



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε δίκτυα ΜΑΝΕΤ, με ενεργειακά κριτήρια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιαννακάκης Ε. Σπυρίδων

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Επιβλέπων: Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιαννακάκης Ε. Σπυρίδων

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Επιβλέπων: Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Νοεμβρίου 2009.

.....
Ι. Στ. Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δ.-Θ. Ι. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Γ. Ματσόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

.....
Γιαννακάκης Ε. Σπυρίδων

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

Copyright© 2010 – Γιαννακάκης Ε. Σπυρίδων , 2010

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

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



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια με τις εξελίξεις στο χώρο των τηλεπικοινωνιών και τη ραγδαία ανάπτυξη του Internet, η πρόσβαση στο διαδίκτυο έπαψε να είναι πολυτέλεια και αποτελεί πλέον μια εκ των καθημερινών ασχολιών για τους περισσότερους χρήστες. Επιπρόσθετα όλο και περισσότεροι επαγγελματίες απαιτούν την παροχή δικτυακών υπηρεσιών ακόμα και “καθοδόν”, προκειμένου να είναι πιο αποδοτικοί στην εργασία τους κάνοντας χρήση των πλεονεκτημάτων της τηλε-εργασίας.

Εξυπηρετώντας την ανάγκη αυτή για κινητικότητα, τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc είναι αυτο-οργανούμενα δίκτυα τα οποία δεν απαιτούν την ύπαρξη κάποιας σταθερής δικτυακής υποδομής. Ειδικότερα, τα δίκτυα Mobile Ad-hoc NETworks (MANETs), δηλαδή δίκτυα ad-hoc που αποτελούνται από κινητούς χρήστες, γνωρίζουν ιδιαίτερη άνθηση εξαιτίας της πληθώρας των πιθανών εφαρμογών τους, από δίκτυα αισθητήρων μέχρι vehicular networks. Επιπλέον, αποτελούν και μια επιστημονική περιοχή με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οι συνθήκες και οι περιορισμοί που επικρατούν στα δίκτυα MANET δυσχεραίνουν την λειτουργία τους.

Ένας από αυτούς τους περιορισμούς είναι και η ενεργειακή εξάντληση των φορητών κόμβων του δικτύου. Οι κόμβοι σε ένα MANET μπορεί να είναι κινητά τηλέφωνα, laptops, smart phones, PDAs κτλ, των οποίων η ενέργεια είναι περιορισμένη. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπιστεί σε επίπεδο δικτύου το ενεργειακό πρόβλημα που παρουσιάζεται στα δίκτυα MANET. Συγκεκριμένα τροποποιήσαμε την απλή εκδοχή του Ad-hoc On demand Distance Vector (AODV) routing protocol που λειτουργεί με τον αριθμό hops, ώστε η απόφαση για την καλύτερη διαδρομή προς τον κόμβο-προορισμό να λαμβάνεται με βάση την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων που την απαρτίζουν. Σε μια σειρά προσομοιώσεων αυξανόμενης κλιμάκωσης και κινητικότητας, με χρήση του προγράμματος Network Simulator 2 (ns2) αποδείχτηκε η βελτιστοποίηση στη διάρκεια ζωής του δικτύου και στη δίκαιη κατανομή των ενεργειακών πόρων των κόμβων του.

Λέξεις κλειδιά: ad-hoc δίκτυα, MANET, mobile ad hoc networks, ασύρματη ζεύξη, δρομολόγηση, on demand protocols, distance vector protocols, υπολειπόμενη ενέργεια κόμβου, μέση ενέργεια δικτύου, AODV, PAODV, RREQ, RREP, ns2.



ABSTRACT

With the advances in the field of telecommunications and the rapid growth of Internet, access to the web is no longer considered a privilege but a necessity. What is more, a growing number of professionals demand Internet services even “on the road”, in order to become more efficient in their work, making full usage of the advantages of mobile communications.

Facing this need of mobility, wireless ad-hoc networks are self-organized networks that do not require the presence of a fixed infrastructure. In particular, Mobile Ad-hoc NETWORKS (MANETs) which are comprised of mobile users, are becoming increasingly popular because of their applications from sensor to vehicular networks. Moreover, they represent a scientific area of high interest, as the conditions and the restrictions of the wireless medium impose significant constraints in the operation of a MANET network.

One of these constraints is the battery discharge of the mobile nodes. Nodes in a MANET can be mobile phones, laptops, smart phones, PDAs etc, the energy of which is limited. The present dissertation attempts to solve the energy problem of MANETs using techniques in the network layer. Specifically we modified the original version of Ad-hoc On demand Distance Vector (AODV) routing protocol which uses the number of hops, in order to decide on the best routing path to a destination-node using the remaining energy of the nodes comprising the route. In a series of simulations of added complexity and mobility levels using the Network Simulator 2 (ns2) program, the optimization in network lifetime and the fair distribution of energy resources was proved.

Keywords: ad-hoc networks, MANET, mobile ad hoc networks, wireless propagation, routing, on demand protocols, distance vector protocols, remaining node energy, mean network energy, AODV, PAODV, RREQ, RREP, ns2.



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία παράλληλα με το τέλος της πενταετούς φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο σηματοδοτεί και την έναρξη μιας νέας περιόδου. Η εκπόνηση της διπλωματικής αυτής, πέρα από μια πρώτη εμπειρία ερευνητικής δουλειάς, αποτέλεσε έναυσμα για την απόκτηση γνώσεων τόσο σε θεωρητικά ζητήματα των δικτύων ad-hoc όσο και σε διάφορες προγραμματιστικές τεχνικές. Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν να φτάσω εδώ.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ιάκωβο Βενιέρη για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής και την εμπιστοσύνη που έδειξε στις ικανότητές μου. Η εργασία αυτή δε θα είχε γίνει ποτέ χωρίς τη συμβολή του διδάκτορα πλέον, Κατσιγιάννη Χρήστο, η καθοδήγησή του οποίου υπήρξε καθοριστική σε κάθε στάδιο της εργασίας. Τον ευχαριστώ για την άριστη συνεργασία μας και την υπομονή που έδειξε στα πολλά, είναι η αλήθεια, ερωτήματά μου.

Ειδική μνεία οφείλω να κάνω στους συμφοιτητές και φίλους Αγγελή Γιώργο, Μαυρογορδάτο Θεμιστοκλή και Μιχαλολιάκο Αντώνη, οι οποίοι υπήρξαν συνοδοιπόροι μου σε αυτή την πενταετή διαδρομή.

Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω τους γονείς μου (Μάνο και Άννα) και τα αδέρφια μου (Κωνσταντίνο και Κατερίνα), για τις ευκαιρίες που μου έδωσαν και την αμέριστη στήριξή τους σε κάθε περίοδο της ζωής μου.

Γιαννακάκης Ε. Σπύρος

Αθήνα, Απρίλιος 2010



Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Κατάλογος εικόνων.....	11
Ευρετήριο πινάκων.....	12
1 Εισαγωγή.....	13
1.1 Κατηγορίες ασυρμάτων δικτύων.....	13
1.2 Ορισμός των ad-hoc δικτύων.....	14
1.3 Χαρακτηριστικά των MANETs.....	14
1.4 Εφαρμογές των ad-hoc δικτύων.....	16
1.5 Περιορισμοί και προβλήματα των MANETs.....	18
1.5.1 Περιορισμένο εύρος ζώνης και δυσμενείς συνθήκες διάυλου.....	18
1.5.2 Προβλήματα ασφαλείας.....	18
1.5.3 Περιορισμένη δυνατότητα εκπομπής.....	19
1.5.4 Πρόσβαση στον (κοινό) διάυλο.....	19
1.5.5 Περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι τερματικών.....	21
1.6 Στόχος της διπλωματικής.....	21
1.7 Οργάνωση του κειμένου.....	21
2 Δρομολόγηση.....	23
2.1 Γενικά Στοιχεία-Ορισμοί.....	23
2.2 Παρούσα κατάσταση στο Internet.....	24
2.2.1 Πρωτόκολλα distance vector.....	25
2.2.2 Link-state πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	26
2.3 Διαφοροποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα.....	27
2.4 Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα.....	29
2.4.1 Πινακοδηγούμενα (Proactive ή Table Driven) πρωτόκολλα.....	30
2.4.2 Οδηγούμενα από ζήτηση (Reactive / Demand Driven) πρωτόκολλα.....	31
2.5 Επιλογή πρωτοκόλλου δρομολόγησης.....	31
2.5.1 Επιλογή on demand πρωτοκόλλου δρομολόγησης.....	31
2.5.2 Σύγκριση μεταξύ on demand πρωτοκόλλων και επιλογή.....	33
2.6 AODV.....	34
2.6.1 Συνοπτική περιγραφή.....	34
2.6.2 Τα μηνύματα RREQ, RREP και RERR.....	37
2.6.2.1 Μορφή μηνύματος Route Request (RREQ).....	37
2.6.2.2 Ανάλυση μηνύματος Route Reply (RREP).....	39
2.6.3 Ανάλυση λειτουργίας AODV.....	42
2.6.3.1 Διατήρηση των αριθμών ακολουθίας (sequence numbers).....	42
2.6.3.2 Εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης και λίστες precursor.....	42
2.6.3.3 Δημιουργία αιτημάτων εύρεσης διαδρομής (Route Requests).....	43
2.6.3.4 Έλεγχος της εκπομπής μηνυμάτων αίτησης διαδρομής.....	44



2.6.3.5 Επεξεργασία και προώθηση αιτημάτων διαδρομών-Route Request.....	45
2.6.3.6 Δημιουργία απαντήσεων διαδρομών (Route Replies-RREP)...	46
2.6.3.6.1 Δημιουργία Route Reply από τον προορισμό.....	47
2.6.3.6.2 Δημιουργία Route Reply από ενδιαμέσο κόμβο.....	47
3 Ενεργειακά Θέματα.....	49
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Ενεργειακή αποφόρτιση μπαταρίας.....	53
3.2.1 Μοντέλα αποφόρτισης.....	54
3.3 Μοντελοποίηση απωλειών ενέργειας.....	57
3.4 Τύποι πρωτοκόλλων ανακάλυψης διαδρομής βάσει υπολειπόμενης ενέργειας.....	63
3.4.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστης ισχύος μετάδοσης (Minimum Total Transmission Power - MTPR).....	63
3.4.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου κόστους μπαταρίας (Minimum Battery Cost Routing - MBCCR).....	64
3.4.3 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου-μέγιστου κόστους μπαταρίας (Min-max battery cost routing - MMBCR).....	66
3.4.4 Πρωτόκολλο δρομολόγησης με χρήση όρων μέγιστης-ελάχιστης χωρητικότητας μπαταρίας (Conditional Max-Min Battery Capacity Routing CMMBCR).....	67
3.5 Υπάρχουσα κατάσταση (state of the art).....	68
3.6 Η δικιά μας ενεργειακή επέκταση.....	72
4 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα.....	73
4.1 Network Simulator 2 (ns2).....	73
4.2 Ενεργειακό μοντέλο στον ns2.....	73
4.3 Ενεργειακή επέκταση του AODV στον ns2.....	75
4.4 Σενάρια προσομοιώσεων.....	77
4.4.1 Απλό σενάριο 10 κόμβων με αναλυτική περιγραφή.....	78
4.4.1.1 Αποτελέσματα απλού AODV.....	80
4.4.1.2 Αποτελέσματα ενεργειακής τροποποίησης PAODV.....	81
4.4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	83
4.4.2 Σενάριο 10 κόμβων, με και χωρίς κινητικότητα.....	84
4.4.3 Σενάριο 20 κόμβων.....	87
4.4.4 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα.....	89
4.5 Μελλοντική Εργασία-Βελτιώσεις.....	91
5 Παράρτημα κώδικα tcl.....	93
5.1 Απλό Σενάριο 10 κόμβων.....	93
5.2 Σενάριο 10 κόμβων με και χωρίς κινητικότητα.....	97
5.3 Σενάριο 20 κόμβων με τυχαία τοπολογία, κίνηση κόμβων και δεδομένων.....	103
Βιβλιογραφία.....	107



Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1: Διάφοροι τύποι ασυρμάτων δικτύων.....	14
Εικόνα 1.2: Αλλαγές στην τοπολογία ενός Ad-Hoc δικτύου.....	15
Εικόνα 1.3: Ετερογενές και ομογενές δίκτυο Ad-Hoc.....	16
Εικόνα 1.4: Hidden terminal problem.....	20
Εικόνα 1.5: Exposed terminal problem.....	20
Εικόνα 2.1: Απλουστευμένη δομή του διαδικτύου.....	25
Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε.....	30
Εικόνα 2.3: Εκπομπή RREQ μηνύματος για αίτηση διαδρομής από την πηγή 1 στον προορισμό 10.....	35
Εικόνα 2.4: Διάδοση RREP και διαδρομή που δημιουργείται μεταξύ των κόμβων 1 και 10.....	36
Εικόνα 2.5: Μορφή RREQ μηνύματος.....	38
Εικόνα 2.6: Μορφή RREP μηνύματος.....	40
Εικόνα 3.1: Σύγκριση απόδοσης διαφορετικών δικτύων.....	52
Εικόνα 3.2: Παράδειγμα υπολογισμού του παράγοντα k από data sheets κατασκευαστών.....	56
Εικόνα 3.3: Επίδραση στον κόμβο N εξαιτίας του κόμβου M λόγω ροής f.....	58
Εικόνα 3.4: Παράδειγμα παρουσίασης για χρήση κριτηρίου επιλογής διαδρομής ελάχιστου αριθμού βημάτων.....	66
Εικόνα 4.1: Απλό σενάριο 10 κόμβων.....	79
Εικόνα 4.2: Εμβέλεις κόμβων στο απλό σενάριο.....	79
Εικόνα 4.3: Σύνθετο σενάριο 10 κόμβων, με και χωρίς κινητικότητα.....	84
Εικόνα 4.4: Εμβέλεις κόμβων στο "σύνθετο" σενάριο.....	84
Εικόνα 4.5: Τελική εικόνα στο "σύνθετο" σενάριο 10 κόμβων με κινητικότητα	86
Εικόνα 4.6: Τυχαία τοπολογία 20 κόμβων.....	87



Ευρετήριο πινάκων

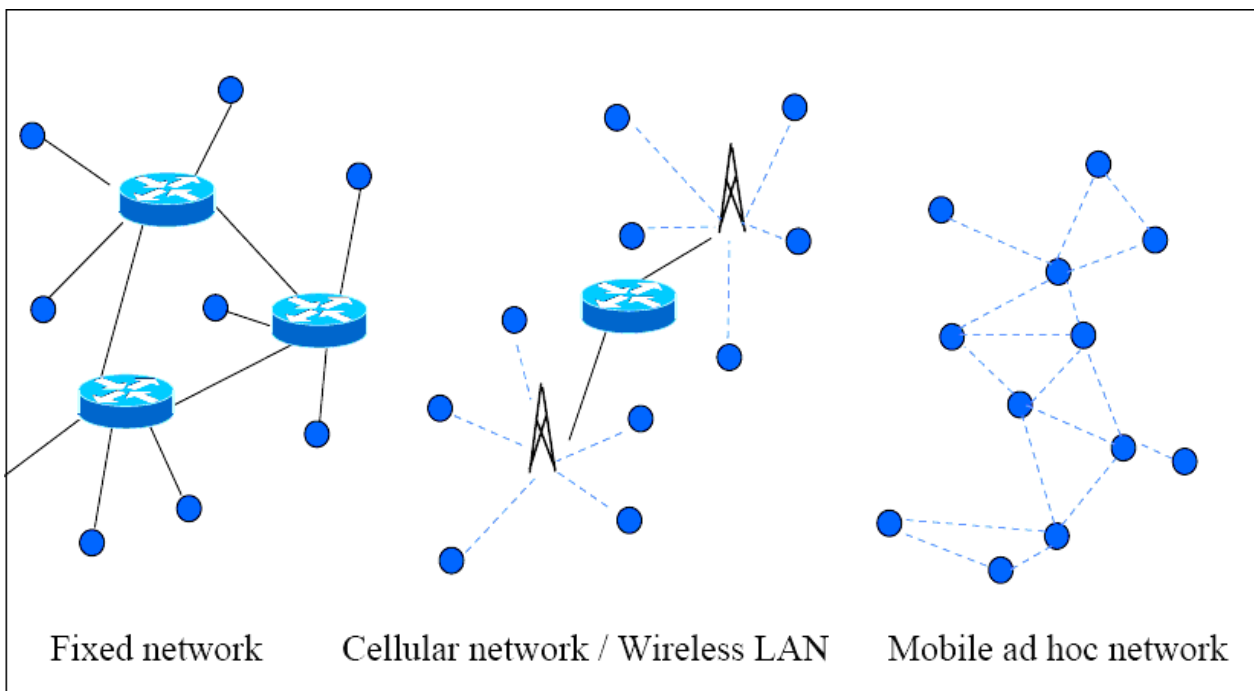
Πίνακας 1: Ανάλυση των πεδίων του RREQ.....	39
Πίνακας 2: Ανάλυση των πεδίων του RREP μηνύματος.....	41
Πίνακας 3: Μετρήσεις διεπαφών δικτύου για την κατανάλωση ενέργειας.....	53
Πίνακας 4: Παρουσίαση των τιμών των μετρήσεων για direct sequence spread spectrum γραμμικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας της κάρτας Lucent IEEE 802.11 WaveLAN PC card 2.4 GHz.....	61
Πίνακας 5: Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις.....	62
Πίνακας 6 : Παράδειγμα tcl script που εισάγει ενεργειακό μοντέλο	74
Πίνακας 7: Ενεργειακά χαρακτηριστικά κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις μας.....	75
Πίνακας 8: Διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των κόμβων του δικτύου προσομοίωσης.....	75
Πίνακας 9: Υπολειπόμενες ενέργειες κόμβων με χρήση απλού AODV στις χρονικές στιγμές πριν την απόφαση δρομολόγησης.....	81
Πίνακας 10: Υπολειπόμενες ενέργειες κόμβων με χρήση PAODV στις χρονικές στιγμές πριν την απόφαση δρομολόγησης.....	82



1 Εισαγωγή

1.1 Κατηγορίες ασυρμάτων δικτύων

Ξεκινάμε με μια συνοπτική αναφορά των ασυρμάτων δικτύων σύμφωνα με το [1], προκειμένου να δώσουμε τη γενικότερη ερευνητική περιοχή της εργασίας. Υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες ασυρμάτων δικτύων. Η πρώτη (και παλιότερη) είναι η κατηγορία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Στα δίκτυα αυτά χρησιμοποιείται ασύρματη μετάδοση στο πρώτο ή/και στο τελευταίο μέρος της τηλεπικοινωνιακής διαδρομής, ενώ στα υπόλοιπα μέρη εμπλέκονται σταθεροί σταθμοί βάσης. Η δεύτερη κλάση είναι τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks, WLANs). Αυτά είναι πραγματικά ασύρματα δίκτυα, στα οποία πραγματοποιείται ωστόσο μετάδοση μονού άλματος (single-hop transmission). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα διάφορα hotspots στα οποία φορητοί υπολογιστές με κάρτες ασύρματης δικτύωσης μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Στην τρίτη κατηγορία συναντάμε δίκτυα που χρησιμοποιούν δορυφορικές ζεύξεις. Σε αυτά η ενεργειακή κατανάλωση είναι σημαντική παρά τη δυνατότητα επαναφόρτισης των ηλιακών κυψελών των δορυφόρων. Στους επίγειους σταθμούς βάσης τα προβλήματα εντοπίζονται στην απαγωγή θερμότητας αν πρόκειται για σταθερούς σταθμούς ή στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας αν πρόκειται για κινητούς σταθμούς. Η επόμενη κατηγορία ασυρμάτων δικτύων, αυτή των δικτύων ad-hoc, είναι και αυτή που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία. Ο όρος ad-hoc χρησιμοποιείται για ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν χωρίς την χρήση σταθερής υποδομής και εξοπλισμού (fixed infrastructure). Συνεπώς τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας όπως και τα δορυφορικά συστήματα εξοπλισμού δεν μπορούν να θεωρηθούν ad-hoc δίκτυα. Η πρόσθετη διαφοροποίηση μάλιστα σε σχέση με ορισμένα δίκτυα WLAN που δεν χρησιμοποιούν κάποιο σταθερό εξοπλισμό, είναι η χρήση στα ad-hoc δίκτυα συνδέσεων πολλαπλών αλμάτων (multi-hop links), για την σύνδεση όλων των κόμβων μεταξύ τους.



Εικόνα 1.1: Διάφοροι τύποι ασυρμάτων δικτύων

1.2 Ορισμός των ad-hoc δικτύων

Αναλυτικότερα, τα δίκτυα ad-hoc είναι ασύρματα, αποκεντρωμένα δίκτυα (Distributed Transient Networks), δηλαδή αυτόνομα συστήματα αποτελούμενα από χρήστες οι οποίοι δεν βασίζονται στην παρουσία κάποιας σταθερής δικτυακής υποδομής. Ετυμολογικά ο όρος ad-hoc σημαίνει “γι'αυτό το λόγο”, ωστόσο ακριβής μετάφραση του όρου δεν υπάρχει στα ελληνικά. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται οι όροι “κατ'απαίτηση” ή “αδόμητο” δίκτυο, που υποδηλώνουν την συχνά προσωρινή ύπαρξη και αυθόρμητη δημιουργία των δικτύων αυτών. Στην περίπτωση μάλιστα που αναφερόμαστε σε κινητούς χρήστες έχουμε να κάνουμε με ένα δίκτυο MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK). Γίνεται κατανοητό ότι οι χρήστες που απαρτίζουν ένα MANET δίκτυο δεν ανήκουν εξορισμού σε αυτό, αλλά έχουν την δυνατότητα να εισέρχονται ή να αποχωρούν από το δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και από οποιοδήποτε σημείο του, μεταβάλλοντας έτσι διαρκώς την τοπολογία του δικτύου.[2],[3]

1.3 Χαρακτηριστικά των MANETs

Στην συνέχεια θα επικεντρωθούμε κυρίως στα χαρακτηριστικά των δικτύων MANET, τα οποία αποτελούν και το βασικό αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας.

- Απουσία ύπαρξης κεντρικής δομής

Η αποκέντρωση ή κατανεμημένη δομή είναι ίσως το βασικότερο χαρακτηριστικό των ad-hoc δικτύων. Για τη εύρυθμη λειτουργία τους δεν απαιτείται η ύπαρξη σταθμού βάσης. Αντίθετα οι συσκευές ανακαλύπτουν την ύπαρξη άλλων συσκευών γύρω τους, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο το δίκτυο. Όλοι οι κόμβοι είναι ισότιμοι και επιτελούν τις ίδιες λειτουργίες για την μετάδοση και λήψη των πακέτων. Παρατηρείται συνεπώς μια αυτό-οργάνωση και αυτοδιαχείριση του

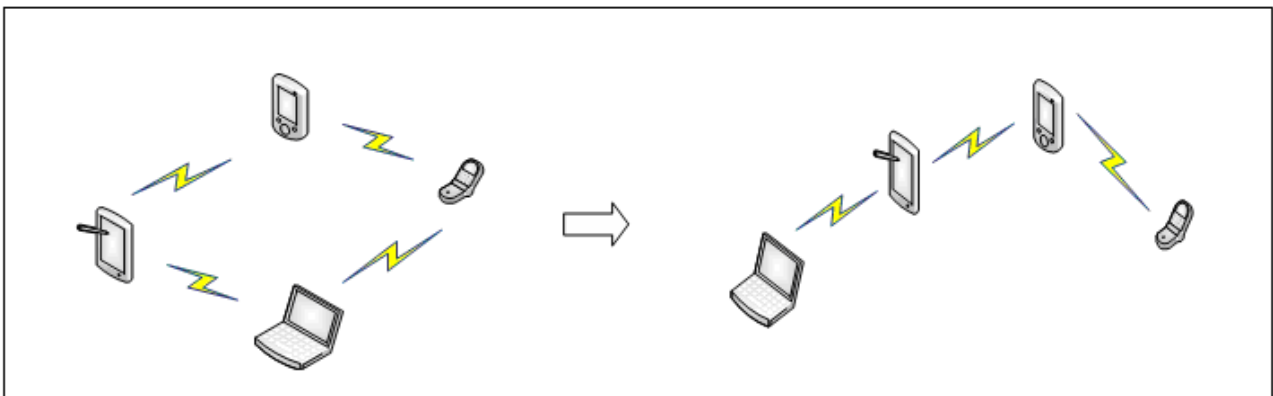
Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

δικτύου από τους ίδιους τους κόμβους του. Αποτέλεσμα της δυνατότητας λειτουργίας χωρίς σταθμό βάσης, είναι η μεγάλη ευκολία και ταχύτητα με την οποία μπορούν να εγκατασταθούν αυτά τα δίκτυα.

Ένα ad-hoc δίκτυο μπορεί να εκτείνεται σε απόσταση πάνω από 500m. Εξαιτίας της περιορισμένης ακτίνας μετάδοσης που διαθέτει ο κάθε κόμβος, οι συνδέσεις πραγματοποιούνται διαμέσου πολλών κόμβων (multi-hop connections), επιτυγχάνοντας έτσι την επικοινωνία και μεταξύ κόμβων εκτός οπτικής επαφής (line of sight). Αυτό είναι εφικτό αφού οι κόμβοι του δικτύου παίζουν ενεργό ρόλο κατά τη δρομολόγηση των πακέτων προωθώντας εκτός από τα δικά τους και τα πακέτα των γειτονικών κόμβων. Αυτό αποτελεί και βασική διαφορά των ad-hoc δικτύων από παλαιότερες κεντροποιημένες δικτυακές τεχνολογίες όπου υπήρχαν κόμβοι με αποκλειστική λειτουργία την προώθηση δεδομένων σε άλλους κόμβους (routers), αφού εδώ ένας κόμβος μπορεί να λειτουργεί τόσο σαν τερματικός όσο και σαν ενδιάμεσος κόμβος. Τα παραπάνω συνηγορούν στο ό,τι κάθε κόμβος εξαρτάται μόνο από τους γειτονικούς του, κάτι το οποίο φυσικά συνεπάγεται την αυξημένη αξιοπιστία του δικτύου, αφού σε μία κεντροποιημένη δομή, η διακοπή της λειτουργίας του σταθμού βάσης συνεπάγεται και διακοπή του δικτύου συνολικά. Για το λόγο αυτό και η προσθήκη ή απομάκρυνση κόμβων είναι μια πολύ εύκολη διαδικασία στα ad-hoc δίκτυα.

- Δυναμική αλλαγή τοπολογίας

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι η μεταβλητότητά τους. Οι κόμβοι που απαρτίζουν το δίκτυο μετακινούνται συνεχώς προς κάθε κατεύθυνση, ενώ είναι πιθανό να βγουν εκτός λειτουργίας, για τυχαίο χρονικό διάστημα. Επιπλέον οι συνθήκες που επικρατούν στον (ασύρματο) δίαυλο αλλάζουν με μεγάλη συχνότητα. Η τοπολογία έτσι του δικτύου μεταβάλλεται με απρόβλεπτο τρόπο σε πολύ μικρό χρονικό ορίζοντα, ενώ και η ύπαρξη εν τέλει του δικτύου δεν είναι δεδομένη.



Εικόνα 1.2: Αλλαγές στην τοπολογία ενός Ad-Hoc δικτύου

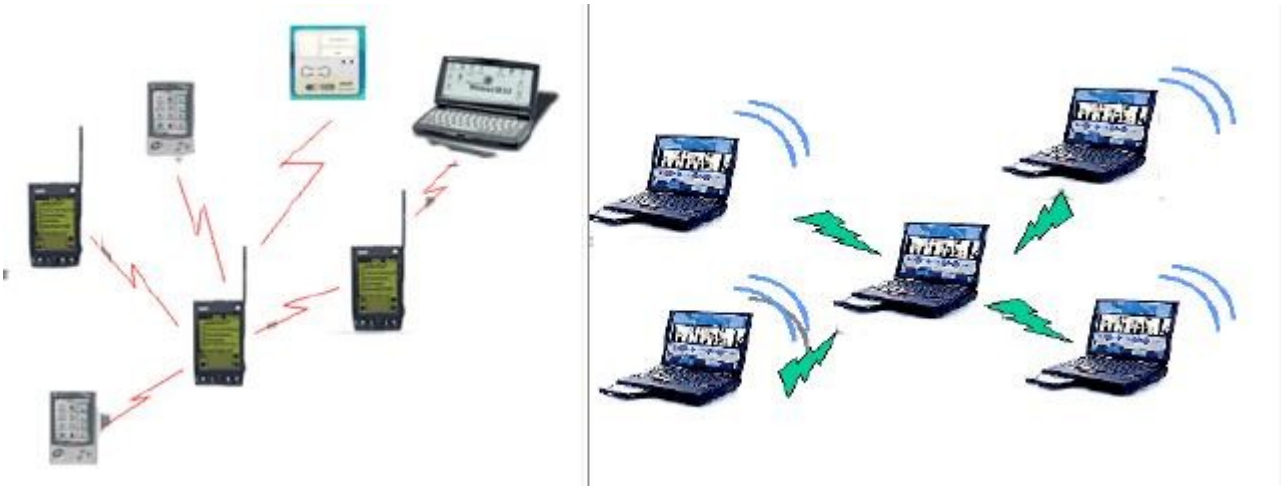
- Ανομοιογένεια

Τα δίκτυα αυτά συχνά είναι ετερογενή, αποτελούνται δηλαδή από διάφορους τύπους δικτυακών συσκευών. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι PDAs, κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, ασύρματοι εκτυπωτές κλπ. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των συσκευών είναι η δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους, ωστόσο οι διάφορες συσκευές που απαρτίζουν το δίκτυο διαφέρουν

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

σημαντικά στα περισσότερα άλλα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η υπολογιστική ισχύς, η ακτίνα εκπομπής ή η διάρκεια ζωής των μπαταριών. Ακόμα και στην περίπτωση όμως που έχουμε ένα ομογενές δίκτυο, κάθε κόμβος δεν έχει την ίδια σημασία για το δίκτυο, ούτε και την ίδια ποσότητα πληροφορίας για να μεταδώσει, ενώ κάποιοι κόμβοι μπορεί να λειτουργούν ως πηγές σταθερού ρυθμού (Constant Bit Rate, CBR) ενώ άλλοι να εκπέμπουν με μεγάλη εκρηκτικότητα.

Όμως και από δίκτυο σε δίκτυο ad-hoc παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση, όσον αφορά για παράδειγμα τους ρυθμούς μετάδοσης, τη δυνατότητα ευρυεκπομπής (broadcasting) ή πολυεκπομπής (multicasting), τη συνύπαρξη με άλλα δίκτυα τα οποία έχουν σταθερή υποδομή, την ικανότητα υποστήριξης κινητικότητας των χρηστών και με τι ταχύτητες κλπ. Συνεπώς το έργο των διαφόρων πρωτοκόλλων αποδεικνύεται δύσκολο προκειμένου να επιτύχουν την επικοινωνία τόσο μεταξύ διαφορετικών χρηστών/κόμβων όσο και μεταξύ διαφορετικών δικτύων. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι τα δίκτυα που διαθέτουν και σταθερή υποδομή ονομάζονται υβριδικά, στα οποία οι κόμβοι υποδομής αναλαμβάνουν εν μέρει τη λειτουργία της δρομολόγησης.



Εικόνα 1.3: Ετερογενές και ομογενές δίκτυο Ad-Hoc

1.4 Εφαρμογές των ad-hoc δικτύων

Οι εφαρμογές των ad-hoc δικτύων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα και με τα [2],[4] ως εξής:

- Δίκτυα αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από κατανεμημένους στο χώρο αυτόνομους αισθητήρες που συνεργάζονται για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών. Για παράδειγμα οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, του ήχου, των δονήσεων, της πίεσης, της κίνησης ή των ρύπων. Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ξεκίνησε για στρατιωτικές εφαρμογές, όπως επιτήρηση σε πεδία μαχών. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε αρκετούς τομείς της καθημερινότητας όπως παρακολούθηση του περιβάλλοντος, καθώς και εφαρμογές υγείας, αυτοματοποίηση των διαδικασιών στο σπίτι και έλεγχο κυκλοφορίας.

Στις εφαρμογές υγείας περιλαμβάνεται η παρακολούθηση, από ιατρικές μονάδες, ενός ασθενούς

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

στο σπίτι. Τα τελευταία χρόνια με την εμφάνιση ασθενειών που σχετίζονται με απώλεια μνήμης ή και κινητικά προβλήματα, όπου υπάρχει ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης, η ερευνητική κοινότητα έχει προχωρήσει στη δημιουργία «έξυπνων περιβαλλόντων» (smart environments) με ιδιαίτερο στόχο την άμεση παροχή βοήθειας στους ασθενείς. Επιπλέον η συγκεκριμένη λύση παρουσιάζει τα πρόσθετα πλεονεκτήματα που εισάγει η κατ'οίκον νοσηλεία. Τέλος σε αθλητικές δραστηριότητες είναι δυνατή η μέτρηση των επιδόσεων και των ζωτικών στοιχείων των αθλητών με συσκευές που ενσωματώνονται στο ανθρώπινο σώμα (BAN-Body Area Networks).

- Προσωπική χρήση (home networks)

Με τα προσωπικά δίκτυα σπιτιού παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο από περισσότερες της μιας θέσης από το σπίτι του. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει δίκτυο στο σπίτι του χρησιμοποιώντας διαφορετικές συσκευές όπως έναν φορητό υπολογιστή (laptop), ένα PDA, ένα κινητό τηλέφωνο ή και άλλες συσκευές. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η ποιότητα της ζωής του χρήστη, αφού αυτές οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα. Επιπλέον ο χρήστης στα πλαίσια ενός «έξυπνου σπιτιού» μπορεί να ελέγχει τις ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι του.

- Εμπορική χρήση

Για τη δημιουργία επικοινωνίας σε περιπτώσεις εκθέσεων, συνεδρίων ή παρουσιάσεις πωλήσεων. Πιο συγκεκριμένα σε τοπικό επίπεδο τα ad-hoc δίκτυα μπορούν να συνδέσουν άμεσα φορητούς υπολογιστές για τη δημιουργία ενός δικτύου πολυμέσων. Αυτό μπορεί να φανεί ιδιαίτερος χρήσιμο σε αίθουσες διδασκαλίας ή συνεδρίων. Γενικότερα σε οποιαδήποτε περίπτωση συναθροίζονται πολλοί άνθρωποι για μικρό χρονικό διάστημα είναι δυνατή η εύκολη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους, χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης υποδομής που μπορεί να είναι οικονομικά ασύμφορη.

- Δίκτυα αυτοκινήτων (Vehicular Networks)

Τέτοια δίκτυα μπορούν να δημιουργηθούν ανάμεσα σε αυτοκίνητα που κινούνται και σε δίκτυα σταθερής υποδομής που καθορίζουν την κυκλοφορία, όπως τα φανάρια. Έτσι μπορεί ο χρήστης-οδηγός να αποφύγει δρόμους όπου υπάρχει κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακόμη να ενημερωθεί και για υπηρεσίες όπως για βενζινάδικα ή συνεργεία που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Επιπλέον, ένα συγκεκριμένο «office-car» μπορεί να περιέχει fax, εκτυπωτές, τηλέφωνο, όπου περαστικοί χρήστες μπορούν να συνδεθούν και να τα χρησιμοποιήσουν μέσω των laptop τους και των PDA.

- Έκτακτες περιπτώσεις

Σε έκτακτες περιπτώσεις για επιχειρήσεις αναζήτησης και διάσωσης. Πιο συγκεκριμένα τα MANETs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία σε περιοχές χωρίς ικανοποιητική ασύρματη κάλυψη ή εφόσον η υπάρχουσα υποδομή επικοινωνίας έχει καταστραφεί εξαιτίας φυσικών καταστροφών. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι συνήθης η απουσία υποδομής και η ανάγκη για άμεση ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών είναι μεγάλη. Άλλες παρόμοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν την επικοινωνία μεταξύ πλοίων ή δυνάμεων τήρησης της τάξης.

- Καταστάσεις χαμηλής κινητικότητας

Πρόκειται για τα δίκτυα που εγκαθίστανται για παράδειγμα μέσα σε κτήρια εταιρειών (enterprise networks). Χρησιμοποιούνται για την πρόσβαση στο internet των εργαζομένων της εταιρείας από διαφορετικές θέσεις-γραφεία, για εφαρμογές video conferencing ή απομακρυσμένων συνεντεύξεων και meeting. Για παράδειγμα σε επαγγελματικές συναντήσεις παρέχουν τη δυνατότητα στον ομιλητή να μεταδώσει προς πολλές πηγές τις παρουσιάσεις του, περιγράφοντας μέσω του video conference στους συμμετέχοντες τις ιδέες του και δίνοντας τη δυνατότητα σε αυτούς να συμμετάσχουν διαδραστικά. Είναι προφανές ότι στις παραπάνω περιπτώσεις προτιμούνται τα δίκτυα ad-hoc όχι τόσο για τη φορητότητα που υποστηρίζουν καθώς οι ανάγκες σε κινητικότητα είναι περιορισμένες, αλλά κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εγκατάστασής τους.

1.5 Περιορισμοί και προβλήματα των MANETs

Εξαιτίας των χαρακτηριστικών που αναλύθηκαν στην ενότητα 1.3, εγείρεται ένα σύνολο από περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός δικτύου MANET, σε σχέση με ένα ενσύρματο δίκτυο:

- Περιορισμένο εύρος ζώνης και μεταβλητή χωρητικότητα διαύλου
- Χαμηλή ασφάλεια
- Περιορισμένη δυνατότητα εκπομπής
- Πρόσβαση στον (κοινό) δίαυλο
- Περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι τερματικών

Στην συνέχεια θα δώσουμε μια συνοπτική αναφορά των περιορισμών αυτών και των απαραίτητων χαρακτηριστικών που πρέπει να διαθέτουν τα ασύρματα δίκτυα, δίνοντας περισσότερη έμφαση σε αυτούς που θα μας απασχολήσουν.

1.5.1 Περιορισμένο εύρος ζώνης και δυσμενείς συνθήκες δίαυλου

Οι ασύρματες ζεύξεις έχουν όπως είναι γνωστό, σημαντικά μικρότερη χωρητικότητα (capacity) και απόδοση (throughput) απ'ότι οι ενσύρματες. Αυτό οφείλεται σε πληθώρα φαινομένων όπως είναι η πολύοδη διάδοση, η ύπαρξη θορύβου, η παρεμβολή σημάτων και η πολλαπλή πρόσβαση (η οποία θα αναλυθεί συνοπτικά στην συνέχεια) μεταξύ άλλων. Για τους παραπάνω λόγους είναι εξαιρετικά δύσκολη αν όχι αδύνατη η παροχή υπηρεσιών με συγκεκριμένες προδιαγραφές σε Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS).

1.5.2 Προβλήματα ασφαλείας

Η αυξημένη πιθανότητα πλαστογράφησης, υποκλοπής ή επιθέσεων άρνησης υπηρεσίας (eavesdropping, spoofing, Denial-of-Service ή DoS attacks) κάνει τα ασύρματα δίκτυα πιο ευάλωτα σε εξωτερικές απειλές.

1.5.3 Περιορισμένη δυνατότητα εκπομπής

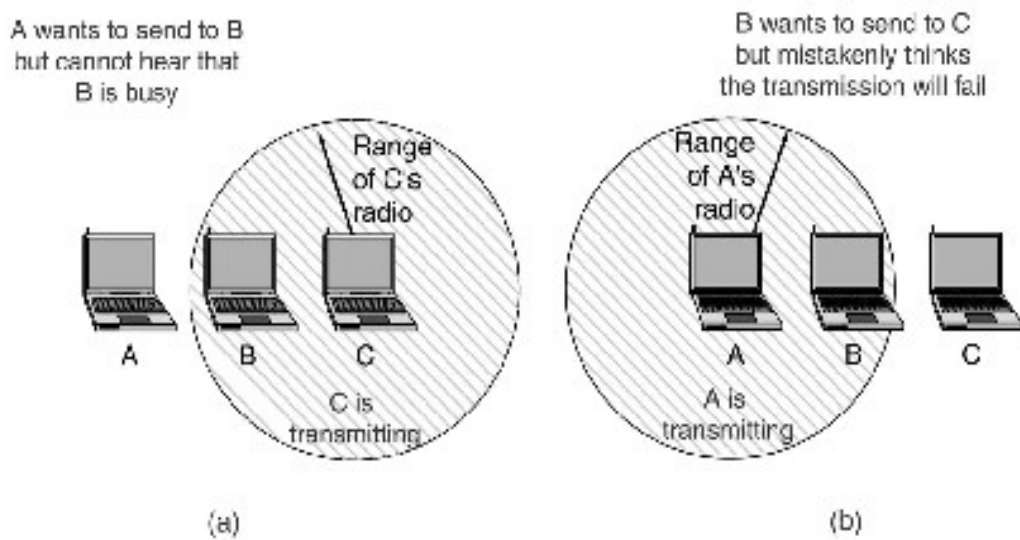
Η δυνατότητα εκπομπής ενός κόμβου βασίζεται στην ακτίνα μετάδοσης του, δηλαδή στην ισχύ του πομποδέκτη του και επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του δικτύου. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα μετάδοσης, τόσο μικρότερος θα είναι ο αριθμός των (ανα)μεταδόσεων που θα απαιτούνται για την αποστολή ενός πακέτου και συνεπώς εφόσον δεχτούμε ότι η αναμετάδοση εισάγει τη μεγαλύτερη καθυστέρηση στη διαδικασία λήψης πακέτου, θα έχουμε μείωση της συνολικής καθυστέρησης, (total delay). Ωστόσο η χρήση μεγάλης ακτίνας μετάδοσης δεν είναι πανάκεια. Αρχικά ένα τερματικό με πομποδέκτη μεγάλης ακτίνας μετάδοσης έχει αυξημένο κόστος κατασκευής. Επιπλέον η αύξηση της ακτίνας μετάδοσης συνεπάγεται και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Επιπρόσθετα η αύξηση της ακτίνας έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο αριθμός των συγκρούσεων αφού μεγαλύτερη ακτίνα μετάδοσης σημαίνει ότι μέσα στην εμβέλεια κάθε κόμβου που εκπέμπει βρίσκονται όλο και περισσότεροι κόμβοι οι οποίοι θέλουν και αυτοί να στείλουν τα πακέτα τους. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εντείνεται και από την έλλειψη κατευθυντικότητας των κεραιών των τερματικών. Έτσι δημιουργούνται άλλα προβλήματα που σχετίζονται με την πρόσβαση στο μέσο, τα οποία θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

Είναι φανερό ότι η επιλογή ακτίνας μετάδοσης αποτελεί σημαντικό κριτήριο καλού σχεδιασμού ενός δικτύου και πρέπει να βασίζεται σε παράγοντες όπως είναι η πυκνότητα των χρηστών, η τοπολογία κλπ. Συγκεκριμένα η ακτίνα μετάδοσης θα πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατόν μικρότερη, χωρίς ωστόσο να είναι τόσο μικρή προκειμένου το δίκτυο τελικά να είναι συνεκτικό. Ενδεικτικά ένας καλός συμβιβασμός (tradeoff) είναι ακτίνα τέτοια ώστε κάθε μετάδοση να "ακούγεται" από περίπου 6 κόμβους.[3]

1.5.4 Πρόσβαση στον (κοινό) δίαυλο

Επειδή δεν υπάρχει κάποιος σταθερός σταθμός βάσης, η πρόσβαση στο δίαυλο είναι κατανεμημένη, κάνοντας δύσκολη την αποφυγή των συγκρούσεων μεταξύ πακέτων. Στα παραδοσιακά ενσύρματα τοπικά δίκτυα ο έλεγχος πρόσβασης μέσου συχνά γίνεται με κάποιο αλγόριθμο CSMA, με τον οποίο πραγματοποιείται ανίχνευση δηλαδή του μέσου για πιθανές μεταδόσεις. Αυτός ο αλγόριθμος όπως θα δούμε [5] σε δύο (τουλάχιστον) σενάρια δεν είναι αποτελεσματικός για τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc.

Ας θεωρήσουμε ό,τι ένας κόμβος A θέλει να μεταδώσει σε ένα κόμβο B. Ήδη όμως ένας άλλος κόμβος C μεταδίδει προς τον B. Αν ο A ανιχνεύσει το μέσο δε θα ακούσει τον C γιατί είναι εκτός της εμβέλειας του και θα συμπεράνει έτσι λανθασμένα ότι μπορεί να στείλει στον B. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθούν παρεμβολές στον B και τελικά να καταστραφούν τα πακέτα και από τις 2 πηγές. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται πρόβλημα κρυμμένου τερματικού ή κρυφού κόμβου (hidden terminal problem) και προκύπτει όταν ένας σταθμός δεν μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία ενός πιθανού ανταγωνιστή για το μέσο, επειδή βρίσκεται εκτός της εμβέλειας του.



Εικόνα 1.4: Hidden terminal problem

Μια άλλη περίπτωση όπου τα παραδοσιακά πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου δεν είναι αποτελεσματικά, είναι η παρακάτω. Θεωρούμε ότι μεταδίδει ο κόμβος A προς τον κόμβο B. Την ίδια στιγμή όμως θέλει να μεταδώσει και ο κόμβος B προς τον C, ωστόσο πραγματοποιώντας ανίχνευση του μέσου διαπιστώνει ότι το μέσο είναι κατηλειμμένο (προς την αντίθετη κατεύθυνση όμως από τον κόμβο C) και έτσι λανθασμένα θεωρεί ότι η μετάδοση προς τον C θα αποτύχει. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται εκτεθειμένου σταθμού (exposed terminal problem).



Fig. 4-11. A wireless LAN. (a) A transmitting. (b) B transmitting.

Εικόνα 1.5: Exposed terminal problem

Όπως βλέπουμε το βασικό μειονέκτημα του CSMA είναι ότι πραγματοποιεί την ανίχνευση του μέσου στον κόμβο που επιθυμεί να πραγματοποιήσει την αποστολή και όχι στον κόμβο που πραγματικά μας νοιάζει να φτάσει σωστά η πληροφορία, δηλαδή στον κόμβο προορισμού. Όταν το μέσο είναι ένα μοναδικό σύρμα όλα τα σήματα διαδίδονται σε όλους τους σταθμούς, επιτρέποντας μία ταυτόχρονη μετάδοση οπουδήποτε στο σύστημα. Έτσι η ανίχνευση του μέσου έχει νόημα. Τα δίκτυα ad-hoc όμως βασίζονται σε ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας για τη μετάδοση της πληροφορίας, συνεπώς μπορούν να γίνονται την ίδια στιγμή πολλές μεταδόσεις αν έχουν όλες διαφορετικούς προορισμούς. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων έχουν προταθεί διάφορα πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου όπως είναι τα MACA, MACAW, FAMA στην κατηγορία

των πρωτοκόλλων που εκκινούνται από τον αποστολέα (sender-initiated MAC protocols), τα MACA-BI, PIMA που εκκινούνται από τον παραλήπτη (receiver-initiated MAC protocols) και τέλος το πρωτόκολλο MARCH.

1.5.5 Περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι τερματικών

Οι συσκευές που αποτελούν ένα ad-hoc δίκτυο μπορεί να διαφέρουν αρκετά όπως περιγράψαμε παραπάνω, ωστόσο οι περισσότερες από αυτές τροφοδοτούνται από μπαταρίες, των οποίων φυσικά η ενέργεια είναι περιορισμένη. Σε ορισμένα σενάρια χρήσης υπάρχει ίσως η δυνατότητα επαναφόρτισης αλλά καθώς κάνουμε αναφορά κυρίως σε περιβάλλοντα μεγάλης κινητικότητας θεωρούμε ότι αυτή η δυνατότητα δεν υπάρχει για τα δίκτυα MANET που θα εξετάσουμε. Επιπρόσθετα, οι διαδικασίες ασύρματης μετάδοσης, λήψης, προώθησης πακέτων καθώς και οι διάφορες εσωτερικές λειτουργίες επεξεργασίας κλπ πακέτων, καταναλώνουν ενέργεια καθιστώντας έτσι επιτακτική την χρήση αλγορίθμων με επίγνωση της ενέργειας (energy-aware algorithms).

Τα πρωτόκολλα που προκύπτουν από τη χρήση τέτοιων αλγορίθμων είναι φυσικά χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας των κόμβων ωστόσο δεν αποτελεί ζήτημα για τα πρωτόκολλα ενός επιπέδου μόνο, αλλά αφορά όλη τη διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων. Έτσι έχουμε για παράδειγμα “κατάλληλα ενεργειακά” πρωτόκολλα (κάποια από αυτά θα παρουσιαστούν και στη διπλωματική παρακάτω) (υπο)επιπέδου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control), όπως είναι το SMAC, επιπέδου δικτύου (δρομολόγηση με ενεργειακά κριτήρια), επιπέδου εφαρμογών κλπ. Κάθε ένα από αυτά τα πρωτόκολλα, ανάλογα με το επίπεδο στο οποίο ανήκει συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας που δαπανάται για τη λειτουργία του δικτύου (πιο συγκεκριμένα για παράδειγμα το MAC ρυθμίζει την ακτίνα μετάδοσης, τα δρομολόγησης δρομολόγηση με ενεργειακά κριτήρια κλπ).

Στα παραπάνω αν προσθέσουμε και τη συνεχή κινητικότητα των τερματικών, καταλαβαίνουμε πως αντιμετωπίζουμε περιβάλλοντα με ιδιαίτερες δυσχέρειες ως προς την επιλογή της κατάλληλης διαδρομής για την μετάδοση των πακέτων.

1.6 Στόχος της διπλωματικής

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να τροποποιήσουμε ένα υπάρχον αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης όπως είναι το AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector), ώστε κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης για τη βέλτιστη διαδρομή των πακέτων να λαμβάνεται υπόψη η ενεργειακή κατάσταση των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται όπως θα δούμε η “ενεργειακή συμπεριφορά” του δικτύου.

1.7 Οργάνωση του κειμένου

Στο πρώτο κεφάλαιο όπως είδαμε, αναφέρθηκαν κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τα δίκτυα ad-hoc. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικά το πρόβλημα της δρομολόγησης στα δίκτυα αυτά και θα γίνει περιγραφή του πρωτοκόλλου AODV που επιλέχτηκε για τις προσομοιώσεις. Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με τα ενεργειακά ζητήματα των δικτύων MANET και τις επιπτώσεις αυτών στη δρομολόγηση. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πρόγραμμα Network Simulator 2 (ns2) που χρησιμοποιήθηκε, οι τροποποιήσεις στον AODV που πραγματοποιήσαμε και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο τελευταίο κεφάλαιο τέλος, δίνονται τα σενάρια των

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια
προσομοιώσεων στη γλώσσα tcl.



2 Δρομολόγηση

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη δρομολόγηση ξεκινώντας με τη δρομολόγηση σε ip δίκτυα. Αφού παρουσιαστούν τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης στο περιβάλλον υψηλής κινητικότητας και αστάθειας των ad-hoc δικτύων, θα εξετάσουμε τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί για ad-hoc δίκτυα. Τέλος παρουσιάζοντας κάποια πρωτόκολλα, θα γίνει κατανοητός ο λόγος για τον οποίο επιλέξαμε το πρωτόκολλο AODV στην παρούσα διπλωματική.

2.1 Γενικά Στοιχεία-Ορισμοί

Με τον όρο **δρομολόγηση** εννοούμε την διαδικασία επιλογής διαδρομών για την αποστολή δεδομένων σε ένα δίκτυο. Δρομολόγηση γίνεται σε διάφορους τύπους δικτύων, όπως είναι τα τηλεφωνικά ή τα δίκτυα μετάδοσης δεδομένων. Στην παρούσα διπλωματική θα μας απασχολήσει η δρομολόγηση σε δίκτυα δεδομένων που χρησιμοποιούν μεταγωγή πακέτου όπως είναι και το Internet. Σε αυτά τα δίκτυα η έννοια της δρομολόγησης σχετίζεται με την προώθηση πακέτων που διαθέτουν λογικές διευθύνσεις από την πηγή τους μέχρι τον τελικό προορισμό χρησιμοποιώντας ενδιάμεσους κόμβους, όπως είναι οι δρομολογητές, γέφυρες, μεταγωγείς κλπ [6].

Τα **πρωτόκολλα δρομολόγησης** είναι πρωτόκολλα που καθορίζουν με ποιο τρόπο δύο δρομολογητές σε ένα δίκτυο υπολογιστών επικοινωνούν μεταξύ τους, ανταλλάσσοντας πληροφορίες που επιτρέπουν την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής μεταξύ 2 κόμβων. Η επιλογή της διαδρομής πραγματοποιείται από τους αλγορίθμους δρομολόγησης. Κάθε δρομολογητής έχει εκ των προτέρων γνώση μόνο για τα δίκτυα στα οποία είναι απευθείας συνδεδεμένος. Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταδίδει αυτή την πληροφορία πρώτα ανάμεσα στους άμεσους γείτονες του κόμβου και στη συνέχεια στο υπόλοιπο δίκτυο και επομένως με αυτό τον τρόπο οι δρομολογητές αποκτούν εικόνα της τοπολογίας του δικτύου. Τέτοια πρωτόκολλα λειτουργούν στο τρίτο επίπεδο OSI (επίπεδο δικτύου-network layer).

Τα βασικά **χαρακτηριστικά** ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι:

- Ο τρόπος και τα κριτήρια με τα οποία επιλέγει τις προτιμώμενες διαδρομές.
- Ο τρόπος με τον οποίο αποφεύγουν το ενδεχόμενο δημιουργίας βρόχων δρομολόγησης.
- Ο χρόνος που χρειάζονται για να συγκλίνουν.
- Πόσο καλά λειτουργούν σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Υπάρχει μεγάλη πληθώρα πρωτοκόλλων δρομολόγησης, το καθένα από τα οποία λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο ή/και κριτήρια. Στόχος όλων όμως είναι να συγκεντρώσουν την απαραίτητη για

την δρομολόγηση πληροφορία.

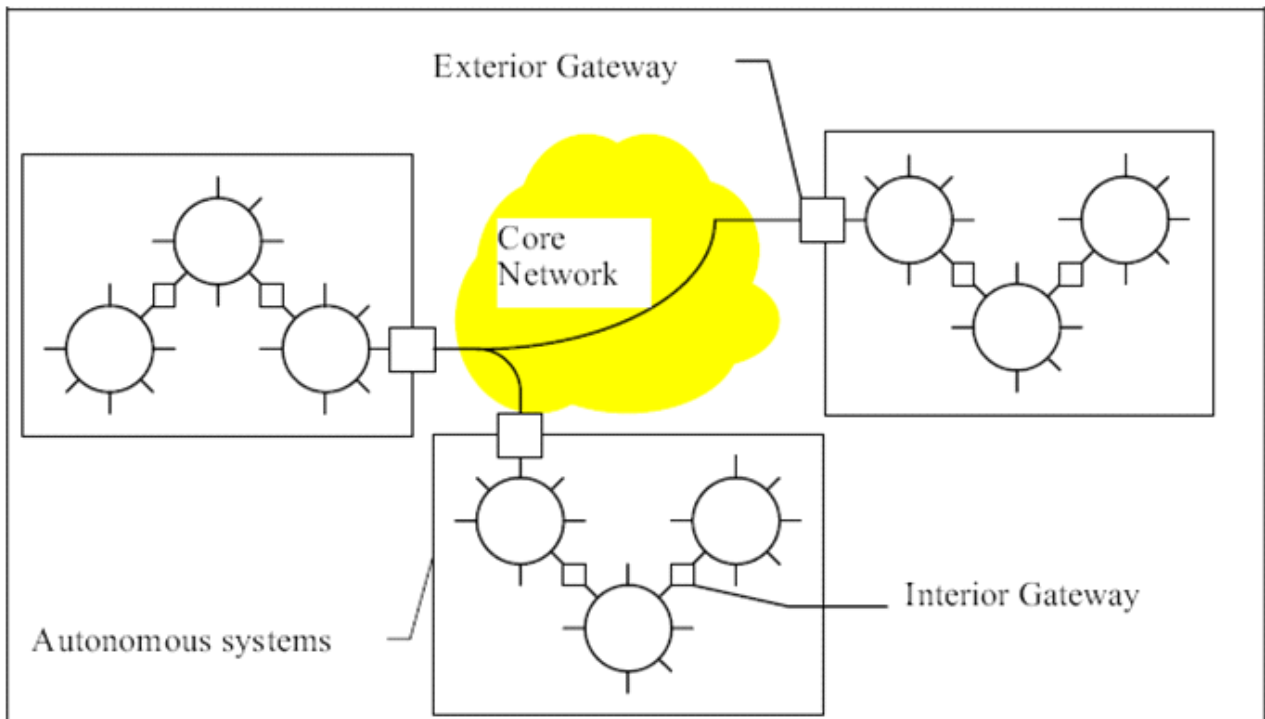
2.2 Παρούσα κατάσταση στο Internet

Πριν αναφερθούμε στα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στο Internet, κρίνεται σκόπιμη η ανάφορα στα **αυτόνομα συστήματα** (autonomous systems). Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζουμε κάθε ανεξάρτητο δίκτυο υπολογιστών που χρησιμοποιεί κοινά προθέματα ip διευθύνσεων για τα μέλη του. Στο εσωτερικό ενός AS επικρατεί μια κοινή και ξεκάθαρη πολιτική δρομολόγησης, ενώ είναι δυνατή η χρήση ιδιωτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα διάφορα Αυτόνομα Συστήματα προσαρτούνται στο δίκτυο κορμού του Internet (core backbone Network). [6],[7]

Ο αρχικός ορισμός σύμφωνα και με το RFC 1771, προϋποθέτει έλεγχο από μία μοναδική διαχειριστική οντότητα, συνήθως από κάποιον ISP ή κάποια μεγάλη οργάνωση, με ανεξάρτητες συνδέσεις σε πολλαπλά δίκτυα. Ο νεότερος ορισμός ωστόσο, όπως έχει διαμορφωθεί από το RFC 1930, δεν απαιτεί τον έλεγχο από μία διαχειριστική αρχή. Για παράδειγμα πολλές οργανώσεις χρησιμοποιούν ιδιωτικούς αριθμούς AS του ίδιου ISP ο οποίος αναλαμβάνει και τη σύνδεση στο Internet. Αν και υπάρχουν πολλαπλά AS που υποστηρίζει ο ίδιος ISP, το Internet «βλέπει» μόνο την πολιτική δρομολόγησης του ISP.

Παρόλο που υπάρχει μεγάλος αριθμός πρωτοκόλλων δρομολόγησης, τρεις τύποι χρησιμοποιούνται ευρέως στα δίκτυα ip:

- Interior gateway routing με χρήση link state routing protocols, όπως είναι τα OSPF και IS-IS
- Interior gateway routing με χρήση path ή distance vector protocols, όπως είναι τα RIP και IGRP.
- Exterior Gateway routing, όπως είναι το BGP-4 που πλέον αποτελεί το de-facto πρωτόκολλο στο «δημόσιο» Internet.



Εικόνα 2.1: Απλουστευμένη δομή του διαδικτύου

Όπως βλέπουμε δύο είναι οι κύριες κατηγορίες πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου: τα πρωτόκολλα link-state και τα πρωτόκολλα distance vector. Η παραπάνω διάκριση γίνεται με βάση τον τρόπο της δυναμικής προσαρμογής στην κατάσταση του δικτύου. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε κάθε μια κατηγορία ξεχωριστά. [6]

2.2.1 Πρωτόκολλα distance vector

Σε αυτό το μοντέλο δρομολόγησης κάθε router ανταλλάσσει εκτιμήσεις για τις ζεύξεις με τους γειτονικούς του. Ο όρος Distance Vector σημαίνει ότι οι δρομολογητές διαφημίζονται σαν ένα διάνυσμα με απόσταση («μέτρο») και κατεύθυνση. Η κατεύθυνση είναι η διεύθυνση του επόμενου άλματος, ενώ το ρόλο της απόστασης μπορούν να παίξουν διάφορες μετρικές, όπως είναι ο αριθμός των αλμάτων για παράδειγμα στο πρωτόκολλο RIP ή η καθυστέρηση και το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο IGRP. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές πρωτοκόλλων DV στις οποίες η μέθοδος υπολογισμού της καλύτερης διαδρομής διαφέρει, ωστόσο τα κύρια χαρακτηριστικά είναι κοινά σε όλα τα πρωτόκολλα.

Τα πρωτόκολλα βασίζονται στον υπολογισμό της κατεύθυνσης και του κόστους για κάθε ζεύξη στο δίκτυο με χρήση του αλγορίθμου **Bellman-Ford**. Οι δρομολογητές δεν έχουν γνώση ολόκληρης της διαδρομής προς τον προορισμό. Αντίθετα στέλνουν περιοδικές ενημερώσεις προς τους γειτονικούς τους, με ολόκληρο ή μέρος του πίνακα δρομολόγησης τους. Οι κόμβοι όταν δέχονται ανανεώσεις, τις ελέγχουν και στην συνέχεια ανανεώνουν τον δικό τους πίνακα δρομολόγησης αν είναι αναγκαίο. Όταν ένας δρομολογητής τέλος έχει την πιο πρόσφατη πληροφορία, ενημερώνει τον δικό του πίνακα και στη συνέχεια ενημερώνει τους γειτονικούς του για τις αλλαγές. Λέμε

συνεπώς ότι η δρομολόγηση γίνεται με φήμες (routing by rumor), γιατί οι δρομολογητές στηρίζονται στην πληροφορία που λαμβάνουν από τους γειτονικούς τους routers και δεν μπορούν να εξακριβώσουν αν αυτές οι πληροφορίες ισχύουν όντως.

Περιορισμοί:

Ο αλγόριθμος Bellman-Ford δεν αποτρέπει την δημιουργία κυκλικών βρόχων δρομολόγησης. Στην απλούστερη περίπτωση κυκλικοί βρόχοι δημιουργούνται όταν μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων, ο καθένας θεωρεί τον άλλο σαν την καλύτερη διαδρομή προς τον προορισμό. Τα πακέτα συνεπώς δρομολογούνται συνεχώς μεταξύ των κόμβων αυτών, μέχρι να απορριφθούν τελικά. Βρόχοι μπορούν να προκύψουν και μεταξύ περισσότερων κόμβων.

Επιπλέον, υποφέρει από ένα πρόσθετο πρόβλημα γνωστό ως “count-to-infinity” το οποίο μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα με τη βοήθεια του παρακάτω παραδείγματος. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε τους κόμβους A και C, οι οποίοι απέχουν ένα βήμα ο καθένας από τον B, όπως φαίνεται στο σχήμα. Κάποια στιγμή η ζεύξη μεταξύ B και C «πέφτει». Μέχρι τότε ο A γνωρίζει ότι απέχει από τον C 2 βήματα. Ο B δεν δέχεται κάποιο διάνυσμα απόστασης από τον C, καθώς η ζεύξη είναι «κάτω». Αντιθέτως ξέρει ότι απέχει 1 βήμα από τον A, ο οποίος με τη σειρά του στέλνει ενημέρωση ότι απέχει 2 από τον C. Συνεπώς, ο B θεωρεί ότι απέχει 3 συνολικά βήματα από τον C. Όταν ο A λαμβάνει αυτή την ενημέρωση, ανανεώνει τον πίνακά του με την πληροφορία ότι ο C απέχει 4 (1 βήμα μέχρι τον B και 3 μέχρι τον C). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται με συνεχείς ενημερώσεις από τους κόμβους A και B, μέχρι το άπειρο.

Προτεινόμενες λύσεις:

Η μερική λύση στο φαινόμενο “count-to-infinity” είναι η χρήση αλγορίθμου Split-horizon με Poison Reverse. Αυτός ο αλγόριθμος μειώνει την πιθανότητα σχηματισμού βρόχων ενώ απαγορεύει σε ένα κόμβο να αποστέλλει ενημερώσεις προς την διεπαφή από την οποία ενημερώθηκε. Πρόσθετο μέτρο αποτελεί η χρήση hold time (άρνηση ανανέωσης διαδρομής για κάποια λεπτά μετά από retraction διαδρομής), το οποίο αποτρέπει τη δημιουργία βρόχων σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις αλλά αυξάνει δραματικά τους χρόνους σύγκλισης.

2.2.2 Link-state πρωτόκολλα δρομολόγησης

Η άλλη μεγάλη κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι τα πρωτόκολλα link-state. Η βασική ιδέα είναι ότι κάθε κόμβος (δρομολογητής) κατασκευάζει ένα χάρτη σε μορφή γράφου με τις συνδέσεις μεταξύ όλων των κόμβων. Κάθε κόμβος στη συνέχεια υπολογίζει ανεξάρτητα την καλύτερη διαδρομή από αυτόν προς κάθε πιθανό προορισμό. Η συλλογή των βέλτιστων διαδρομών σχηματίζει τον πίνακα δρομολόγησης του κόμβου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι τα πρωτόκολλα OSPF και IS-IS.

Αρχικά κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο «συνδεσιμότητας» για να καθορίσει τις απευθείας συνδέσεις με τους γειτονικούς του κόμβους. Στην συνέχεια περιοδικά ή σε περίπτωση αλλαγής στις ζεύξεις, δημιουργεί ένα σύντομο μήνυμα, το link-state advertisement στο οποίο προσδιορίζεται ο κόμβος που το δημιουργεί, οι γειτονικοί του κόμβοι ενώ περιλαμβάνεται και ένας

αύξων ακολουθιακός αριθμός. Το μήνυμα αυτό μεταδίδεται σε ολόκληρο το δίκτυο, γι' αυτό και λέμε ότι στα πρωτόκολλα αυτά «κάθε δρομολογητής λέει στον κόσμο τους γείτονές του». Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα link-state advertisement, ελέγχει τον αριθμό ακολουθίας που έχει αποθηκεύσει για την πηγή του μηνύματος. Αν διαπιστώσει ότι ο αριθμός ακολουθίας του μηνύματος είναι μεγαλύτερος από την προηγούμενη καταχώρηση, τότε το μήνυμα αποθηκεύεται και στέλνεται με τη σειρά του σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους. Με αυτή τη διαδικασία κάθε κόμβος λαμβάνει ένα αντίγραφο της πιο πρόσφατης κατάστασης ολόκληρου του δικτύου. Η κατασκευή πλέον του χάρτη είναι εφικτή με τον διαδοχικό έλεγχο των link state advertisements. Για κάθε link state advertisement που υπάρχει συμφωνία και από τις δύο πλευρές-κόμβους δημιουργείται μία ζεύξη στον χάρτη. Αν ένας κόμβος δηλώνει ότι είναι συνδεδεμένος με έναν άλλο ενώ ο άλλος όχι, τότε κάποιο πρόβλημα υπάρχει και η ζεύξη δεν καταχωρείται στον γράφο. Το επόμενο βήμα είναι η κατασκευή του πίνακα δρομολόγησης από την επιθεώρηση του γράφου. Κάθε κόμβος τρέχει κάποια παραλλαγή του αλγορίθμου **Dijkstra** πάνω στον χάρτη, για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής προς κάθε άλλο κόμβο του δικτύου.

Καταστάσεις αποτυχίας:

Αν όλοι οι κόμβοι δεν χρησιμοποιούν τον ίδιο ακριβώς χάρτη βρόχοι δρομολόγησης μπορούν να δημιουργηθούν. Ο λόγος είναι ότι για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής δεν υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ των κόμβων, συνεπώς αν οι κόμβοι έχουν ξεκινήσει με διαφορετικούς χάρτες, είναι εύκολο να προκύψουν βρόχοι.

2.3 Διαφοροποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα

Στο πρώτο κεφάλαιο είδαμε τους περιορισμούς των δικτύων ad-hoc. Στην ενότητα αυτή θα συνδέσουμε τους περιορισμούς αυτούς με τη διαδικασία της δρομολόγησης και θα αναφέρουμε τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων δρομολόγησης προκειμένου αυτοί να λειτουργούν ικανοποιητικά σε περιβάλλοντα MANET.

Η κινητικότητα των χρηστών είναι ίσως ο δυσμενέστερος παράγοντας για τη δρομολόγηση των πακέτων, αφού εξαιτίας της αλλάζει πολύ συχνά η τοπολογία του δικτύου και επομένως απαιτείται σε σύντομο χρονικό διάστημα η κατασκευή νέων διαδρομών. Επιπλέον το περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης επιβάλλει τη χρήση μικρού αριθμού μηνυμάτων σηματοδοσίας και ελέγχου των ζεύξεων, μηνύματα τα οποία είναι ωστόσο απαραίτητα για την έγκαιρη διάγνωση προβλημάτων στις ζεύξεις. Ακόμα το ποσοστό των πακέτων που χάνονται είναι αρκετά υψηλό, εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας του διαύλου, με αποτέλεσμα τη συχνή απώλεια και αυτών των λίγων πακέτων σηματοδοσίας. Το πρόβλημα της δρομολόγησης εντείνεται και από το γεγονός ότι τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν σχεδιαστεί για συνθήκες πολύ πιο ευνοϊκές από αυτές που επικρατούν στα ασύρματα δίκτυα. Συνεπώς τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται για ενσύρματα δίκτυα δεν ενδείκνυνται για τα δίκτυα MANET.

Αντιθέτως [3],[8],[9], τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που προορίζονται για χρήση σε δίκτυα ad-hoc πρέπει να διαθέτουν χαρακτηριστικά όπως:

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

- Κατανεμημένη λειτουργία

Η λειτουργία ενός κεντρικοποιημένου πρωτοκόλλου δρομολόγησης δεν είναι αξιόπιστη σε περίπτωση κίνησης των κόμβων, ενώ εξαρτάται και από την παρουσία συγκεκριμένων κόμβων στο δίκτυο. Εφόσον τα ad-hoc είναι δίκτυα που οργανώνονται μόνα τους, κάθε κόμβος θα πρέπει να μπορεί να λαμβάνει ανεξάρτητα αποφάσεις δρομολόγησης.

- Αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης

Το εύρος ζώνης σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι περιορισμένο. Συνεπώς το πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν πρέπει να επιβαρύνει το δίκτυο με υπερβολικό αριθμό μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδοσίας. Πρωτόκολλα με λειτουργία βασισμένη στη ζήτηση, όπου ο αλγόριθμος δρομολόγησης προσαρμόζεται στο μοντέλο της κίνησης ανάλογα με τη ζήτηση που υπάρχει, χρησιμοποιούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης πιο αποδοτικά.

- Αποδοτική χρήση της μπαταρίας των κόμβων

Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας η μείωση των χρηστών λόγω έλλειψης μπαταρίας δεν δυσχεραίνει την επικοινωνία των υπολοίπων, αλλά αντίθετα μειώνει τις παρεμβολές και τη χρησιμοποίηση του διαύλου. Αντίθετα οι χρήστες στα δίκτυα ad-hoc εξαρτώνται και από τους άλλους χρήστες για τη μετάδοση των μηνυμάτων τους. Επιπλέον η μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων κάποιων χρηστών μπορεί να οδηγήσει σε κατακερματισμό του δικτύου. Ένα αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για ad-hoc θα πρέπει να υποστηρίζει λειτουργία άεργων περιόδων, ώστε κάποιοι κόμβοι ενός ad-hoc δικτύου να μπορούν να πάψουν να λαμβάνουν ή να μεταδίδουν πακέτα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

- Ελευθερία βρόχων

όπως είναι ζητούμενο σε κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης εξάλλου. Η κινητικότητα των κόμβων καθιστά πιο δύσκολη την αποφυγή βρόχων. Παράλληλα στα δίκτυα ad-hoc, οι βρόχοι δρομολόγησης πέρα από καθυστερήσεις στην παράδοση των πακέτων προκαλούν και σπατάλη των πόρων του δικτύου (εύρος ζώνης και ενέργεια). Επιπλέον, εξαιτίας της ταχέων αλλαγών που παρατηρούνται στα δίκτυα ad-hoc το πρωτόκολλο θα πρέπει να δημιουργεί γρήγορα διαδρομές για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν αλλάξει η τοπολογία του δικτύου.

- Ασφάλεια

Τα ad hoc δίκτυα όντας ασύρματα δίκτυα υποφέρουν από θέματα ασφάλειας. Η ασφάλεια είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως είναι οι στρατιωτικές.

- Υποστήριξη συνδέσεων μονής κατεύθυνσης (Unidirectional links).

Κατά τη σχεδίαση πρωτοκόλλων δρομολόγησης θεωρείται συνήθως ότι όλες οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων είναι διπλής κατεύθυνσης. Ωστόσο, συνδέσεις μονής κατεύθυνσης υπάρχουν συχνά στα ασύρματα δίκτυα (εξαιτίας διαφορετικών δυνατοτήτων εκπομπής ή παρεμβολών), γι' αυτό και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

2.4 Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα

Όπως είναι προφανές έχει προταθεί μεγάλος αριθμός πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ad-hoc δίκτυα. Κάθε τέτοιο πρωτόκολλο είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί με διαφορετικά κριτήρια. Για την καλύτερη εποπτεία των διαθέσιμων πρωτοκόλλων έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι κατηγοριοποίησης. Συνοπτικά αναφέρουμε μερικούς τρόπους ταξινόμησης, όπως παρουσιάζονται στα [3],[8],[10]:

- Ο κλασικός τρόπος είναι ανάλογα με τον τρόπο που λαμβάνεται η απόφαση δρομολόγησης ή αλλιώς ποια **στρατηγική δρομολόγησης** ακολουθείται. Τα πρωτόκολλα έτσι χωρίζονται σε πινακοδηγούμενα (table-driven ή proactive) και κατ'απαίτηση (on demand ή reactive). Στο [11] έχουν προταθεί κάποιες αλλαγές που έχουν να κάνουν με την ύπαρξη ιεραρχίας ή την γεωγραφική θέση. Ο συγκεκριμένος τρόπος ακολουθείται γενικώς και είναι αυτός που επιλέξαμε και εμείς για την ανάλυσή μας.
- Ένας άλλος τρόπος είναι με βάση το **σημείο που λαμβάνεται η απόφαση** δρομολόγησης. Όταν η δρομολόγηση γίνεται κατανεμημένα, κάθε κόμβος αποφασίζει για τον επόμενο στον οποίο θα προωθήσει το πακέτο. Αντίθετα στη δρομολόγηση πηγής (source routing), ο κόμβος που στέλνει το πακέτο αποφασίζει την διαδρομή που θα ακολουθήσει αυτό μέχρι τον προορισμό του.
- Ο **τρόπος που γίνεται η προσαρμογή** στην κατάσταση του δικτύου αποτελεί μια ακόμα μέθοδο ταξινόμησης. Έτσι έχουμε πρωτόκολλα βασισμένα σε αλγορίθμους που χρησιμοποιούν διανύσματα απόστασης ή distance vector και άλλα βασισμένα σε αλγορίθμους κατάστασης ζεύξης ή link state, όπως αναλύθηκαν και προηγουμένως.

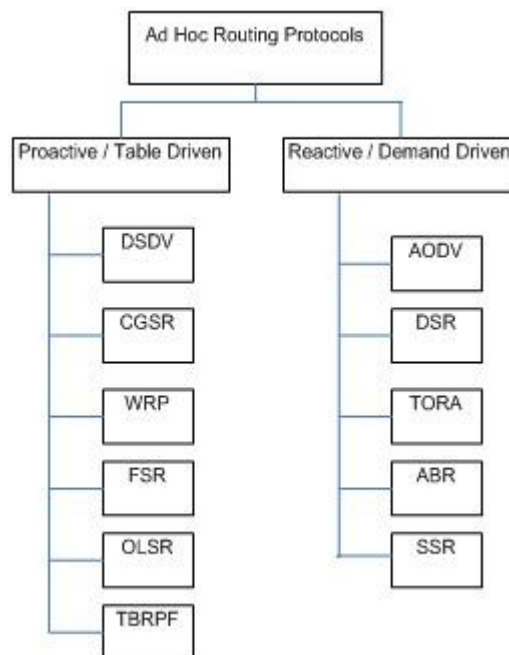
Τέλος, μια ενδιαφέρουσα ταξινόμηση που έχει προταθεί από την L.M. Feeney στο [12], αντικατοπτρίζει τις κυριότερες επιλογές στον σχεδιασμό και την υλοποίηση των πρωτοκόλλων και συνοψίζει εν μέρει τα παραπάνω:

- Ποιο είναι το μοντέλο επικοινωνίας: ενός ή πολλαπλών καναλιών (single ή multi-channel);
- Ποια είναι η δομή του δικτύου: αντιμετωπίζονται όλοι οι κόμβοι με τον ίδιο ή διαφορετικό τρόπο; Τα πρωτόκολλα σε αυτή την περίπτωση μπορούν να διακριθούν σε επίπεδα ή ιεραρχικά (flat ή hierarchical). Σε ένα επίπεδο πρωτόκολλο όλοι οι κόμβοι εκτελούν την ίδια λειτουργία. Σε ένα μη επίπεδο μπορεί κάποιος κόμβος να έχουν ειδική λειτουργία. Επιπλέον στα πρωτόκολλα ιεραρχικής τοπολογίας χρησιμοποιούνται ομάδες (clusters) με κάθε ομάδα να αντιπροσωπεύεται από έναν επικεφαλής-κόμβο (cluster-head), προκειμένου να εισαχθεί κάποια δομή στη δυναμική φύση του δικτύου.
- Πληροφορία κατάστασης: Έχει κάθε κόμβος πρόσβαση σε πληροφορίες για ολόκληρο το δίκτυο (topology based ή destination based);
- Χρονοπρογραμματισμός: Η πληροφορία των διαδρομών διατηρείται συνέχεια για κάθε προορισμό και ανανεώνεται περιοδικά ή δημιουργείται κάθε φορά που χρειάζεται; (proactive ή reactive)

Άλλες ξεχωριστές κατηγορίες είναι πρωτόκολλα βασισμένα στη **ροή** ή τα πρωτόκολλα βασισμένα στη **γεωγραφική θέση**(Geographical Position Based). Τέλος υπάρχουν και πρωτόκολλα βασισμένα

στην **ενέργεια**. Η ενέργεια που χρειάζεται για την μετάδοση ενός σήματος είναι προσεγγιστικά ανάλογη του όρου d^2 όπου d η απόσταση και α 2 είναι ο παράγοντας εξασθένισης, που εξαρτάται από το μέσο μετάδοσης. Στην βέλτιστη περίπτωση που είναι $\alpha=2$, ισχύει ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου. Σε αυτή την περίπτωση για παράδειγμα η μετάδοση ενός σήματος στη μισή απόσταση απαιτεί το ένα τέταρτο της ενέργειας. Αν ο ενδιαμέσος κόμβος είναι διατεθειμένος να ξοδέψει το άλλο τέταρτο για τη μετάδοση μέχρι τον τελικό κόμβο, η μετάδοση του σήματος θα έχει επιτευχθεί με τη μισή κατανάλωση ενέργειας (συνολικά στο δίκτυο) σε σχέση με την απευθείας μετάδοση. Γενικότερα τα πρωτόκολλα αυτά υποφέρουν από πρόσθετες καθυστερήσεις σε κάθε μετάδοση.[6]

Στην παρούσα διπλωματική ωστόσο θα χρησιμοποιήσουμε την πιο συνηθισμένη και απλή μέθοδο ταξινόμησης με βάση τη στρατηγική της δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα έτσι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: πινακοδηγούμενα (Table-driven ή proactive) και οδηγούμενα από ζήτηση (Demand driven ή reactive). Στα πινακοδηγούμενα πρωτόκολλα κάθε κόμβος διατηρεί σε πίνακες, πληροφορίες δρομολόγησης για όσους κόμβους γνωρίζει. Οι πληροφορίες δρομολόγησης ενημερώνονται περιοδικά. Στα οδηγούμενα από ζήτηση πρωτόκολλα απ' την άλλη πλευρά μια συγκεκριμένη διαδρομή από ένα κόμβο σε έναν άλλο δημιουργείται μόνο εφόσον ζητηθεί. Η παρακάτω εικόνα 2.2 δείχνει την προσέγγιση που ακολουθήσαμε:



Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε

2.4.1 Πινακοδηγούμενα (Proactive ή Table Driven) πρωτόκολλα

Στα πινακοδηγούμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης κάθε κόμβος διατηρεί ανά πάσα στιγμή πληροφορίες δρομολόγησης για κάθε πιθανό κόμβο-προορισμό μέσα στο δίκτυο. Γι' αυτό

απαιτείται κάθε κόμβος να διατηρεί έναν ή περισσότερους πίνακες για την αποθήκευση των συγκεκριμένων πληροφοριών και για να ανταποκρίνεται στις αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου εκπέμποντας ενημερώσεις σε άλλους κόμβους. Ο όρος proactive δηλώνει ότι οι ενημερώσεις πραγματοποιούνται περιοδικά, δηλαδή τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα δρουν ακόμα και χωρίς να έχει συμβεί κάποια αλλαγή στις ζεύξεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων πρωτοκόλλων είναι το **DSDV** (Destination Sequence Distance Vector Routing). Το πρωτόκολλο αυτό υλοποιήθηκε από την IBM το 1996 και χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη μορφή του αλγορίθμου Bellman-Ford, είναι δηλαδή ένα πρωτόκολλο διανύσματος απόστασης. Το πρωτόκολλο λειτουργεί με τον παρακάτω τρόπο: οι κινητοί κόμβοι διατηρούν διαδρομές για όλους τους πιθανούς προορισμούς και διακινούν πληροφορία για τη δρομολόγηση μεταξύ τους. Ο αριθμός των βημάτων χρησιμοποιείται ως μετρική για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής. Για να εξασφαλιστεί ότι η πληροφορίες που διακινούνται είναι ενημερωμένες, χρησιμοποιούνται αριθμοί ακολουθίας. Κάθε κόμβος διατηρεί πληροφορία για τον δικό του χρόνο και ακολουθία των γεγονότων που συμβαίνουν, προκειμένου να γίνεται η ανανέωση του πίνακα δρομολόγησής του.

2.4.2 Οδηγούμενα από ζήτηση (Reactive / Demand Driven) πρωτόκολλα

Τα οδηγούμενα από ζήτηση πρωτόκολλα αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση στη δρομολόγηση. Ο όρος reactive δηλώνει ότι τα πρωτόκολλα αυτά αντιδρούν στις αλλαγές των ζεύξεων, χωρίς να χρησιμοποιούν περιοδικές ανανεώσεις. Οι διαδρομές κατασκευάζονται μόνο όταν αυτό ζητηθεί από τον κόμβο-πηγή. Όταν ένας κόμβος μέσα στο δίκτυο ζητήσει μια διαδρομή προς κάποιο συγκεκριμένο προορισμό, αρχικοποιείται μια διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής στο δίκτυο. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται όταν βρεθεί μια διαδρομή ή όταν έχουν εξεταστεί όλες οι πιθανές διαδρομές. Αφού μια διαδρομή κατασκευαστεί, διατηρείται μέχρι ο προορισμός να μην είναι πια προσβάσιμος μέσω της συγκεκριμένης διαδρομής ή μέχρι η διαδρομή να μη χρειάζεται πια. Βασικό εκπρόσωπο αυτής της κατηγορίας αποτελεί ο AODV, του οποίου η περιγραφή ακολουθεί σε επόμενη ενότητα.

2.5 Επιλογή πρωτοκόλλου δρομολόγησης

2.5.1 Επιλογή on demand πρωτοκόλλου δρομολόγησης

Καταρχάς, να διευκρινιστεί ότι διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να αποδειχθούν πιο αποτελεσματικά σε διαφορετικά δίκτυα και σενάρια κίνησης ή φορτίου. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάλληλο για την πλειοψηφία των ad hoc δικτύων, αλλά σε κάθε ad hoc δίκτυο το πρωτόκολλο δρομολόγησης επιλέγεται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Για την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων είναι απαραίτητη και η αξιολόγηση των μετρικών απόδοσης. Στο [10] γίνεται αναλυτική περιγραφή των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των δικτύων, ωστόσο αυτό είναι έξω από τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής. Συνοπτικά οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή του καταλληλότερου

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

πρωτοκόλλου είναι το μέγεθος του δικτύου, ο βαθμός κινητικότητας και οι απαιτήσεις φορτίου των χρηστών.

Εξαιτίας του περιβάλλοντος κινητικότητας και ταχέων αλλαγών που χαρακτηρίζει τα MANET, η επιλογή on demand πρωτοκόλλου για τη δρομολόγηση, κρίνεται σκόπιμη. Σε αυτή την απόφαση συνετέλεσε και η πληθώρα μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα πινακοδηγούμενα πρωτόκολλα. Στα proactive πρωτόκολλα όπως είναι το DSDV, ανταλλάσσεται μεγάλη ποσότητα πληροφορίας για τη συντήρηση των διαδρομών ενώ η αντίδραση σε περίπτωση αποτυχίας των ζεύξεων ή αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου είναι αργή. Επιπλέον, καθώς το πλήθος των κόμβων αυξάνει, το μέγεθος των πινάκων δρομολόγησης και το εύρος ζώνης που απαιτείται για την ενημέρωσή τους αυξάνει επίσης. Τέλος, καθώς οι ενημερώσεις των διαδρομών μπορεί να ληφθούν σε οποιαδήποτε σειρά, εμποδίζεται η χρήση καλύτερων μετρικών στη δρομολόγηση. Γίνεται φανερό από τα παραπάνω ότι τα πινακοδηγούμενα πρωτόκολλα παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία καθιστούν την χρήση τους απαγορευτική σε μεγάλα δίκτυα ή δίκτυα με μεγάλη κινητικότητα.

Αντίθετα, τα οδηγούμενα από ζήτηση πρωτόκολλα υποφέρουν από άλλα μειονεκτήματα, όπως είναι η καθυστέρηση στην ανακάλυψη διαδρομής και η υπερβολική ανταλλαγή μηνυμάτων που μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό του δικτύου. Ακόμα, σε περίπτωση που υπάρχει έντονη κίνηση σε πολλούς κόμβους, το φορτίο για την εγκατάσταση διαδρομών μπορεί να υπερβεί το αντίστοιχο φορτίο των πινακοδηγούμενων πρωτοκόλλων για τη διατήρηση έγκυρων πληροφοριών δρομολόγησης.

Παρόλα αυτά στα οδηγούμενα από ζήτηση πρωτόκολλα το ασύρματο κανάλι δε χρειάζεται να μεταφέρει περιττές πληροφορίες για διαδρομές που δε χρησιμοποιούνται ποτέ. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η ανάγκη αποστολής ενημερωτικών μηνυμάτων, επικεντρώνοντας τη λειτουργία των κόμβων στη στοχευμένη εκπομπή πακέτων αναζήτησης διαδρομής. Επομένως αποτελούν μια αποδοτική προσέγγιση δρομολόγησης ως προς την ενέργεια και το εύρος ζώνης, γεγονός που τα καθιστά τελικά και περισσότερο αποτελεσματικά για τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα.

Επιπλέον οι reactive αλγόριθμοι αντιδρούν ταχύτερα σε απότομες αλλαγές των διαδρομών που μπορεί να συμβούν στα δίκτυα MANET. Οι συγκεκριμένες αλλαγές μπορούν να προκύψουν από διάφορες αιτίες, όπως είναι η αποχώρηση ή η είσοδος ενός κόμβου στο δίκτυο ή η αλλαγή θέσης ενός κόμβου στο χώρο λόγω κίνησης που μπορεί να επαναπροσδιορίσει τις διαθέσιμες ζεύξεις. Τέλος η ενεργειακή εξάντληση ενός κόμβου που συμμετέχει σε μια διαδρομή επικοινωνίας μπορεί να αναιρέσει τη συγκεκριμένη διαδρομή.

Συνοπτικά μπορούμε να παραθέσουμε τους βασικούς λόγους που μας οδήγησαν στην επιλογή on demand πρωτοκόλλου:

1. Ταχεία προσαρμογή σε δυναμικές αλλαγές ζεύξης.
2. Χαμηλό κόστος επεξεργασίας και overhead μνήμης.
3. Χαμηλή χρησιμοποίηση δικτύου.
4. Απουσία βρόχων δρομολόγησης.
5. Η δρομολόγηση είναι δυναμική και γίνεται κατ'απαίτηση.

2.5.2 Σύγκριση μεταξύ on demand πρωτοκόλλων και επιλογή

Όπως αναφέρθηκε όλα τα on demand πρωτόκολλα δρομολόγησης στοχεύουν στην μείωση των μηνυμάτων ελέγχου και στην δυνατότητα εύκολης επέκτασης του δικτύου. Στη συνέχεια θα δούμε πως αντιμετωπίζονται διάφορες καταστάσεις του δικτύου από τα τρία ευρύτερα χρησιμοποιούμενα on demand πρωτόκολλα: AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) και TORA(Temporally-Ordered Routing Algorithm routing protocol).

Ο DSR χρησιμοποιεί δρομολόγηση πηγής και caching της πληροφορίας δρομολόγησης. Κάθε πακέτο δεδομένων περιέχει την πληροφορία που απαιτείται για τη δρομολόγησή του στο πεδίο route record. Η ανακάλυψη διαδρομής γίνεται με flooding του δικτύου όπως και στον AODV. Ωστόσο στον AODV αποθηκεύεται μόνο το επόμενο βήμα κατά μήκος της διαδρομής. Το μικρότερο μέγεθος των εγγραφών δρομολόγησης για τον AODV συνεπάγεται μικρότερα overhead κίνησης και ευκολότερη επέκταση σε περισσότερους κόμβους σε σχέση με τον DSR.

Ένα μειονέκτημά του AODV είναι ότι απαιτεί συμμετρικές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων και δε μπορεί κατά συνέπεια να χρησιμοποιήσει διαδρομές με ασύμμετρες ζεύξεις. Αντίθετα στα πρωτόκολλα DSR και TORA μπορεί να γίνει χρήση ασύμμετρων συνδέσεων, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες συμμετρικές ζεύξεις.

Σε περίπτωση αποτυχίας της ζεύξης link failure τόσο ο AODV όσο και ο DSR χρησιμοποιούν flooding για την ανακάλυψη διαδρομής. Αντίθετα ο TORA περιορίζει τοπικά την επίδραση σε μια ομάδα κόμβων γύρω από την ζεύξη που έπεσε.

Για την αποφυγή των βρόχων δρομολόγησης ο AODV χρησιμοποιεί αριθμούς ακολουθίας. Επειδή ο DSR χρησιμοποιεί δρομολόγηση πηγής, οι βρόχοι δρομολόγησης μπορούν να αποφευχθούν με τον έλεγχο των διευθύνσεων στο πεδίο route record του πακέτου. Στο TORA κάθε κόμβος σε μια ενεργή διαδρομή έχει ένα ξεχωριστό «ύψος» και τα πακέτα μπορούν να μεταδοθούν από κόμβους σε υψηλότερο επίπεδο προς αυτούς που είναι σε χαμηλότερο. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση βρόχων δρομολόγησης. Ωστόσο ο TORA απαιτεί τον συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων.

Στο [13] παρατίθενται τα αποτελέσματα διάφορων συγκρίσεων μεταξύ των TORA, DSR και AODV. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα, η απόδοση του TORA μειώνεται για μεγάλο αριθμό κόμβων, ενώ οι AODV και DSR λειτουργούν καλά για μεγάλο εύρος εφαρμογών. Το γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι ο DSR λειτουργεί καλύτερα σε σχέση με τον AODV όταν ο αριθμός κόμβων είναι μικρότερος, υπάρχει μικρότερο φορτίο ή/και κινητικότητα. Αντίθετα ο AODV αποδίδει καλύτερα σε πιο απαιτητικά σενάρια μετάδοσης.

Συνεπώς μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι ο DSR δεν σχεδιάστηκε για να ανιχνεύει τοπολογικές αλλαγές που εμφανίζονται σε υψηλούς ρυθμούς, αλλά προορίζεται για δίκτυα στα οποία οι κόμβοι

κινούνται με μέτριες ταχύτητες, γεγονός που τον καθιστά λιγότερο αποτελεσματικό στα δίκτυα MANET. Από την άλλη η καινοτομία του TORA έγκειται στη χρήση κατευθυνόμενων ακυκλικών γράφων στη δημιουργία των διαδρομών. Αποτελεί όμως ένα από τα πιο πολύπλοκα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και η απόδοσή του δεν έχει αποδειχτεί καλή σε συγκρίσεις που έχουν γίνει με άλλα πρωτόκολλα.

Το πρωτόκολλο AODV έχει καλή συμπεριφορά γενικώς και αποτελεί μια αποδεκτή μέση λύση. Για το λόγο αυτό και επιλέχθηκε. Επιπλέον είναι πρωτόκολλο που έχει προταθεί χρόνια πριν, συνεπώς υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία για τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται. Τέλος είναι ήδη υλοποιημένο στο πρόγραμμα Network Simulator 2 (ns2) που είχε επιλεγθεί για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Είναι προφανές ότι η διαδικασία που θα περιγραφεί στη συνέχεια για τον AODV μπορεί εύκολα να γενικευθεί σε άλλα on-demand πρωτόκολλα καθώς και σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης γενικότερα, συνεπώς η επιλογή του πρωτοκόλλου δεν αποτελεί και καθοριστικής σημασίας παράγοντα για την επιτυχία των προσομοιώσεων.

2.6 AODV

Βασιζόμενοι στην ανάλυση του AODV στην εργασία [4] και το RFC 3561, στην ενότητα αυτή θα γίνει περιγραφή του πρωτοκόλλου που επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις μας.

2.6.1 Συνοπτική περιγραφή

Το πρωτόκολλο Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) είναι ένα distance vector, on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάλληλο για MANET και ad-hoc δίκτυα γενικότερα. Αναπτύχθηκε από το Nokia Research Center και τα πανεπιστήμια University of California, Santa Barbara και University of Cincinnati. Το πρωτόκολλο επιτρέπει τη δυναμική, αυτοεκκινούμενη, multipoint δρομολόγηση (unicast και multicast) μεταξύ κινητών κόμβων που επιθυμούν να δημιουργήσουν ένα ad-hoc δίκτυο. Οι διαδρομές προς τους προορισμούς δημιουργούνται όταν χρειάζεται όπως άλλωστε και σε κάθε reactive πρωτόκολλο. Η αντίδραση των κόμβων σε διακοπές ζεύξεων και τοπολογικές αλλαγές είναι έγκαιρη, αφού στην περίπτωση που μια ζεύξη τεθεί εκτός λειτουργίας, το πρωτόκολλο ενημερώνει τους κόμβους που επηρεάζονται προκειμένου να ακυρώσουν τις διαδρομές που χρησιμοποιούν τη χαμένη ζεύξη. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η γρήγορη σύγκλιση σε περιπτώσεις αλλαγής της τοπολογίας του δικτύου.

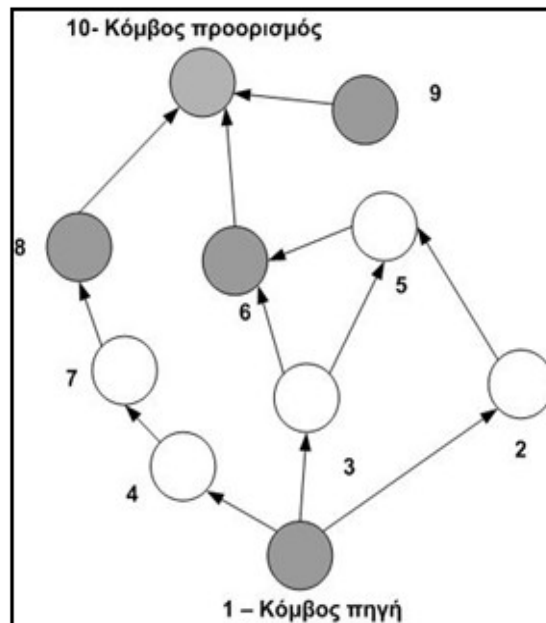
Οι βρόχοι δρομολόγησης αποφεύγονται στον AODV με τη χρήση του αριθμού ακολουθίας προορισμού (destination sequence number) για κάθε αποθηκευμένη διαδρομή. Ο αριθμός ακολουθίας προορισμού δημιουργείται από τον κόμβο-προορισμό για να συμπεριληφθεί μαζί με τις υπόλοιπες πληροφορίες της διαδρομής που στέλνει στους κόμβους. Όταν δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο διαδρομών για έναν προορισμό, ο κόμβος που ζήτησε τη διαδρομή, επιλέγει εκείνη με τον μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας προορισμού.

Όταν ένας κόμβος επιχειρεί να βρει μια διαδρομή, ευρεκπέμπει ένα μήνυμα Αίτησης Διαδρομής RREQ (Route Request) με συγκεκριμένο αύξοντα αριθμό πηγής προς όλους τους γειτονικούς κόμβους. Το RREQ διαδίδεται μέσα στο δίκτυο μέχρι να φτάσει στον προορισμό ή κάποιον κόμβο

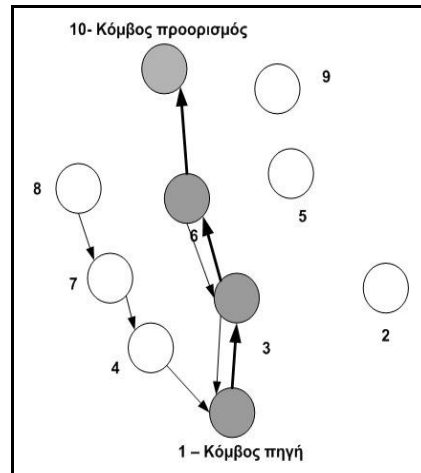
Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

με μια πρόσφατη διαδρομή προς τον προορισμό. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι που λαμβάνουν το μήνυμα αυτό εφόσον δεν έχουν διαδρομή προς τον προορισμό επανεκπέμπουν το μήνυμα, κρατώντας παράλληλα στον δικό τους πίνακα δρομολόγησης τη διαδρομή προς την πηγή. Η διαθέσιμη διαδρομή γίνεται γνωστή στην πηγή μέσω ενός μηνύματος RREP (Route Reply). Το μήνυμα αυτό εκπέμπεται προς την πηγή με μόνο-εκπομπή, σύμφωνα με τις διαδρομές που έχουν δημιουργηθεί κατά την μετάδοση του AODVrequest.

Πέρα από τα μηνύματα RREP και RREQ που θα αναλυθούν και στη συνέχεια, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί διαφορετικά πακέτα μηνυμάτων για την εύρεση και διατήρηση διαδρομών, όπως είναι τα μηνύματα HELLO, που εκπέμπονται περιοδικά προς τους άμεσα γειτονικούς κόμβους. Τα μηνύματα αυτά ενημερώνουν για την παρουσία του κόμβου και κοινοποιούνται προς τους γειτονικούς κόμβους προκειμένου να διατηρούνται ενεργές οι έγκυρες διαδρομές. Εάν τα μηνύματα HELLO σταματήσουν να εκπέμπονται από κάποιον κόμβο, ο γειτονικός του υποθέτει ότι ο κόμβος απομακρύνθηκε και θεωρεί τη διαδρομή άκυρη, ειδοποιώντας παράλληλα τους κόμβους που επηρεάζονται. Η ενημέρωση γίνεται με την αποστολή μηνύματος Αποτυχίας Ζεύξης (link failure notice). Τόσο το μήνυμα Αποτυχίας Ζεύξης όσο και το μήνυμα HELLO, αποτελούν ειδική κατηγορία RREP πακέτου.



Εικόνα 2.3: Εκπομπή RREQ μηνύματος για αίτηση διαδρομής από την πηγή 1 στον προορισμό 10



Εικόνα 2.4: Διάδοση RREP και διαδρομή που δημιουργείται μεταξύ των κόμβων 1 και 10

Ο AODV προϋποθέτει τη δημιουργία και διαχείριση ενός πίνακα διαδρομών (route table) από τους κόμβους, η πληροφορία του οποίου διατηρείται ακόμη και για βραχυπρόθεσμες διαδρομές. Κάθε εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης περιέχει τα ακόλουθα πεδία:

- Διεύθυνση IP του προορισμού (Destination IP Address)
- Αριθμός Ακολουθίας Προορισμού (Destination Sequence number)
- Σημαία Έγκυρου Αριθμού Ακολουθίας Διαδρομής (Valid Destination Sequence Number flag)
- Άλλες σημαίες διαδρομών και κατάστασης (π.χ. έγκυρη, άκυρη, επισκευάσιμη)
- Δικτυακή διεπαφή (Network Interface)
- Αριθμός Hop (ο αριθμός των βημάτων που απαιτούνται για την άφιξη στον προορισμό)
- Επόμενο Hop (ο κόμβος που έχει αναλάβει την προώθηση των πακέτων για τη συγκεκριμένη καταχώρηση διαδρομής)
- Λίστα Πρόδρομων (List of Precursors, οι γειτονικοί κόμβοι στους οποίους προωθήθηκε ή δημιουργήθηκε ένα RREP)
- Χρόνος Ζωής (Lifetime, η διάρκεια ζωής μιας καταχώρησης διαδρομής)

Η διαχείριση του αριθμού ακολουθίας είναι απαραίτητη για την αποφυγή βρόχων δρομολόγησης, ακόμα και όταν μια ζεύξη τεθεί εκτός λειτουργίας. Ένας προορισμός καθίσταται απρόσιτος όταν μια ζεύξη τίθεται εκτός λειτουργίας ή απενεργοποιείται. Τότε η διαδρομή ακυρώνεται με διαδικασίες που περιλαμβάνουν τον αριθμό ακολουθίας, ενώ η καταχώρηση στον πίνακα διαδρομών καταγράφεται ως άκυρη και η διαδικασία εύρεσης διαδρομής εκκινείται από την αρχή.

2.6.2 Τα μηνύματα RREQ, RREP και RERR

Τα βασικά πακέτα που ανταλλάσσονται κατά την αναζήτηση διαδρομής είναι το RREQ (Route Request - μήνυμα αίτησης διαδρομής), το RREP (Route Reply - μήνυμα απάντησης σε μια αίτηση διαδρομής), και το RERR (Route Error - μήνυμα που ενημερώνει για σφάλμα διαδρομής)[4].

Κατά τη δημιουργία ενός πακέτου RREQ, ο κόμβος-πηγή εισάγει την IP διεύθυνση του, στο πεδίο Originator. Σε περίπτωση ευρυ-εκπομπής μηνύματος χρησιμοποιείται η διεύθυνση IP (255.255.255.255). Η λειτουργία του AODV απαιτεί τα RREQ μηνύματα να διανέμονται ευρέως σε όλο το δίκτυο (flooding). Το πεδίο TTL (Time To Live) υποδεικνύει το χρονικό διάστημα που διακινούνται τα μηνύματα αυτά.

Για όσο χρόνο τα άκρα της επικοινωνίας διαθέτουν ενεργές διαδρομές μεταξύ τους ο AODV δεν αναλαμβάνει ουσιαστικά κάποιον ρόλο. Όταν όμως μια διαδρομή προς έναν νέο προορισμό απαιτηθεί, ο κόμβος εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα RREQ πακέτο για να βρει μια ενεργή διαδρομή προς τον προορισμό. Μια νέα διαδρομή καθορίζεται με την άφιξη ενός RREQ πακέτου είτε άμεσα στον προορισμό είτε σε κάποιο ενδιάμεσο κόμβο. Η διαδρομή γίνεται διαθέσιμη μεταδίδοντας ένα RREP πακέτο στην πηγή. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα αίτημα, διατηρεί ένα μονοπάτι προς την πηγή της αίτησης, ώστε το RREP να μπορεί να μεταδοθεί unicast χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο μονοπάτι.

Η κατάσταση των συνδέσμων του κάθε κόμβου με τους γειτονικούς του παρακολουθείται. Όταν εντοπιστεί απότομη διακοπή σε μια ζεύξη ενεργής διαδρομής, το RERR μήνυμα δημιουργείται για να ειδοποιήσει τους υπόλοιπους κόμβους ότι διακόπηκε η συγκεκριμένη σύνδεση. Το RERR μήνυμα ενημερώνει ότι οι προορισμοί που ανήκαν στο ανενεργό μονοπάτι δεν είναι πλέον προσβάσιμοι πλέον μέσω της συγκεκριμένης σύνδεσης.

Προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αυτός κάθε κόμβος διατηρεί μια λίστα που περιέχει τις IP διευθύνσεις των γειτονικών του. Οι πληροφορίες της λίστας αυτής γίνονται πιο εύκολα προσβάσιμες κατά τη διαδικασία της δημιουργίας ενός RREP μηνύματος.

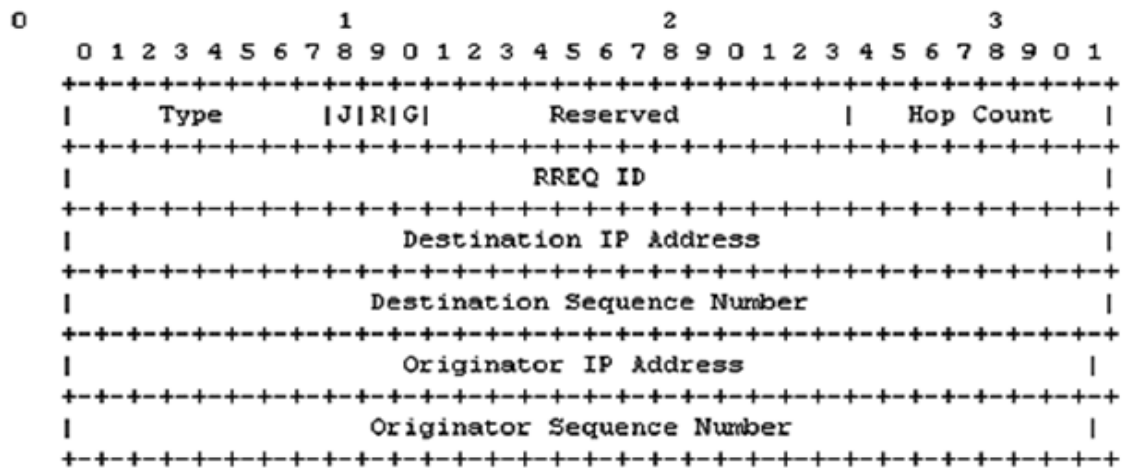
Ένα RREQ μήνυμα μπορεί να αποσταλεί σε μια IP διεύθυνση πολυδιανομής (multicast). Πρέπει να σημειωθεί ότι η πηγή ενός τέτοιου μηνύματος θα πρέπει να ακολουθήσει ειδικούς κανόνες. Είναι σημαντικό να ενεργοποιηθούν σωστά οι λειτουργίες πολυδιανομής από τους ενδιάμεσους κόμβους, τους οποίους δεν αφορά το συγκεκριμένο πακέτο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μορφή που έχουν τα βασικά μηνύματα για τη δημιουργία μιας διαδρομής μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού.

2.6.2.1 Μορφή μηνύματος Route Request (RREQ)

Τα πεδία του μηνύματος RREQ εμφανίζονται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.5), ενώ η χρήση κάθε πεδίου αναλύεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια



Εικόνα 2.5: Μορφή RREQ μηνύματος

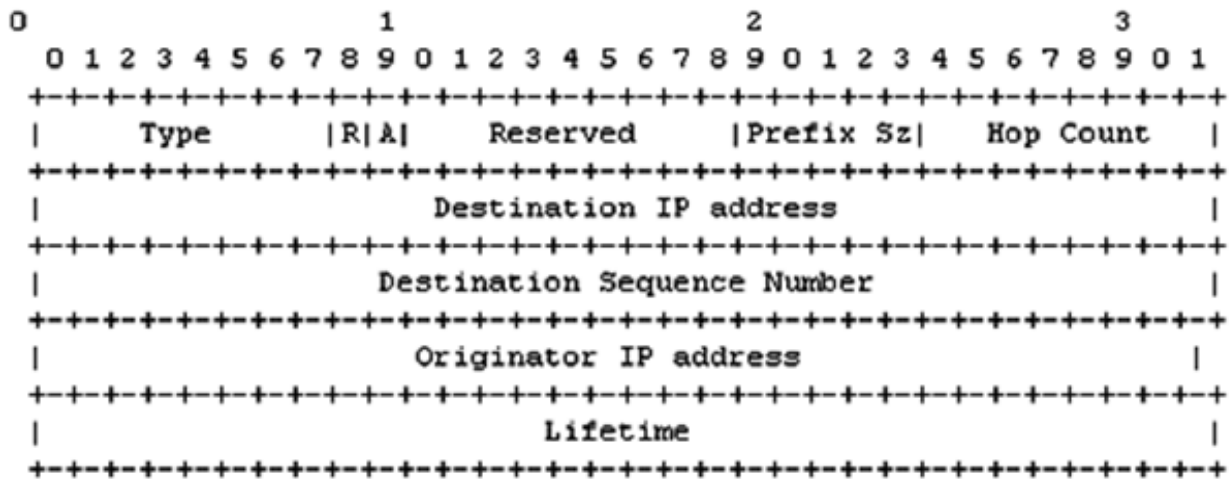
<u>Πεδίο</u>	<u>Τρόπος χρησιμοποίησης</u>
J	Σημαία ενοποίησης, κατειλημμένη για την περίπτωση πολυδιανομής
R	Σημαία επιδιόρθωσης, κατειλημμένη για την περίπτωση πολυδιανομής
G	Σημαία RREP, υποδεικνύει αν ένα ανέξοδο RREP πρέπει να μεταδοθεί unicast προς τον κόμβο που καθορίζεται στο πεδίο Destination IP Address
D	Σημαία αποκλειστική για τον προορισμό, υποδεικνύει μόνο τον προορισμό και μπορεί να απαντήσει σε συγκεκριμένο RREQ.
Reserved	Περιέχει την τιμή 0 και αγνοείται κατά την παραλαβή
Hop Count	Ο αριθμός των βημάτων από τον κόμβο – πηγή προς τον κόμβο που έχει λάβει την αίτηση
RREQ ID	Ένας αύξων ακολουθιακός αριθμός που είναι μοναδικός για κάθε διαφορετικό RREQ, όταν λαμβάνεται σε συνδυασμό με την IP διεύθυνση του κόμβου – πηγή
Destination IP Address	Πεδίο που υποδηλώνει την IP διεύθυνση του προορισμού για τον οποίο αναζητείται διαδρομή
Destination Sequence Number	Ο τελευταίος ακολουθιακός αριθμός που λαμβάνεται στο παρελθόν από την πηγή για οποιαδήποτε διαδρομή προς το συγκεκριμένο προορισμό.
Originator IP Address	Η διεύθυνση του κόμβου – πηγή που δημιουργεί το μήνυμα Route Request
Originator Sequence Number	Δείχνει τον τρέχον αύξοντα ακολουθιακό αριθμό που θα χρησιμοποιηθεί στη διαδρομή του πίνακα δρομολόγησης που δείχνει προς την πηγή μιας αίτησης διαδρομής

Πίνακας 1: Ανάλυση των πεδίων του RREQ

2.6.2.2 Ανάλυση μηνύματος Route Reply (RREP)

Τα πεδία του μηνύματος RREQ εμφανίζονται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.6), ενώ η χρήση κάθε πεδίου αναλύεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2).

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια



Εικόνα 2.6: Μορφή RREP μηνύματος

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

<u>Πεδίο</u>	<u>Τρόπος χρησιμοποίησης</u>
R	Σημαία επιδιόρθωσης, χρησιμοποιείται για πολυδιανομή
A	Πεδίο αναγνώρισης μηνύματος
Reserved	Τίθεται στην τιμή 0, απορρίπτεται κατά την παραλαβή του πακέτου
Prefix Size	Αν δεν είναι μηδέν, το μέγεθος του προθέματος καθορίζει ότι το επόμενο βήμα που υποδεικνύεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιουδήποτε κόμβους με το ίδιο πρόθεμα δρομολόγησης (όπως καθορίζεται από το μέγεθος του προθέματος) όπως ο απαιτούμενος προορισμός.
Hop Count	Ο αριθμός των βημάτων από τον κόμβο πηγή προς τον κόμβο προορισμό. Οι δύο κόμβοι καθορίζονται σαν Originator IP Address και Destination IP Address αντίστοιχα. Για αιτήσεις διαδρομής που πολυδιανέμονται, αυτό το πεδίο καθορίζει τον αριθμό των βημάτων στα μέλη του δένδρου πολυδιανομής στέλνοντας το RREP.
Destination IP Address	Η διεύθυνση IP του προορισμού, που αποτελεί τον κόμβο ο οποίος εκίνησε τη διαδικασία εύρεσης διαδρομής.
Destination Sequence Number	Ο αύξων ακολουθιακός αριθμός που σχετίζεται με τη διαδρομή.
Originator IP Address	Η IP διεύθυνση του κόμβου που δημιουργεί το RREQ μήνυμα, για τον οποίο εντοπίζεται η διαδρομή.
Lifetime	Ο χρόνος σε msec για τον οποίο οι κόμβοι που λαμβάνουν το RREP θεωρούν ότι η διαδρομή είναι έγκυρη.

Πίνακας 2: Ανάλυση των πεδίων του RREP μηνύματος

Το μέγεθος του προθέματος επιτρέπει σε ένα δρομολογητή υποδικτύου να καταγράψει μια διαδρομή για κάθε κόμβο του υποδικτύου του. Με αυτό τον τρόπο δίνει προσβασιμότητα στους προορισμούς που ανήκουν στο υποδίκτυό του.

Να σημειωθεί ακόμα ότι το πεδίο “A” χρησιμοποιείται όταν η ζεύξη μέσω της οποίας μεταδίδεται το RREP μήνυμα είναι ασταθής ή αναξιόπιστη. Όταν το RREP μήνυμα έχει συμπληρωμένο το πεδίο A, τότε ο παραλήπτης του RREP αναμένεται (και επιβάλλεται) να επιστρέψει ένα RREP-ACK μήνυμα.

2.6.3 Ανάλυση λειτουργίας AODV

Τα μηνύματα του AODV στέλνονται στην πόρτα (port) 654, χρησιμοποιώντας UDP (User Datagram Protocol). Για την μετάδοση των μηνυμάτων συγκεκριμένες πληροφορίες κατάστασης για τους προορισμούς διατηρούνται σε έναν πίνακα δρομολόγησης με τη μορφή εγγραφών.

2.6.3.1 Διατήρηση των αριθμών ακολουθίας (sequence numbers)

Κάθε εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης, πρέπει να εμπεριέχει τις τελευταίες πληροφορίες όπως ο αύξων ακολουθιακός αριθμός για τον προορισμό. Ο συγκεκριμένος αριθμός καλείται “destination sequence number”, δηλαδή ακολουθιακός αριθμός προορισμού. Ο αριθμός αυτός ανανεώνεται όταν ένας κόμβος λαμβάνει νέα πληροφορία από τα RREQ, RREP ή RERR μηνύματα που αφορούν τον προορισμό. Ένας κόμβος – προορισμός αυξάνει τον ακολουθιακό του αριθμό σε μια από τις δύο ακόλουθες περιπτώσεις:

- πριν εκκινηθεί η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής, όταν και πρέπει να αυξηθεί ο προσωπικός ακολουθιακός αριθμός προορισμού. Η συγκεκριμένη ενέργεια προστατεύει από τυχόν συγκρούσεις με προηγούμενα καθορισμένες διαδρομές προς την πηγή ενός RREQ.
- πριν ένας προορισμός ξεκινήσει την αποστολή ενός RREP πρέπει να ανανεώσει τον δικό του ακολουθιακό αριθμό στη μέγιστη τιμή ανάμεσα σε αυτήν του τρέχοντος αριθμού και του ακολουθιακού αριθμού προορισμού του RREQ πακέτου.

Ένας κόμβος μπορεί να αλλάξει τον ακολουθιακό αριθμό ενός προορισμού, για τον οποίο εντοπίζεται εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης σε μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Αν ο ίδιος αποτελεί προορισμό, και προσφέρει μια νέα διαδρομή προς τον εαυτό του ή
- Αν παραλάβει νέο AODV μήνυμα με ανανεωμένες πληροφορίες για τον ακολουθιακό αριθμό του προορισμού, ή τέλος
- Αν το μονοπάτι προς τον προορισμό εκπνεύσει ή διακοπεί.

2.6.3.2 Εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης και λίστες precursor

Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο ελέγχου από γειτονικό του, ή δημιουργεί, ή ανανεώνει μια διαδρομή για έναν συγκεκριμένο προορισμό, ή υποδίκτυο, αναζητά στον πίνακα δρομολόγησης του μια έγκυρη εγγραφή προς το συγκεκριμένο προορισμό. Στην περίπτωση που δεν βρεθεί αντίστοιχη είσοδος στον πίνακα, τότε δημιουργείται μια νέα εγγραφή. Ο ακολουθιακός αριθμός είναι καθορισμένος από την πληροφορία που περιέχεται στο πακέτο ελέγχου. Ανανεώνεται μόνο αν ληφθεί ένας νέος ακολουθιακός αριθμός και συμβεί ένα από τα ακόλουθα:

1. είτε η τιμή του είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που έχει καταγραφεί στον πίνακα δρομολόγησης.

2. είτε η τιμή του είναι ίδια με την αντίστοιχη της εγγραφής, αλλά το άθροισμα των απαιτούμενων βημάτων είναι μικρότερο από το αντίστοιχο της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησης.

3. ο ακολουθιακός αριθμός είναι άγνωστος.

Το πεδίο Lifetime της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησης είτε καθορίζεται από το πακέτο ελέγχου είτε αρχικοποιείται στην τιμή ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT. Κάθε φορά που μια διαδρομή χρησιμοποιείται για να προωθήσει πακέτα δεδομένων, το πεδίο Lifetime της πηγής, του προορισμού, αλλά και του επόμενου κόμβου στο μονοπάτι, περιέχει τιμή μικρότερη από την αντίστοιχη του ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT. Το πεδίο lifetime για μια Active Route ανανεώνεται κάθε φορά που η διαδρομή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το αν ο προορισμός είναι ένας απλός κόμβος ή ολόκληρο υποδίκτυο.

Για κάθε έγκυρη διαδρομή που διατηρείται στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου, διατηρείται και μια λίστα από precursors, δηλαδή ενδιάμεσους κόμβους, που μπορούν να προωθούν πακέτα στη διαδρομή. Οι precursors ειδοποιούνται από τον κόμβο κατά την απώλεια κάποιας ζεύξης στη διαδρομή.

2.6.3.3 Δημιουργία αιτημάτων εύρεσης διαδρομής (Route Requests)

Ένας κόμβος εκπέμπει ένα RREQ πακέτο όταν απαιτηθεί μια διαδρομή για έναν προορισμό, χωρίς να είναι διαθέσιμη στον δικό του πίνακα δρομολόγησης. Αυτό μπορεί να συμβεί αν ο προορισμός δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός ή αν μια διαδρομή που ήταν έγκυρη έχει καταστεί ανενεργή. Η τιμή του ακολουθιακού αριθμού προορισμού η οποία αντιγράφεται στον πίνακα δρομολόγησης, περιέχεται στο πακέτο και σχετίζεται με τον τελευταίο αριθμό που λήφθηκε. Ο συγκεκριμένος αριθμός αυξάνεται βάσει προτεραιότητας λήψης RREQs μηνυμάτων.

Το πεδίο RREQ ID αυξάνεται από την τιμή 1 μέχρι το τελευταίο RREQ ID που χρησιμοποιείται από τον τρέχοντα κόμβο. Κάθε κόμβος διατηρεί μόνο ένα RREQ ID, ενώ το πεδίο Hop Count τίθεται στην τιμή 0. Πριν την ευρυ-εκπομπή του RREQ, ο κόμβος πηγή καταχωρεί το RREQ ID καθώς και την IP διεύθυνση της πηγής, του RREQ για το PATH_DISCOVERY_TIME. Με αυτό τον τρόπο όταν ο κόμβος λαμβάνει το πακέτο ξανά από τους γείτονές του, δεν θα αναμεταδώσει ή επανα-προωθήσει το πακέτο.

Η επικοινωνία μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού είναι αμφίδρομη. Ουσιαστικά θα πρέπει και ο προορισμός να διαθέτει μια διαδρομή προς την πηγή. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό με αποδοτικό τρόπο, η δημιουργία ενός RREP από έναν ενδιάμεσο κόμβο, θα πρέπει να συνοδεύεται από συγκεκριμένες ενέργειες που ενημερώνουν τον προορισμό για μια διαδρομή προς την πηγή. Ο αποστολέας επιλέγει το συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας για τους ενδιάμεσους κόμβους ορίζοντας μια σημαία που αναφέρεται σαν σημαία G.

Το πεδίο RREQ_RATELIMIT καθορίζει το μέγιστο αριθμό RREQ μηνυμάτων που δύναται να δημιουργήσει ένας κόμβος. Μετά την εκπομπή ενός RREQ, η πηγή αναμένει ένα RREP πακέτο ή άλλο μήνυμα ελέγχου με τις τρέχουσες πληροφορίες για τη διαδρομή προς τον προορισμό. Αν μια διαδρομή δεν έχει ληφθεί εντός του χρόνου που προσδιορίζεται στο πεδίο NET_TRAVERSAL_TIME, τότε ο κόμβος μπορεί να προσπαθήσει ξανά με επανεκπομπή άλλου RREQ. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές κριθεί σκόπιμο. Ο μέγιστος αριθμός επανεκπομπών, καθορίζεται από το πεδίο RREQ_RETRIES. Οι επανεκπομπές πρέπει να γίνουν

εντός του χρόνου που καθορίζεται από το TTL. Κάθε νέα προσπάθεια πρέπει να αυξάνει ή να ανανεώνει το RREQ ID.

Η καταχώρηση των διαδρομών ακολουθούν την τεχνική FIFO (First-In, First-Out). Μπορεί να μην ανακαλυφθεί κάποια διαδρομή ακόμα και αν επιχειρηθούν τόσες επανεκπομπές όσες καθορίζονται από το πεδίο RREQ_RETRIES μέσα στο χρονικό διάστημα TTL. Ουσιαστικά αν δεν ληφθεί ένα RREP μήνυμα τότε όλα τα πακέτα δεδομένων με κατεύθυνση τον προορισμό θα απορριφθούν και ένα μήνυμα Destination Unreachable θα παραδοθεί στην πηγή.

2.6.3.4 Έλεγχος της εκπομπής μηνυμάτων αίτησης διαδρομής

Προκειμένου να προστατευθεί το δίκτυο από ανούσια διανομή RREQ μηνυμάτων, η πηγή πρέπει να χρησιμοποιεί μια εκτεταμένη τεχνική αναζήτησης δακτυλίου. Στη συγκεκριμένη τεχνική η πηγή αρχικά χρησιμοποιεί ένα $TTL = TTL_START$ το οποίο εισάγεται στην επικεφαλίδα του RREQ. Ταυτόχρονα θέτει την τιμή του timeout για την παραλαβή του RREP σε RING_TRAVERSAL_TIME. Το πεδίο TTL_VALUE που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του RING_TRAVERSAL_TIME έχει την τιμή του αντίστοιχου πεδίου της επικεφαλίδας. Αν το RREQ σταματήσει χωρίς πρώτα να έχει ληφθεί αντίστοιχο RREP, τότε η πηγή επανεκπέμπει το RREQ, αυξάνοντας την τιμή του TTL. Η συγκεκριμένη αύξηση πραγματοποιείται μέσω του πεδίου TTL_INCREMENT. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πεδίο TTL να πάρει την τιμή του TTL_THRESHOLD του RREQ. Για κάθε νέα απόπειρα το TTL θα πρέπει να τεθεί στην τιμή NET_DIAMETER. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την παραλαβή ενός RREP είναι ίση με την τιμή του πεδίου RING_TRAVERSAL_TIME.

Η αποθηκευμένη τιμή του Hop Count σε μια άκυρη είσοδο του πίνακα δρομολόγησης δείχνει την αντίστοιχη τελευταία τιμή που λήφθηκε και αποθηκεύτηκε στον πίνακα δρομολόγησης για τον συγκεκριμένο προορισμό. Όταν εμφανιστεί μια νέα διαδρομή για τον ίδιο προορισμό απαιτείται σε μεταγενέστερο στάδιο, όπως για παράδειγμα κατά την απώλεια της διαδρομής, τόσο το TTL που υπάρχει στην επικεφαλίδα IP του RREQ, το οποίο αρχικά έχει τεθεί στην τιμή του Hop Count αυξημένο κατά το TTL_INCREMENT.

Για αυτό το λόγο, ακολουθώντας κάθε παύση το TTL αυξάνεται κατά TTL_INCREMENT μέχρι να φτάσει στο όριο του TTL_THRESHOLD. Αν ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο τότε η τιμή του TTL θα οριστεί ίση με το NET_DIAMETER ενώ ο χρόνος αναμονής για το RREP θα τεθεί ίσος με το NET_TRAVERSAL_TIME.

Μια είσοδος του πίνακα δρομολόγησης που έχει λήξει δεν πρέπει να διαγραφεί πριν να συμπληρωθεί το χρονικό διάστημα που καθορίζεται από την τιμή του τρέχοντος χρόνου προσαυξημένη κατά το χρόνο DELETE_PERIOD. Σε διαφορετική περίπτωση η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η διαδρομή, για παράδειγμα η τελευταία ενημέρωση για το άθροισμα των κόμβων, θα χαθεί. Επιπρόσθετα μπορεί να διαμορφωθεί και να τεθεί σε μεγαλύτερη τιμή ο χρόνος απαλοιφής για μια είσοδο του πίνακα δρομολόγησης. Οποιοδήποτε χρονικό διάστημα αποδοθεί στο χρόνο αναμονής ενός RREP μηνύματος για μια είσοδο του πίνακα δρομολόγησης δεν πρέπει να ξεπερνά το άθροισμα του τρέχοντος χρόνου και της διπλής τιμής του NET_TRAVERSAL_TIME.

2.6.3.5 Επεξεργασία και προώθηση αιτημάτων διαδρομών-Route Request

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα RREQ μήνυμα, πρώτα δημιουργεί ή ανανεώνει μια διαδρομή βάσει των προηγούμενων βημάτων χωρίς ένα έγκυρο ακολουθιακό αριθμό και εν συνεχεία ελέγχει αν είχε ληφθεί κάποιο μήνυμα RREQ που έχει αποσταλεί από τον ίδιο κόμβο πηγή καθώς και τα RREQ ID των αιτήσεων που έχει λάβει εντός χρόνου ίσου με το PATH_DISCOVERY_TIME. Αν έχει ληφθεί RREQ μήνυμα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά τότε ο κόμβος απορρίπτει το νεοαφιχθέν RREQ μήνυμα.

Σε περίπτωση που το μήνυμα γίνει δεκτό αρχικά αυξάνεται κατά ένα, η τιμή του μετρητή βημάτων στο RREQ μήνυμα προκειμένου να συμπεριληφθούν τα νέα βήματα της διαδρομής μέσα από τους ενδιάμεσους κόμβους. Στη συνέχεια ο κόμβος αναζητά την αντίστροφη διαδρομή προς τον κόμβο – πηγή, με αντιστοίχιση του μεγαλύτερου προθέματος. Αν κριθεί αναγκαίο η διαδρομή δημιουργείται ή ανανεώνεται χρησιμοποιώντας τον ακολουθιακό αριθμό της πηγής από την εγγραφή του RREQ μηνύματος στον πίνακα δρομολόγησης. Η συγκεκριμένη αντίστροφη διαδρομή θα απαιτηθεί αν ο κόμβος λάβει ένα RREP μήνυμα πίσω στον κόμβο που ξεκίνησε - δημιούργησε το RREQ. Όταν η αντίστροφη διαδρομή δημιουργηθεί ή ανανεωθεί, οι ακόλουθες διεργασίες θα λάβουν χώρα στη διαδρομή:

1. ο ακολουθιακός αριθμός της πηγής για το RREQ συγκρίνεται με τον αντίστοιχο ακολουθιακό αριθμό του προορισμού που βρίσκεται στην είσοδο του πίνακα δρομολόγησης και αν είναι μεγαλύτερο από την αποθηκευμένη τιμή αντιγράφεται στη θέση της.
2. το πεδίο του έγκυρου ακολουθιακού αριθμού τίθεται στην τιμή true.
3. το επόμενο βήμα στον πίνακα δρομολόγησης αποτελεί ο κόμβος από τον οποίο λαμβάνεται το RREQ. Η συγκεκριμένη πληροφορία αντλείται από την IP διεύθυνση της πηγής, πληροφορία που βρίσκεται στην επικεφαλίδα IP. Συνήθως η συγκεκριμένη διεύθυνση δεν είναι ίδια με την IP διεύθυνση της πηγής του RREQ μηνύματος.
4. ο μετρητής βημάτων αντιγράφεται από το πεδίο Hop Count του RREQ μηνύματος.

Σε οποιαδήποτε στιγμή λαμβάνεται ένα RREQ μήνυμα, η ζωή της εισόδου για την αντίστροφη διαδρομή προς τη διεύθυνση IP της πηγής τίθεται στη μέγιστη μεταξύ των δύο τιμών ExistingLifetime και MinimalLifetime, όπου το MinimalLifetime καθορίζεται από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$\text{MinimalLifetime} = \text{currenttime} + 2 * \text{NET_TRAVERSAL_TIME} - 2 * (\text{HopCount} * \text{NODE_TRAVERSAL_TIME})$$

Ο τρέχων κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει την αντίστροφη διαδρομή για να προωθήσει πακέτα δεδομένων με τον ίδιο τρόπο όπως για οποιαδήποτε άλλη διαδρομή στον πίνακα δρομολόγησης. Αν ένας κόμβος δεν παράγει ένα RREP, ακολουθώντας τους κανόνες επεξεργασίας και αν οι εισερχόμενες επικεφαλίδες IP έχουν TTL μεγαλύτερο από το 1, ο κόμβος ανανεώνεται και ευρυ-

εκπέμπει το RREQ πακέτο στη διεύθυνση 255.255.255.255 σε κάθε μία από τις διαμορφωμένες διεπαφές. Για να ανανεωθεί το RREQ το TTL ή το πεδίο που καθορίζει το όριο των βημάτων για την εξερχόμενη IP επικεφαλίδα μειώνεται κατά ένα, ενώ το πεδίο Hop Count του RREQ μηνύματος αυξάνεται κατά ένα, για την καταμέτρηση του νέου βήματος διαμέσου του νέου ενδιάμεσου κόμβου.

Στο τέλος ο ακολουθιακός αριθμός του προορισμού για τον αιτούμενο προορισμό τίθεται στο μέγιστο της αντίστοιχης τιμής που λαμβάνεται στο RREQ μήνυμα και την τιμή του αντίστοιχου ακολουθιακού αριθμού του προορισμού που έχει διατηρηθεί από τον κόμβο και αφορά τον προορισμό. Παρόλα αυτά ο κόμβος που προωθεί δεν πρέπει να μεταβάλλει την τιμή που έχει διατηρηθεί για τον ακολουθιακό αριθμό του προορισμού, ακόμα και αν η συγκεκριμένη τιμή που λήφθηκε από το εισερχόμενο RREQ είναι μεγαλύτερη από την τιμή που έχει διατηρηθεί από τον ενδιάμεσο κόμβο που προωθεί το μήνυμα.

Σε αντίθετη περίπτωση εάν ένας κόμβος δημιουργεί ένα RREP μήνυμα, τότε ο κόμβος απορρίπτει το RREQ. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι αν η απάντηση του ενδιάμεσου κόμβου σε κάθε μετάδοση μηνυμάτων RREQ για ένα ιδιαίτερο προορισμό, θα αποδειχθεί ότι ο προορισμός δεν λαμβάνει κανένα μήνυμα ανακάλυψης. Σε αυτή την κατάσταση ο προορισμός δεν μαθαίνει από το RREQ μήνυμα για μια διαδρομή προς τον κόμβο – πηγή. Αυτό μπορούσε να προκαλέσει τον προορισμό να εκκινήσει μια ανακάλυψη διαδρομής, για παράδειγμα αν η πηγή επιχειρήσει να εγκαθιδρύσει μια TCP σύνοδο. Προκειμένου ο προορισμός να «μάθει» τις διαθέσιμες διαδρομές προς τον κόμβο – πηγή, η πηγή πρέπει να θέσει τη σημαία “gratuitous RREP” (‘G’), στο RREQ μόνο εάν για οποιοδήποτε λόγο ο προορισμός είναι πιθανό να χρειαστεί μια διαδρομή προς την πηγή. Αν σε απάντηση ενός RREQ που έχει θέσει τη σημαία ‘G’, ένας ενδιάμεσος κόμβος επιστρέφει ένα RREP, τότε πρέπει επίσης να επιστρέψει με unicast ένα RREP στον κόμβο προορισμό.

2.6.3.6 Δημιουργία απαντήσεων διαδρομών (Route Replies-RREP)

Ένας κόμβος δημιουργεί RREP σε μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1. εάν αποτελεί ο ίδιος τον προορισμό του μηνύματος ή
2. εάν έχει μια ενεργή διαδρομή προς τον προορισμό, οπότε και ο αντίστοιχος ακολουθιακός αριθμός προορισμού που θα είναι αποθηκευμένος στον πίνακα δρομολόγησης θα είναι έγκυρος και μεγαλύτερος ή ίσος με τον αντίστοιχο που αναγράφεται στο πεδίο Destination Sequence Number του RREQ μηνύματος, ενώ η σημαία ‘D’ του πεδίου “destination only” δεν θα τεθεί σε κάποια τιμή.

Όταν δημιουργηθεί ένα RREP μήνυμα, ένας κόμβος αντιγράφει την IP διεύθυνση του προορισμού και τον ακολουθιακό αριθμό της πηγής για το RREQ μήνυμα στα αντίστοιχα πεδία του RREP μηνύματος. Η επεξεργασία διαφοροποιείται ελάχιστα και εξαρτάται από το αν ο κόμβος είναι ο αιτούμενος προορισμός ή αν είναι ενδιάμεσος κόμβος μιας νέας διαδρομής προς τον προορισμό.

Όταν δημιουργηθεί ένα RREP μήνυμα μεταδίδεται με unicast τρόπο στο επόμενο βήμα προς την πηγή του RREQ, τότε το πεδίο Hop Count αυξάνεται κατά ένα σε κάθε βήμα. Παρόλαυτά όταν ένα RREP φτάνει στον προορισμό, το Hop Count αναπαριστά την απόσταση, σε βήματα, του προορισμού από την πηγή.

2.6.3.6.1 Δημιουργία Route Reply από τον προορισμό

Αν ο κόμβος που δημιουργεί το RREP αποτελεί τον προορισμό, τότε πρέπει να αυξήσει τον δικό του ακολουθιακό αριθμό κατά ένα αν ο ακολουθιακός αριθμός του RREQ πακέτου είναι ίσος με την αυξημένη τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση ο προορισμός δεν μεταβάλλει τον ακολουθιακό αριθμό πριν τη δημιουργία του RREP μηνύματος. Ο κόμβος προορισμός τοποθετεί, τον ακολουθιακό αριθμό του που έχει προσφάτως ανανεωθεί στο πεδίο Destination Sequence Number του RREP μηνύματος και προσθέτει την τιμή 0 στο πεδίο Hop Count του RREP.

Ο κόμβος προορισμός αντιγράφει την τιμή του MY_ROUTE_TIMEOUT στο πεδίο Lifetime του RREP . Κάθε κόμβος μπορεί να επαναπροσδιορίσει την τιμή του για το MY_ROUTE_TIMEOUT, ακολουθώντας όμως συγκεκριμένους περιορισμούς.

2.6.3.6.2 Δημιουργία Route Reply από ενδιάμεσο κόμβο

Εάν ο κόμβος που δημιουργεί το RREP δεν είναι ο προορισμός, αλλά ένας ενδιάμεσος στη διαδρομή προς την πηγή, αντιγράφει το δικό του γνωστό ακολουθιακό αριθμό για τον προορισμό στο πεδίο Destination Sequence Number του RREP μηνύματος.

Ο ενδιάμεσος κόμβος ανανεώνει την είσοδο με τη διαδρομή προώθησης του μηνύματος τοποθετώντας το τελευταίο βήμα, από το οποίο έλαβε το RREQ, όπως υποδείχτηκε από το πεδίο της επικεφαλίδας IP, που περιέχει την IP της πηγής, στη λίστα με τους precursor για την είσοδο του πίνακα δρομολόγησης που περιέχει τη διαδρομή προώθησης π.χ. την είσοδο για το Destination IP Address. Ο ενδιάμεσος κόμβος ανανεώνει τις διαθέσιμες διαδρομές του προς την πηγή του RREQ, στον πίνακα δρομολόγησης του. Τοποθετεί το επόμενο βήμα προς τον προορισμό στην λίστα precursor της εγγραφής που αφορά την αντίστροφη διαδρομή από τον προορισμό στην πηγή.

Ο ενδιάμεσος κόμβος τοποθετεί την απόστασή του σε βήματα από τον προορισμό, όπως καθορίζεται από την εγγραφή του μετρητή βημάτων στον πίνακα δρομολόγησης. Η συγκεκριμένη εγγραφή καθορίζεται από το πεδίο Count του RREP πακέτου. Το πεδίο Lifetime του RREP υπολογίζεται αφαιρώντας τον τρέχον χρόνο από το χρόνο λήξης του μηνύματος που έχει αποθηκευτεί στον πίνακα δρομολόγησης.



3 Ενεργειακά Θέματα

3.1 Εισαγωγή

Η υπερβολική κατανάλωση ενέργειας μέσω των διαδικασιών και των ρόλων του κάθε κόμβου στο δίκτυο και ο τρόπος περιορισμού της, με επέκταση υπάρχοντων πρωτοκόλλων ή με δημιουργία νέων, είναι μια από τις πιο διαδεδομένες ερευνητικές περιοχές. Στην παρούσα υποενότητα θα αναλυθεί η σχετική βιβλιογραφία.

Σε πρώτο στάδιο κρίνεται σκόπιμο να εντοπίσουμε και να παρουσιάσουμε τα ενεργειακά προβλήματα όπως εντοπίζονται σε ένα ad hoc δίκτυο. Η υπολειπόμενη ενέργεια ενός κόμβου και η διαρκής κατανάλωσή της, εκτός από τον σταδιακό ενεργειακό «θάνατο» της συσκευής, προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα και στη γενικότερη δομή του δικτύου. Από τη συγκεκριμένη κατάσταση επηρεάζονται άμεσα οι διαδικασίες δρομολόγησης και επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Η εύρεση αλγορίθμων και μεθόδων που αξιοποιούν τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας χωρίς να προκαλούν την υπερβολική σπατάλη τους, είναι μια επιτακτική ανάγκη προκειμένου να αυξηθεί συνολικά η ζωή του δικτύου.

Αρχικά, εφόσον σε ένα ad hoc δίκτυο οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ταυτόχρονα σαν τελικοί παραλήπτες μηνύματος και σαν δρομολογητές κίνησης και ενδιάμεσοι κόμβοι, απαιτείται επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας. Η επιπλέον ισχύς καταναλώνεται στις διαδικασίες προώθησης και παραλαβής πακέτου.

Όπως αναλύθηκε στο [1], προκειμένου να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο καταναλώνεται η ενέργεια σε ένα ad hoc δίκτυο, θα πρέπει να διαχωρίσουμε τις καταστάσεις λειτουργίας ενός κόμβου σε ένα MANET. Μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας μιας ασύρματης συσκευής και πιο συγκεκριμένα την κατάσταση εκπομπής, την κατάσταση λήψης και την κατάσταση “οπ”, στην περίπτωση όπου απλά η συσκευή είναι ανοιχτή.

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα τον τρόπο κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε μια από τις προαναφερθείσες μορφές λειτουργίας. Αν θεωρήσουμε ότι η συσκευή μεταδίδει (transmitting mode), απώλειες εντοπίζονται στον front-end ενισχυτή της κεραίας που πραγματοποιεί την μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων (RF-Radio Frequency) και οφείλονται στην ενέργεια που μεταδίδεται και στις εσωτερικές θερμικές απώλειες στην κεραία και τον ενισχυτή. Ενέργεια όμως καταναλώνεται και από τις διαδικασίες επεξεργασίας του κόμβου. Πιο συγκεκριμένα η δημιουργία, η διαμόρφωση, η κωδικοποίηση σήματος, καθώς και η πρόσβαση στη μνήμη και η επεξεργασία του προς αποστολή σήματος είναι ιδιαίτερα απαιτητικές ενεργειακά λειτουργίες.

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Στην περίπτωση όπου ο κόμβος είναι παραλήπτης μηνύματος (receiving mode), η ενέργεια καταναλώνεται αποκλειστικά στον επεξεργαστή. Στον συγκεκριμένο υπολογισμό ενσωματώνεται και η ενέργεια που δαπανάται από τον ενισχυτή LNA, καθώς ενισχύει την έξοδο της κεραίας λήψης σε επίπεδα επιθυμητά για αποκωδικοποίηση, επεξεργασία και αποθήκευση.

Τέλος, στην περίπτωση όπου η συσκευή είναι στην κατάσταση “on” η ενέργεια καταναλώνεται στον επεξεργαστή, αφού οι ταλαντωτές τάσης, VCO, λειτουργούν, προκειμένου να είναι έτοιμοι να εκκινήσουν τη διαδικασία αποκωδικοποίησης ενός εισερχόμενου σήματος. Όλα τα κυκλώματα παραμένουν ορθά αρχικοποιημένα και φορτισμένα. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να οφείλεται και στην αποστολή περιοδικών ενημερωτικών μηνυμάτων (beacon signals) για το αν συνεχίζουν να συμμετέχουν στο δίκτυο ή όχι.

Το σύνολο της δαπανώμενης ενέργειας στη μονάδα του χρόνου, όταν βρίσκεται σε κατάσταση “on”, είναι πολύ μικρό συγκρινόμενο με το αντίστοιχο των καταστάσεων αποστολής και λήψης μηνυμάτων. Αξίζει όμως να σημειωθεί, ότι σε αρκετές εφαρμογές, ειδικότερα στις περιπτώσεις των δικτύων αισθητήρων, ένας κόμβος μπορεί να σπαταλά τον περισσότερο χρόνο ζωής του όταν βρίσκεται στην “on” κατάσταση, χωρίς ουσιαστικά να στέλνει ή να λαμβάνει μηνύματα. Σε άλλες εφαρμογές, όπου ένας κόμβος είναι ενεργός και μεταδίδει κατά τη διάρκεια του περισσότερου χρόνου που βρίσκεται η συσκευή σε “on”, το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται σε παθητική κατάσταση είναι αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψη.

Κρίνεται σκόπιμο να διαχωρίσουμε την κατάσταση “on” σε “idle” και “sleep”, καθώς σε κάθε μία ο κόμβος παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Σε κατάσταση “sleep”, μια διεπαφή δεν μπορεί ούτε να μεταδώσει ούτε να παραλάβει, συνεπώς η κατανάλωση ενέργειας θα είναι ιδιαίτερα μικρή. Ένας κόμβος θα πρέπει να μεταδίδει ή να λαμβάνει μέσω της δικτυακής διεπαφής του, αφού πρώτα μεταβεί σε αδρανή (idle) κατάσταση λειτουργίας, που απαιτεί τόσο χρόνο όσο και ενέργεια. Στη συγκεκριμένη κατάσταση, η μετάδοση ή λήψη μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, αλλά καταναλώνεται πολύ ενέργεια, εξαιτίας του αριθμού των στοιχείων κυκλωμάτων που πρέπει να ενεργοποιηθούν.

Όλες οι προαναφερθείσες καταστάσεις λειτουργίας εμπεριέχουν τόσο τις μονάδες hardware όσο και τους αλγορίθμους επεξεργασίας. Προκειμένου να μειωθεί το ποσό της απαιτούμενης ενέργειας για να επιτευχθεί μια εργασία επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα μετάδοση ή παραλαβή ενός πακέτου, είναι απαραίτητο να εξεταστεί ο ρόλος κάθε ενός στοιχείου τόσο αυτόνομα όσο και σε συνεργασία μεταξύ τους.

Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την κατανάλωση της ενέργειας, οι σχεδιαστικές επιλογές που θα γίνουν κατά τη δημιουργία ενός MANET. Για παράδειγμα η επιλογή των μπαταριών είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού καθορίζει το συνολικό ενεργειακό απόθεμα των κόμβων και κατ'επέκταση του δικτύου. Η επιλογή αυτή δεν μπορεί να στηρίζεται μόνο στην ονομαστική τιμή των Coulombs που μπορούν να αποθηκεύσουν οι μπαταρίες, καθώς ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται η ενέργεια από την μπαταρία επηρεάζει το συνολικό ποσό της ενέργειας που μπορεί να διατεθεί.

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Επιπρόσθετα, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και από την κατάλληλη επιλογή hardware. Οι ενισχυτές ισχύος είναι γνωστό ότι δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά. Όταν βρεθούν σε κορεσμό (κάτι το οποίο μπορεί να είναι απαραίτητο για τη μετάδοση στη μέγιστη ισχύ) είναι μη αποδοτικοί και καταναλώνουν περισσότερα Joules από αυτά που μεταφέρουν στην κεραία. Από την άλλη η λειτουργία ενισχυτών στη γραμμική περιοχή τους σημαίνει χαμηλή χρησιμοποίηση των δυνατοτήτων τους. Συνεπώς ενισχυτές με καλύτερη καμπύλη απόδοσης μπορούν να εξασφαλίσουν μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Ένας άλλος παράγοντας hardware που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας (συνεπώς και τα ποσά θερμότητας που εκλύονται) είναι και η αρχιτεκτονική κυκλώματος που χρησιμοποιείται.

Η επιλογή της κεραίας ακόμα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Σε αυτό συνυπολογίζονται οι διαστάσεις, το υλικό, σχήμα αλλά και η κατευθυντικότητα και άλλες παράμετροι.

Ο συνδυασμός του σχήματος διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης και κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης επηρεάζει την φασματική απόδοση του συστήματος (πχ τον εφικτό ρυθμό bits per second per hertz), με τον καθορισμό της απαιτούμενης ενέργειας πρόσληψης (και άρα και μετάδοσης) για την επιτυχή πρόσληψη του σήματος. Επιπλέον, η επιλογή των αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος από την συμπίεση μέχρι την αποθήκευση και την λήψη του σήματος από την μνήμη, επηρεάζει την ενεργειακή κατανάλωση.

Οι παραπάνω παράγοντες είναι κατανοητοί και γνωστοί εδώ και καιρό. Αυτό που δεν είναι ξεκάθαρο πάντα είναι με ποιο τρόπο οι παράγοντες αυτοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και άρα πως επηρεάζει η ταυτόχρονη επιλογή των διαφορετικών σχεδιαστικών αρχών την ενεργειακή αυτονομία ενός ασύρματου δικτύου.

Επιπλέον έχει γίνει πλέον κατανοητό ότι και η επιλογή των πρωτοκόλλων σε υψηλότερα επίπεδα επηρεάζει την ενέργεια που δαπανάται, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τον έλεγχο ισχύος στα CDMA (Code-Division Multiple Access) δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Στο επίπεδο ελέγχου ζεύξης (Data Link Layer, DLL) άσκοπες αναμεταδόσεις πακέτων που συγκρούονται επιβαρύνουν δραματικά την ενέργεια των κόμβων. Έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι μεγάλο μέρος της ενέργειας των κόμβων καταναλώνεται στα επίπεδα MAC και δρομολόγησης, συνεπώς η χρήση ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων μπορεί να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια που καταναλώνεται.

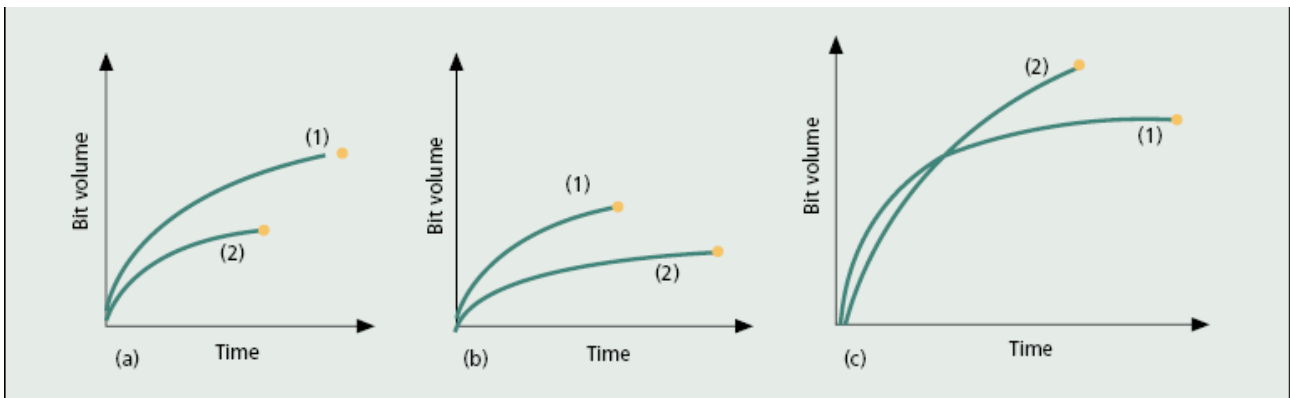
Το πρόβλημα της κατανάλωσης ενέργειας ωστόσο δεν είναι εύκολο να επιλυθεί, καθώς τεχνικές που επικεντρώνονται αποκλειστικά στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας επιδρούν δυσμενώς σε άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου. Για παράδειγμα μπορεί από ενεργειακής άποψης να είναι προτιμότερο κατά τη δρομολόγηση να επιλέγονται μακρινά μονοπάτια με μικρές αποστάσεις από βήμα σε βήμα, παρά μικρά μονοπάτια με μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο μια τέτοια επιλογή θα έχει αντίκτυπο στην καθυστέρηση, αφού πολλοί περισσότεροι κόμβοι θα πρέπει να επεξεργάζονται και να επανεκπέμπουν το μήνυμα. Μια πιθανή μετρική είναι η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης με μέριμνα ώστε η απόδοση-throughput (ή καθυστέρηση-delay) να διατηρείται πάνω (ή κάτω) από συγκεκριμένο κατώφλι. Μια άλλη προσέγγιση είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης (ή ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης) ανά Joule καταναλισκόμενης ενέργειας.

Ακόμα και έτσι όμως οι επιλογές δε γίνονται ξεκάθαρες. Για παράδειγμα στο παραπάνω σενάριο θεωρήσαμε ότι είναι προτιμότερο ενεργειακά να έχουμε περισσότερα και μικρότερης απόστασης hops παρά το αντίθετο, λαμβάνοντας υπόψη το ενεργειακό κόστος μετάδοσης των πακέτων. Ωστόσο αν αναλογιστούμε και το κόστος επεξεργασίας των μηνυμάτων σε κάθε κόμβο, μπορεί να διαπιστώσουμε ότι αυτή η επιλογή μπορεί να μην είναι η βέλτιστη ενεργειακά για ολόκληρο το δίκτυο, καθώς περισσότεροι κόμβοι πρέπει να ξοδέψουν ενέργεια προκειμένου να επεξεργαστούν το μεταδιδόμενο μήνυμα.

Στην προσπάθεια να συνδυαστεί η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση με την αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης για την ανταλλαγή μηνυμάτων, κρίνεται απαραίτητο να καθοριστούν επαρκώς συγκεκριμένοι στόχοι κατά την σχεδίαση ενός δικτύου. Προφανώς σε κάθε εφαρμογή η διάρκεια ζωής του δικτύου είναι μία από τις πιο σημαντικές επιδιώξεις. Σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να αναλυθεί η έννοια της ζωής του δικτύου[4]. Ο συγκεκριμένος όρος μπορεί να έχει διάφορες ερμηνείες:

- I. Μπορεί να καθοριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα ποσοστό $K\%$ των κόμβων να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω ενεργειακής εξάντλησης.
- II. Μπορεί να καθοριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται μέχρι τον ενεργειακό «θάνατο» του πρώτου κόμβου.
- III. Μπορεί να καθοριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε όλοι οι κόμβοι του δικτύου να τεθούν εκτός λειτουργίας εξαιτίας ενεργειακής εξάντλησης.

Όμως ο χρόνος ζωής πρέπει να συνοδεύεται και από κάποια ικανοποιητική επικοινωνία. Είδαμε σαν πιθανές μετρικές της επίδοσης του συστήματος την απόδοση ή την καθυστέρηση, ενώ μια ακόμα μετρική μπορεί να είναι ο συνολικός όγκος δεδομένων που παραδίδονται. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το δίλημμα στην επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου ας δούμε την παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.1):



Εικόνα 3.1: Σύγκριση απόδοσης διαφορετικών δικτύων

Στην εικόνα αποτυπώνεται ο συνολικός όγκος δεδομένων που παραδίδεται κατά τη διάρκεια ζωής του δικτύου από δύο διαφορετικά, υποθετικά πρωτόκολλα (1) και (2) σε συνθήκες ίδιου φορτίου, από όλους τους κόμβους. Στα δεδομένα μετριέται ο αριθμός των bits που παραδίδεται τελικά και όχι που μεταδίδεται. Στην εικόνα 4a είναι ξεκάθαρο ότι το πρωτόκολλο 1 είναι ανώτερο όχι μόνο γιατί αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του δικτύου αλλά και γιατί μεταδίδει μεγαλύτερο όγκο

δεδομένων σε όλο αυτό το διάστημα. Στην εικόνα 4b η διάκριση γίνεται κάπως δυσκολότερη καθώς το πρωτόκολλο 1 παραδίδει περισσότερα δεδομένα αλλά το δίκτυο πεθαίνει νωρίτερα. Στην εικόνα 4c η επιλογή του πρωτοκόλλου γίνεται ακόμα δυσκολότερη καθώς οι καμπύλες του όγκου δεδομένων τέμνονται. Το πρωτόκολλο 1 προσφέρει μια πιο έντονη εκκίνηση μέχρι το σημείο τομής. Από εκεί και πέρα το πρωτόκολλο 2 παραδίδει περισσότερα δεδομένα κάτι που όμως έχει επίπτωση και στη διάρκεια ζωής του δικτύου. Συνεπώς η επιλογή του καταλληλότερου πρωτοκόλλου που να συνδυάζει διάρκεια ζωής και αποδοτικότητα είναι μια δύσκολη υπόθεση.

3.2 Ενεργειακή αποφόρτιση μπαταρίας

Όπως αναλύουν και οι συγγραφείς στο [14], ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας απαιτεί την πρακτική κατανόηση της συμπεριφοράς των υποκείμενων δικτυακών διεπαφών. Η ενέργεια που καταναλώνεται από μια διεπαφή της συσκευής, εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας.

Εξαιτίας της ευρείας διαθεσιμότητάς τους, του χαμηλού κόστους και της σχετικής σταθερότητας που προσφέρουν, οι διεπαφές που βασίζονται στα ανοιχτά πρότυπα IEEE 802.11 [15], προκάλεσαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) συνοψίζονται οι σχετικές πειραματικές μετρήσεις για κατανάλωση ενέργειας που έγιναν βάσει διαφορετικών δικτυακών διεπαφών.

Διεπαφή IEEE 802.11 (2,4 GHz)	Μετάδοση	Λήψη	Κατάσταση λειτουργίας idle	Κατάσταση λειτουργίας sleep	Mbps
Aironet PC4800	1.4–1.9 W	1.3–1.4 W	1.34 W	0.075 W	11
Lucent Bronze	1.3 W	0.97 W	0.84 W	0.066 W	2
Lucent Silver	1.3 W	0.90 W	0.74 W	0.048 W	11
Cabletron Roamabout	1.4 W	1.0 W	0.83 W	0.13 W	2
Lucent WaveLAN	3.10 W	1.52 W	1.5 W	—	—

Πίνακας 3: Μετρήσεις διεπαφών δικτύου για την κατανάλωση ενέργειας

Στους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις που προαναφέρθηκαν, συμπεριλαμβάνονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, τα σχεδιαστικά κριτήρια και ο τρόπος κατασκευής που εφαρμόζεται από τους κατασκευαστές. Τα αποτελέσματα και οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται δεν είναι μεγάλες, πιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη συνέπεια των προτύπων που αναφέρθηκαν.

Αναλυτικά αποτελέσματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας κατά τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων από τις διεπαφές δικτύου παρουσιάζονται στο [16]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από τους συγγραφείς προκύπτουν από μετρήσεις που έγιναν σε πραγματικές συνθήκες μετάδοσης και λήψης πακέτων διαφορετικών μεγεθών. Στο [16] τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να αναπτύξουν ένα μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης για μια διεπαφή

δικτύου τύπου IEEE 802.11 Lucent.

Όταν μια διεπαφή δικτύου λαμβάνει, αποστέλλει ή απορρίπτει ένα πακέτο καταναλώνεται επιπλέον ενέργεια, η οποία προστίθεται στην αρχική. Αυτή μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας σε κάθε μορφή λειτουργίας ένα παράγοντα που αυξάνεται με τρόπο ανάλογο προς το μέγεθος του πακέτου, αλλά και ένα προκαθορισμένο στοιχείο που αντανακλά την ανάθεση του καναλιού.

Στη συγκεκριμένη εργασία παρατηρούνται πολύ ισχυρά πρότυπα. Το προκαθορισμένο κόστος είναι υψηλό, εξαιτίας του κόστους που δημιουργείται από τις RTS (Request To Send)/ CTS(Clear To Send)/data/ACK (Acknowledge) χειραψίες και το μέγεθος των IEEE 802.11 MAC ετικετών. Το προκαθορισμένο κόστος κυριαρχεί για πακέτα μικρότερα από 338 bytes, για 2Mbps εύρος ζώνης ή 1,2 Kbytes για 11 Mbps. Παρόλα αυτά, η κατανάλωση της ενέργειας στην περίπτωση αδράνειας (idle) είναι η επικρατούσα στην υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται. Κάνοντας μια σκληρή αποτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας αποδεικνύεται ότι μια διεπαφή IEEE 802.11 δύναται να αποστείλει δέκα 128-byte πακέτα με ευρυ-εκπομπή ανά δευτερόλεπτο και να παραλάβει τον ίδιο όγκο μηνυμάτων και από τους 4 γειτονικούς του κόμβους, καταναλώνοντας μόνο περίπου 1% παραπάνω ενέργεια από ότι μια διεπαφή που βρίσκεται σε αδράνεια. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να ενσωματωθούν σε προσομοιώσεις στο επίπεδο του πακέτου ενός ad hoc πρωτοκόλλου δρομολόγησης, όπως περιγράφεται στο [17].

Στη συγκεκριμένη εργασία, γίνεται ξεκάθαρο ότι το εύρος ζώνης και η ενέργεια δεν είναι κριτήρια αλληλοεπηρεαζόμενα με ανάλογο τρόπο, δηλαδή η μείωση του εύρους ζώνης δεν συνεπάγεται απαραίτητα τη μείωση της δαπανούμενης ενέργειας. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ότι σε ένα σχετικά πυκνό δίκτυο, η ευρυεκπομπή κίνησης μπορεί να είναι ακριβή, εξαιτίας πολλαπλού κόστους παραλαβής μηνυμάτων. Από την άλλη, τα πειράματα που περιγράφονται στο [16] δεν υπολογίζουν τα αποτελέσματα του ελέγχου μετάδοσης ενέργειας, κατά την κατανάλωση ενέργειας στη διεπαφή δικτύου.

Οι υπολογισμοί για την κάρτα Aironet PC 4800B, η οποία υποστηρίζει πολλαπλά επίπεδα μετάδοσης ενέργειας, αναφέρονται στην [18]. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν ότι καθώς μειώνεται το επίπεδο της εξερχόμενης ενέργειας από 50mW σε 1mW, η ενέργεια που καταναλώνεται από τον αποστολέα μειώνεται κατά περίπου 500mW. Αυτό αναπαριστά μόνο περίπου το 25% από το συνολικό ποσό καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ η αρχική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται περίπου στο 70% της συνολικής. Από την άλλη πλευρά η κατανάλωση ενέργειας του παραλήπτη μπορεί να συγκριθεί με την αρχική και να θεωρηθεί προσεγγιστικά ανεξάρτητη των επιπέδων εκπεμπόμενης ισχύος.

Το συμπέρασμα της εργασίας [14] είναι ότι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας της δικτυακής διεπαφής, είναι απαραίτητη για να βρεθεί ένας τρόπος, ώστε να βρίσκεται για περισσότερο χρόνο στην κατάσταση “sleep” και λιγότερο χρονικό διάστημα στην κατάσταση “idle”.

3.2.1 Μοντέλα αποφόρτισης

Στην εργασία [19] γίνεται αναφορά στα διαφορετικά μοντέλα χωρητικότητας μπαταρίας. Τα συγκεκριμένα μοντέλα περιγράφουν τη χωρητικότητα της μπαταρίας, βάσει του τρόπου αποφόρτισης των κυκλωμάτων της. Σε μια προσπάθεια επικύρωσης των συγκεκριμένων μοντέλων, μια εμπορικά διαθέσιμη μπαταρία λιθίου μπορεί να χαρακτηριστεί μέσα από συγκεκριμένες

μετρήσεις του φέροντος και της εξόδου τάσης της, για διαφορετικά προφίλ κίνησης που εφαρμόζονται από έναν κόμβο-αισθητήρα. Στο αποτέλεσμα, παρουσιάζεται ο τρόπος που επηρεάζεται η χωρητικότητα από τα διαφορετικά προφίλ κίνησης και παρέχεται μια ανάλυση για το αν τα μοντέλα συμβατικών μπαταριών μπορούν να εφαρμοστούν στις σημερινές συνθήκες.

Μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία αναλύεται ο τρόπος μοντελοποίησης μιας μπαταρίας. Σύμφωνα με την παρουσίαση, η συγκεκριμένη μοντελοποίηση οδηγεί στη δημιουργία των «γενεών» ενσωματώνοντας επιπλέον χαρακτηριστικά σε κάθε νέα γενεά που δημιουργείται. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να υποδειχθεί η μέγιστη χωρητικότητα, είναι η μονάδα Ah (Ampere·Hour). Το εν λόγω κριτήριο αποτελεί μια κοινή μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως από τους κατασκευαστές για να καθορίσουν θεωρητικά τη συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας. Γνωρίζοντας τον τρόπο εκφόρτισης της μπαταρίας και τη συνολική χωρητικότητα σε A·h, μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας με χρήση της συνάρτησης.

$$T = \frac{C}{I} \quad (1)$$

όπου το T συμβολίζει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το C τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας που μετράται σε A·h, ενώ το I συμβολίζει το ρεύμα αποφόρτισης των κυκλωμάτων της μπαταρίας.

Τα τρία πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα χωρητικότητας όπως αναφέρονται στο [19] είναι τα ακόλουθα:

1. Γραμμικό μοντέλο – 1ης Γενιάς

Στο γραμμικό μοντέλο, η μπαταρία θεωρείται σαν γραμμική αποθήκη ρεύματος. Η μέγιστη χωρητικότητα επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από την τιμή του ρυθμού αποφόρτισης. Το απλό μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να παρατηρήσει την πληροφορία του ποσού της ενέργειας που καταναλώνεται. Η υπολειπόμενη χωρητικότητα μετά από χρόνο t_d μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη εξίσωση 2:

$$C = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t) dt \quad (2)$$

όπου C' είναι η προηγούμενη τιμή της χωρητικότητας και $I(t)$ είναι η στιγμιαία τιμή του ρεύματος εκφόρτισης του κυκλώματος της μπαταρίας στο χρόνο t .

Στο γραμμικό μοντέλο μπαταρίας υποθέτουμε ότι το $I(t)$ θα παραμείνει ίδιο για το χρονικό διάστημα t_d , εάν η κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος παραμείνει σταθερή. Με αυτή την υπόθεση η εξίσωση (2) γίνεται:

$$C = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t) dt = C' - I \cdot T_d \quad (3)$$

Καταλήγοντας μπορούμε να πούμε ότι το γραμμικό μοντέλο είναι το πιο απλοϊκό και δεν απεικονίζει την συμπεριφορά μιας μπαταρίας σε πραγματικές συνθήκες.

2 Μοντέλο εξαρτημένο από το ρυθμό αποφόρτισης – 2^{ης} Γενιάς

Ενώ το γραμμικό μοντέλο λειτουργίας υποθέτει ότι η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας δεν

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

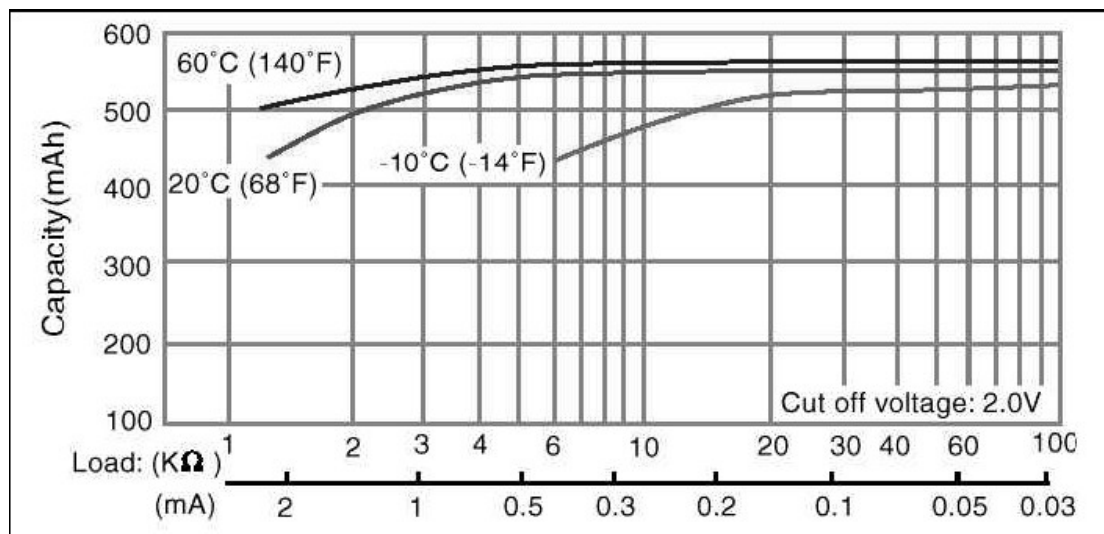
επηρεάζεται από το ρυθμό αποφόρτισης, το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του την επίδραση του ρυθμού αποφόρτισης στον υπολογισμό της χωρητικότητας της μπαταρίας. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αποφόρτισης. Για να αποτυπωθεί σαφώς η εξάρτηση αυτή εισάγεται ο παράγοντας

$$k = \frac{C_{eff}}{C_{max}} \quad (4),$$

όπου C_{eff} είναι η ενεργή χωρητικότητα της μπαταρίας και C_{max} η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας, εκφρασμένες σε Ampere hour. Η εξίσωση (3) γίνεται

$$C = C' - I * td \quad (5).$$

Ο παράγοντας k εξαρτάται από το το ρεύμα I και είναι κοντά στο 1 όταν ο ρυθμός αποφόρτισης είναι χαμηλός, ενώ πλησιάζει στο 0 στην αντίθετη περίπτωση. Χρησιμοποιώντας τα γραφήματα του κατασκευαστή της μπαταρίας για συγκεκριμένες τιμές του ρεύματος μπορούμε να βρούμε την C_{eff} (Εικόνα 3.2) και συνεπώς με χρήση και της C_{max} , μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή k .



Εικόνα 3.2: Παράδειγμα υπολογισμού του παράγοντα k από data sheets κατασκευαστών

Μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψιν την συμπεριφορά μιας αληθινής μπαταρίας, αγνοώντας το φαινόμενο της χαλάρωσης.

3 Μοντέλο Relaxation – 3^{ης} Γενιάς

Οι μπαταρίες παρουσιάζουν ένα φαινόμενο γνωστό και ως χαλάρωση. Όταν αποφορτίζεται με υψηλό ρυθμό, ο ρυθμός διάχυσης των ενεργών στοιχείων της μεταξύ του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου μειώνεται. Αν ο υψηλός ρυθμός αποφόρτισης συνεχιστεί η μπαταρία μπορεί να φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής της, ενώ υπάρχει ακόμα αριθμός ενεργών στοιχείων διαθέσιμος.

Αντίθετα αν η αποφόρτιση είναι διακοπτόμενη ή χαμηλότερης έντασης, δίνεται η δυνατότητα στην μπαταρία να ανακτήσει την χωρητικότητα που έχασε. Το φαινόμενο της χαλάρωσης επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Έχουν προταθεί αναλυτικοί και στοχαστικοί τρόποι υπολογισμού του φαινομένου της χαλάρωσης, ωστόσο λόγω της πολυπλοκότητας του αναλυτικού τρόπου υπολογισμού, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψιν πάνω από 50 ηλεκτροχημικοί και φυσικοί παράγοντες για διαφορετικούς τύπους μπαταρίας, προτείνεται η χρήση μετρήσεων.

3.3 Μοντελοποίηση απωλειών ενέργειας

Στην ενότητα αυτή θα δούμε πιο αναλυτικά τις απώλειες ενέργειας στα δίκτυα ad-hoc, όπως παρουσιάζονται εκτενώς στην εργασία [4]. Εφόσον η ενέργεια είναι σπάνιος και μη ανανεώσιμος πόρος για τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα, η σχεδίαση ενεργητικά αποδοτικών πρωτοκόλλων είναι από τους πιο βασικούς στόχους και τις πιο σημαντικές προτεραιότητες. Η σχεδίαση και η ανάλυση της απόδοσης αυτών των πρωτοκόλλων, απαιτούν κατάλληλη μοντελοποίηση των παραγόντων κατανάλωσης ενέργειας. Ως καταστάσεις λειτουργίας ενός κόμβου αναγνωρίζονται αυτές που προαναφέρθηκαν προηγουμένως (transmit, receive, idle και sleep).

Το κόστος που σχετίζεται με κάθε πακέτο σε ένα κόμβο παρουσιάζεται σαν το άθροισμα ενός αυξανόμενου παράγοντα κόστους m , ο οποίος αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του πακέτου και ενός προκαθορισμένου κόστους b που σχετίζεται με το κανάλι. Οπότε προκύπτει η ακόλουθη συνάρτηση κόστους:

$$Cost = m * size + b \quad (6)$$

Βασιζόμενοι σε αυτό το ενεργειακό μοντέλο οι συγγραφείς Geraud Allard et al, παρέθεσαν ένα απλό μοντέλο υπολογισμού της καταναλισκόμενης ενέργειας σε κάθε κόμβο, με βάση τις ροές δεδομένων του δικτύου. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες τιμές για κατανάλωση ισχύος σε περιπτώσεις μετάδοσης και λήψης το προτεινόμενο μοντέλο δίνει με ακρίβεια τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας, σε ένα ιδανικό όμως δίκτυο, δηλαδή σε ασύρματο περιβάλλον όπου δεν υπάρχουν παρεμβολές και συγκρούσεις στην αποστολή δεδομένων.

Βάσει της ερευνητικής τους εργασίας, κατέληξαν ότι η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε κόμβο εξαιτίας της ροής δεδομένων μπορεί να υπολογιστεί με έναν απλό τρόπο. Λαμβάνοντας υπόψη την αναπαράσταση της Εικόνα 3.3 και ανάλογα με το αν ο κόμβος N ανήκει σε μια ροή ή όχι και εάν στη ροή ο M επηρεάζει, τότε η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο N εξαιτίας του M μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$E_{N/M} = 1_{n>0} (1_{M=N} E_{Tack} + 1_{M \neq N} E_{Rack}) + 1_{m>0} (1_{M=N} E_{Tpck} + 1_{M \neq N} E_{Rpck})$$

όπου

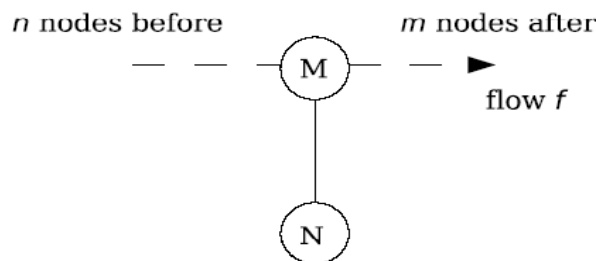
- $E_{N/M}$ εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται στον κόμβο N εξαιτίας του κόμβου M ,
- E_{Tack} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μετάδοση ενός πακέτου επιβεβαίωσης (ACK)
- E_{Tpck} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται για μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

- E_{Rack} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται για τη λήψη ενός πακέτου επιβεβαίωσης (ACK)
- E_{Rpck} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται για τη λήψη ενός πακέτου δεδομένων

$$1_p = \begin{cases} 1 & \text{εάν το } p \text{ είναι αληθές} \\ 0 & \text{εάν το } p \text{ είναι ψευδές} \end{cases}$$

Η συγκεκριμένη μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε απλοποιεί τη διαδικασία ανταλλαγής πακέτων λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα και ACK πακέτα μόνο. Σε περίπτωση που συμπεριληφθούν και άλλα πακέτα, όπως RTS/CTS και ARP (Address Resolution Protocol), το σχετικό κόστος για τα συγκεκριμένα πακέτα πρέπει να συμπεριληφθεί για να επεκταθεί στο μοντέλο.



Εικόνα 3.3: Επίδραση στον κόμβο N εξαιτίας του κόμβου M λόγω ροής f

Σύμφωνα με άλλες μελέτες το κόστος μετάδοσης και λήψης πακέτων βασίζεται στην εξίσωση (6). Μια τέτοια μοντελοποίηση προσφέρει μια γραμμική αναπαράσταση για τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας. Το κόστος υπολογίζεται προσθετικά από τα κόστη της αποστολής πακέτων στους κόμβους-αποστολείς και το αντίστοιχο λήψης στους κόμβους-παραλήπτες. Το σύνολο των πιθανών παραληπτών αποτελείται από τους point-to-point κόμβους προορισμού καθώς και κόμβους που βρίσκονται μέσα στην ακτίνα εκπομπής του αποστολέα καθώς και τους κόμβους που βρίσκονται εντός ακτίνας εκπομπής του προορισμού.

Σε αυτό το σημείο προκειμένου να αναλυθούν διεξοδικότερα οι συναρτήσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ισχύος σε ένα ad hoc δίκτυο θα πρέπει να διαχωρίσουμε την απώλεια ενέργειας λόγω ευρυεκπομπής, από άκρο σε άκρο κίνησης και απόρριψη κίνησης.

- Απώλεια ενέργειας κατά την ευρυεκπομπή δεδομένων

Για την περίπτωση της κατά IEEE 802.11 ευρυεκπομπή δεδομένων, ο αποστολέας αφουγκράζεται την κίνηση στο κανάλι. Αν είναι ελεύθερος ο δίαυλος για μετάδοση, τότε ένα μήνυμα στέλνεται και παραλαμβάνεται από όλους τους κόμβους εντός ακτίνας μετάδοσης. Αν όμως ο δίαυλος δεν είναι ελεύθερος ο αποστολέας πρέπει να υποχωρήσει και να ξαναπροσπαθήσει μεταγενέστερα. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 δεν καθορίζει ευρυεκπομπή μηνυμάτων επιβεβαίωσης (ACK) ή αναμεταδόσεις. Αν ορίσουμε σαν προκαθορισμένο κόστος απώλειας ενέργειας στο κανάλι κατά τη

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

μετάδοση σε b_{send} για την αποστολή μηνύματος και b_{recv} για την παραλαβή και το αυξανόμενο φορτίο κόστους σε m_{send} και m_{recv} αντίστοιχα τότε η εξίσωση (6) θα γίνει:

$$Cost = m_{send} \cdot size + b_{send} + \sum_{n \in S} (m_{recv} \cdot size + b_{recv}) \quad (7)$$

- Απώλεια ενέργειας κατά την από άκρο σε άκρο επικοινωνία

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σταθερά που υποδηλώνει το αυξανόμενο κόστος φορτίου m_{send} και m_{recv} έχει την ίδια τιμή με την αντίστοιχη της απώλειας ενέργειας κατά την ευρυεκπομπή δεδομένων. Για την από άκρο σε άκρο κίνηση, το προκαθορισμένο κόστος εμπεριέχει τόσο το κόστος για την πρόσβαση στο κανάλι όσο και την απώλεια που προκύπτει από τις διαπραγματεύσεις σε επίπεδο MAC (Medium Access Control – Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου), διαπραγματεύσεις που σχετίζονται με την πρόσβαση στο μέσο. Το κόστος πρόσβασης στο κανάλι θεωρείται το ίδιο με αυτό της περίπτωσης ευρυεκπομπής. Στο IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο, η πηγή-αποστολέας στέλνει ένα μήνυμα ελέγχου (RTS-Request To Send) υποδεικνύοντας τον προορισμό, ενώ από την πλευρά του ο κόμβος-προορισμός απαντά στέλνοντας στην πηγή ένα μήνυμα (CTS-Clear To Send). Με την παραλαβή του μηνύματος CTS η πηγή αποστέλλει τα δεδομένα, αναμένοντας ένα μήνυμα επιβεβαίωσης (ACK) από τον προορισμό. Για μεγαλύτερη απλότητα τα μικρά μηνύματα ελέγχου υποθέτουμε ότι έχουν τα ίδια προκαθορισμένα κόστη ($b_{sendctl}$) και ($b_{recvctl}$).

Το κόστος απώλειας ενέργειας στον αποστολέα θα είναι:

$$Cost = b_{sendctl} + b_{recvctl} + m_{send} * size + b_{send} + b_{recvctl} \quad (8)$$

Το κόστος απώλειας ενέργειας στον παραλήπτη θα είναι:

$$Cost = b_{recvctl} + b_{sendctl} + m_{recv} * size + b_{recv} + b_{sendctl} \quad (9)$$

Στην πράξη όμως τα μηνύματα μπορεί να χαθούν εξαιτίας συγκρούσεων ή άλλων απωλειών και το πρωτόκολλο παρέχει στο επίπεδο MAC αναμετάδοση. Για αυτό το λόγο, κάθε στοιχείο του πρωτοκόλλου που εμφανίζεται στις εξισώσεις (8) μέχρι και (9) εμπεριέχουν έναν παράγοντα που δεν εμφανίζεται αλλά υπονοείται. Ο συγκεκριμένος παράγοντας αφορά $1+N_{\text{επαναμεταδόσεις/διπλοεγγραφές}}$. Χωρίζοντας τα μηνύματα ελέγχου με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των επαναμεταδόσεων.

- Απώλεια ενέργειας κατά την απόρριψη δεδομένων

Σε αυτή την περίπτωση οι κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμούς και βρίσκονται στην εμβέλεια μετάδοσης είτε του αποστολέα είτε του παραλήπτη, «ακούν τυχαία» ένα μέρος ή όλη την κίνηση στο δίαυλο. Οι κόμβοι εντός εμβέλειας της πηγής, αλλά όχι του προορισμού, βάσει του προβλήματος του εκτεθειμένου τερματικού, «ακούν» μόνο τις μεταδόσεις του αποστολέα της ακολουθίας. Αντίστοιχα οι κόμβοι που βρίσκονται στην εμβέλεια του προορισμού, αλλά όχι του αποστολέα, σύμφωνα με το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, «ακούν» αποκλειστικά και μόνο την αποστολή μηνυμάτων από την πλευρά του προορισμού.

Όπως τονίζεται στην συγκεκριμένη εργασία το ενεργειακό κόστος της απόρριψης δεδομένων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση του MAC επιπέδου. Για το IEEE 802.11 MAC

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

πρωτόκολλο, οι κόμβοι εντός εμβέλειας του αποστολέα «ακούν» το RTS μήνυμα και δεδομένα και κόμβοι εντός εμβέλειας του παραλήπτη «ακούν» τα CTS και ACK μηνύματα.

Το κόστος απώλειας ενέργειας στους κόμβους που δεν αποτελούν προορισμό υπολογίζεται ως εξής:

$$Cost = \sum_{n \in S} b_{discardtcl} + \sum_{n \in D} b_{discardtcl} + \sum_{n \in S} (m_{discard} \cdot size + b_{discard}) + \sum_{n \in D} b_{discardtcl} \quad (10)$$

Στη χειρότερη περίπτωση τα $m_{discard}$ και $b_{discard}$ έχουν την ίδια τιμή με τα m_{recv} και b_{recv} αντίστοιχα. Ουσιαστικά αυτό που εννοείται είναι ότι οι κόμβοι λαμβάνουν, και εν συνεχεία απορρίπτουν οποιοδήποτε πακέτο, για το οποίο αναγνωρίζουν ότι δεν είναι ο προορισμός. Μια πιο αποδοτική στρατηγική θα ήταν να επιτρέπεται στους κόμβους που δεν αποτελούν προορισμούς να εισέρχονται σε μια κατάσταση μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας.

Στην εξίσωση (10) το προκαθορισμένο κόστος $b_{discard}$ εμπεριέχει το κόστος που σχετίζεται με την κατάσταση μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας κατά την αποστολή δεδομένων. Η τιμή του $m_{discard}$ είναι αρνητική, επειδή η συγκεκριμένη κατάσταση απαιτεί λιγότερη ενέργεια από την αντίστοιχη που απαιτείται στην idle κατάσταση, που είναι η προκαθορισμένη.

Όσο μεγαλύτερη χρονικά είναι η μετάδοση των δεδομένων τόσο περισσότερο χρονικό διάστημα παραμένει ο κόμβος στην συγκεκριμένη κατάσταση. Ειδικότερα, για την περίπτωση της κάρτας Lucent WaveLAN IEEE 802.11 η κατάσταση μετάδοσης, απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας από ότι η idle, αλλά περισσότερο από την αντίστοιχη sleep. Ένας κόμβος που δεν αποτελεί προορισμό «ακούει» όλα τα δεδομένα κίνησης, είτε αποτελεί τον προορισμό είτε όχι, η συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας χαρακτηρίζεται στη βιβλιογραφία σαν promiscuous. Η διαφορά ανάμεσα στα b_{recv} , m_{recv} και $b_{discard}$, $m_{discard}$ αποτελεί μια απόδειξη της επιπρόσθετης ενεργειακής κατανάλωσης που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας.

Για κόμβους που δεν αποτελούν προορισμούς και λειτουργούν στην promiscuous κατάσταση, το κόστος απώλειας υπολογίζεται ως εξής:

$$Cost = \sum_{npromiscuous \in S} b_{discardtcl} + \sum_{npromiscuous \in D} b_{discardtcl} + \sum_{npromiscuous \in S} (m_{recv} \cdot size + b_{recv}) + \sum_{npromiscuous \in D} b_{discardtcl} \quad (11)$$

Τιμές συντελεστών που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς απώλειας ενέργειας

Οι προδιαγραφές των διεπαφών ασύρματων καρτών δικτύων δεν παρέχουν συντελεστές όπως καθορίζονται παραπάνω. Σε συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος για τη μέτρηση της εισερχόμενης τάσης, ενώ διαφορετικών μεγεθών πακέτα στέλνονται και λαμβάνονται στο δίκτυο. Με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίστηκαν οι συντελεστές απώλειας ενέργειας ανά πακέτο. Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας μιας ασύρματης δικτυακής διεπαφής βασισμένης στο IEEE 802.11.

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Εξαιτίας της έμμεσης φύσης των υπολογισμών οι συγκεκριμένες τιμές παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, περίπου στο 10 με 15%. Παρόλα αυτά, παρέχουν μια καλή υπόδειξη για τον υπολογισμό κόστους πολύ σημαντικών για υψηλού επιπέδου αναλύσεις. Τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό του γραμμικού μοντέλου συντελεστών για την αποστολή, λήψη και απόρριψη κίνησης εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5). Ο συγκεκριμένος πίνακας, παρουσιάζει τις τιμές των συντελεστών που προκύπτουν και χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις (8) – (11).

	$\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{byte}(\text{excl.MACheader})$	$\mu\text{W}\cdot\text{s}$
point-to-point send	Cost = $1.9 \times \text{size}$ +	420
broadcast send	Cost = $1.9 \times \text{size}$ +	250
point-to-point recv	Cost = $0.42 \times \text{size}$ +	330
broadcast recv	Cost = $0.50 \times \text{size}$ +	56
Κόμβοι που δεν αποτελούν προρισμούς n S, D		
promiscuous recv	Cost = $0.39 \times \text{size}$ +	140
Discard	Cost = $-0.49 \times \text{size}$ +	97
Κόμβοι που δεν αποτελούν προρισμούς n □ S, n D		
promiscuous recv	Cost = $0.54 \times \text{size}$ +	66
Discard	Cost = $-0.58 \times \text{size}$ +	24
Κόμβοι που δεν αποτελούν προρισμούς n □ S, n ∪ D		
promiscuous recv	Cost = $0.0029 \times \text{size}$ +	63
Discard	Cost = $-0.0058 \times \text{size}$ +	56
Idle		
Idle	Cost = 808 mW	

Πίνακας 4: Παρουσίαση των τιμών των μετρήσεων για *direct sequence spread spectrum* γραμμικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας της κάρτας *Lucent IEEE 802.11 WaveLAN PC card 2.4 GHz*

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Msend	1.89 mW·s/byte
Bsend	246 mW·s
Mrecv	0.494 mWs/byte
Brecv	56.1 mWs
mdiscard	-0.490 mW·s/byte
bdiscard	97.2 mW·s
mrecv_promisc	0.388 mW·s/byte
brecv_promisc	136 mW·s
bsendctl	120 mW·s
brecvctl	29.0 mW·s

Πίνακας 5: Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις

Τελικά τέσσερα είναι τα βασικά ερωτήματα για τα οποία θα πρέπει οι σχεδιαστές πρωτοκόλλων να βρουν απαντήσεις:

1) Είναι το κόστος παραλαβής μηνύματος σημαντικό;

Το κόστος παραλαβής πακέτων είναι σημαντικό. Αν ληφθεί ένα μήνυμα ευρυεκπομπής από περισσότερους του ενός γείτονες, τότε το συνολικό κόστος της παραλαβής πακέτου είναι μεγαλύτερο από το κόστος αποστολής του. Το κόστος παραλαβής είναι πιθανό να αυξηθεί σύμφωνα με την τάση προς μεγαλύτερη ευαισθησία και τις δυνατότητες επεξεργασίας σήματος στον κόμβο-παραλήπτη.

2) Ποια είναι τα αντίστοιχα κόστη για μεγάλα ή μικρά πακέτα;

Το προκαθορισμένο κόστος αποστολής και παραλαβής πακέτου είναι σχετικά μεγάλο συγκρινόμενο με το οριακό κόστος. Για μικρά πακέτα μεγέθους 130 bytes όταν πρόκειται για ευρυεκπομπή ή 230 bytes όταν η μετάδοση αφορά από άκρο σε άκρο επικοινωνία, το προκαθορισμένο κόστος είναι μεγαλύτερο από το οριακό κόστος αποστολής και παραλαβής. Αυτό υπονοεί ότι η δημιουργία και αποστολή μιας αίτησης μικρής διαδρομής ή ακόμα και ενός “hello” μηνύματος, είναι ιδιαίτερα ακριβός μηχανισμός. Ουσιαστικά προτείνεται οι επικεφαλίδες της δρομολόγησης πηγής να είναι ανέξοδη αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας.

3) Ποιο είναι το κόστος απόρριψης πακέτων:

Απορρίπτοντας ένα πακέτο είναι γενικά πολύ λιγότερο δαπανηρό από ότι παραλαμβάνοντάς το. Αυτό βρίσκει πλήρη εφαρμογή στην περίπτωση των μεγάλων μηνυμάτων, επειδή οι κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμό μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των δεδομένων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι κάποια από τα αποθέματα προκύπτουν από το εξαιρετικά υψηλό κόστος της idle διεπαφής κάρτας δικτύου και το γεγονός ότι οι ad hoc κόμβοι είναι εξαρχής διαμορφωμένη σε κατάσταση idle (και όχι σε sleep) κατάσταση. Παρόλα αυτά, ακόμα και αν το mdiscard ήταν 0, η παραλαβή κίνησης δεδομένων σε promiscuous κατάσταση παραλαβής θα ήταν περισσότερο ακριβή από ότι η απόρριψή της.

4) Ποιο το αντίστοιχο κόστος για ευρυεκπομπή και απ' άκρο σε άκρο κίνηση:

Όταν το κόστος της παραλαβής είναι σημαντικό, το αντίστοιχο της ευρυεκπομπής κίνησης, καθορίζεται από το κόστος στους κόμβους-παραλήπτες. Αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό σε ένα πυκνό δίκτυο. Η απ' άκρο σε άκρο κίνηση έχει υψηλότερο κόστος αποστολής (σχεδόν δύο φορές) και παραλαβής (σχεδόν έξι φορές) από ότι η κίνηση ευρυεκπομπής, αλλά επιτρέπει σε κόμβους που δεν αποτελούν προορισμούς να απορρίψουν την κίνηση. Αν το κόστος απόρριψης είναι υψηλό, τότε το πρωταρχικό πλεονέκτημα της απ' άκρο σε άκρο κίνησης είναι η αποφυγή σύγκρουσης και η αναγνώριση των δεδομένων. Αν από την άλλη είναι χαμηλό, τότε υπάρχουν σημαντικά ενεργειακά αποθέματα.

3.4 Τύποι πρωτοκόλλων ανακάλυψης διαδρομής βάσει υπολειπόμενης ενέργειας

Στην εργασία [9] παρουσιάζονται διάφοροι τύποι πρωτοκόλλων δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τους ενεργειακούς περιορισμούς. Σύμφωνα με τον συγγραφέα, η υπάρχουσα ερευνητική δουλειά δεν καταφέρνει να συνδυάσει τους δύο στόχους που σχετίζονται με την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου: ομοιόμορφη κατανομή του ρυθμού κατανάλωσης της ενέργειας κάθε κόμβου και μείωση της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας για κάθε σύνδεση. Για το λόγο αυτό προτείνεται ένα καινούργιο πρωτόκολλο δρομολόγησης που βασίζεται στην ενέργεια, προκειμένου να ικανοποιήσει ταυτόχρονα τους δύο περιορισμούς που αναφέρθηκαν.

3.4.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστης ισχύος μετάδοσης (Minimum Total Transmission Power - MTPR)

Στις ασύρματες επικοινωνίες, η μετάδοση μπορεί να μοντελοποιηθεί αποδοτικά, χρησιμοποιώντας τον παράγοντα μετάδοσης ισχύος $1/d^n$, όπου το n παίρνει την τιμή 2 για μικρή απόσταση και την τιμή 4 για μεγαλύτερες αποστάσεις. Προκειμένου να θεωρηθούν επιτυχημένες οι αποστολές πακέτων δεδομένων θα πρέπει η αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal to noise ration – SNR), για το σήμα που λαμβάνεται σε έναν κόμβο n_j , να είναι μεγαλύτερο από το όριο ψ_j που έχει προκαθοριστεί. Μάλιστα η τιμή του συγκεκριμένου κατωφλίου σχετίζεται με το bit error rate (BER) του λαμβανόμενου σήματος.

Συνεπώς, η ελάχιστη ισχύς μετάδοσης εξαρτάται από τον θόρυβο παρεμβολής, από την απόσταση μεταξύ των κόμβων, αλλά και από το επιθυμητό BER.

Για να γίνει εφικτή η εύρεση της βέλτιστης ενεργειακά διαδρομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βασικό κριτήριο, όπως αναφέρουν και οι συγγραφείς της μελέτης Σφάλμα: Δεν βρέθηκε η πηγή παραπομπής, η συνολική ενέργεια μετάδοσης κατά μήκος μιας πιθανής διαδρομής l μεταξύ των κόμβων n_0 (πηγή) και n_D (προορισμός), P_l :

$$P_l = \sum_{i=0}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (12)$$

Πλέον η επιθυμητή διαδρομή k μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$(13)$$

όπου το A συμβολίζει το σύνολο με όλες τις διαθέσιμες διαδρομές.

Η εξίσωση 13 μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας έναν από τους γνωστούς αλγόριθμους εύρεσης σύντομου μονοπατιού, όπως Dijkstra ή Bellman Ford. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι η ισχύς μετάδοσης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των κόμβων, η οποία είναι αντίστοιχη του d^n . Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος θα επιλέξει τη διαδρομή με τα περισσότερα βήματα, σε σχέση με άλλους αλγόριθμους. Αυτό συνεπάγεται αύξηση των ενδιάμεσων κόμβων μεταξύ πηγής και προορισμού και αντίστοιχα αύξηση του χρόνου καθυστέρησης απ' άκρο εις άκρο. Επιπλέον, μια διαδρομή με πολλούς ενδιάμεσους κόμβους είναι ασταθής, εξαιτίας της πιθανής κινητικότητας τους. Από την άλλη όμως αν χρησιμοποιηθεί σαν βασικό κριτήριο ο αριθμός βημάτων από την πηγή στον προορισμό τότε δεν πληρούνται οι ενεργειακοί στόχοι που θέσαμε προηγουμένως.

Προκειμένου να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, θα πρέπει να συνυπολογιστούν η ισχύς λήψης δεδομένων και η ισχύς μετάδοσης πακέτων στη συνάρτηση κόστους. Η συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους για τον κόμβο n_j έχει την ακόλουθη μορφή:

$$C_{i,j} = P_{transmit}(n_i, n_j) + P_{receiver}(n_j) + Cost(n_j) \quad (14)$$

όπου n_i είναι ένας γειτονικός κόμβος του n_j , το $P_{receiver}(n_j)$ είναι η ισχύς λήψης δεδομένων στον n_j και $Cost(n_j)$ είναι το συνολικό ενεργειακό κόστος για τη διαδικασία μετάδοσης δεδομένων από την πηγή και λήψης από τον προορισμό. Στον κόμβο n_i ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος μετάδοσης-προώθησης των πακέτων δεδομένων υπολογίζεται ως εξής:

$$Cost(n_i) = \min_{j \in NH(i)} C_{i,j} \quad (15)$$

όπου $NH(i) = \{j, \text{για } n_j \text{ γειτονικό κόμβος του } n_i\}$.

Το μονοπάτι που θα επιλεγεί από το συγκεκριμένο αλγόριθμο, θα είναι αυτό που ελαχιστοποιεί το κόστος της παραπάνω συνάρτησης κόστους, από την πηγή μέχρι τον ενδιάμεσο κόμβο n_j . Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη μέχρι να βρεθεί ο προορισμός και να σχηματιστεί η διαδρομή. Στον αλγόριθμο ο παράγοντας $P_{receiver}(n_j)$ χρησιμοποιείται προκειμένου να βρεθεί η διαδρομή με τα λιγότερα βήματα, καθώς η ισχύς λήψης έχει την ίδια τιμή για περιπτώσεις κόμβων με ίδια χαρακτηριστικά πομποδέκτη.

3.4.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου κόστους μπαταρίας (Minimum Battery Cost Routing - MBCR)

Η συνολική ισχύ μετάδοσης είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο επειδή σχετίζεται με την ενεργειακή «ζωή» των κινητών κόμβων. Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο κριτήριο μπορεί να μειωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά στο δίκτυο. Κάτι τέτοιο όμως δεν αντανακλάται άμεσα και στην επέκταση ή τη διατήρηση της ζωής κάθε κόμβου ξεχωριστά. Αν οι διαδρομές

ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας, δρομολογούνται διαμέσου ενός συγκεκριμένου κόμβου, τότε όπως είναι φυσικό η μπαταρία του συγκεκριμένου κόμβου θα εξαντληθεί γρήγορα. Για αυτό το λόγο η υπολειπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας του κάθε κόμβου, είναι ένα πιο ακριβές κριτήριο για την περιγραφή της ζωής κάθε κόμβου του δικτύου.

Ας υποθέσουμε ότι το c_i^t είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας ενός κόμβου n_i για χρόνο t με εύρος 0 και 100. Η συνάρτηση κόστους για τον κόμβο n_i μπορεί να καθοριστεί σαν $f_i(c_i^t)$. Επίσης μπορούμε να υποθέσουμε ότι η πρόθεση ενός κόμβου να προωθήσει πακέτα αποτελεί συνάρτηση της υπολειπόμενης χωρητικότητας μπαταρίας. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της χωρητικότητας, τόσο πιο απρόθυμος θεωρείται ο κόμβος για μετάδοση.

Μια πιθανή επιλογή μοντελοποίησης της συνάρτησης κόστους είναι:

$$f_i(c_i^t) = \frac{1}{c_i^t} \quad (16)$$

όσο μειώνεται η τιμή της χωρητικότητας, τόσο η τιμή της συνάρτησης κόστους για τον κόμβο n_i αυξάνεται. Η τιμή της συνάρτησης κόστους μπαταρίας R_j για τη διαδρομή i , που αποτελείται από D κόμβους, θα είναι:

$$R_j = \sum_{i=0}^{D_j-1} f_i(c_i^t) \quad (17)$$

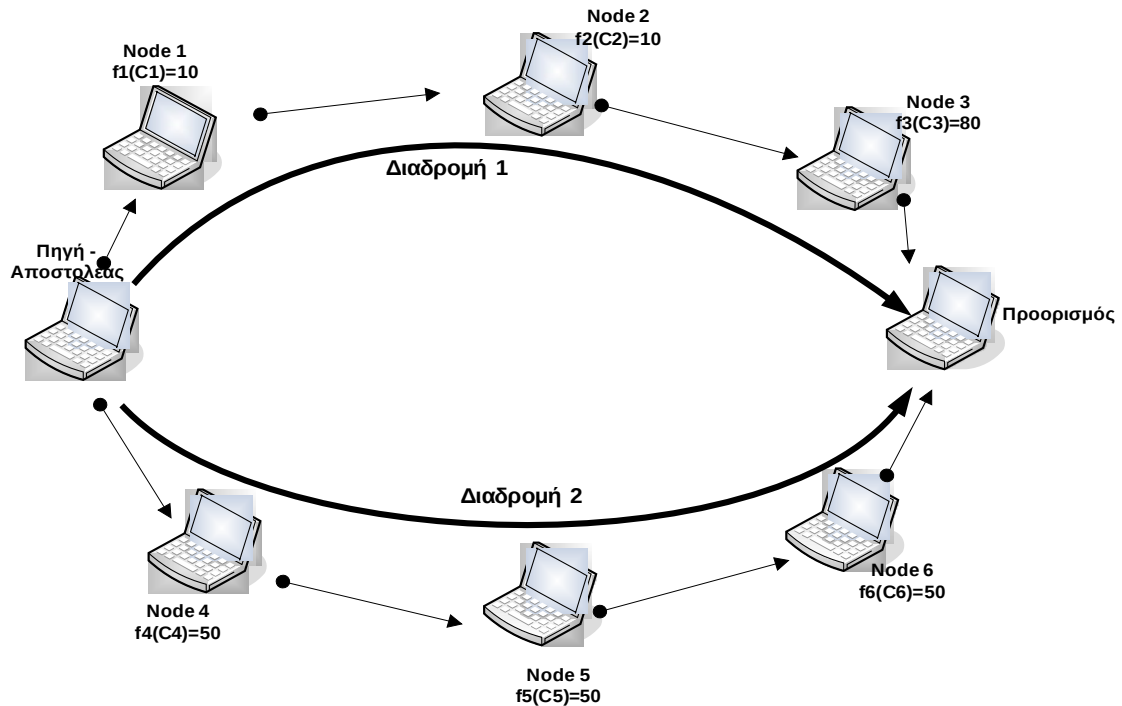
Για αυτό το λόγο, προκειμένου να βρεθεί μια διαδρομή με τη μέγιστη υπολειπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας, θα πρέπει να επιλεγεί η διαδρομή i που θα έχει την ελάχιστη τιμή στη συνάρτηση κόστους μπαταρίας, δηλαδή θα πρέπει:

$$R_i = \min \{ R_j \mid j \in A \} \quad (18)$$

όπου το A δηλώνει το σύνολο που περιέχει όλες τις πιθανές διαδρομές.

Εφόσον η χωρητικότητα της μπαταρίας ενσωματώνεται άμεσα στο πρωτόκολλο δρομολόγησης σαν βασική παράμετρος, καθορίζοντας το όριο χρήσης ενός κόμβου, προστατεύοντας με αυτό τον τρόπο τον κόμβο από υπερβολική χρήση. Στην περίπτωση όπου όλοι οι κόμβοι έχουν ίδια τιμή χωρητικότητας τότε η διαδρομή επιλέγεται βάσει του αριθμού βημάτων που απαιτούνται από την πηγή προς τον προορισμό. Ωστόσο, επειδή λαμβάνεται υπόψη μόνο το άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων κόστους μπαταρίας, είναι ακόμα πιθανό να επιλεγεί μια διαδρομή που περιέχει κόμβους με χαμηλή υπολειπόμενη ενέργεια. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4 υπάρχουν δύο πιθανές διαδρομές ανάμεσα σε οποιονδήποτε κόμβο πηγή και προορισμό.

Παρά το γεγονός ότι ο κόμβος 3 έχει πολύ λιγότερη υπολειπόμενη χωρητικότητα ενέργειας (υψηλή τιμή συνάρτησης κόστους) σε σχέση με άλλους κόμβους, η τιμή της συνάρτησης κόστους μπαταρίας συνολικά στη διαδρομή 1 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της διαδρομής 2. Για αυτό το λόγο τελικά βάσει του αλγορίθμου επιλέγεται η διαδρομή 1, η οποία όμως μειώνει ακόμα περισσότερο τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής του κόμβου 3. Συνεπώς και αυτή η προσέγγιση δεν πληρεί τους ενεργειακούς στόχους που έχουμε θέσει.



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα παρουσίασης για χρήση κριτηρίου επιλογής διαδρομής ελάχιστου αριθμού βημάτων

3.4.3 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου-μέγιστου κόστους μπαταρίας (Min-max battery cost routing - MMBCR)

Προκειμένου να γίνει σίγουρο ότι κανένας κόμβος δεν θα χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, η εξίσωση 17 μπορεί να μετατραπεί ως εξής:

$$R_j = \max_{i \text{ route}_j} f_i(c_i^t) \quad (19)$$

στην οποία η συνάρτηση κόστους ολόκληρης της διαδρομής καθορίζεται από την μεγαλύτερη τιμή κόστους μπαταρίας που απαντάται στην διαδρομή, δηλαδή από τον κόμβο με τη χαμηλότερη ενέργεια. Προφανώς η καλύτερη διαδρομή είναι αυτή για την οποία ελαχιστοποιείται η παραπάνω συνάρτηση κόστους.

Εφόσον ο αλγόριθμος προσπαθεί να αποφύγει τη διαδρομή που περιέχει τον κόμβο με την χαμηλότερη υπολειπόμενη χωρητικότητα, η ισχύς φαίνεται ότι θα χρησιμοποιηθεί πιο δίκαια σε σχέση με τα προαναφερθέντα σχήματα, αφού δε θα επιβαρυνθεί περαιτέρω ο κόμβος με την μικρότερη ενέργεια. Εξετάζοντάς όμως πιο αναλυτικά καταλήγουμε ότι εφόσον δεν υπάρχει καμιά εγγύηση, ότι θα επιλεγθούν σε κάθε περίπτωση τα μονοπάτια με τη συνολικά μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, μπορεί τελικά η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο να είναι μεγαλύτερη.

3.4.4 Πρωτόκολλο δρομολόγησης με χρήση όρων μέγιστης-ελάχιστης χωρητικότητας μπαταρίας (Conditional Max-Min Battery Capacity Routing CMMBCR)

Όπως έγινε φανερό οι προσεγγίσεις MTPR και MBCR δεν πληρούν τους δύο στόχους που θέσαμε αρχικά. Ο MBCR μπορεί σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις να εκπληρώσει τους συγκεκριμένους στόχους. Για να επιλυθούν ταυτόχρονα και οι δύο στόχοι, προτείνεται η χρήση σαν κριτήριο επιλογής της διαδρομής αντί για συνάρτηση κόστους, απευθείας η χωρητικότητα μπαταρίας.

Η βασική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου CMMBCR είναι ότι όταν όλοι οι κόμβοι στις πιθανές διαδρομές από την πηγή στον προορισμό έχουν ενεργειακό υπόλοιπο πάνω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τότε επιλέγεται η διαδρομή με την συνολική ελάχιστη ενέργεια μετάδοσης από το σύνολο των διαθέσιμων (λειτουργεί δηλαδή σαν MTPR). Αν όλες οι διαδρομές έχουν τουλάχιστον ένα κόμβο με χωρητικότητα μπαταρίας χαμηλότερη από το προκαθορισμένο όριο, τότε οι διαδρομές που περιέχουν κόμβους με την πιο χαμηλή τιμή χωρητικότητας μπαταρίας αποφεύγονται, προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των εν λόγω κόμβων (λειτουργεί δηλαδή σαν MMBCR).

Συγκεκριμένα, η χωρητικότητα μπαταρίας R_j^c για τη διαδρομή j ορίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_j^c = \min_{i \in \text{route } j} C_j^t \quad (20),$$

δηλαδή ολόκληρη η διαδρομή χαρακτηρίζεται από την τιμή του κόμβου με την χαμηλότερη ενέργεια.

Αν θεωρήσουμε ότι το A υποδηλώνει το σύνολο που περιέχει όλες τις πιθανές διαδρομές και έστω ότι ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_j^c \geq \gamma \quad \text{για οποιαδήποτε διαδρομή } j \in A \quad (21)$$

όπου το γ συμβολίζει το προκαθορισμένο όριο, με εύρος τιμών μεταξύ 0 και 100.

Έχουμε:

- Αν όλοι οι κόμβοι σε κάποιες διαδρομές διαθέτουν υπολειπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο όριο γ . Τότε η επιλογή από το σύνολο των διαδρομών που ανήκουν στο σύνολο A θα γίνει χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο MTPR.
- Σε κάθε άλλη περίπτωση επιλέγεται μια διαδρομή i με τη μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας $R_i^c = \max\{R_j^c \mid j \in Q\}$.

Αν $\gamma=0$ τότε η εξίσωση (21) ισχύει πάντα και το κριτήριο που χρησιμοποιείται τελικά είναι το ίδιο με το αντίστοιχο του MTPR. Από την άλλη αν $\gamma=100$ τότε η εξίσωση (21) είναι πάντα μη αληθής και το χρησιμοποιούμενο κριτήριο είναι το ίδιο με το αντίστοιχο του MMBCR, επειδή τελικά αποφεύγονται οι διαδρομές που περιέχουν κόμβους με τη χαμηλότερη τιμή υπολειπόμενης χωρητικότητας μπαταρίας.

Από τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στην εργασία [9] αποδεικνύεται τελικά ότι οι στόχοι της δίκαιης χρησιμοποίησης των κόμβων και της προσαύξησης της διάρκειας ζωής του δικτύου, δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα, αλλά κάποιο trade off απαιτείται μεταξύ τους. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος CMMBCR μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την βασική επιδίωξη

κατά τον σχεδιασμό του δικτύου. Έτσι με κατάλληλη επιλογή της τιμής του γ μπορούμε να μεγιστοποιήσουμε είτε το χρόνο που ο πρώτος κόμβος τίθεται εκτός λειτουργίας είτε τη διάρκεια ζωής των περισσότερων κόμβων του δικτύου.

3.5 Υπάρχουσα κατάσταση (state of the art)

Αρκετές λύσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία που σχετίζονται με τη διαδικασία διατήρησης ενέργειας και ελέγχου της κατανάλωσης. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι, λαμβάνοντας υπόψη τους τον τρόπο κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών, προτείνουν σχήματα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, κατά την εκπομπή και την παραλαβή μηνυμάτων σε διαφορετικά επίπεδα διαστρωμάτωσης. Στο επίπεδο δικτύου έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα που ενσωματώνουν στην πληροφορία δρομολόγησης επιπρόσθετη πληροφορία σχετιζόμενη με την ενέργεια. Τέτοιες “ενεργειακές” επεκτάσεις έχουν γίνει σε πληθώρα γνωστών πρωτοκόλλων όπως παρουσιάζονται και στο [4].

Αρχικά έχουν προταθεί αλγόριθμοι ελέγχου τοπολογίας, υπολογίζουν μια δικτυακή τοπολογία με βασική τους θεώρηση ότι κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνεί με κάθε άλλο κόμβο χρησιμοποιώντας την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος μετάδοσης. Εναλλακτικά, έχει μελετηθεί μια μέθοδος υπολογισμού του μικρότερου από τους υπο-γράφους δικτύου. Ο υπο-γράφος που περιέχει τη μικρότερη διαδρομή από το σύνολο των διαδρομών του δικτύου μεταξύ ζευγών κόμβων, εκλαμβάνεται ως η ελάχιστη τοπολογία ενέργειας. Στη μέθοδο δύο φάσεων από την άλλη στο πρώτο βήμα επιλέγεται ένας κόμβος σαν σημείο συγκέντρωσης πληροφοριών για όλους τους κόμβους του δικτύου. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος διατήρησης ενέργειας, προκειμένου να δημιουργηθεί η ελάχιστη τοπολογία ισχύος μεταξύ του συγκεκριμένου κόμβου και όλων των υπολοίπων. Αναλυτικότερα κάθε κόμβος αρχικά επιλέγει τα πιθανά σύνολα από άμεσους γείτονες όπου η δρομολόγηση διαμέσου αυτών γίνεται με την ελάχιστη απαίτηση ενέργειας. Επιπρόσθετα κάθε κόμβος θα μεταδώσει το κόστος κατανάλωσης ενέργειας στους γείτονές του ώστε να διευκολύνει τον κατανεμημένο αλγόριθμο εύρεσης μονοπατιού Bellman-Ford, στην επιλογή του γείτονα με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους κατανάλωσης ενέργειας.

Οι αλγόριθμοι πλέγματος-ομαδοποίησης επιτυγχάνουν διατήρηση ενέργειας χρησιμοποιώντας ένα συντονιστή συμπλέγματος για να καθορίσουν χρονικά με χρονοπρογραμματισμό την κατάσταση sleeping/wakeup και προώθησης /buffer πακέτων για τα μέλη της ομάδας. Μια διαφορετική προσέγγιση αποτελούν οι τεχνικές συνεργασίας, σύμφωνα με τις οποίες επιβάλλεται η συνεργασία μεταξύ των κόμβων, στην προώθηση πακέτων δεδομένων, ώστε κανένας κόμβος να μην χρησιμοποιηθεί με υπερβολικό και άδικο τρόπο. Τα συστήματα Nuglet και SPRITE προτείνουν μια μέθοδο ανταμοιβής, όπου κάθε κόμβος χρειάζεται πίστωση για να μεταδώσει ένα πακέτο που δημιούργησε ο ίδιος. Μπορεί όμως να κερδίσει την απαιτούμενη πίστωση, μέσω της προώθησης πακέτων που αφορούν άλλους κόμβους. Η διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων έγκειται στο γεγονός ότι ενώ το Nuglet χρησιμοποιεί κρυπτογραφημένο λογισμικό/ υλικό για τη δημιουργία προστατευμένων ετικετών ασφαλείας, το SPRITE καταργεί την επιπρόσθετη απαιτούμενη ασφάλεια λογισμικού/ υλικού σε κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας ένα κεντρικό εξυπηρετητή για την έκδοση και τον υπολογισμό των πιστώσεων. Το CONFIDANT από την άλλη είναι ένα σύστημα τιμωρίας, στο οποίο, αν ένας κόμβος αρνηθεί να συνεργαστεί στην προώθηση πακέτων για άλλους, στιγματίζεται. Στη συνέχεια, οι υπόλοιποι κόμβοι δεν βοηθούν στην προώθηση πακέτων αυτού που έχουν στιγματιστεί. Ένα πρόβλημα που ανακύπτει για το συγκεκριμένο σύστημα είναι ότι, αν κάποιος κόμβος δεν επιθυμούν να επικοινωνήσουν ή δεν χρειάζεται να βασιστούν σε άλλους κόμβους, τότε δεν τους ενοχλεί να στιγματιστούν προκειμένου να διατηρήσουν την ενέργειά τους

για προσωπική χρήση.

Στην εργασία [20] αναλύεται μια επέκταση του αλγορίθμου δρομολόγησης **DSR** (Dynamic Source Routing). Η συγκεκριμένη επέκταση αφορά την εισαγωγή της απαιτούμενης ενέργειας στους υπολογισμούς για την εύρεση της αιτούμενης διαδρομής, ενώ η αρχιτεκτονική που προκύπτει ονομάζεται **PSR** (Power-aware Source Routing).

Ο **PSR** προσπαθεί να βρει μια διαδρομή wz , με τρόπο ώστε οι καθορισμένες συναρτήσεις κόστους της διαδρομής να ελαχιστοποιηθούν. Όλοι οι κόμβοι εκτός από τον προορισμό υπολογίζουν τα κόστη των συνδέσμων τους και τα προσθέτουν στο κόστος διαδρομής, πρόσθεση που πραγματοποιείται στην ετικέτα του πακέτου Route Request του **DSR** (**RREQ** πακέτο). Οποιοσδήποτε ενδιάμεσος κόμβος λαμβάνει ένα **RREQ** πακέτο καταγράφει την ανανεωμένη και μικρότερου κόστους πληροφορία αντίστροφης διαδρομής, βάσει της πληροφορίας, για το κόστος διαδρομής που περιέχεται στην ετικέτα του **RREQ** πακέτου. Ο κόμβος προορισμός θα απαντήσει με την πληροφορία μικρότερου κόστους προς την πηγή εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού ορίου. Ο **PSR** θα σταθεροποιήσει τη διαδρομή ακόμα και αν η τιμή της ενέργειας ενός κόμβου πέσει κάτω από ένα προ-καθορισμένο όριο, το οποίο τίθεται συνήθως πάνω από την περίπτωση διακοπής της σύνδεσης.

Αντίστοιχα στο [21] οι συγγραφείς προτείνουν την δικιά τους επέκταση στον **DSR**. Το προτεινόμενο σχήμα της μελέτης, ονομάζεται (και αυτό) Power-aware Source Routing (**PSR**). Προκειμένου να γίνει εφικτή η μεγιστοποίηση της ζωής ενός ασύρματου δικτύου, προστατεύοντας του κόμβους από ενεργειακό «θάνατο», θα πρέπει να δημιουργηθεί μια συνάρτηση κόστους που θα επιλύει το πρόβλημα εύρεσης διαδρομής p σε χρόνο ανακάλυψης διαδρομής t και θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$C(\pi, t) = \sum_{i \in \pi} C_i(t) \quad (22)$$

$$\text{όπου } C_i(t) = \rho_i \cdot \left(\frac{F_i}{R_i(t)} \right)^a \quad (23)$$

ρ_i : ισχύς μετάδοσης του κόμβου i

F_i : χωρητικότητα μπαταρίας πλήρως φορτισμένης του κόμβου i

R_i : υπολοιπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας για τον κόμβο i στο χρόνο t

a : θετικός παράγοντας βαρών

Στον **DSR** η επιλογή διαδρομής γίνεται βάσει της μικρότερης διαδρομής π.χ. εύρεση της διαδρομής με τα λιγότερα βήματα, όπου το μόνο κριτήριο για να τεθεί ανενεργή είναι η κινητικότητα των κόμβων. Αντίθετα στον **PSR** τόσο η κινητικότητα όσο και η ενεργειακή εξάντληση των κόμβων μπορεί να προκαλέσει την ακύρωση μιας διαδρομής. Η ανακάλυψη αλλά και η διατήρηση μιας διαδρομής στον **PSR** είναι περισσότερο πολύπλοκη, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διαδικασίες στον **DSR**. Στον **DSR** η διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής ξεκινά με τον κόμβο – πηγή να «πλημμυρίζει» το δίκτυο με πακέτα **RREQ**, όταν η πηγή επιθυμεί να στείλει δεδομένα. Ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταδίδει με ευρυ-εκπομπή το **RREQ** πακέτο εκτός αν συμβεί κάτι από τα ακόλουθα:

- Βρεθεί μονοπάτι προς τον προορισμό από τη μνήμη του,
- Έχει επαναμεταδώσει το συγκεκριμένο **RREQ** πακέτο. Για να το κατανοήσει αυτό ο ενδιάμεσος κόμβος, θα πρέπει να ελεγχθεί ο ακολουθιακός αριθμός του **RREQ** καθώς και το αναγνωριστικό του αποστολέα.

Συνεπώς οι ενδιαμέσοι κόμβοι απλά προωθούν το πρώτο RREQ πακέτο που θα παραλάβουν. Ο κόμβος προορισμός απαντάει στο πρώτο RREQ που θα παραλάβει, εφόσον τα πακέτα τείνουν να ακολουθήσουν την πιο σύντομη διαδρομή.

Στον PSR όλοι οι κόμβοι εκτός από τον προορισμό υπολογίζουν το κόστος του συνδέσμου C_{ij} , που περιγράφεται στην εξίσωση 23 και την προσθέτουν στο κόστος μονοπατιού που περιέχεται στην ετικέτα του RREQ πακέτου, όπως περιγράφεται στην εξίσωση 22. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος παραλάβει ένα RREQ πακέτο, ξεκινάει μια χρονοσφραγίδα (T_r), που διατηρεί το κόστος στην ετικέτα του πακέτου σαν Min-Cost, δηλαδή ελάχιστο κόστος. Αν καταφθάσουν επιπρόσθετα RREQs με τον ίδιο προορισμό και τον ίδιο ακολουθιακό αριθμό, το κόστος των προσφάτως αφιχθέντων RREQ πακέτων, συγκρίνονται με το ελάχιστο κόστος (Min-Cost). Αν το νέο πακέτο που αφίχθηκε, έχει μικρότερο κόστος, τότε η παράμετρος Min-Cost θα μεταβληθεί λαμβάνοντας τη μικρότερη τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση το νέο RREQ πακέτο απλά θα απορριφθεί.

Ο προορισμός αναμένει το όριο της χρονοσφραγίδας (T_r) για κάποια δευτερόλεπτα μετά την άφιξη του πρώτου RREQ πακέτου. Κατά τη διάρκεια του χρόνου αναμονής ο προορισμός ελέγχει το κόστος της διαδρομής για κάθε πακέτο RREQ που λαμβάνει. Όταν ο χρόνος εξαντληθεί ο κόμβος προορισμός επιλέγει τη διαδρομή με το ελάχιστο κόστος και απαντάει μέσω αυτής. Ακολούθως θα απορρίψει τα επόμενα RREQs. Η απάντηση θα περιέχει επιπρόσθετη πληροφορία με το κόστος των μονοπατιών που έχουν επιλεγεί για τη συγκεκριμένη επικοινωνία. Κάθε κόμβος που «ακούει» την απάντηση διαδρομής προσθέτει τη διαδρομή μαζί με το κόστος της, στον πίνακα της μνήμης που περιέχει τις διαδρομές. Παρά το γεγονός ότι το σχήμα που έχει περιγραφεί μπορεί να αυξήσει την καθυστέρηση των δεδομένων που μεταφέρονται, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται. Η πιο σημαντική παράμετρος της μελέτης σχετίζεται με τη ζωή του δικτύου. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν διαφορετικές παραμέτρους, προκειμένου να μελετήσουν τα αποτελέσματα που έχουν στη ζωή του δικτύου, που αποτελεί το βασικό κριτήριο της μελέτης.

Μετά την προσομοίωση του νέου αλγορίθμου του PSR τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι αυξάνεται η ζωή του δικτύου, κατά έως και 30%. Μια πολιτική απληστίας εφαρμόστηκε για να επιστρέφει μονοπάτια από την κρυφή μνήμη, προκειμένου να βεβαιωθεί ότι κανένα από τα μονοπάτια δεν θα χρησιμοποιηθεί σε υπερβολικό βαθμό. Επίσης απαιτείται προκειμένου να βεβαιωθεί ότι κάθε ένα από τα επιλεγμένα μονοπάτια έχει το ελάχιστος κόστος μπαταρίας, συγκρινόμενο με όλες τις υπόλοιπες πιθανές διαδρομές μεταξύ των δύο κόμβων, δηλαδή την πηγή και τον προορισμό.

Σε άλλες εργασίες επιλέγεται ο **AODV**(Ad hoc On Demand distance Vector), ο οποίος επεκτείνεται προκειμένου η αναζήτηση διαδρομής να γίνεται με χρήση ενεργειακών κριτηρίων, όπως έχει γίνει και στην παρούσα εργασία για τους λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο προτεινόμενο σχήμα του AODV [9] που λαμβάνει υπόψη του την κατανάλωση ενέργειας ή αλλιώς του PAW-AODV όπως χαρακτηρίζεται, δημιουργείται μια συνάρτηση κόστους που βασίζεται στη διαθέσιμη ενέργεια μπαταρίας κόμβου. Στην εξίσωση (24)

$$c_i(t) = \frac{1}{b_i(t)} \quad \text{για κάθε κόμβο } n_i \quad (24)$$

το $c_i(t)$ και το $b_i(t)$ εκφράζουν τη συνάρτηση κόστους και την υπολειπόμενη ενέργεια μπαταρίας αντίστοιχα για τον κόμβο n_i τη χρονική στιγμή t . Αν χρησιμοποιηθεί η (24), θα δημιουργηθεί ένα ενημερωτικό μήνυμα αλλαγής κόστους, οποιαδήποτε στιγμή μειωθεί η διαθέσιμη ισχύς μπαταρίας

και η διαθέσιμη ενέργεια μπαταρίας, ενώ ταυτόχρονα η συνάρτηση κόστους του κόμβου μεταβάλλεται για κάθε κόμβο. Με αυτό τον τρόπο ο έλεγχος της κίνησης που δημιουργείται εξαιτίας της διαδικασίας σύνθεσης και αποστολής μηνυμάτων-ανακοινώσεων θα είναι δύσκολος με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο φόρτος του δικτύου. Επιπρόσθετα η συνάρτηση κόστους του κόμβου δεν θα έχει τη δυνατότητα να σταθεροποιηθεί εξαιτίας των συχνών αλλαγών που θα υποστεί. Επειδή η λύση αυτή δεν έχει τα αναμενόμενα πρακτικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη εργασία προτάθηκε η έννοια του διαχωρισμού της συνάρτησης κόστους σε διαφορετικές ζώνες.

Η συγκεκριμένη ιδέα οδηγεί στον καθορισμό ζωνών, βάσει ενός συγκεκριμένου εύρους διαθεσιμότητας ενέργειας και εν συνεχεία αναθέτει ένα προκαθορισμένο κόστος κόμβου σε κάθε ζώνη. Όταν οι κόμβοι έχουν υψηλή ενέργεια όπως στην αρχή της ζωής του δικτύου, λειτουργεί σαν ένας κανονικός AODV. Όσο προχωράει η χρήση του δικτύου επιλέγει διαδρομές με μεγαλύτερη ενέργεια, θέτοντας υψηλά κόστη (penalty) στις διαδρομές με κόμβους στις ζώνες “κινδύνου”. Στην εξίσωση (25) που ακολουθεί αναφέρονται οι διαφορετικές περιπτώσεις και οι αντίστοιχες τιμές για τη συνάρτηση κόστους, ανάλογα με την επιλεγμένη ζώνη.

$$c_i(t) = \begin{cases} CR & \text{για } b_i(t) > 0.3B \\ 2CR & \text{για } 0.2B < b_i(t) \leq 0.3B \\ 4CR & \text{για } 0.1B < b_i(t) \leq 0.2B \\ \infty & \text{για } b_i(t) \leq 0.1B \end{cases} \quad (25)$$

Ο παράγοντας B αναφέρεται στην τιμή της αρχικής ενέργειας όταν η μπαταρία είναι γεμάτη, ενώ το CR δηλώνει το προκαθορισμένο κόστος ενός κόμβου, το οποίο μπορεί να τεθεί σε CR=1 χωρίς βλάβη της γενικότητας. Όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση 25 υπάρχουν 4 ζώνες κόστους που σχετίζονται με την συνάρτηση $c_i(t)$. Σαν αναφορά τίθεται το επίπεδο μέγιστης ισχύος μπαταρίας, στην τιμή B.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου ο κόμβος έχει ικανοποιητικά υψηλή ισχύ ($b_i(t) > 0.3B$), στην περιοχή της λευκής ζώνης). Σε αυτή την περίπτωση ο προτεινόμενος αλγόριθμος PAW-AODV συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ο AODV, όπου η συνάρτηση κόστους είναι το ίδιο αποδοτική όσο η περίπτωση άμεσης σύνδεσης, ενός βήματος, μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Όταν η διαθέσιμη ενέργεια ενός κόμβου κατατάσσεται σε μια από τις επόμενες ζώνες (πχ την κίτρινη ζώνη) το κόστος προσεγγίζει τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σύνδεσης ενός βήματος ανάμεσα σε άμεσα προσβάσιμους γειτονικούς κόμβους. Το συγκεκριμένο υψηλό κόστος θα αποθαρρύνει τους κόμβους – πηγές από τη δρομολόγηση διαμέσου των αντίστοιχων που εισήλθαν στην κίτρινη ζώνη συναγερμού. Ο αριθμός των «κίτρινων» ζωνών συναγερμού που θα υλοποιηθεί εξαρτάται από τον αριθμό των ορίων επιπέδων ενέργειας που θέλει ένας σχεδιαστής συστήματος να υλοποιήσει. Βέβαια στη συγκεκριμένη εργασία έχουν υλοποιηθεί μόνο δύο «κίτρινες» ζώνες συναγερμού. Η κόκκινη ζώνη ($b_i(t) < 0.1B$) προσεγγίζεται όταν η διαθέσιμη ισχύς του κόμβου είναι πολύ χαμηλή. Όταν ένας κόμβος βρίσκεται σε αυτή τη ζώνη αυτόματα υποδεικνύεται ότι έχει πολύ υψηλό κόστος αποτρέποντας άλλους να δρομολογήσουν πακέτα μέσω αυτού. Αντίθετα διατηρεί την εναπομείνουσα ενέργειά του μόνο για δικά του πακέτα.

Χρησιμοποιώντας αυτό τον τρόπο καθορισμού του κόστους διαδρομής, ο σκοπός του PAW-AODV είναι να συνδυάσει τους κατάλληλους αλγορίθμους ανίχνευσης διαδρομής στον AODV, προκειμένου να βρει μια διαδρομή r με το ελάχιστο κόστος $c(r, t)$, ή με το υψηλότερο επίπεδο υπολειπόμενης ενέργειας. Η συνάρτηση κόστους $c(r, t)$ περιγράφεται ακολούθως:

$$c(r, t) = \sum c_i(t) \quad \text{για κάθε κόμβο } n_i \text{ που βρίσκεται στη διαδρομή } r \quad (26)$$

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο PAW-AODV είναι ένας ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος για MANETs. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, πιστοποιείται ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να μεταδώσει περισσότερα πακέτα, εφόσον λαμβάνει υπόψη την ενέργεια, χωρίς να προκαλεί φαινόμενα αύξησης καθυστέρησης στο δίκτυο. Η κινητικότητα μπορεί να προκαλεί προβλήματα καθώς αναδιανέμονται τα ενεργειακά υπόλοιπα των κόμβων λόγω αλλαγής της θέσης τους. Πρακτικά μπορεί να αυξηθούν οι αποστολές πακέτων στο δίκτυο. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η συμφόρηση στο δίκτυο, θα μπορούσε να τεθεί ένα κατάλληλο όριο από αριθμό βημάτων, τόσο για τον AODV όσο και για τον PAW-AODV για τη διατήρηση της ενέργειας αυξάνοντας την αποστολή πακέτων σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα.

3.6 Η δικιά μας ενεργειακή επέκταση

Από τα προαναφερθέντα έχει γίνει φανερό η κρισιμότητα της διατήρησης των ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων ενός δικτύου ad-hoc. Στις τελευταίες ενότητες αναλύθηκαν τα είδη πρωτοκόλλων σε επίπεδο δικτύου που λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια και οι επεκτάσεις σε γνωστά πρωτόκολλα που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία. Εδώ θα παρουσιάσουμε συνοπτικά την δικιά μας πρόταση και θα παρουσιάσουμε τους λόγους που την διαφοροποιούν από τις υλοποιήσεις που έχουν ήδη προταθεί.

Είδαμε ότι η πιο σύντομη, από πλευράς hops, διαδρομή δεν εγγυάται και την καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων του δικτύου. Οι ενεργειακές επεκτάσεις που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάζουν κάποια θετικά αποτελέσματα. Ωστόσο επειδή ο συγκεκριμένος ερευνητικός κλάδος είναι αναπτυσσόμενος, δεν έχει επικρατήσει ακόμα κάποιος συγκεκριμένος αλγόριθμος. Επιπλέον κάθε αρχιτεκτονική παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που συχνά απαιτούν συμβιβασμούς σε ζητήματα σχεδιασμού.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο το πρωτόκολλο δρομολόγησης που έχει επιλεγεί για την εργασία μας είναι ο AODV, εξαιτίας μιας πληθώρας λόγων. Σχεδιαστική επιλογή ήταν και η επέκταση με ενεργειακά κριτήρια ενός γνωστού πρωτοκόλλου με αποδεδειγμένα από τη βιβλιογραφία καλή συμπεριφορά, από την ανάπτυξη ενός εξ'ολοκλήρου νέου πρωτοκόλλου με "ενεργειακές ευαισθησίες". Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική θυμίζει τα πρωτόκολλα Min-max (MMBCR) που είδαμε αλλά όπως θα δείξουμε, πρόκειται για Max-min πρωτόκολλο. Αυτή η αρχιτεκτονική προτιμήθηκε καθώς δεν υπάρχει αντίστοιχη ερευνητική δουλειά.

Αρχικά δεν χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση κόστους για τις ζεύξεις αλλά απευθείας η πραγματική χωρητικότητα της μπαταρίας κάθε κόμβου. Κάθε πακέτο Route Request που μεταδίδεται μέσω flooding στο δίκτυο μεταφέρει την ελάχιστη ενέργεια κόμβου που συναντάει στη διαδρομή του. Η ελάχιστη αυτή ενέργεια μεταφέρεται πίσω στην πηγή, μαζί με την πιθανή διαδρομή. Η πηγή αφού λάβει τις απαντήσεις με όλες τις πιθανές διαδρομές επιλέγει την διαδρομή με την μεγαλύτερη-ελάχιστη ενέργεια κόμβου (max-min algorithm), προκειμένου να μην χρησιμοποιηθεί κάποια διαδρομή στην οποία περιλαμβάνεται κάποιος κόμβος με χαμηλή ενέργεια.

Η διαρκής ενημέρωση σχετικά με την ενέργεια του κάθε κόμβου θα αποτελούσε μεγάλη επιβάρυνση για το δίκτυο καθώς θα αυξανόταν το μέγεθος του πακέτου, προκαλώντας αυξημένο φόρτο από τη διαρκή ανταλλαγή πακέτων. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε και η διατήρηση αποκλειστικά και μόνο της ελάχιστης ενέργειας για το μονοπάτι. Η συγκεκριμένη τιμή προκύπτει όπως θα δούμε από τη σύγκριση των τιμών των κόμβων που ανήκουν σε αυτό.



4 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

4.1 Network Simulator 2 (ns2)

Το ns2 είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα και ίσως το πιο διαδεδομένο πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων. Η πλατφόρμα είναι διαθέσιμη για ερευνητικούς σκοπούς στη θέση <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> και έχει δημιουργηθεί από το Information Science Institute του πανεπιστημίου Southern California. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προτιμήθηκε σε σχέση με άλλα προγράμματα προσομοίωσης δικτύων όπως είναι το OPNET πχ, εξαιτίας της εύκολης παραμετροποίησης και της μεγάλης κοινότητας χρηστών που το υποστηρίζουν.

Το ns2 χρησιμοποιεί την γλώσσα c++ για την υλοποίηση των πρωτοκόλλων και την αντικειμενοστραφή έκδοση της tcl, otcl, για την διεπαφή με τον χρήστη. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 2.33, η οποία λαμβάνει υπόψη της την ενεργειακή εξάντληση των κόμβων εξαιτίας της μετάδοσης και περιέχει την κλασική έκδοση του πρωτοκόλλου AODV, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Μαζί με τον ns2 παρέχεται το πρόγραμμα nam, στο οποίο παρέχεται σχηματική απεικόνιση των προσομοιώσεων καθώς και το xgraph για τον σχεδιασμό διαγραμμάτων. Στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν ευρέως στιγμιότυπα από το nam.

4.2 Ενεργειακό μοντέλο στον ns2

Στην έκδοση του ns2 που χρησιμοποιήθηκε, περιέχονται τα αρχεία energy.h και energy.cc. Τα συγκεκριμένα αρχεία υλοποιούν τις απαιτούμενες συναρτήσεις για τον υπολογισμό της ενεργειακής αποφόρτισης του κόμβου ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας του.

Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η αρχική ενέργεια του κόμβου και ο χρόνος που βρίσκεται σε κάθε κατάσταση λειτουργίας. Για παράδειγμα αν ο κόμβος μεταδίδει σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συγκεκριμένο αριθμό πακέτων, τότε η ενεργειακή εξάντληση του κόμβου θα υπολογίζεται σαν το γινόμενο της απαιτούμενης για τη μετάδοση ενέργειας επί το χρονικό διάστημα που ο κόμβος μεταδίδει, για σταθερό μέγεθος πακέτου.

Με το tcl σεναρίο καθορίζεται η αρχική ενέργεια των κόμβων. Στη συνέχεια κατά τη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των κόμβων, καθορίζεται η ποσότητα ενέργειας που δαπανάται για τον κόμβο σε κάθε μία από τις 3 καταστάσεις. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) περιλαμβάνονται με κόκκινο χρώμα τα πεδία της ενέργειας που ρυθμίζονται στα tcl σενάρια:

```
...  
set opt(energymodel)      EnergyModel ;  
set opt(initialenergy)    1000           ;# Initial energy in  
Joules
```

καθορισμός των χαρακτηριστικών του κόμβου

```
$ns_ node-config -adhocRouting DumbAgent \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -channelType $opt(chan) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -energyModel $opt(energymodel) \
    -idlePower 1.0 \
    -rxPower 1.0 \
    -txPower 1.0 \
        -sleepPower 0.001 \
        -transitionPower 0.2 \
        -transitionTime 0.005 \
    -initialEnergy $opt(initialenergy)
...

```

Πίνακας 6 : Παράδειγμα tcl script που εισάγει ενεργειακό μοντέλο

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η αρχική ενέργεια τίθεται στα 1000 joules, ενώ καθορίζονται και οι τιμές ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε μια από τις καταστάσεις.

```
-idlePower 1.0
-sleepPower 0.001
-transitionPower 0.2
```

Επίσης διαμορφώνεται ο χρόνος μετάβασης μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας, αλλά και η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό και το δέκτη σε κάθε μετάδοση/παραλαβή μηνύματος.

```
-transitionTime 0.005
-txPower 1.0
-rxPower 1.0
```

Στις δικές μας προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαμε τις τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7):

set val(rp)	AODV; # πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται
set val(rxPower)	10 ;#Ισχύς σε watt
set val(txPower)	100 ;#Ισχύς μετάδοσης σε W
set val(energymodel)	EnergyModel ;
set val(initialenergy)	100 ;# Αρχική ενέργεια σε Joules
set val(sleeppower)	0.5 ;#ενέργεια σε W που δαπανάται από

set val(tp)	0.5	τον κόμβο όταν βρίσκεται σε κατάσταση sleep W 15uA $P=I*I*R=11.25*10E-9$ W ;#ισχύς (Watt) που καταναλώνεται κατά τη μετάβαση του κόμβου από την κατάσταση sleep στην idle (ενεργή)
set val(tt)	0.05	;#χρόνος (second) που απαιτείται για τη μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας sleep σε idle
set val(ip)	0.5	;# ισχύς ενεργής κατάστασης 8 mA όπου $P=0.0032$ σε Watt

Πίνακας 7: Ενεργειακά χαρακτηριστικά κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις μας

Τέλος, οι κόμβοι διαμορφώνονται σύμφωνα με τα ακόλουθα:

```

$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
  -llType $val(ll) \
  -macType $val(mac) \
  -ifqType $val(ifq) \
  -ifqLen $val(ifqlen) \
  -antType $val(ant) \
  -propType $val(prop) \
  -phyType $val(netif) \
  -topoInstance $topo \
  -energyModel $val(energymodel) \
  -idlePower $val(ip) \
  -rxPower $val(rxPower) \
  -txPower $val(txPower) \
  -sleepPower $val(sleppower)\
  -transitionPower $val(tp) \
  -transitionTime $val(tt)\
  -initialEnergy $val(initialenergy)\
  -channelType $val(chan) \
  -agentTrace ON \
  -routerTrace ON \
  -macTrace OFF \
  -movementTrace OFF\
    
```

Πίνακας 8: Διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των κόμβων του δικτύου προσομοίωσης

4.3 Ενεργειακή επέκταση του AODV στον ns2

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε αναλυτικά τον τρόπο λειτουργίας της ενεργειακής επέκτασης που προτείναμε για τον AODV σε σύγκριση με την “παραδοσιακή” έκδοση του, όπως έχει υλοποιηθεί στο ns2. Για τη δικιά μας τροποποίησή χρησιμοποιήσαμε την ονομασία PAODV από τη λέξη Power, προκειμένου να υποδηλώσουμε την μέριμνα του AODV για την διατήρηση της ενέργειας.

Ο κόμβος-πηγή που εκκινεί την διαδικασία εύρεσης διαδρομής προς τον προορισμό, ευρύ-εκπέμπει

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

κατά τα γνωστά ένα μήνυμα AODVrequest με συγκεκριμένο αναγνωριστικό bid (broadcast id) και μοναδικό ακολουθιακό αριθμό πηγής (sequence number). Στην επέκτασή μας, ο κόμβος-πηγή τοποθετεί και την ενέργεια του κατά τη στιγμή της δημιουργίας του μηνύματος, σε ειδικό, πρόσθετο πεδίο του μηνύματος. Το πεδίο αυτό θα αναφέρεται ως πεδίο ελάχιστης ενέργειας.

Οι κόμβοι που θα λάβουν το μήνυμα AODVrequest, ελέγχουν αρχικά στον πίνακα δρομολόγησής τους, αν έχουν διαδρομή προς τα πίσω, δηλαδή προς την πηγή του πακέτου. Στον παραδοσιακό AODV αν δεν υπάρχει κάποια καταχώρηση, δημιουργείται μια νέα με τον αριθμό των βημάτων και το sequence number της πηγής. Αν υπάρχει ήδη κάποια διαδρομή και εφόσον η διαδρομή που μόλις έφτασε έχει μεγαλύτερο αριθμό sequence number (είναι δηλαδή νεότερη) και μικρότερο αριθμό βημάτων (hops) από την καταχώρηση που ήδη υπάρχει, τότε ο πίνακας δρομολόγησης του κόμβου ανανεώνεται σύμφωνα με την πιο πρόσφατη (και καλύτερη από άποψη hops) πληροφορία. Στην δικιά μας επέκταση, αν δεν υπάρχει διαδρομή καταχωρείται επιπρόσθετα και η ενέργεια της διαδρομής. Ως ενέργεια διαδρομής θεωρούμε την ενέργεια που περιέχεται στο πεδίο ελάχιστης ενέργειας του μηνύματος. Στην περίπτωση που υπάρχει καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης πέρα από το sequence number, ελέγχεται και η ενέργεια της καταχώρησης σε σχέση με την ενέργεια του πακέτου που μόλις έφτασε. Εφόσον το πακέτο έχει υψηλότερη ενέργεια, αυτή τοποθετείται στον πίνακα δρομολόγησης. Αυτό συμβαίνει γιατί πακέτο με υψηλότερη ενέργεια στο συγκεκριμένο πεδίο, υποδεικνύει διαδρομή προς την πηγή με τουλάχιστον ένα κόμβο που διαθέτει μεγαλύτερη ενέργεια από την προηγούμενη καταχώρηση.

Στην συνέχεια ο κόμβος που έλαβε το request, ελέγχει εάν έχει καταχώρηση για τον προορισμό.-Αν ο ίδιος είναι ο προορισμός, τότε αποστέλλει unicast μήνυμα AODVreply προς τον κόμβο-πηγή του request. Στη δικιά μας τροποποίηση, ο κόμβος ελέγχει την ενέργεια του πακέτου που έχει λάβει με την ενέργεια που έχει ο ίδιος και στο μήνυμα reply που αποστέλλει τοποθετεί την ελάχιστη εκ των δύο.

Αν δεν είναι ο ίδιος προορισμός, αλλά έχει κάποια διαδρομή για τον προορισμό τότε στέλνει κατευθείαν απάντηση προς την πηγή εκ μέρους του προορισμού (γιαυτό και το μήνυμα λέγεται gratuitous). Στη δικιά μας επέκταση, σε αυτό το reply μήνυμα τοποθετούμε τη μικρότερη ενέργεια από:

1. την ενέργεια του πακέτου που λάβαμε (δηλαδή της διαδρομής πίσω από τον κόμβο που έλαβε το πακέτο και μέχρι την πηγή),
2. την ενέργεια του (ενδιάμεσου) κόμβου για τον οποίο μιλάμε και
3. την ενέργεια της διαδρομής που έχει ήδη ο κόμβος προς τον προορισμό.

Με τον τρόπο αυτό είμαστε σίγουροι ότι το πακέτο reply που θα λάβει η πηγή θα περιέχει πράγματι την ελάχιστη ενέργεια που έχει κάποιος κόμβος στη διαδρομή μέχρι τον προορισμό.

Αν δεν έχει ούτε διαδρομή προς τον προορισμό, τότε δε μένει κάτι άλλο από το να επανεκπέμψει με ευρυεκπομπή το request μήνυμα που έλαβε, φροντίζοντας πάλι στην επέκτασή μας να τοποθετήσει την ενέργεια του αν είναι η μικρότερη στο κατάλληλο πεδίο, πριν το αποστείλει.

Το ίδιο γίνεται σε όλους τους ενδιαμέσους κόμβους, μέχρι να αποσταλεί κάποιο AODVReply. Οι κόμβοι που λαμβάνουν το reply πρώτα καταχωρούν τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησής τους και ύστερα στέλνουν το unicast μήνυμα προς την πηγή. Να σημειωθεί ότι κατά την επιστροφή του μηνύματος reply οι ενδιαμέσοι κόμβοι διαθέτουν ήδη διαδρομή προς την πηγή (κατά τη διαδικασία λήψης του μηνύματος request), γιατί και είναι εφικτή η επιστροφή του μηνύματος με unicasting. Φυσικά στην δικιά μας επέκταση και κατά την επιστροφή του reply ελέγχεται και πάλι η ενέργεια και αποστέλλεται προς την πηγή η ελάχιστη ενέργεια της διαδρομής. Αυτό γίνεται γιατί μέχρι να επιστρέψει το πακέτο είναι πιθανό κάποιος κόμβος της διαδρομής να έχει χρησιμοποιηθεί στο μεταξύ από άλλες ζεύξεις και να έχει μειωθεί και άλλο η ενέργειά του. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ληφθεί το πακέτο reply από την αρχική πηγή και να αρχίσει η διαδικασία αποστολής των πακέτων δεδομένων.

Η παραπάνω τροποποίηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου AODV προϋποθέτει φυσικά αλλαγές στα πακέτα AODV που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων και πιο συγκεκριμένα στο RREQ και RREP. Στα πακέτα προστέθηκαν δύο νέα πεδία στις επικεφαλίδες. Το ένα πεδίο είναι το πεδίο ελάχιστης ενέργειας που είδαμε, στο οποίο καταγράφεται και διατηρείται η ελάχιστη χωρητικότητα μπαταρίας κόμβου στη διαδρομή που ακολούθησε το πακέτο. Στο άλλο πεδίο φυλάσσεται η αμέσως μεγαλύτερη ενέργεια κόμβου. Η εισαγωγή του δεύτερου πεδίου έγινε επειδή είναι πιθανό η ελάχιστη ενέργεια δύο πιθανών διαδρομών να είναι η ίδια. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος θα αδυνατεί να πάρει μια απόφαση για την κυρίαρχη ενεργειακά διαδρομή. Όπως είδαμε και στο 3.4.3 το μειονέκτημα των αλγορίθμων min-max είναι ότι επειδή μια διαδρομή χαρακτηρίζεται μόνο από τον κόμβο με την μέγιστη συνάρτηση κόστους, δεν λαμβάνεται υπόψη το συνολικό κόστος μετάδοσης που οφείλεται και στους υπόλοιπους κόμβους. Αν και ο δικός μας αλγόριθμος είναι man-mix (αφού χρησιμοποιεί απευθείας τις ενέργειες και όχι συναρτήσεις κόστους), το πρόβλημα παραμένει. Έτσι όλοι οι έλεγχοι πραγματοποιούνται και με τα δύο πεδία, με μεγαλύτερη βαρύτητα στην ελάχιστη ενέργεια κάθε διαδρομής.

Οι παραπάνω αλλαγές μεταφέρθηκαν και στους πίνακες δρομολόγησης, οι οποίοι πλέον διατηρούν πληροφορία για την ελάχιστη και την δεύτερη χαμηλότερη ενέργεια κόμβου κατά μήκος της διαδρομής.

Μια τελευταία βελτιστοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή με το παρακάτω σενάριο: ένας κόμβος-προορισμός που λαμβάνει ένα request, απαντά στέλνοντας μήνυμα reply και στη συνέχεια λαμβάνει το ίδιο μήνυμα request αλλά από άλλη διαδρομή η οποία είναι καλύτερη ενεργειακά. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει ο κόμβος να στείλει νέο reply προς αυτή την καλύτερη διαδρομή προκειμένου ο κόμβος πηγή να χρησιμοποιήσει αυτή τη διαδρομή. Στον κλασικό AODV, αυτό δεν μπορεί να γίνει καθώς ο κάθε κόμβος μπορεί να αποστείλει μόνο ένα reply προς ένα συγκεκριμένο μήνυμα request. Ωστόσο στη δικιά μας υλοποίηση φροντίσαμε αυτό να είναι εφικτό.

4.4 Σενάρια προσομοιώσεων

Η επιλογή των σεναρίων προσομοίωσης πρέπει να καλύπτει μεγάλο εύρος περιπτώσεων προκειμένου τα αποτελέσματα να θεωρηθούν αντικειμενικά. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν

τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: αρχικά δημιουργήθηκαν τα σενάρια προσομοίωσης. Με αυτό εννοούμε η τοπολογία του δικτύου (αριθμός και θέση κόμβων στο χώρο), η τηλεπικοινωνιακή κίνηση (ποιοι κόμβοι επικοινωνούν με ποιους, με ποια χαρακτηριστικά κλπ), η κίνηση των κόμβων στο χώρο κλπ. Στη συνέχεια δοκιμάσαμε τα σενάρια με την αυθεντική υλοποίηση του AODV που διαθέτει έτοιμη ο ns2 και με την ενεργειακή τροποποίηση που αναλύσαμε. Αφού συγκεντρώσαμε τα αποτελέσματα, τα συγκρίναμε για να διαπιστώσουμε εάν και σε ποιους τομείς υπερτερεί η προτεινόμενη υλοποίηση μας.

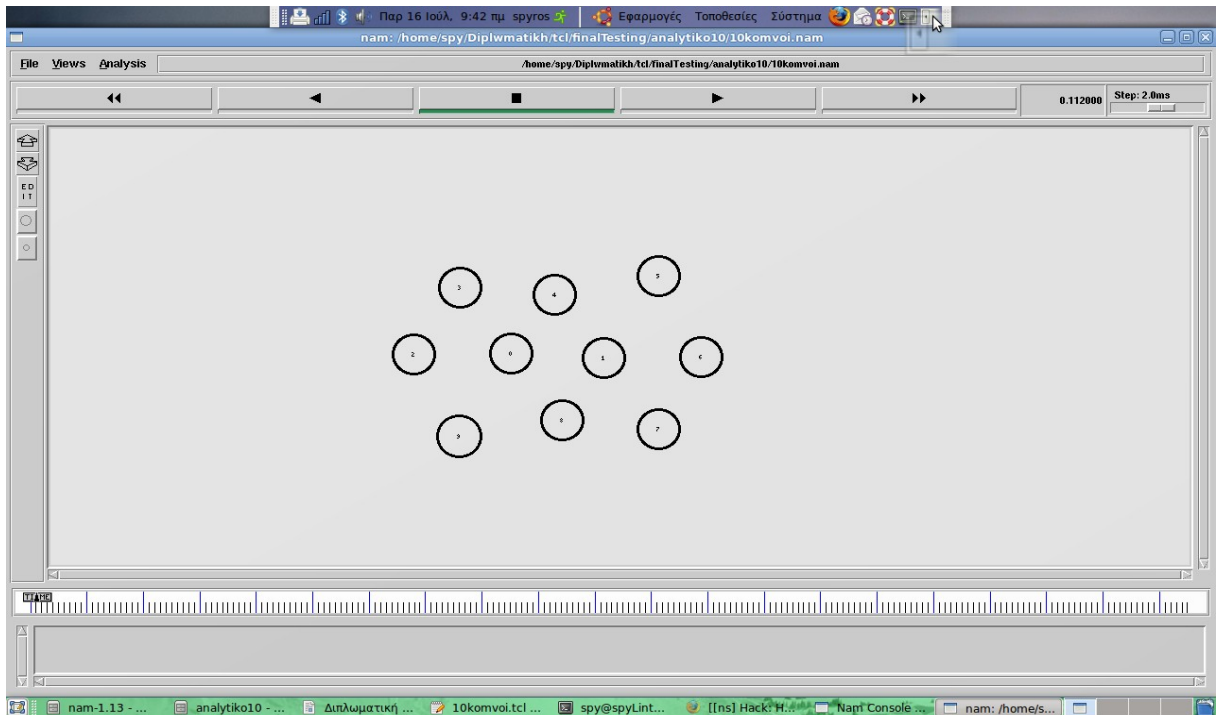
Όπως είδαμε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο τα δίκτυα ad-hoc χαρακτηρίζονται από χαμηλή έως μεσαία κλιμάκωση. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο ο αριθμός των κόμβων στα σενάρια που μελετήσαμε να περιοριστεί στους 10 και 20 κόμβους, ένας ρεαλιστικός αριθμός που καλύπτει τις περισσότερες εφαρμογές.

Η προτεινόμενη υλοποίηση λαμβάνει υπόψιν την διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων κατά τη λήψη απόφασης για τη δρομολόγηση. Για τον έλεγχο των δύο εκδόσεων του AODV χρησιμοποιήσαμε συγκεκριμένα κριτήρια ως προς την ενέργεια αλλά και την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου. Ως προς την ενέργεια ο στόχος που τέθηκε είναι διττός: αρχικά η αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου και η δυνατόν “δικαιότερη κατανομή” του τηλεπικοινωνιακού φορτίου (και άρα και της ενεργειακής κατανάλωσης) μεταξύ των κόμβων. Όπως είδαμε και στο 3.1 η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να περιγραφεί με πολλούς τρόπους. Για την διπλωματική αυτή επιλέχτηκε το πιο απλό κριτήριο που είναι ο πρώτος “ενεργειακός θάνατος” κάποιου κόμβου του δικτύου. Δευτερευόντως θα εξετάζεται και η μέση ενέργεια των κόμβων του δικτύου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Η “δικαιοσύνη” στον καταμερισμό των ενεργειακών πόρων ελέγχεται με την τυπική απόκλιση των τιμών της ενέργειας των κόμβων από τη μέση τιμή. Με αυτή την μετρική διαπιστώνουμε αν πράγματι η ενεργειακή αποφόρτιση των κόμβων γίνεται ομοιόμορφα ή κάποιοι κόμβοι επιβαρύνονται περισσότερο από άλλους. Πέρα όμως από την “ενεργειακή” συμπεριφορά του δικτύου, σημαντικό είναι να διατηρηθεί και η τηλεπικοινωνιακή του απόδοσή του στα ίδια επίπεδα. Για την ικανοποίηση του συγκεκριμένου κριτηρίου χρησιμοποιήθηκε η πιο συνηθισμένη μετρική, αυτή της απόδοσης throughput.

4.4.1 Απλό σενάριο 10 κόμβων με αναλυτική περιγραφή

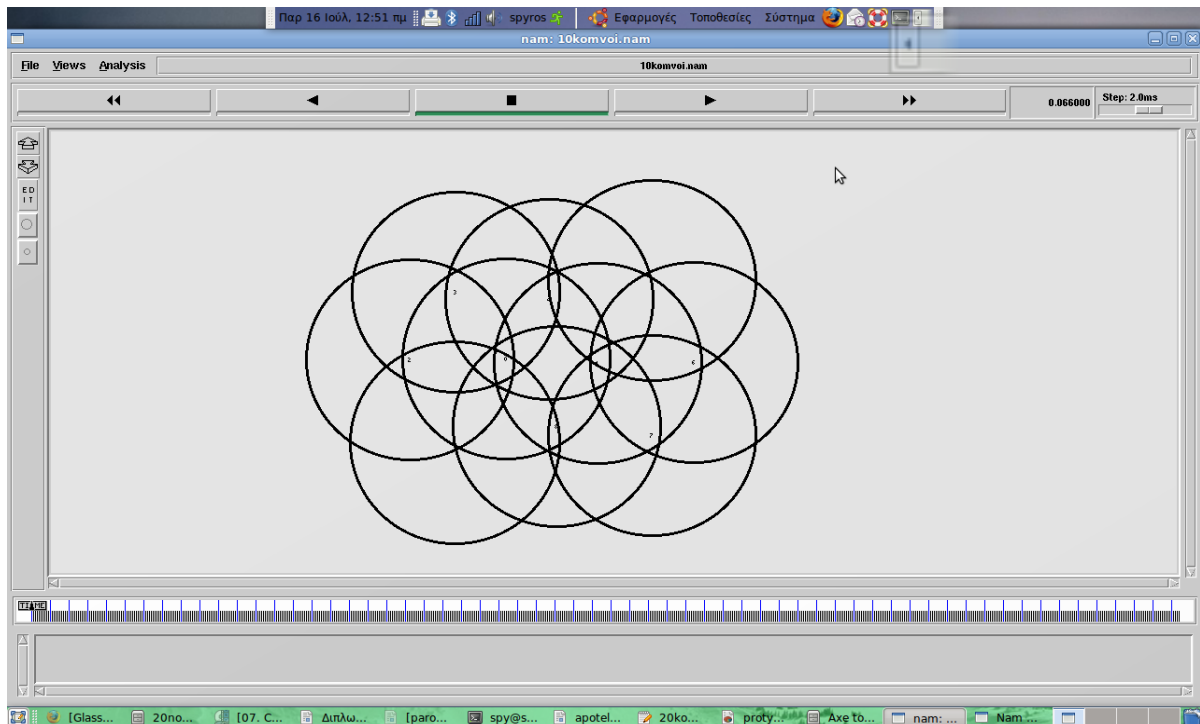
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε αναλυτικά την διαδικασία επιλογής της βέλτιστης διαδρομής σε ένα απλό σενάριο 10 κόμβων χωρίς κινητικότητα, για να γίνει πλήρως κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του πρωτοκόλλου μας. Το παρακάτω σενάριο επιλέχτηκε για την απλότητα του και το πλήρες αρχείο .tcl με το οποίο δημιουργήθηκε βρίσκεται στο παράρτημα 5.1. Η τοπολογία που δημιουργείται φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.1):

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια



Εικόνα 4.1: Απλό σενάριο 10 κόμβων

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.2), οι κύκλοι γύρω από τους κόμβους συμβολίζουν την ακτίνα μετάδοσης των κόμβων.



Εικόνα 4.2: Εμβέλειες κόμβων στο απλό σενάριο

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Όπως φαίνεται, ορίσαμε μια πυκνή τοπολογία στην οποία κάθε κόμβος συνδέεται με τουλάχιστον 3 κόμβους κάθε φορά. Οι κεντρικοί κόμβοι 0 και 1 συνδέονται μάλιστα με 6 κόμβους, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται για την διέλευση περισσότερων πακέτων το οποίο προκαλεί και την ιδιαίτερη “ενεργειακή” τους επιβάρυνση.

Επιλέξαμε χωρίς βλάβη της γενικότητας, κάθε πηγή να μεταδίδει φορτίο CBR (Constant Bit Rate) με σταθερό ρυθμό και μέγεθος πακέτου, καθώς κάτι τέτοιο διευκόλυνε την παρακολούθηση της προσομοίωσης και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Το τέλος της προσομοίωσης (η χρονική στιγμή στην οποία δηλαδή όλοι οι κόμβοι σταματάνε τις μεταδόσεις) ορίστηκε στα 21 sec. Το φορτίο που μεταδίδεται έχει ως εξής:

- 1sec: Ο κόμβος 2 ψάχνει διαδρομή για τον κόμβο 6 και αρχίζει να μεταδίδει πακέτα προς αυτόν μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.
- 6sec: Ο κόμβος 3 κάνει το ίδιο προς τον κόμβο 7.
- 11sec: Ο κόμβος 9 προς τον κόμβο 5.

4.4.1.1 Αποτελέσματα απλού AODV

Τρέχοντας το παραπάνω σενάριο με την εντολή ns και το όνομα του .tcl αρχείου, διαπιστώνουμε τα παρακάτω:

- Για τον κόμβο 6, η διαδρομή που επιλέγεται είναι η 2 → 3 → 4 → 5 → 6.
- Για τον 7: 3 → 4 → 1 → 7
- Για τον 5: 9 → 2 → 3 → 4 → 5

Ο πρώτος θάνατος κόμβου λόγω ενεργειακής εξάντλησης είναι του 4 και πραγματοποιείται στα 12,25 sec. Όπως είδαμε ο κόμβος 4 χρησιμοποιείται (εσφαλμένα, όπως θα δούμε) σε όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται με αποτέλεσμα και την ταχύτερη αποφόρτιση του.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα αρχείο .awk το οποίο διαβάζει το αρχείο .tr που παράγεται από την προσομοίωση εξάγει τα πεδία που θέλουμε σε text μορφή. Σχετικά με την ενέργεια επιστρέφεται η υπολειπόμενη ενέργεια κάθε κόμβου ακριβώς πριν (0,1sec) την αναζήτηση της διαδρομής από τον κόμβο-πηγή (για την πρώτη μετάδοση δεν περιέχονται στοιχεία καθώς η ενέργεια των κόμβων είναι ακόμα μέγιστη, δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια μετάδοση ακόμα). Με τον τρόπο αυτό είμαστε σε θέση να κρίνουμε αν η διαδρομή που επιλέγει ο κάθε αλγόριθμος (απλός ή η ενεργειακή μας επέκταση PAODV) είναι η κατάλληλη κάθε φορά.

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Node	T=5,9 sec	T=10,9 sec	T=12,25 sec
0	89,33	73,46	67,34
1	89,33	55,51	44,73
2	76,47	47,9	32,94
3	71,7	23,45	4,03
4	71,41	19,74	0
5	72,99	40,8	30,56
6	90	76,49	72,27
7	92,82	79,21	74,71
8	89,33	73,46	67,34
9	91,53	77,84	67,9
Μέση τιμή	83,49±8,28	56,78±19,31	46,18±23,72

Πίνακας 9: Υπολειπόμενες ενέργειες κόμβων με χρήση απλού AODV στις χρονικές στιγμές πριν την απόφαση δρομολόγησης

Για την τηλεπικοινωνιακή απόδοση του αλγορίθμου μας ελέγχουμε με το .awk αρχείο το πλήθος των πακέτων που στέλνονται σε σχέση με τον αριθμό εκείνων που τελικά λαμβάνονται. Είναι σκόπιμο για λόγους συγκρίσεων των μετρήσεων που θα πάρουμε, η απόδοση να μετρείται μέχρι τη στιγμή που πεθαίνει ο πρώτος κόμβος, δηλαδή στα 12,25 sec. Προέκυψε ότι στάλθηκαν 69 πακέτα, ελήφθησαν 66, το οποίο σημαίνει απόδοση 95,65% για τον απλό AODV.

Συνοψίζοντας, έχουμε:

1ος θάνατος κόμβου	12,25 sec
Μέση ενέργεια κόμβου στα 5,9 sec	83,49±8,28
Μέση ενέργεια κόμβου στα 10,9 sec	56,78±19,31
Μέση ενέργεια κόμβου στα 12,25 sec	46,18±23,73
Απόδοση	95,65%

4.4.1.2 Αποτελέσματα ενεργειακής τροποποίησης PAODV

Τρέχοντας και πάλι το παραπάνω σενάριο χρησιμοποιώντας την ενεργειακή επέκταση μας διαπιστώνουμε τα εξής:

- Για τον κόμβο 6, η διαδρομή που επιλέγεται είναι η ίδια με προηγουμένως, 2 → 3 → 4 → 5 → 6.
- Για τον κόμβο 7 η διαδρομή που επιλέγεται πλέον είναι η 3 → 0 → 8 → 7.
- Για τον κόμβο 5 η προτιμώμενη διαδρομή επίσης αλλάζει και γίνεται η 9 → 0 → 1 → 5.

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Ο πρώτος θάνατος κόμβου λόγω ενεργειακής εξάντλησης είναι αυτή τη φορά του 3 και πραγματοποιείται στα 13,17 sec. Όπως βλέπουμε στην δικιά μας επέκταση, ο κόμβος 4 “προστατεύεται” και δεν χρησιμοποιείται σε όλες τις διαδρομές με αποτέλεσμα να διατηρεί για περισσότερη ώρα την ενέργειά του. Αντίθετα ο κόμβος 3 επιλέγεται από την πρώτη διαδρομή και στη συνέχεια είναι ο κόμβος-πηγή για τη 2η διαδρομή, συνεπώς αναπόφευκτα επιβαρύνεται καθώς από αυτόν ξεκινάνε τα πακέτα.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η διαδρομή που επιλέχτηκε για την πρώτη μετάδοση (2 → 6) είναι κοινή στα δύο πρωτόκολλα. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια άλλη μετάδοση και άρα η ενέργεια όλων των κόμβων κυμαίνεται στα μέγιστα, αρχικά επίπεδα. Συνεπώς τα πακέτα AODVReply που επιστρέφουν από κάθε διαδρομή διαθέτουν την ίδια ενέργεια στα πεδία ενέργειας που έχουμε ορίσει και ο αλγόριθμος επιλέγει την διαδρομή με βάση την απάντηση που καταφθάνει πρώτη.

Για να εξετάσουμε τις υπόλοιπες επιλογές διαδρομών, θα χρησιμοποιήσουμε το ίδιο αρχείο .awk με προηγουμένως, με τα ίδια χρονικά κατώφλια (καθώς δεν έχει νόημα να συγκρίνουμε τις προσομοιώσεις μετά τον πρώτο θάνατο κόμβου σε οποιαδήποτε από τις δύο προσομοιώσεις):

Node	T=5,9 sec	T=10,9 sec	T=12,25 sec
0	89,33	55,29	38,64
1	89,33	73,32	62,37
2	76,47	47,89	38,03
3	71,7	23,22	7,87
4	71,41	37,53	25,52
5	72,99	40,67	29,31
6	90	76,36	71,24
7	92,82	79,17	73,58
8	89,33	55,46	44,19
9	91,53	77,8	67,68
Μέση τιμή	83,49±8,28	56,67±15,99	45,84±18,3

Πίνακας 10: Υπολειπόμενες ενέργειες κόμβων με χρήση PAODV στις χρονικές στιγμές πριν την απόφαση δρομολόγησης

Όπως βλέπουμε εξαιτίας της πρώτης μετάδοσης, οι κόμβοι που έχουν επιβαρυνθεί περισσότερο είναι οι “ενδιάμεσοι” κόμβοι 3,4,5 καθώς χρησιμοποιούν ενέργεια τόσο για την πρόσληψη όσο και για την αποστολή των πακέτων. Ιδιαίτερα οι κόμβοι 3 και 4 έχουν τις πιο χαμηλές ενέργειες λίγο πριν την επιλογή διαδρομής (5,9 sec) και επομένως ο αλγόριθμος μας, θα πρέπει να επιλέξει διαδρομή που αποφεύγει τη χρήση των δύο αυτών κόμβων για την δεύτερη μετάδοση. Ωστόσο ο κόμβος 3 είναι η πηγή των δεδομένων και άρα δεν μπορεί να “προστατευθεί” με κάποιο τρόπο.

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Στον κόμβο 4 δίνεται η δυνατότητα να διατηρήσει την ενέργεια του για μεγαλύτερο διάστημα αφού ορθά δεν επιλέγεται από τον αλγόριθμό μας, ως ο κόμβος με τη δεύτερη χαμηλότερη ενέργεια στο δίκτυο. Αντίθετα η διαδρομή που επιλέγεται είναι η $3 \rightarrow 0 \rightarrow 8 \rightarrow 7$, η οποία περιέχει τους κόμβους 0 και 8 που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως και διαθέτουν τα υψηλότερα ενεργειακά αποθέματα.

Για την τρίτη μετάδοση, η επιλογή της διαδρομής γίνεται με τα ίδια κριτήρια. Αντί να επιλεγεί η διαδρομή $9 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ όπως στον απλό AODV, που επιβαρύνει πολλούς κόμβους και μάλιστα κόμβους όπως είναι οι 3 και 4 που χρησιμοποιούνται σε όλες τις μεταδόσεις, επιλέγεται η συντομότερη διαδρομή $9 \rightarrow 0 \rightarrow 1 \rightarrow 5$. Εναλλακτικά θα μπορούσε να επιλεγεί η διαδρομή $9 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 5$, αλλά επειδή οι κόμβοι 0 και 8 έχουν την ίδια ενέργεια σχεδόν στα 10,9 sec (55,29 και 55,46 αντίστοιχα), οπότε η επιλογή μεταξύ των δύο γίνεται με βάση ποιό μήνυμα AODVReply καταφθάνει πρώτο στον κόμβο-πηγή, 9. Όπως βλέπουμε χρησιμοποιείται ο κόμβος 1 που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμα και αποφεύγονται κόμβοι όπως οι 3 και 4 που είναι ήδη επιβαρυνμένοι.

Με χρήση του αρχείου .awk διαπιστώσαμε ότι η απόδοση του αλγορίθμου μας είναι 100% αφού 69 πακέτα στάλθηκαν και ελήφθησαν από τους κόμβους του δικτύου.

Συνοψίζοντας έχουμε:

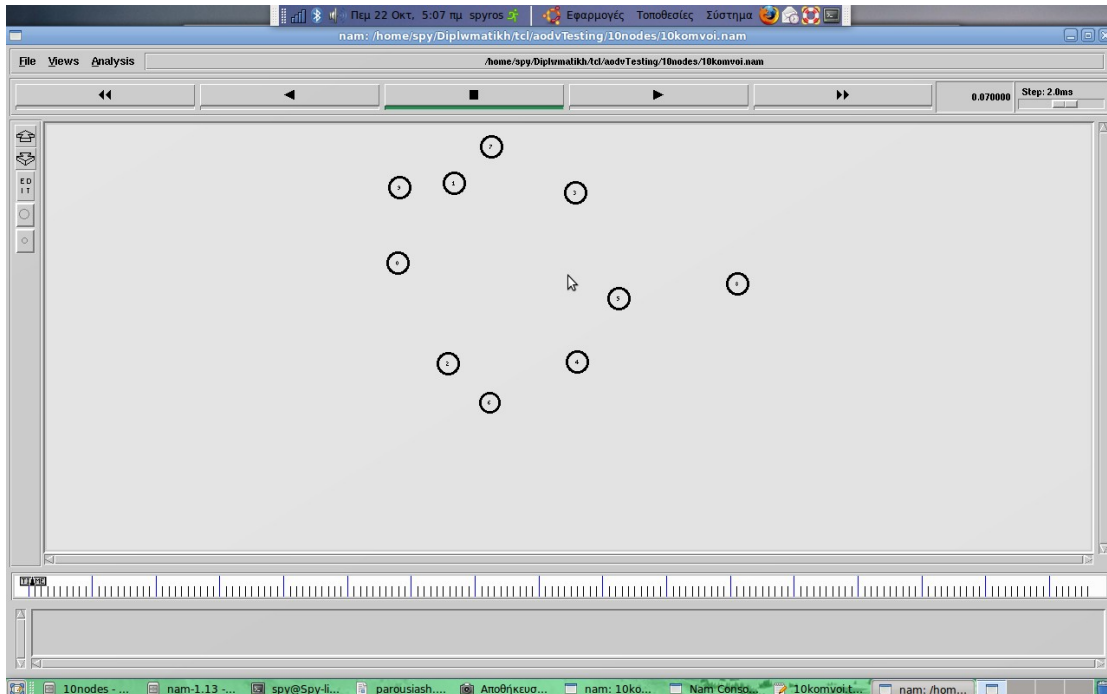
1ος θάνατος κόμβου	13,17 sec
Μέση ενέργεια κόμβου στα 5,9 sec	83,49±8,28
Μέση ενέργεια κόμβου στα 10,9 sec	56,67±15,99
Μέση ενέργεια κόμβου στα 12,25 sec	45,84±18,3
Απόδοση	100%

4.4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συμπερασματικά, γίνεται κατανοητό ότι ο αλγόριθμός μας πράγματι λειτουργεί όπως έχει σχεδιαστεί, επιλέγοντας τις καλύτερες ενεργειακά διαδρομές σε κάθε περίπτωση. Το κριτήριο της αύξησης της διάρκειας ζωής του δικτύου ικανοποιείται καθώς ο πρώτος θάνατος κόμβου γίνεται στα 13,17 sec και είναι αναπόφευκτος καθώς αποτελεί κόμβο πηγή. Ο συγκεκριμένος χρόνος συνιστά αύξηση της διάρκειας ζωής κατά 7,5%. Το κριτήριο της δικαιότερης κατανομής της ενεργειακής αποφόρτισης επίσης πληρείται καθώς όπως βλέπουμε η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των ενεργειών των κόμβων είναι 14,19 αντί για 17,1, μείωση της τάξης του 20,51%. Το παραπάνω αποδεικνύει ότι το τηλεπικοινωνιακό φορτίο μοιράζεται καλύτερα μεταξύ των κόμβων του δικτύου (ιδιαίτερα φανερό προς το τέλος της προσομοίωσης που διαφοροποιούνται οι 2 αλγόριθμοι). Από την άλλη μεριά, η μέση ενέργεια κάθε κόμβου είναι ελαφρώς μικρότερη στην δικιά μας τροποποίηση (62 αντί για 62,15, μείωση της τάξης του 0,24%) και αυτό οφείλεται στην αύξηση των μηνυμάτων ελέγχου που αποστέλλονται, τα οποία και είναι απαραίτητα για την λειτουργία του αλγορίθμου μας. Τέλος ακόμα και η απόδοση του πρωτοκόλλου βελτιώνεται σημαντικά (αύξηση κατά 4,55%) στα ίδια χρονικά πλαίσια για τις δύο προσομοιώσεις.

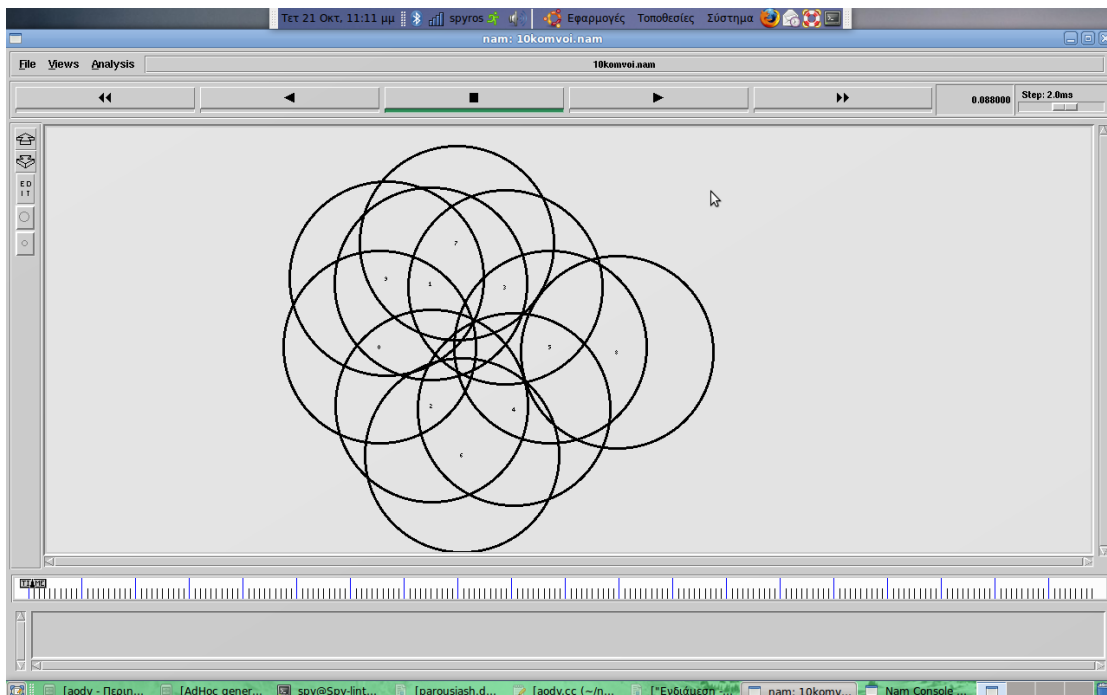
4.4.2 Σενάριο 10 κόμβων, με και χωρίς κινητικότητα

Στις υπόλοιπες προσομοιώσεις χάριν συντομίας, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα χωρίς την ανάλυση των διαδρομών που επιλέγονται κάθε φορά: Το πλήρες αρχείο βρίσκεται στην ενότητα 5.2 . Σχηματικά, η τοπολογία μας έχει ως εξής:



Εικόνα 4.3: Σύνθετο σενάριο 10 κόμβων, με και χωρίς κινητικότητα

με τις εμβέλειες κάθε κόμβου:



Εικόνα 4.4: Εμβέλειες κόμβων στο "σύνθετο" σενάριο

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Όπως φαίνεται και στο .tcl αρχείο, πάλι θεωρούμε πηγές CBR, όμως αυτή τη φορά με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και μεγέθη πακέτων. Για λόγους συντομίας παραθέτουμε εδώ και την διαδοχή των γεγονότων αποστολής μηνυμάτων:

Στέλνει ο 5 → 3

Στέλνει ο 1 → 7

Στέλνει ο 4 → 6

Στέλνει ο 0 → 5

Στέλνει ο 2 → 3

Σενάριο χωρίς κινητικότητα

Τρέχοντας το παραπάνω σενάριο με τον απλό AODV παρατηρούμε ότι ο πρώτος θάνατος κόμβου είναι του κόμβου 4 και πραγματοποιείται στα 12,6 sec. Αντίθετα ο πρώτος θάνατος κόμβου στην δικιά μας υλοποίηση έρχεται στα 14,5 sec. Χρησιμοποιώντας το αρχείο .awk που περιγράψαμε και παραπάνω εξάγουμε τις υπολειπόμενες ενέργειες των κόμβων στα 12,6 sec:

Κόμβος	AODV	PAODV
0	55,28	51,43
1	73,08	69,34
2	48,24	69,53
3	75,29	47,4
4	0	22,22
5	58,08	55,01
6	72,86	72,41
7	76,66	49,18
8	79,54	79,43
9	76,81	49,39
Μέση τιμή	61,58±16,95	56,53±12,92

Τέλος στον απλό AODV, ελήφθησαν 48 από τα 75 πακέτα που στάλθηκαν, ενώ στην δικιά μας τροποποίηση ελήφθησαν 49 πακέτα.

Συνοψίζοντας έχουμε:

	AODV	P.AODV	Σύγκριση
1ος θάνατος κόμβου	12,6 sec	14,5 sec	+15,08%
Μέση ενέργεια κόμβου στα 12,6 sec	61,58±16,95	56,53±12,92	
Απόδοση	64%	65,33%	+2.08%

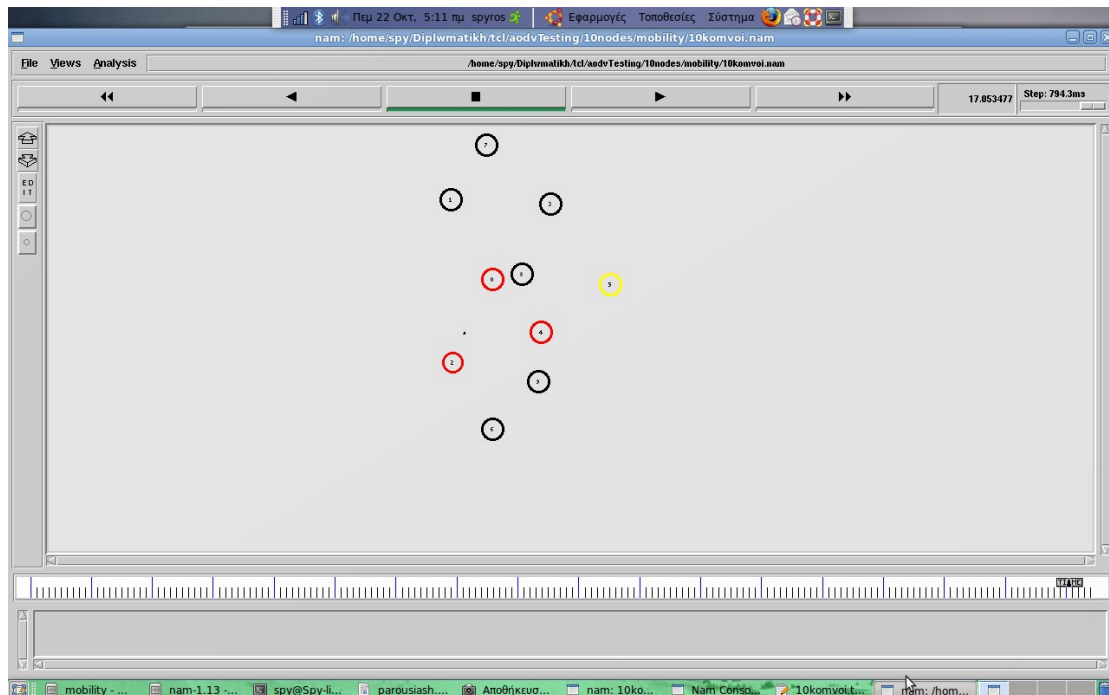
Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Παρατηρούμε και πάλι ότι ο αλγόριθμός μας είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Σενάριο με τυχαία κινητικότητα

Εισάγοντας το αρχείο που δημιουργείται από την εντολή `./setdest` στο `.tcl` αρχείο που παρουσιάζεται στο 5.2, έχουμε την δυνατότητα να εισαγάγουμε τυχαία κίνηση των κόμβων.

Η τελική εικόνα των κόμβων έχει κάπως έτσι:



Εικόνα 4.5: Τελική εικόνα στο "σύνθετο" σενάριο 10 κόμβων με κινητικότητα

Σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα αποτελέσματα και εδώ ο κόμβος 4 πέφτει ήδη από τα 12,6 sec στον κλασσικό AODV, ενώ χρησιμοποιείται κανονικά στην δικιά μας επέκταση. Για την διαφοροποίηση των συμπερασμάτων, συνεχίσαμε την προσομοίωση μέχρι την στιγμή που θα βγει εκτός λειτουργίας και ο επόμενος κόμβος. Αυτό συμβαίνει στα 17,41 sec στον απλό AODV για τον κόμβο 2, σε αντίθεση με την δικιά μας υλοποίηση στην οποία ο πρώτος θάνατος προκύπτει στα 19 sec:

T=17,41 sec	AODV	PAODV
Node 0	2.24	42.56
Node 1	61.65	35.50
Node 2	0	23.03
Node 3	63.87	37.74
Node 4	0	16.48
Node 5	43.32	40.09
Node 6	61.42	60.78

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

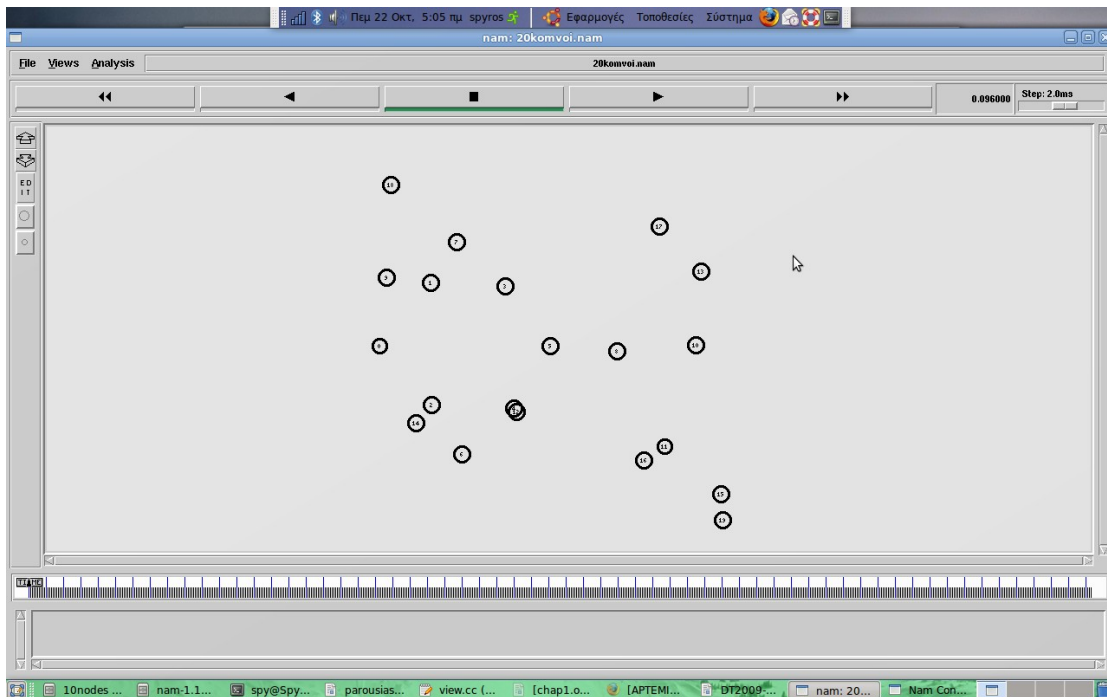
Node 7	65.26	64.68
Node 8	65.52	17.84
Node 9	65.40	64.74
Μέση τιμή	42,87±25,27	40,34±14,28

Τέλος στον απλό AODV, ελήφθησαν 168 από τα 171 πακέτα που στάλθηκαν, ενώ στην δικιά μας τροποποίηση ελήφθησαν 170 πακέτα.

	AODV	P.AODV	Σύγκριση
1ος θάνατος κόμβου	12,6 sec	19 sec	+50,79%
Μέση ενέργεια κόμβου στα 17,41 sec	42,87±25,27	40,34±14,28	
Απόδοση	98,25%	99,42%	+1.19%

4.4.3 Σενάριο 20 κόμβων

Η τοπολογία αυτή αποτελεί το πιο απαιτητικό σενάριο στο οποίο θα δοκιμάσουμε την επέκταση που δημιουργήσαμε. Αρχικά αυξήθηκε ο αριθμός των κόμβων, ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές `./setdest` και `ns cbrgen.tcl` για την τυχαία κίνηση των κόμβων και την παραγωγή τυχαίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Το αρχείο `.tcl` φαίνεται και στην ενότητα 5.3 .



Εικόνα 4.6: Τυχαία τοπολογία 20 κόμβων

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

Στο συγκεκριμένο σενάριο ο πρώτος θάνατος κόμβου πραγματοποιείται στην δικιά μας υλοποίηση. Πρόκειται για τον κόμβο 5 στα 32,3 sec περίπου, ο οποίος στον απλό AODV πέφτει στα 34,3 sec.

T=32,3 sec	AODV	PAODV
Κόμβος 0	29,31	40,37
Κόμβος 1	27,23	30,9
Κόμβος 2	51,87	54,02
Κόμβος 3	19,77	16,53
Κόμβος 4	39,69	43,6
Κόμβος 5	0,28	0,08
Κόμβος 6	34,16	38,72
Κόμβος 7	26,22	30,74
Κόμβος 8	34,62	37,67
Κόμβος 9	45,58	55,82
Κόμβος 10	51,97	53,87
Κόμβος 11	69,39	69,95
Κόμβος 12	43	39,03
Κόμβος 13	58,76	60,37
Κόμβος 14	46,65	58,15
Κόμβος 15	78,3	79,73
Κόμβος 16	66,9	67,66
Κόμβος 17	56,87	58,88
Κόμβος 18	66,97	59,98
Κόμβος 19	78,3	79,73
Μέση τιμή	46,29±16,31	48,79±16,15

Τέλος στον απλό AODV, ελήφθησαν 172 από τα 528 πακέτα που στάλθηκαν, ενώ στην δικιά μας τροποποίηση ελήφθησαν 173 πακέτα από τα 513.

	AODV	P.AODV	Σύγκριση
1ος θάνατος κόμβου	34,3 sec	32,3 sec	-5,83%
Μέση ενέργεια κόμβου στα 32,3 sec	46,29±16,31	48,79±16,15	
Απόδοση	32,58%	33,72%	+3,5%

Παρατηρούμε ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση η δικιά μας τροποποίηση δεν λειτουργεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Συγκεκριμένα ο θάνατος του πρώτου κόμβου έρχεται 2 sec νωρίτερα απ'ότι με χρήση του απλού AODV. Ωστόσο η μέση ενέργεια κόμβου είναι υψηλότερη, ενώ ο διαμοιρασμός της κίνησης είναι στα ίδια επίπεδα αφού η τυπική απόκλιση είναι ελαφρώς μικρότερη στην δικιά μας υλοποίηση. Τέλος και η απόδοση παρουσιάζει μικρή αύξηση.

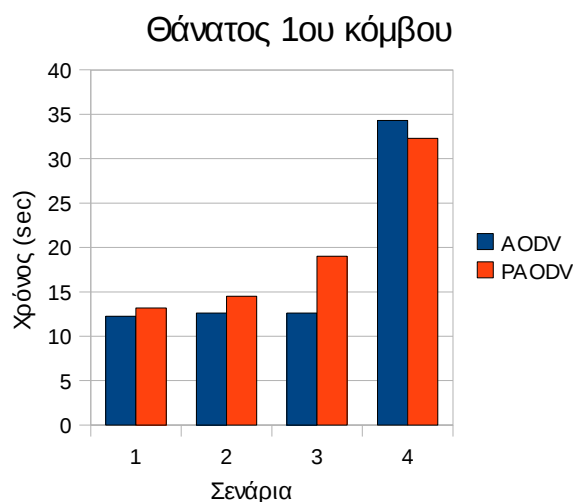
Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η τροποποίησή μας δεν συμπεριφέρεται ιδανικά σε απαιτητικά σενάρια με μεγάλο αριθμό κόμβων, τυχαία κίνηση και φορτία. Αρχικά να αναφερθεί ότι στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων, η δικιά μας υλοποίηση δεν υπολείπεται σημαντικά σε σχετικά μεγέθη, αφού η διάρκειας ζωής δεν μειώνεται σε μεγάλο ποσοστό. Επιπλέον και ο απλός AODV δεν συμπεριφέρεται ιδανικά καθώς παρουσιάζει πολύ χαμηλή απόδοση (μόλις 32,58%). Συνεπώς είναι πιθανό το συγκεκριμένο σενάριο να αποτελεί ένα απαιτητικό σενάριο, στο οποίο δεν μπορεί να ανταπεξέλθει ούτε ο κανονικός AODV. Παρόλα αυτά, η μη αναμενόμενη συμπεριφορά του AODV μας, οφείλεται στον αυξημένο αριθμό μηνυμάτων ελέγχου που αποστέλλονται, τα οποία σε απαιτητικά σενάρια όπως φαίνεται επιδρούν δυσμενώς τελικά στην ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου.

4.4.4 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν διαγράμματα με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Για λόγους αναγνωσιμότητας των διαγραμμάτων, τον x-άξονα απαρτίζουν τα σενάρια, τα οποία αντιστοιχίζονται ως εξής:

- 1 → απλό σενάριο 10 κόμβων, όπως αναλύθηκε στο 4.4.1
- 2 → “σύνθετο” σενάριο 10 κόμβων, χωρίς κινητικότητα από την ενότητα 4.4.2
- 3 → “σύνθετο” σενάριο 10 κόμβων, με κινητικότητα από το 4.4.2 .
- 4 → σενάριο 20 κόμβων, της ενότητας 4.4.3

Σχετικά με τη διάρκεια ζωής του δικτύου, έχουμε το παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα.



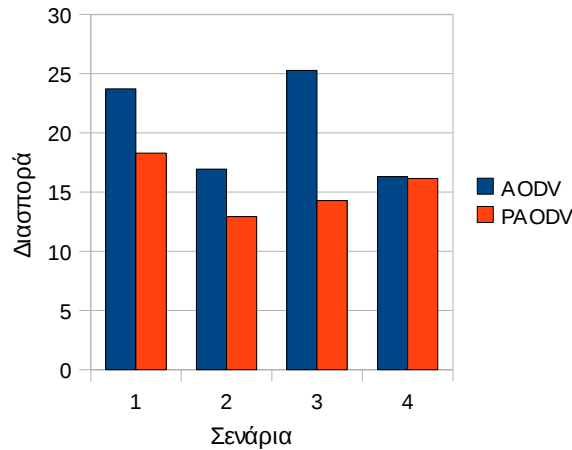
Σε αυτό απεικονίζεται η χρονική στιγμή του ενεργειακού “θανάτου” του πρώτου κόμβου σε κάθε

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

υλοποίηση. Στα πρώτα τρία σενάρια η βελτιστοποίηση που προκλήθηκε από τον PAODV, είναι εμφανής, ενώ στο τελευταίο σενάριο η επιδείνωση είναι ποσοστιαία μικρή.

Για την κατανομή του τηλεπικοινωνιακού και άρα και του ενεργειακού φόρτου έχουμε:

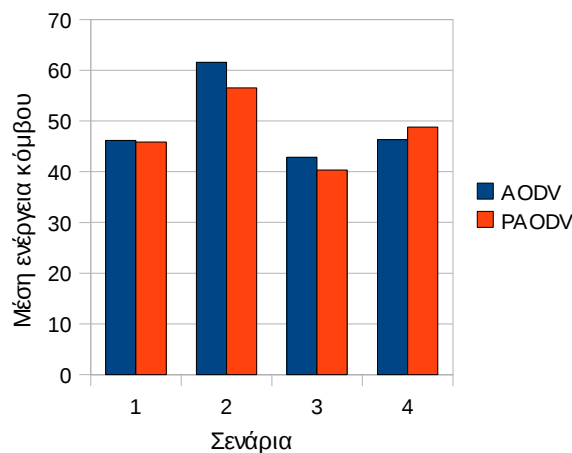
Κατανομή ενέργειας μεταξύ των κόμβων



Και στο διάγραμμα αυτό είναι εμφανής η μείωση της διασποράς της μέσης ενέργειας κόμβου στα πρώτα τρία σενάρια (ιδίως στο τρίτο) με χρήση του PAODV, ενώ στο τελευταίο η διασπορά παραμένει στα ίδια επίπεδα περίπου με τον απλό AODV. Οι μετρήσεις σε αυτό και τα παρακάτω διαγράμματα έγιναν όπως αναλύσαμε την ίδια χρονική στιγμή για κάθε σενάριο: 12.9 sec , 12.6 sec , 17.41 sec και 32.3 sec αντίστοιχα.

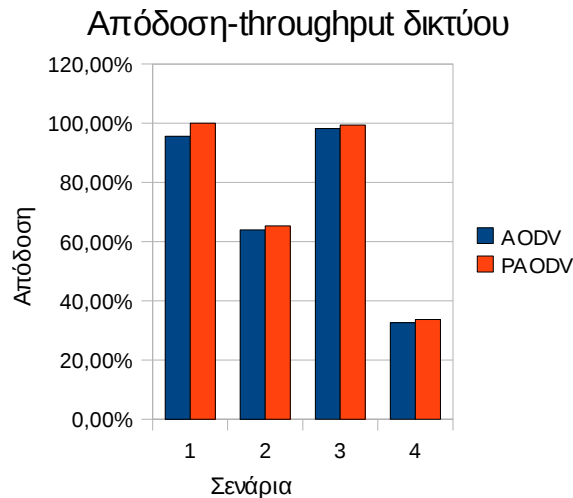
Για την μέση ενέργεια κόμβου έχουμε:

Υπολειπόμενη ενέργεια



Όπως είπαμε από την αρχή, το συγκεκριμένο κριτήριο θα εξεταστεί δευτερευόντως και το διάγραμμα παρατίθεται εδώ για λόγους πληρότητας. Παρόλα αυτά η μείωση της μέσης ενέργειας ανά κόμβου είναι μικρή στην υλοποίησή μας και δεν την καθιστά απαγορευτική ενεργειακά.

Τέλος, για την απόδοση του δικτύου:



Παρατηρούμε πως η απόδοση του δικτύου αυξάνεται οριακά στον PAODV, για κάθε σενάριο, γεγονός που αποδεικνύει ότι η επιθυμητή ενεργειακή συμπεριφορά δεν επιδρά αρνητικά στην λειτουργία του δικτύου.

4.5 Μελλοντική Εργασία-Βελτιώσεις

Στην παρούσα εργασία διαπιστώσαμε την σκοπιμότητα της διατήρησης των ενεργειακών πόρων του δικτύου. Η προτεινόμενη υλοποίηση PAODV παρουσιάζει αποτελέσματα προς την επιθυμητή κατεύθυνση, ωστόσο υπάρχουν ακόμα περιθώρια βελτίωσης του αλγορίθμου μας.

Αρχικά μπορούν να προστεθούν και άλλα κριτήρια κατά την επιλογή της διαδρομής γιατί σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων, είναι πιθανό και το δεύτερο πεδίο ενέργειας να μην είναι αρκετό. Ένα επιπλέον πεδίο θα μπορούσε να είναι η μέγιστη ενέργεια της κάθε διαδρομής ή/και ο αριθμός των βημάτων κάθε διαδρομής. Ιδανικά θα μπορούσε να συνυπολογίζεται και η σημασία των κόμβων για το δίκτυο. Για παράδειγμα κόμβοι που έχουν αναλάβει την επικοινωνία με το διαδίκτυο είναι κρίσιμης σημασίας για το δίκτυο και επομένως αν είναι εφικτό θα πρέπει να αποφεύγεται η άσκοπη χρησιμοποίησή τους. Τέλος και μετά τον συνυπολογισμό όλων αυτών των κριτηρίων θα μπορούσε να εισαχθεί και διαμοιρασμός της κίνησης σε παραπάνω από μία διαδρομή.

Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των πακέτων AODV που μεταδίδονται, μπορεί να εισαχθεί κάποια καθυστέρηση πριν την αναμετάδοση ενός AODVrequest ή πριν την αποστολή ενός AODVreply. Ιδίως το ενεργειακό κόστος σε περίπτωση επαναπροώθησης μηνύματος request είναι πολύ υψηλό καθώς έχουμε να κάνουμε με μήνυμα ευρυεκπομπής που εκπέμπεται σε όλο το δίκτυο. Η συγκεκριμένη τεχνική δοκιμάστηκε αλλά δεν έφερε τα αναμενόμενα αποτελέσματα εξαιτίας της καθυστέρησης στην ενημέρωση του δικτύου. Ωστόσο σε περιβάλλοντα χαμηλής κινητικότητας, με κατάλληλη παραμετροποίηση μπορεί να βελτιστοποιήσει τον αλγόριθμό μας.

Ένα πρόβλημα που δεν αντιμετωπίζεται ούτε από τη δικιά μας υλοποίηση είναι ότι ο AODV δεν ανανεώνει την πληροφορία που διαθέτει για μια διαδρομή που είναι “ενεργή”, δηλαδή βρίσκεται ακόμα στους πίνακες δρομολόγησης των κόμβων. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα καθώς μια

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

διαδρομή χρησιμοποιείται, οι κόμβοι που την απαρτίζουν να εξαντλούνται ενεργειακά, καθιστώντας τη διαδρομή σταδιακά απαγορευτική σε σύγκριση με κάποια άλλη. Για να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα θα πρέπει ο AODV περιοδικά να ενημερώνει και τις ενεργές συνδέσεις. Είναι κρίσιμο να βρεθεί μια κατάλληλη ισορροπία προκειμένου να μην επιβαρύνεται το δίκτυο με άσκοπες ενημερώσεις ζεύξεων αλλά και να μην “εμμένει” σε διαδρομές που από ένα σημείο και μετά εξαντλούν τους κόμβους που τις απαρτίζουν.

Επέκταση των αλλαγών και σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως είναι ο DSR θα μπορούσε να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου μας και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτά καθεαυτά. Επιπλέον, όπως αναφέραμε η ενεργειακή μέριμνα είναι πιο αποδοτική όταν καλύπτει όλα τα επίπεδα σχεδιασμού ενός δικτύου. Συνεπώς η δημιουργία crosslayer υλοποίησης με την επέκταση ενός πρωτοκόλλου ανακάλυψης υπηρεσίας όπως είναι το SLP για παράδειγμα, θα μπορούσε να δώσει καλύτερα αποτελέσματα. Απαραίτητη τέλος κρίνεται η καλύτερη μοντελοποίηση των σεναρίων και η διεξαγωγή πρόσθετων προσομοιώσεων, προκειμένου τα συμπεράσματα να είναι ξεκάθαρα και αδιαμφισβήτητα.



5 Παράρτημα κώδικα tcl

5.1 Απλό Σενάριο 10 κόμβων

```
set ns_ [new Simulator]

set tracefd [open 10komvoi.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd      #.tr αρχείο παλιού τύπου

set namtrace [open 10komvoi.nam w]      ;# for nam tracing
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace 1000 1000

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 1000 1000

# Define options
=====
set val(chan)      Channel/WirelessChannel ;# channel type
set val(prop)      Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
set val(ant)       Antenna/OmniAntenna    ;# Antenna type
set val(ll)        LL                      ;# Link layer type
set val(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue ;# Interface queue type
set val(ifqlen)    50                     ;# max packet in ifq
set val(netif)     Phy/WirelessPhy        ;# network interface type
set val(mac)       Mac/802_11            ;# MAC type
set val(rp)        AODV                   ;# ad-hoc routing protocol
set val(nn)        10                    ;# number of mobilenodes

set god_ [create-god $val(nn)]

set val(stop)      150
```

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

```
set val(rxPower)      10;
set val(txPower)      100;
set val(energymodel)  EnergyModel;
set val(initialenergy) 100;
set val(sleppower)    0.5;
set val(tp)           0.5;
set val(tt)           0.05;
set val(ip)           0.5;
#=====
$ns_ node-config      -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energymodel) \
    -idlePower $val(ip) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -sleepPower $val(sleppower)\
    -transitionPower $val(tp) \
    -transitionTime $val(tt)\
    -initialEnergy $val(initialenergy)\
    -channelType $val(chan) \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace OFF \
    -movementTrace OFF\
```

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

```
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {  
    set node_($i) [$ns_ node ]  
    $node_($i) random-motion 0    ;# disable random motion  
}
```

```
$ns_ at 0.01 "$node_(2) setdest 10 500 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(3) setdest 130 700 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(9) setdest 130 300 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(5) setdest 610 700 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(7) setdest 610 300 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(1) setdest 490 500 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(8) setdest 370 320 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(4) setdest 370 680 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(6) setdest 730 500 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(0) setdest 250 500 30000.0"
```

```
puts "Loading connection pattern..."
```

```
#*****2->6*****  
set null6 [new Agent/Null]  
$ns_ attach-agent $node_(6) $null6  
set udp2 [new Agent/UDP]  
$ns_ attach-agent $node_(2) $udp2  
# Create a CBR traffic source and attach it to udp0  
set cbr2 [new Application/Traffic/CBR]  
$cbr2 set packetSize_ 300  
$cbr2 set interval_ 0.1  
$cbr2 set random_ 0  
$cbr2 attach-agent $udp2  
$ns_ connect $udp2 $null6  
$ns_ at 1.0 "$cbr2 start"  
$ns_ at 19 "$cbr2 stop"
```

```
#*****3->7*****  
set null7 [new Agent/Null]  
$ns_ attach-agent $node_(7) $null7  
set udp3 [new Agent/UDP]  
$ns_ attach-agent $node_(3) $udp3  
# Create a CBR traffic source and attach it to udp0  
set cbr3 [new Application/Traffic/CBR]  
$cbr3 set packetSize_ 300  
$cbr3 set interval_ 0.1  
$cbr3 set random_ 0  
$cbr3 attach-agent $udp3  
$ns_ connect $udp3 $null7  
$ns_ at 6.0 "$cbr3 start"  
$ns_ at 19 "$cbr3 stop"
```

```
#*****9->5*****  
set null5 [new Agent/Null]  
$ns_ attach-agent $node_(5) $null5  
set udp9 [new Agent/UDP]  
$ns_ attach-agent $node_(9) $udp9  
# Create a CBR traffic source and attach it to udp0  
set cbr9 [new Application/Traffic/CBR]  
$cbr9 set packetSize_ 300  
$cbr9 set interval_ 0.1  
$cbr9 set random_ 0  
$cbr9 attach-agent $udp9  
$ns_ connect $udp9 $null5  
$ns_ at 11.0 "$cbr9 start"  
$ns_ at 19 "$cbr2 stop"
```

```
# Tell nodes when the simulation ends  
#  
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
```

```
$ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at $val(stop).5001 "stop"
$ns_ at $val(stop).5002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
    global ns_ tracefd namtrace
    close $tracefd
    close $namtrace
    exec nam 10komvoi.nam &
    exit 0
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run
```

5.2 Σενάριο 10 κόμβων με και χωρίς κινητικότητα

```
set ns_ [new Simulator]

set tracefd [open 10komvoi.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

set namtrace [open 10komvoi.nam w] ;# for nam tracing
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace 750 750

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 1000 1000

=====
# Define options
=====
set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# channel type
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ;# Antenna type
```

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

```
set val(ll)      LL                ;# Link layer type
set val(ifq)     Queue/DropTail/PriQueue ;# Interface queue type
set val(ifqlen)  50                 ;# max packet in ifq
set val(netif)   Phy/WirelessPhy     ;# network interface type
set val(mac)     Mac/802_11          ;# MAC type
set val(rp)      AODV                 ;# ad-hoc routing protocol
set val(nn)      10                   ;# number of mobilenodes

set god_ [create-god $val(nn)]
set val(cp)      "./set-10-0-1-100" ;#movement scenario file

set val(stop)    150

set val(rxPower) 10                   ;
set val(txPower) 100                   ;
set val(energymodel) EnergyModel     ;
set val(initialenergy) 100             ;
set val(sleeppower) 0.5                ;
set val(tp)       0.5                  ;
set val(tt)       0.05                 ;
set val(ip)       0.5                  ;
# =====
$ns_ node-config      -adhocRouting $val(rp) \
                    -llType $val(ll) \
                    -macType $val(mac) \
                    -ifqType $val(ifq) \
                    -ifqLen $val(ifqlen) \
                    -antType $val(ant) \
                    -propType $val(prop) \
                    -phyType $val(netif) \
                    -topoInstance $topo \
                    -energyModel $val(energymodel) \
                    -idlePower $val(ip) \
```


Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

```
-rxPower $val(rxPower) \  
-txPower $val(txPower) \  
-sleepPower $val(sleeppower)\  
-transitionPower $val(tp) \  
-transitionTime $val(tt)\  
-initialEnergy $val(initialenergy)\  
-channelType $val(chan) \  
-agentTrace ON \  
-routerTrace ON \  
-macTrace OFF \  
-movementTrace OFF\  

```

```
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {  
    set node_($i) [$ns_ node ]  
    $node_($i) random-motion 0    ;# disable random motion  
}
```

```
$ns_ at 0.01 "$node_(0) setdest 10 500 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(1) setdest 150 680 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(2) setdest 150 340 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(3) setdest 360 680 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(4) setdest 360 320 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(5) setdest 470 500 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(6) setdest 225 200 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(7) setdest 225 800 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(8) setdest 670 500 30000.0"  
$ns_ at 0.01 "$node_(9) setdest 30 670 30000.0"
```

```
puts "Loading connection pattern..."  
source $val(cp)
```

```
#***** 5->3*****  
set udp5 [new Agent/UDP]
```

```
$ns_ attach-agent $node_(5) $udp5
set cbr5 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr5 set packetSize_ 700
$cbr5 set interval_ 0.02
$cbr5 set random_ 0
$cbr5 attach-agent $udp5

set null3 [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(3) $null3

$ns_ connect $udp5 $null3
$ns_ at 0.7 "$cbr5 start"
$ns_ at 1.2 "$cbr5 stop"

#***** 1->7*****
set udp1 [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(1) $udp1
# Create a CBR traffic source and attach it to udp0
set cbr1 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr1 set packetSize_ 500
$cbr1 set interval_ 0.05
$cbr1 set random_ 0
$cbr1 attach-agent $udp1

set null7 [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(7) $null7

$ns_ connect $udp1 $null7
$ns_ at 1.6 "$cbr1 start"
$ns_ at 2.0 "$cbr1 stop"

#***** 4->6*****
set null6 [new Agent/Null]
```

```
$ns_ attach-agent $node_(6) $null6
set udp4 [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(4) $udp4
# Create a CBR traffic source and attach it to udp0
set cbr4 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr4 set packetSize_ 800
$cbr4 set interval_ 0.01
$cbr4 set random_ 0
$cbr4 attach-agent $udp4

$ns_ connect $udp4 $null6
$ns_ at 1.7 "$cbr4 start"
$ns_ at 2.4 "$cbr4 stop"

#*****0 -> 5*****
set udp0 [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(0) $udp0
# Create a CBR traffic source and attach it to udp0
set cbr0 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr0 set packetSize_ 400
$cbr0 set interval_ 0.05
$cbr0 set random_ 0
$cbr0 attach-agent $udp0

set null5 [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(5) $null5

$ns_ connect $udp0 $null5
$ns_ at 4 "$cbr0 start"
$ns_ at 6.8 "$cbr0 stop"

#***** 2->5*****
set udp2 [new Agent/UDP]
```

```
$ns_ attach-agent $node_(2) $udp2
set cbr2 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr2 set packetSize_ 400
$cbr2 set interval_ 0.05
$cbr2 set random_ 0
$cbr2 attach-agent $udp2

set null5 [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(5) $null5

$ns_ connect $udp2 $null5
$ns_ at 12.0 "$cbr2 start"
$ns_ at 50 "$cbr2 stop"

#
# Tell nodes when the simulation ends
#
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at $val(stop).5001 "stop"
$ns_ at $val(stop).5002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
    global ns_ tracefd namtrace
    close $tracefd
    close $namtrace
    exec nam 10komvoi.nam &
    exit 0
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run
```

5.3 Σενάριο 20 κόμβων με τυχαία τοπολογία, κίνηση κόμβων και δεδομένων

```
set ns_ [new Simulator]

set tracefd [open 20komvoi.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

set namtrace [open 20komvoi.nam w] ;# for nam tracing
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace 1000 1000

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 1000 1000

=====
# Define options
=====

set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# channel type
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ;# Antenna type
set val(ll) LL ;# Link layer type
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# Interface queue type
set val(ifqlen) 50 ;# max packet in ifq
set val(netif) Phy/WirelessPhy ;# network interface type
set val(mac) Mac/802_11 ;# MAC type
set val(rp) AODV ;# ad-hoc routing protocol
set val(nn) 20 ;# number of mobilenodes

set god_ [create-god $val(nn)]
set val(cp) ". /set-20-0-0.1-200" ;#movement scenario file
set val(sc) ". /cbr-20-1.0-30-1" ;#traffic scenario file

set val(stop) 250
#added apo th mailing list
set val(rxPower) 10 ;
```

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

```
set val(txPower)    100          ;
set val(energymodel) EnergyModel ;
set val(initialenergy) 100          ;
set val(sleeppower)  0.5          ;
set val(tp)          0.5          ;
set val(tt)          0.05         ;
set val(ip)          0.5          ;

=====

$ns_ node-config      -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energymodel) \
    -idlePower $val(ip) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -sleepPower $val(sleeppower)\
    -transitionPower $val(tp) \
    -transitionTime $val(tt)\
    -initialEnergy $val(initialenergy)\
    -channelType $val(chan) \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace OFF \
    -movementTrace OFF\

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
```

Μελέτη ανακάλυψης διαδρομής σε MANET, με ενεργειακά κριτήρια

```
set node_($i) [$ns_ node ]
  $node_($i) random-motion 0      ;# disable random motion
}
```

```
puts "Loading connection pattern..."
```

```
source $val(cp)
```

```
source $val(sc)
```

```
# Tell nodes when the simulation ends
```

```
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
  $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}
```

```
$ns_ at $val(stop).5001 "stop"
```

```
$ns_ at $val(stop).5002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
```

```
proc stop {} {
```

```
  global ns_ tracefd namtrace
```

```
  close $tracefd
```

```
  close $namtrace
```

```
  #exec nam 20komvoi.nam &
```

```
  exit 0
```

```
}
```

```
puts "Starting Simulation..."
```

```
$ns_ run
```



Βιβλιογραφία

- [1] A.Ephremides "Energy Concerns in Wireless Networks." *IEEE Wireless Communications*, vol.9, no. 4, August 2002, pp. 48-59.
- [2] Κωνσταντίνος Τραγανός, Μελέτη Πρωτοκόλλων Ανακάλυψης και Παράδοσης Υπηρεσίας σε MANET, artemis.ntua.ece/DT2007-0161
- [3] Καμπιτάκη Δήμητρα, Δίκτυα κατ'απαίτηση και Δίκτυα Αισθητήρων, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, 2007
- [4] Κατσιγιάννης Χρήστος, Αρχιτεκτονική αύξησης βιωσιμότητας MANET με βάση ενεργειακούς περιορισμούς, ΕΜΠ, 2010
- [5] Andrew Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th edition, 2007
- [6] Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_systems, *Distance-vector routing protocol*, *Link-state routing protocol*, *List of ad hoc routing protocols*, *Routing*, *Routing protocols*.
- [7] Β. Μάγκλαρης, Τ. Χιώτης κλπ, *Διαχείριση Δικτύων Υπολογιστών*, ΕΜΠ, 1994
- [8] Καπιτσάκη Γεωργία, *Η Δρομολόγηση σε Ad-Hoc δίκτυα*, ΕΜΠ, 2006
- [9] C.K. Toh, *Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks*, *IEEE Commun. Mag.*, vol.39, no.6, pp.138-147, June 2001.
- [10] Petteri Kuosmanen, *Classification of Ad Hoc Routing Protocols*, Finnish Defence Forces Naval Academy
- [11] N. Nikaiein, H. Labiod, C. Bonnet, *DDR Distributed Dynamic Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks*, Institute Eurocom, 2000
- [12] L.M. Feeney, *A Taxonomy for Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks*, 1999
- [13] Changling Liu, Jörg Kaiser, *A Survey of Mobile Ad Hoc network Routing Protocols*, University of Magdeburg, 2005
- [14] Basagni, Conti, Giordano, and Stojmenovic, *Mobile Ad Hoc Networking*, 2004
- [15] *Mobile Ad Hoc Networking*, edited by Basagni, Conti, Giordano, and Stojmenovic, ISBN 0-471-37313-3, 2004.
- [16] Laura Marie Feeney and Martin Nilsson. "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *Proceedings of IEEE Infocom*, April 2001.
- [17] Laura Marie Feeney. "An energy-consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks." *Journal of Mobile Networks and Applications (MONET)*, vol.6, no.3, pp. 239-250, June 2001.
- [18] Jean-Pierre Ebert, Brian Burns, and Adam Wolisz. "A trace-based approach for determining the energy consumption of a WLAN network interface," in *Proceedings of European Wireless*, pp. 230-236, February 2002.
- [19] Sung Park, Andreas Savvides, Mani B. Srivastava, "Battery Capacity Measurement And Analysis Using Lithium Coin Cell Battery" ISLPED '01,

August 2001.

[20] M. Maleki, K. Dantu and M. Pedram, Power-aware source routing protocol for mobile ad hoc networks, Proceedings of the 2002 international symposium on Low power electronics and design, Monterey, California, USA, 2002, ACM Press, pp. 72-75.

[21] Power-aware Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks ISLPED'02, August 12-14, 2002.