) PSNR 23 [dB]



(b) PSNR 30 [dB]



(c) PSNR 43 [dB]



(d) Τα αρχικά frames του video

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται το ποσοστό των frames του video, που λαμβάνονται δίχως απώλειες από το δέκτη, όταν σε καθένα από τα εξεταζόμενα δίκτυα, τα οποία διαφέρουν ως προς την πυκνότητα τους, χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα δρομολόγησης AODV και DSR. Προφανώς για τα frames αυτά δεν ορίζεται το PSNR. Για τα υπόλοιπα frames του video (distorted frames) υπολογίζεται και καταγράφεται στον πίνακα η μέση τιμή του PSNR. Η ποιότητα του ληφθέντος video βελτιώνεται, καθώς αυξάνεται τόσο το ποσοστό των frames που λαμβάνονται δίχως απώλειες όσο και η τιμή του PSNR των frames που λαμβάνονται με απώλειες. Ο πίνακας περιέχει επίσης τις τιμές της μετρικής MOS, οι οποίες αντικατοπτρίζουν την ποιότητα του video που παρακολούθησε ο δέκτης και συνολικά την εμπειρία που αποκόμισε σε κάθε περίπτωση.

	AODV			DSR		
	nodes			nodes		
	50	75	100	50	75	100
Undistorted Frames (%)	85%	90%	91%	81%	87%	85%
Average Frame PSNR [dB]	24.6	26	24.6	21.5	24.4	24.5
MOS	3	3	3	3	3	3
Perceived Quality	Fair	Fair	Fair	Fair	Fair	Fair
Impairment	Slightly Annoying	Slightly Annoying	Slightly Annoying	Annoying/Slightly Annoying	Slightly Annoying	Slightly Annoying

Πίνακας 5.1

Παρατηρώντας τον πίνακα διαπιστώνεται ότι ανεξάρτητα από την πυκνότητα του δικτύου, το video που λαμβάνει ο δέκτης δεν είναι ιδιαίτερα ποιοτικό, ούτε όταν χρησιμοποιείται ως πρωτόκολλο δρομολόγησης το DSR, ούτε όταν χρησιμοποιείται το AODV. Συγκεκριμένα, η μετρική MOS, η οποία υπολογίστηκε με τη χρήση του εργαλείου EvalVid, φανερώνει ότι σε κάθε περίπτωση η ποιότητα του video είναι ικανοποιητική, σε σημείο που να μην ενοχλείται έντονα ο χρήστης. Τα δυο εξεταζόμενα πρωτόκολλα αποδίδουν χειρότερα στη μετάδοση του video, όταν το δίκτυο είναι αραιό (50 κόμβοι). Συγκεκριμένα, η χειρότερη επίδοση καταγράφεται από το πρωτόκολλο DSR στο αραιό δίκτυο των 50 κόμβων, όπου κατά διαστήματα δημιουργείται ενόχληση στο δέκτη, καθώς παρακολουθεί το video. Αντίθετα, οι υψηλότερες επιδόσεις καταγράφονται από

το πρωτόκολλο AODV στο δίκτυο των 75 και 100 κόμβων. Σε κάθε περίπτωση το πρωτόκολλο AODV φαίνεται να αποδίδει ελαφρώς καλύτερα στη μετάδοση του video από το DSR. Ωστόσο, οι διαφορές που παρουσιάζουν τα δυο reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν είναι σημαντικές.

5.2 Δεύτερο Πείραμα

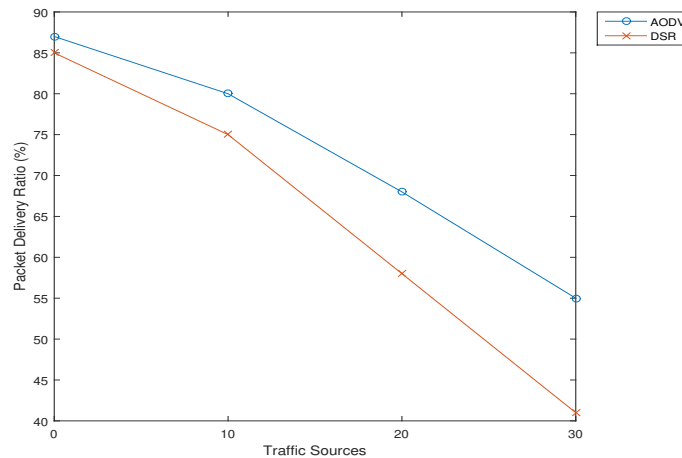
5.2.1 Χαρακτηριστικά Πειράματος

Στο δεύτερο πείραμα ερευνάται η απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης AODV και DSR στη μετάδοση video, καθώς εισάγεται προοδευτικά επιπρόσθετη κίνηση (background traffic) στο κινητό ad hoc δίκτυο. Το proactive πρωτόκολλο DSDV, το οποίο κρίθηκε ακατάλληλο για τη μετάδοση του video στο πρώτο πείραμα, εξαιρείται από το πείραμα αυτό. Πιο συγκεκριμένα, στο πυκνό δίκτυο των 100 κόμβων του πρώτου πειράματος επιλέγονται τυχαία 10, 20 και 30 κόμβοι (CBR sources), οι οποίοι μεταδίδουν παράλληλα με τον αποστολέα του video σε 10, 20 και 30 επίσης τυχαία επιλεγμένους κόμβους (10, 20, 30 CBR connections). Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδουν οι κόμβοι αυτοί είναι 2 packets/sec και το μέγεθος του πακέτου είναι 512 bytes. Στο πείραμα αυτό εξετάζονται τα ίδια σενάρια κίνησης των κόμβων που εξετάστηκαν στο αντίστοιχο δίκτυο του πρώτου πειράματος. Επίσης, το video που μεταδίδει ο αποστολέας είναι αυτό του πρώτου πειράματος.

5.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται το ποσοστό παράδοσης πακέτων που επιτυγχάνει κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης, καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων που μεταδίδουν στο δίκτυο. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται και το ποσοστό παράδοσης πακέτων που εξασφαλίζει κάθε πρωτόκολλο, όταν κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του video από την πηγή στον προορισμό δε μεταδίδει κανένας άλλος κόμβος (υπολογίστηκε στο πρώτο πείραμα). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.5, η απόδοση των δυο αλγορίθμων δρομολόγησης σε σχέση με το ποσοστό παράδοσης πακέτων υποβαθμίζεται, καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων πηγών (traffic sources) στο δίκτυο. Η υποβάθμιση αυτή είναι σημαντική, αν αναλογιστεί κανείς ότι η κίνηση που εισάγεται στο δίκτυο κάθε φορά δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη, καθώς ούτε το πλήθος των κόμβων πηγών είναι μεγάλο, ούτε ο ρυθμός με τον οποίο αυτοί μεταδίδουν είναι υψηλός. Χαρακτηριστικά αναφέρεται, ότι όταν παράλληλα με τη μετάδοση του video από τον αποστολέα στον παραλήπτη μεταδίδουν 30 κόμβοι στο δίκτυο, το πρωτόκολλο AODV αδυνατεί να παραδώσει το 45% των πακέτων του video στον παραλήπτη,

ενώ το DSR χάνει σχεδόν το 60% των πακέτων αυτών. Το πρωτόκολλο AODV αποδίδει καλύτερα από το DSR σε κάθε περίπτωση, με τη διαφορά στο ποσοστό παράδοσης πακέτων που επιτυγχάνει κάθε πρωτόκολλο να αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο.

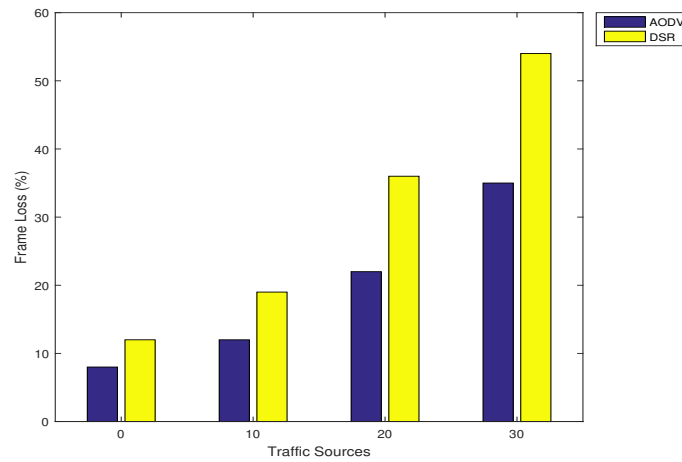


Σχήμα 5.5: Packet Delivery Ratio vs Traffic Sources

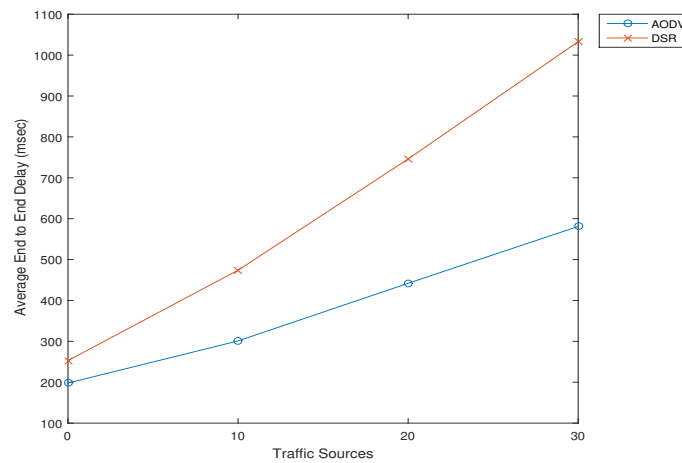
Στο διάγραμμα του σχήματος 5.6 αποτυπώνεται η απώλεια των frames του video που παρουσιάζουν οι δυο αλγόριθμοι δρομολόγησης σε κάθε περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το εργαλείο etmp4 του evalvid, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απώλειας αυτής, θεωρεί ότι ένα frame παραδίδεται στον προορισμό του, αν μια συγκεκριμένη ποσότητα πληροφορίας του frame ληφθεί επιτυχώς από τον ίδιο. Παρατηρώντας το ποσοστό των frames, που αδυνατεί να μεταδώσει το DSR, όταν το πλήθος των κόμβων που μεταδίδουν στο δίκτυο είναι 30, διαπιστώνει κανείς ότι σε συνθήκες αυξημένης κίνησης στο δίκτυο το συγκεκριμένο πρωτόκολλο αποτυγχάνει στη μετάδοση του video. Το πρωτόκολλο AODV, αν και παραδίδει περίπου 15% περισσότερα frames στον προορισμό σε σχέση με το DSR στις συνθήκες αυτές, παρουσιάζει επίσης χαμηλή απόδοση και αντιμετωπίζει σοβαρές δυσκολίες στη μετάδοση του video.

Η σημαντική υποβάθμιση της επίδοσης του DSR, καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο, εντοπίζεται και στη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση που εγγυάται το πρωτόκολλο αυτό. Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα του σχήματος 5.7, η αύξηση του πλήθους των κόμβων πηγών κατά 10, επιφέρει κάθε φορά μια αύξηση της μέσης από άκρο σε άκρο καθυστέρησης κατά περίπου 300 msec. Το πρωτόκολλο AODV εγγυάται σε κάθε περίπτωση μικρότερη καθυστέρηση

από το DSR. Η διαφορά στην απόδοση των δυο πρωτοκόλλων και σε αυτή την περίπτωση κλιμακώνεται, καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο.



Σχήμα 5.6: Frame Loss vs Traffic Sources



Σχήμα 5.7: Average end to end Delay vs Traffic Sources

5.3 Συγκεντρωτική Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στο πρώτο πείραμα, που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι και τα τρία εξεταζόμενα πρωτόκολλα επιτυγχάνουν μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου. Συχνά στα αραιά δίκτυα ορισμένοι κόμβοι είναι απομονωμένοι, δηλαδή δε βρίσκονται στην ακτίνα εκπομπής κάποιου άλλου κόμβου με αποτέλεσμα η επικοινωνία τους με το υπόλοιπο δίκτυο να είναι αδύνατη. Στα δίκτυα αυτά συνήθως σχηματίζονται συστάδες κόμβων (μικρές γειτονιές), όπου είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων που συνθέτουν τη συστάδα, ωστόσο δεν είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ των συστάδων (αποκοπές δικτύου). Δυο συστάδες συνενώνονται σε μια, όταν δυο κόμβοι, ένας από κάθε συστάδα, βρεθούν ο ένας στην ακτίνα εκπομπής του άλλου. Από την άλλη πλευρά, τα πυκνά δίκτυα είναι κατά κύριο λόγο συνεκτικά, δηλαδή κάθε κόμβος είναι προσβάσιμος από οποιονδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου. Συνεπώς, η επικοινωνία μεταξύ δυο κόμβων στα δίκτυα αυτά είναι συνήθως δυνατή ανά πάσα στιγμή. Έτσι δικαιολογούνται οι μικρότερες απώλειες πακέτων που παρατηρούνται στα πυκνά δίκτυα.

Όπως διαπιστώθηκε στο πρώτο πείραμα, το πρωτόκολλο DSDV κρίνεται ακατάλληλο για τη μετάδοση του video από τον αποστολέα στον παραλήπτη τόσο σε αραιά όσο και σε πυκνά δίκτυα, καθώς σημειώνει ιδιαίτερα υψηλή απώλεια πακέτων. Στο πρωτόκολλο DSDV, κάθε κόμβος μεταδίδει περιοδικά αλλά και άμεσα, όταν ανιχνεύσει κάποια αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου, μια ενημέρωση στους γειτονικούς του κόμβους. Καθένας από τους κόμβους αυτούς μεταδίδει επίσης μια ενημέρωση στους γειτονικούς του κόμβους, αν η ενημέρωση η οποία έλαβε τροποποίησε το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης του. Γίνεται αντιληπτό ότι σε σενάρια υψηλής κινητικότητας, όπου η τοπολογία του δικτύου αλλάζει διαρκώς, το πλήθος των ενημερώσεων αυτών είναι πολύ μεγάλο. Στα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαξαγωγή του πρώτου πειράματος, η κινητικότητα στο δίκτυο είναι σχετικά υψηλή. Έτσι, το μεγάλο πλήθος ενημερώσεων μαζί με τον υψηλό ρυθμό με τον οποίο μεταδίδει ο αποστολέας του video δημιουργούν συμφόρηση στο δίκτυο. Η συμφόρηση αυτή σε συνδυασμό με τις μη ανανεωμένες εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης, οι οποίες υποδεικνύουν στους κόμβους να προωθήσουν πακέτα μέσω συνδέσεων που έχουν καταργηθεί, είναι οι βασικές αιτίες της σημαντικής απώλειας πακέτων που παρουσιάζει το πρωτόκολλο DSDV.

Από την άλλη πλευρά, τα reactive πρωτόκολλα AODV και DSR επιτυγχάνουν σχετικά υψηλό ποσοστό παράδοσης πακέτων και χαμηλή μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση, εξασφαλίζοντας μια ικανοποιητική μετάδοση του video από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Συνολικά, η απόδοση του AODV είναι καλύτερη από αυτή του DSR με μικρή ωστόσο διαφορά.

Στο δεύτερο πείραμα διαπιστώνεται ότι η απόδοση του DSR και του AODV υποβαθμίζεται σημαντικά, όταν εισάγεται επιπρόσθετη κίνηση στο δίκτυο ακόμα και όταν αυτή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή. Πιο συγκεκριμένα, στο πιο απαιτητικό σενάριο που εξετάστηκε (γενικώς η κίνηση είναι ήπια ως χαμηλή σε όλα τα σενάρια), στο οποίο παράλληλα με τη μετάδοση του video από τον αποστολέα στον παραλήπτη μεταδίδουν 30 κόμβοι (σχεδόν το 1/3 των κόμβων του δικτύου) με ρυθμό 2 packets/sec το DSR παρουσιάζει 60% απώλεια πακέτων και το AODV 45%. Τα δυο πρωτόκολλα δρομολόγησης και ιδιαίτερα το DSR στο σενάριο αυτό σημειώνει επίσης υψηλή μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση. Όταν υπάρχει background traffic στο δίκτυο κατά τη μετάδοση του video από τον αποστολέα στον παραλήπτη, κόμβοι οι οποίοι συμμετέχουν στη δρομολόγηση των πακέτων του video πλέον επιφορτίζονται και με τη δρομολόγηση άλλων πακέτων. Στους buffers των συγκεκριμένων κόμβων πλέον στοιβάζονται πολλά πακέτα με αποτέλεσμα τα πακέτα του video, τα οποία καταφθάνουν, όταν οι buffers είναι γεμάτοι, να απορρίπτονται. Ο συνωστισμός των πακέτων στους buffers ασφαλώς συμβάλλει στην αύξηση της μέσης από άκρο σε άκρο καθυστέρησης, καθώς η εξυπηρέτηση των πακέτων απαιτεί περισσότερο χρόνο. Συνολικά παρατηρείται ότι το AODV αποδίδει καλύτερα από το DSR, καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων πηγών, ωστόσο και αυτό αποτυγχάνει στη μετάδοση του video ακόμη και σε συνθήκες ήπιας κίνησης στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 6

Μελλοντική Εργασία

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται ορισμένα ζητήματα, τα οποία αφορούν τη μετάδοση πολυμέσων σε κινητά ad hoc δίκτυα. Τα συγκεκριμένα ζητήματα χρήζουν περαιτέρω έρευνας και μελέτης και έτσι οι μελλοντικές εργασίες μπορούν να εστιάσουν σε αυτά.

Αρχικά, στα δίκτυα που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία, η κινητικότητα των κόμβων είναι σχετικά υψηλή. Συνεπώς, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί η απόδοση των συγκεκριμένων (ή και άλλων) πρωτοκόλλων δρομολόγησης, όσον αφορά τη μετάδοση του video, σε συνθήκες χαμηλότερης αλλά και υψηλότερης κινητικότητας των κόμβων στο δίκτυο. Χρησιμοποιώντας ως βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας σχετικά με τη μετάδοση του video, όταν παράλληλα μεταδίδουν και άλλοι κόμβοι στο δίκτυο, θα ήταν χρησιμό να ερευνηθεί η απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης που εξετάστηκαν (ή και άλλων) στα ίδια σενάρια αν ανατεθεί υψηλότερη προτεραιότητα στα πακέτα του video σε σχέση με τα υπόλοιπα. Επειδή η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία περιορίζεται στην αξιολόγηση της απόδοσης τριών πρωτοκόλλων δρομολόγησης, οι μελλοντικές εργασίες μπορούν να εξετάσουν την απόδοση και άλλων αλγορίθμων δρομολόγησης (π.χ υβριδικών) με διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτούς που εξετάστηκαν. Επίσης, ίσως θα είχε νόημα να χρησιμοποιηθούν και άλλες μετρικές αξιολόγησης για την ποιότητα του video που λαμβάνει ο δέκτης εκτός από το PSNR και το MOS. Τέλος, ένα κρίσιμο θέμα, το οποίο θα μπορούσε να απασχολήσει μελλοντικές εργασίες, είναι τα ζητήματα ασφαλείας κατά τη μετάδοση των πακέτων του video. Οι μηχανισμοί που πρόκειται να αναπτυχθούν και θα εγγυώνται την ασφαλή προώθηση πακέτων, πρέπει να μην επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου τόσο στο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων όσο και στη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.

Βιβλιογραφία

- [1] Perkins, C. E., Royer, E. M., Das, S. R., & Marina, M. K. (2001). Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *IEEE Personal communications*, 8(1), 16-28.
- [2] Tuteja, A., Gujral, R., & Thalia, S. (2010, June). Comparative performance analysis of DSDV, AODV and DSR routing protocols in MANET using NS2. In *2010 International Conference on Advances in Computer Engineering* (pp. 330-333). IEEE.
- [3] Johansson, P., Larsson, T., Hedman, N., Mielczarek, B., & Degermark, M. (1999, August). Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking* (pp. 195-206). ACM.
- [4] Maurya, A. K., & Singh, D. (2010). Simulation based Performance Comparison of AODV, FSR and zrp Routing Protocols in MANET. *International Journal of Computer Applications*, 12(2), 23-28.
- [5] Maltz, D. A., Broch, J., Johnson, D., Hu, Y. C., & Jetcheva, J. (1998, October). A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of ACM MobiCom* (Vol. 114, p. 119).
- [6] Ke, C. H., Shieh, C. K., Hwang, W. S., & Ziviani, A. (2008). An evaluation framework for more realistic simulations of MPEG video transmission. *Journal of Information Science & Engineering*, 24(2).
- [7] Bouras, C., Kapoulas, V., Gkamas, A., Politaki, D., & Tsanai, E. (2013, December). Evaluation of routing protocols for video transmission over MANETs that use multiple interfaces and multiple channels per node.

- In *2013 19th IEEE International Conference on Networks (ICON)* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Bouras, C., Gioumourtzis, G., Gkamas, A., Kapoulas, V., Politaki, D., & Tsanai, E. (2013, July). Evaluation of video transmission in emergency response ad hoc networks. In *2013 International Conference on Data Communication Networking (DCNET)* (pp. 1-9). IEEE.
- [9] Κασιμοπούλου, Α. (2017). *Αδόμητα (ad hoc) δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών* (Master's thesis, Πανεπιστήμιο Πειραιώς).
- [10] Ενέα Τσανάι, *Δρομολόγηση και Πολυμεσικές Εφαρμογές σε Ασύρματα Κινητά Δίκτυα MANET και VANET*, Διπλωματική Εργασία, Οκτώβριος 2014
- [11] The Network Simulator ns-2
<https://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [12] EvalVid - A Video Quality Evaluation Tool-set
<http://www2.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/EvalVid/docevalvid.html>
- [13] Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. (2010). Computer networks.
- [14] Pei, G., Gerla, M., & Chen, T. W. (2000, June). Fisheye state routing: A routing scheme for ad hoc wireless networks. In *2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record* (Vol. 1, pp. 70-74). IEEE.
- [15] Murthy, S., & Garcia-Luna-Aceves, J. J. (1996). An efficient routing protocol for wireless networks. *Mobile Networks and applications*, 1(2), 183-197.
- [16] Haas, Z. J. (1997, October). A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks. In *Proceedings of ICUPC 97-6th International Conference on Universal Personal Communications* (Vol. 2, pp. 562-566). IEEE.
- [17] Johnson, D. B., & Maltz, D. A. (1996). Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile computing* (pp. 153-181). Springer, Boston, MA.
- [18] Perkins, C. E., & Royer, E. M. (1999, February). Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings WMCSA '99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (pp. 90-100). IEEE.

- [19] Park, V. D., & Corson, M. S. (1997, April). A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *Proceedings of INFOCOM'97* (Vol. 3, pp. 1405-1413). IEEE.
- [20] He, G. (2002). Destination-sequenced distance vector (DSDV) protocol. *Networking Laboratory, Helsinki University of Technology*, 1-9.
- [21] Αδάμ, Γ. (2013). *Μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων σε ασύρματα κινητά Ad Hoc δίκτυα (Doctoral dissertation)*.