



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πάτρα, Ιούλιος 2006

Μελέτη, Σχεδιασμός & Ανάλυση
Υβριδικών, Αδόμητων Δικτύων
Ασύρματων Σταθμών

Αθανάσιος Χ. Μπάμης, Α.Μ. 2682
mpamis@ceid.upatras.gr

Επιβλέπων: Νικολετσέας Σωτήρης
Λέκτορας Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία είκοσι χρόνια παρατηρείται μια επανάσταση στις ασύρματες επικοινωνίες. Τα ασύρματα δίκτυα είτε πρόκειται για δίκτυα ευρείας περιοχής, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, είτε πρόκειται για ασύρματα τοπικά δίκτυα, όπως τα δίκτυα που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11 έχουν γνωρίσει μεγάλη εξάπλωση και αναμένεται να συνεχίσουν να εξελίσσονται ταχύτατα στο ορατό μέλλον. Η ανάπτυξη νέων φορητών συσκευών μικρού κόστους και μικρού μεγέθους, οι οποίες διαθέτουν δυνατότητες ασύρματης δικτύωσης, καθώς και ενός μεγάλου πλήθους εφαρμογών για αυτές, έχουν καταστήσει την υποστήριξη της κινητικότητας καθοριστικής σημασίας για τα ασύρματα δίκτυα. Η προσέγγιση που ακολουθούν τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα βασίζεται στην ύπαρξη κάποιων σταθερών υποδομών. Όμως, συχνά, αυτές οι υποδομές είναι δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να παρέχονται στους χρήστες, τουλάχιστον μέσα στα απαιτούμενα χρονικά πλαίσια και κόστος. Μια τεχνολογία που φαίνεται να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τα παραπάνω προβλήματα είναι αυτή των αδόμητων δικτύων (ad hoc networks). Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούν τους ίδιους τους κόμβους του δικτύου σαν δρομολογητές, δηλαδή κάθε κόμβος αναλαμβάνει να μεταφέρει πακέτα για λογαριασμό άλλων κόμβων. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους που είναι η δυνατότητα αυτοοργάνωσης και αυτοδιαχείρισης, η υψηλή ανοχή στα σφάλματα, η έλλειψη ανάγκης για ύπαρξη συγκεκριμένων υποδομών και η εγγενής δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας που έχουν, τα καθιστούν καθοριστικό κομμάτι των μελλοντικών δικτυακών συστημάτων τέταρτης γενιάς (4G).

Η ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τα αδόμητα δίκτυα είναι ιδιαίτερα έντονη τα τελευταία χρόνια και εκτείνεται σε ένα μεγάλο πλήθος προβλημάτων. Σε αυτή την εργασία μελετάται το πρόβλημα της δρομολόγησης. Συγκεκριμένα, μετά από μια παρουσίαση των βασικότερων λύσεων που αναφέρονται στην βιβλιογραφία, προτείνεται ένα υβριδικό σύστημα δρομολόγησης, το οποίο προσπαθεί να προσαρμόσει την χρησιμοποιούμενη τεχνική δρομολόγησης στην κατάσταση κινητικότητας του δικτύου. Το σύστημα MSA που προτείνεται, προσπαθεί να κατατάξει τους κόμβους του δικτύου σε *κλάσεις κινητικότητας* με την βοήθεια μιας μετρικής, της *σταθερότητας*, η οποία προσπαθεί να εκτιμήσει την σχετική κινητικότητα των κόμβων. Στην συνέχεια, το MSA επιλέγει με βάση την κλάση κινητικότητας της πηγής και του προορισμού κάθε πακέτου την κατάλληλη τεχνική δρομολόγησης, ανάμεσα σε ένα σύνολο τεχνικών που είναι διαθέσιμες στον κόμβο. Από την πειραματική αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης, με την χρήση του γνωστού δικτυακού προσομοιωτή ns-2, έγινε φανερό ότι το MSA έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των «παραδοσιακών» τεχνικών. Επιπλέον, με βάση τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την πειραματική αξιολόγηση, σχεδιάστηκε ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο απευθύνεται σε στατικά δίκτυα και το οποίο βασίζεται στην ιεραρχική ομαδοποίηση των κόμβων με βάση την κινητικότητά τους. Εκτός όλων των παραπάνω, στα πλαίσια της πειραματικής αξιολόγησης, έγινε για πρώτη φορά υλοποίηση του πρωτοκόλλου RUNNERS στον ns-2 (και γενικότερα σε έναν ρεαλιστικό προσομοιωτή), κάτι το οποίο απαίτησε τον ριζικό επανασχεδιασμό κάποιων από τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Καθ. Σ. Νικολετσέα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και τον Δρ. Ι. Χατζηγιαννάκη ερευνητή του Ε.Α. Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών (ΙΤΥ) για την καθοριστική συνεισφορά του στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1.	ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΗΜΕΡΑ	12
1.2.	ΜΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	14
1.2.1	Τηλεπικοινωνιακά Θέματα.....	14
1.2.2	Τεχνικές Εξάπλωσης Φάσματος.....	16
1.2.3	Έλεγχος Πρόσβασης Στο Μέσο	18
1.2.4	Φορητό IP	21
1.2.5	Ασύρματο TCP και UDP.....	22
1.2.6	Ζητήματα Ασφαλείας	23
1.3.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	25
1.3.1	Δορυφορικά Δίκτυα	25
1.3.2	Κυψελικά Δίκτυα	28
1.3.3	Αδόμητα Δίκτυα.....	31
2.	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	39
2.1.	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΚΙΝΗΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	42
2.2.	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ ΠΙΝΑΚΕΣ	45
2.2.1	<i>Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)</i>	46
2.3.	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ.....	47
2.3.1	<i>Dynamic Source Routing (DSR) Protocol</i>	48
2.3.2	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) Protocol</i>	50
2.3.3	<i>Associativity Based Routing (ABR) Protocol</i>	52
2.4.	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ ΣΥΝΟΛΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	54
3.	ΜΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	55
3.1.	ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	57
3.2.	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΤΗ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ.....	60
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ MSA	65
4.1.	Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ NS-2.....	69
4.1.1	Δομή του ns-2.....	70

4.1.2	Προσομοίωση στον ns-2	72
4.1.3	Προσομοίωση MANET στον ns-2	80
4.2.	ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ RUNNERS	86
4.3.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	89
4.3.1	Περιοχή Προσομοίωσης.....	89
4.3.2	Αριθμός Κόμβων.....	91
4.3.3	Εμβέλεια Μετάδοσης, Διάδοση Ραδιοκυμάτων, Λάθη Μετάδοσης & Μοντελοποίηση Παρεμβολών	93
4.3.4	Μοντέλο Κίνησης	96
4.3.5	Φόρτο	98
4.3.6	Μετρικές.....	99
4.4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	100
5.	ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ	115
5.1.	ΟΡΙΣΜΟΙ	116
5.2.	ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ	121
5.2.1	Υποπρωτόκολλο 1: Υπολογισμός Της Συσχέτισης Των Συνδέσμων Υπερκόμβου.....	122
5.2.2	Υποπρωτόκολλο 2: Υπολογισμός Σταθερότητας & Κατάταξη Υπερκόμβου Σε Κλάση Κινητικότητα	123
5.2.3	Υποπρωτόκολλο 3: Σχηματισμός Υπερκόμβου	123
5.2.4	Υποπρωτόκολλο 4: Συντήρηση Υπερκόμβου	128
5.2.5	Υποπρωτόκολλο 5: Υπολογισμός Εντροπίας Υπερκόμβου.....	129
5.2.6	Υποπρωτόκολλο 6: Εκλογή Εκπροσώπου Υπερκόμβου.....	130
5.3.	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ.....	131
5.3.1	Εκπομπές Εντός Του Υπερκόμβου.....	132
5.3.2	Δρομολόγηση Εντός Του Υπερκόμβου.....	133
5.3.3	Η Αξιοπιστία Ως Ένα Κριτήριο Επιλογής Δρομολογίων	133
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	137
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων, κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, έχει οδηγήσει σε επαναστατικές αλλαγές στον χώρο των υπολογιστικών συστημάτων και γενικότερα της τεχνολογίας. Μερικά από τα ορατά αποτελέσματα αυτής της προόδου είναι οι βελτιώσεις των υπάρχοντων δικτυακών υποδομών, η παροχή πολύτιμων υπηρεσιών (π.χ. κινητή τηλεφωνία, δορυφορικές επικοινωνίες), καθώς και η εμφάνιση πλήθους ενσωματωμένων συσκευών με δυνατότητες δικτύωσης (π.χ. κινητά τηλέφωνα, PDAs). Επιπρόσθετα, οι φορητές αυτές υπολογιστικές συσκευές αποκτούν μέρα με τη μέρα μεγαλύτερες υπολογιστικές δυνατότητες και ενεργειακή αυτονομία, ενώ τείνουν παράλληλα να γίνουν αναντικατάστατα εργαλεία της καθημερινότητάς μας. Σαν ένα ενδεικτικό παράδειγμα των δυνατοτήτων που παρέχουν τα ασύρματα συστήματα μπορούμε να θεωρήσουμε έναν χρήστη που ενώ βρίσκεται σε ένα αυτοκίνητο μπορεί να ελέγξει το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο του, να ανακτήσει ένα σημαντικό έγγραφο από το γραφείο του ή ακόμη και να συμμετάσχει σε ένα έκτακτο εταιρικό συμβούλιο μέσω τηλεδιάσκεψης. Μια ακόμα συχνή περίπτωση είναι η χρήση συστημάτων κατεύθυνσης (μέσω χρήσης GPS) για την διευκόλυνση της οδήγησης σε αστικές περιοχές. Στο άμεσο μέλλον αναμένεται, επίσης, ένα μεγάλο πλήθος ασύρματων υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα υπηρεσίες που θα βασίζονται στην θέση των χρηστών (π.χ. ενημέρωση για το που βρίσκεται το κοντινότερο βενζινάδικο, ενημέρωση για την κατάσταση του δρόμου ή της κίνησης), πανταχού παρόντες υπολογιστές (ubiquitous ή pervasive computing) και πολλές άλλες ακόμα.

Το γεγονός ότι οι κινητές συσκευές γίνονται συνεχώς μικρότερες, φθηνότερες, με μεγαλύτερες υπολογιστικές ικανότητες και περισσότερο διαθέσιμο λογισμικό έχει οδηγήσει και αναμένεται να συνεχίσει να οδηγεί, με μεγαλύτερους ρυθμούς στο μέλλον, την ανάπτυξη της σχετικής αγοράς και κατά συνέπεια και της σχετικής βιομηχανίας. Ανάμεσα στο μεγάλο πλήθος υπηρεσιών που παρέχονται από τις κινητές συσκευές, η παροχή δικτυακών υπηρεσιών και οι αντίστοιχες υπηρεσίες δεδομένων είναι πέραν πάσης αμφιβολίας αυτές με τη μεγαλύτερη ζήτηση. Σήμερα, η συντριπτική πλειοψηφία δικτυακών υπηρεσιών για κινητές συσκευές παρέχεται μέσω σταθερών υποδομών που προσφέρονται από παρόχους ή ιδιωτικά δίκτυα. Για παράδειγμα, μια σύνδεση μεταξύ δύο κινητών τηλεφώνων είναι εφικτή μόνο μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, ενώ ένας φορητός υπολογιστής μπορεί να συνδεθεί ασύρματα στο Internet μέσω ενός ασύρματου σημείου πρόσβασης (wireless access point).

Παρά το γεγονός ότι τα βασιζόμενα σε υποδομές (infrastructure-based) δίκτυα παρέχουν τον απλούστερο και, συνήθως, αποτελεσματικότερο τρόπο για παροχή δικτυακών υπηρεσιών, παρουσιάζουν επίσης και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών για την παροχή ασύρματων δικτυακών υπηρεσιών έχει σημαντικό κόστος, απαιτεί συνήθως αρκετό χρόνο και εμφανίζει ιδιαίτερες δυσκολίες όσον αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τους. Ακόμα σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή και συντήρηση υποδομών μπορεί να είναι δύσκολη ή αδύνατη, τουλάχιστον σύμφωνα με τους χρονικούς περιορισμούς που θέτουν οι χρήστες. Τέτοια

παραδείγματα είναι περιπτώσεις καταστροφών (όπου οι υπάρχουσες υποδομές έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας), στρατιωτικές επιχειρήσεις, απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές (π.χ. ορεινές περιοχές, απομακρυσμένες νησίδες του Αιγαίου) ή ακόμα και «τυχαίες» συγκεντρώσεις ατόμων που επιθυμούν την ανταλλαγή δεδομένων (π.χ. συνέδρια, επαγγελματικές συναντήσεις, παιχνίδια υπολογιστών για πολλούς χρήστες).

Για όλους αυτούς τους λόγους, σε συνδυασμό με τις σημαντικές προόδους στην τεχνολογία και την προτυποποίηση, νέες εναλλακτικές τεχνικές για την παροχή δικτυακών υπηρεσιών έχουν αρχίσει να τραβούν την προσοχή των ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Οι περισσότερες εστιάζονται στην διασύνδεση κινητών συσκευών που βρίσκονται εντός καθεμιά στην ακτίνα μετάδοσης της άλλης μέσω της αυτόματης δημιουργίας και συντήρησης ενός αδόμητου δικτύου (ad hoc network). Αυτή η λύση φαίνεται να είναι αρκετά ευέλικτη και ισχυρή, καθώς επιτρέπει στους κόμβους όχι μόνο να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, αλλά να μπορούν να έχουν πρόσβαση και σε υπηρεσίες του Internet διαμέσου ενός κατάλληλα διαμορφωμένου κόμβου-πύλης (Internet gateway node). Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η επέκταση του δικτύου, αλλά και των υπηρεσιών του Internet σε περιοχές που δεν διαθέτουν συγκεκριμένες υποδομές. Καθώς τα ασύρματα δίκτυα συνεχίζουν να εξελίσσονται, αυτή η ικανότητα δημιουργίας αδόμητων δικτύων αναμένεται να γίνει ιδιαίτερα σημαντική και οι τεχνολογικές λύσεις για την υποστήριξή της κρίσιμες. Αυτό με τη σειρά του έχει οδηγήσει σε ένα μεγάλο αριθμό προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης, υποστηριζόμενα από ερευνητικούς οργανισμούς αλλά και από την βιομηχανία.

Για να αντιληφθούμε τις τάσεις της τεχνολογίας των ασύρματων συστημάτων και να καταλάβουμε γιατί τα αδόμητα δίκτυα αναμένεται να διαδραματίσουν έναν καθοριστικό ρόλο στο μέλλον, θα ήταν χρήσιμη μια σύντομη αναδρομή στην «ασύρματη επανάσταση» της τελευταίας εικοσαετίας. Η πρώτη ουσιαστική εμπορική επιτυχία των ασύρματων συστημάτων ξεκίνησε με την πρώτη γενιά (1G) τη δεκαετία του 1980, η οποία υποστήριζε αναλογικά κυψελικά συστήματα. Τα συστήματα αυτά γνώρισαν σχετικά μικρή επιτυχία εξαιτίας της (συγκριτικά με τα σημερινά δεδομένα) χαμηλής τεχνολογίας τους και της έλλειψης προτυποποίησης, η οποία οδήγησε στο φαινόμενο διαφορετικές περιοχές του κόσμου να χρησιμοποιούν ασύμβατα μεταξύ τους συστήματα (π.χ. η Ευρώπη χρησιμοποιούσε τα NMT και TACS, ενώ η Αμερική το AMPS).

Η βιομηχανία των κυψελικών συστημάτων ξεκίνησε την ανάπτυξη των δικτύων δεύτερης γενιάς (2G) σχεδόν μια δεκαετία αργότερα. Η 2G μετέτρεψε τα κινητά συστήματα σε ψηφιακά και προσέθεσε νέες δυνατότητες, όπως μεταφορά δεδομένων, fax και αποστολή γραπτών μηνυμάτων (SMS). Η επανάσταση της 2G πυροδοτήθηκε από την υψηλή ζήτηση για υπηρεσίες δεδομένων, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τα SMS και άλλες. Δυστυχώς και σε αυτή την περίπτωση διαφορετικά πρότυπα χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη (π.χ. στην Ευρώπη χρησιμοποιείται το GSM, ενώ στην Αμερική χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα και τεχνολογίες TDMA και CDMA), αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Πρόσφατα, το 2G επεκτάθηκε στο 2.5G, το οποίο υποστηρίζει επικοινωνίες δεδομένων με ταχύτητες μέχρι και 384kbps.

Σήμερα, βρίσκεται σε εξέλιξη μια προσπάθεια μετάβασης της ασύρματης βιομηχανίας από τα δίκτυα τεχνολογίας 2G και 2.5G στα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς

(3G). Τα δίκτυα αυτά θα ακολουθούν ένα κοινό παγκόσμιο πρότυπο βασισμένο στην τεχνολογία CDMA και θα παρέχουν δυνατότητες περιαγωγής (roaming) σε ολόκληρο τον πλανήτη. Τα δίκτυα 3G παρέχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και αναμένεται να υποστηρίζουν ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα εφαρμογές πολυμέσων. Όμως, παρά της υψηλής προσδοκίας για τα δίκτυα 3G, η ανάπτυξη τους αντιμετωπίζει μεγάλο αριθμό δυσκολιών κυρίως εξαιτίας των εγγενών περιορισμών της αρχιτεκτονικής και των χαρακτηριστικών τους. Από την άλλη, οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις κατέστησαν δυνατή την παροχή νέων υπηρεσιών, οι οποίες με τη σειρά τους εισάγουν νέες απαιτήσεις στις δυνατότητες των ασύρματων συστημάτων. Δυστυχώς, οι περισσότερες από αυτές τις απαιτήσεις δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό των συστημάτων 3G. Μερικά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν ή αναμένεται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα 3G είναι τα εξής:

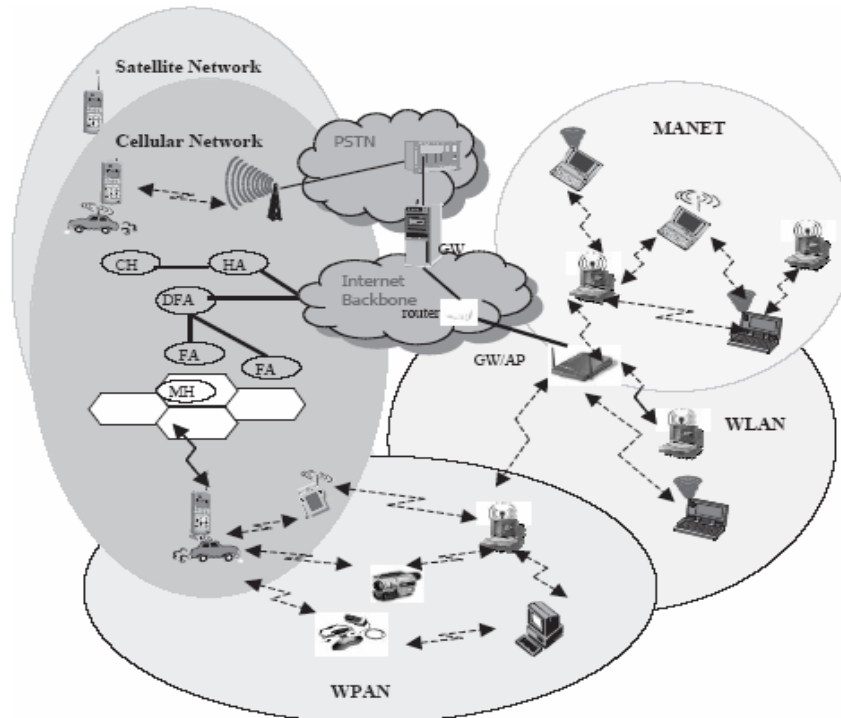
- **Ανάγκη για ενσωμάτωση διαφόρων τύπων ασύρματων δικτύων:** Τα σημερινά δίκτυα (συμπεριλαμβανομένων των δικτύων 3G) σχεδιάστηκαν για να παρέχουν φτηνές υπηρεσίες, μικρού εύρους ζώνης, σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Εντωμεταξύ, όμως, έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός άλλων τεχνολογιών, οι οποίες αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη δημοτικότητα, συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων τοπικών δικτύων (π.χ. IEEE 802.11) και των δικτύων προσωπικής περιοχής (π.χ. Bluetooth), τα οποία σχεδιάστηκαν αρχικά σαν «απομονωμένα» δίκτυα. Σήμερα, είναι επιτακτική η ανάγκη αυτά τα δίκτυα να ενοποιηθούν, ώστε να παρέχουν διαφανείς (seamless) ασύρματες υπηρεσίες. Οι τελευταίες τάσεις της τεχνολογίας υποδεικνύουν ότι οι δικτυακές τεχνολογίες των επόμενων γενιών θα αποτελούνται από υψηλής ταχύτητας δίκτυα κορμού (backbone networks) με ασύρματα δίκτυα, συνδεδεμένα σε αυτά, να παρέχουν πρόσβαση στους χρήστες, ακόμα και όταν αυτοί βρίσκονται σε κίνηση.
- **Ανάγκη για την ενσωμάτωση των ασύρματων συστημάτων στα υπάρχοντα δίκτυα κορμού:** Οι πελάτες των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών απαιτούν ολοένα και περισσότερο την ασύρματη παροχή των υπηρεσιών που παραδοσιακά προσφέρονταν από ενσύρματα δίκτυα. Επομένως, τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα θα πρέπει να παρέχουν τις υπηρεσίες τους στο χρήστη με διαφάνεια (transparency), κάτι το οποίο επιβάλλει την διασύνδεσή τους με τις υπάρχουσες σταθερές υποδομές, όπως το Internet και τα δίκτυα PSTN.
- **Η ανάγκη για υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων:** Η ανάπτυξη του Internet και η εμφάνιση πολλών νέων εφαρμογών πολυμέσων (π.χ. μουσική, βίντεο, τηλεδιάσκεψη), έχει κάνει τις υπηρεσίες αυτές ιδιαίτερα ελκυστικές για τους χρήστες ασύρματων συστημάτων. Στα συστήματα 3G η μέγιστη υποστηριζόμενη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων είναι 2Mbps. Αυτό το εύρος ζώνης δεν είναι αρκετό για την υποστήριξη πολλών από τις εφαρμογές πολυμέσων.

- **Ανάγκη για σύγκλιση στις χρησιμοποιούμενες υποδομές:** Σήμερα, οι ασύρματες επικοινωνίες δείχνουν μεγάλη προτίμηση στις υπηρεσίες φωνής. Όμως, ταυτόχρονα, η κίνηση δεδομένων αυξάνεται με σχεδόν εκθετικούς ρυθμούς και η τεχνολογίες IP φαίνεται να επικρατούν. Η συντήρηση δύο ξεχωριστών υποδομών κορμού για φωνή και δεδομένα φαίνεται μη εφικτή. Άρα, η λύση φαίνεται να βρίσκεται στην χρήση βασιζόμενων στο IP ψηφιακών δικτύων μεταγωγής πακέτων (packet switched), τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν φωνή, δεδομένα και κίνηση πολυμέσων και τα οποία θα επιτρέψουν την μείωση του κόστους της ανάπτυξης και συντήρησης των δικτύων υποδομής.
- **Ανάγκη για την υποστήριξη υψηλής κινητικότητας και φορητότητας των συσκευών:** Σήμερα, οι χρήστες απαιτούν να μπορούν να συνδέονται με δίκτυα και να επικοινωνούν με άλλους χρήστες ή συσκευές από οποιοδήποτε σημείο του κόσμου και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Τα συστήματα 3G δεν μπορούν να υποστηρίξουν ακόμα την απαιτούμενη διαφάνεια, όπως για παράδειγμα την δυναμική αλλαγή δικτυακών διευθύνσεων και θέσεων των συσκευών.
- **Ανάγκη για υποστήριξη δικτύων χωρίς υποδομή:** Τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε προϋπάρχουσες υποδομές (σταθμούς βάσης, MSCs, APs) για την παροχή των υπηρεσιών τους. Το γεγονός αυτό περιορίζει την παροχή των υπηρεσιών τους σε προκαθορισμένες περιοχές. Παρόλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις οι δικτυακές υπηρεσίες απαιτούνται σε περιοχές που τέτοια υποδομή δεν είναι διαθέσιμη (ή τουλάχιστον όχι άμεσα). Η υποστήριξη και ενσωμάτωση δικτύων που δεν βασίζονται σε κάποια υποδομή είναι σημαντική σε τέτοιες περιπτώσεις.

Η τέταρτη γενιά δικτυακών συστημάτων (4G) , η οποία σήμερα βρίσκεται στην φάση της έρευνας, βασίζεται στην προσέγγιση των ανοικτών συστημάτων (open-systems' approach). Ο κύριος στόχος της είναι να ενσωματώσει πολλούς διαφορετικούς τύπους ασύρματων δικτύων, καθώς και να προσφέρει την διαφανή διασύνδεση τους με τα δίκτυα κορμού. Επίσης, αναμένεται να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης των 100Mbps) και παροχή ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) επιτρέποντας την κίνηση φωνής, πολυμέσων και δεδομένων πάνω από ένα κοινό δίκτυο βασισμένο σε τεχνολογίες IP. Τα δίκτυα 4G οραματίζεται να παρέχουν πανταχού παρούσες (ubiquitous) υπηρεσίες, υποστηρίζοντας τόσο την φορητότητα (portability) όσο και την κινητικότητα (mobility) των συστημάτων (Εικόνα 1).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει τα κινητά αδόμητα δίκτυα (Mobile Ad hoc NETworks – MANETs), τα οποία αναμένεται να έχουν ένα καθοριστικό ρόλο στα δικτυακά συστήματα τέταρτης γενιάς, αλλά και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Ειδικότερα, η εργασία αυτή θα μελετήσει το πρόβλημα της δρομολόγησης (routing) στα MANET, το οποίο είναι, ίσως, το σημαντικότερο ανοικτό ερευνητικό πρόβλημα αυτής της κατηγορίας

δικτύων (κάτι που γίνεται αντιληπτό και από το μεγάλο αριθμό σχετικών δημοσιεύσεων κάθε χρόνο).

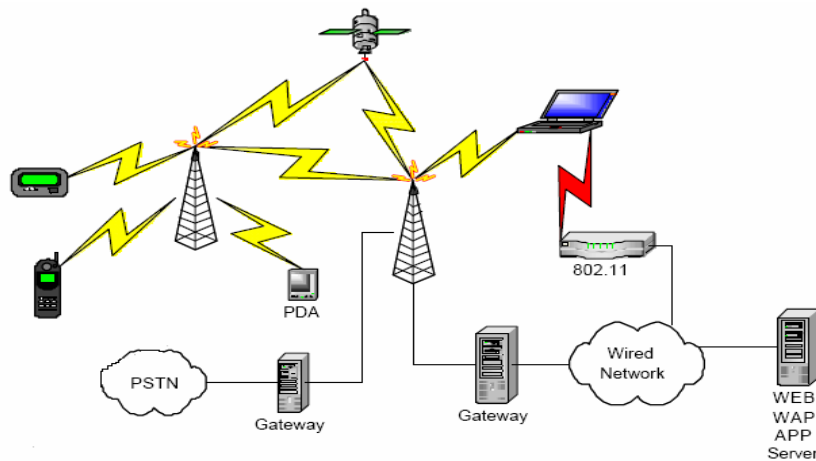


Εικόνα 1. Η αρχιτεκτονική του δικτύου 4G.

Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα παρουσιάσουμε κάποια γενικά στοιχεία για τα ασύρματα συστήματα, τα οποία θα βοηθήσουν στην κατανόηση των δυσκολιών που έχουν να αντιμετωπίσουν οι σχεδιαστές δικτυακών πρωτοκόλλων. Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας θα παρουσιάσουμε σύντομα το πρόβλημα της δρομολόγησης στα MANET. Στα υπόλοιπα τρία κεφάλαια θα παρουσιάσουμε την ερευνητική εργασία που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, στο τρίτο κεφάλαιο θα προτείνουμε ένα νέο υβριδικό σύστημα δρομολόγησης, το οποίο προσαρμόζει την χρησιμοποιούμενη τεχνική δρομολόγησης στα χαρακτηριστικά κινητικότητας του δικτύου και στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την πειραματική αξιολόγηση της λύσης που προτείνουμε χρησιμοποιώντας έναν γνωστό δικτυακό προσομοιωτή (ns-2). Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο με βάση τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την πειραματική αξιολόγηση, θα προτείνουμε ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης για MANET, το οποίο βασίζεται στην έννοια της ομαδοποίησης (clustering) των κόμβων του δικτύου με βάση την κινητικότητά τους.

1.1. ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΗΜΕΡΑ

Σήμερα τα ασύρματα δίκτυα γνωρίζουν τεράστια εξάπλωση (Εικόνα 2), η οποία αναμένεται να αυξηθεί με την έλευση νέων προτύπων όπως το IEEE 802.16 (WiMAX), το IEEE 802.15 (Bluetooth), αλλά και την έλευση της πολυαναμενόμενης κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (UMTS). Όπως και τα ενσύρματα δίκτυα, έτσι και τα ασύρματα μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες, με βάση κυρίως το μέγεθός τους και την περιοχή κάλυψής τους. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε τις κατηγορίες των ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής (Wireless Wide Area Networks – WWAN), τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (Wireless Metropolitan Area Networks – WMAN), τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής (Wireless Local Area Networks – WLAN) και τέλος, μια νέα κατηγορία δικτύων, η οποία δεν ορίζεται στα ενσύρματα, τα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (Wireless Personal Area Networks – WPAN ή απλώς PAN).



Εικόνα 2. Μέρος της σημερινής ασύρματης πραγματικότητας.

Στα δίκτυα WWAN, μπορούμε να κατατάξουμε τα δορυφορικά δίκτυα, τα οποία καλύπτουν μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή και εξυπηρετούν έναν μεγάλο αριθμό χρηστών. Ο βασικός ρόλος αυτών των δικτύων είναι να παρέχουν διασύνδεση μεταξύ ηπείρων, παρέχοντας δυνατότητες μεταφοράς φωνής, τηλεοπτικού σήματος, υπηρεσίες εντοπισμού θέσης (π.χ. GPS) και διάφορες άλλες. Ένας σημαντικός τομέας χρήσης των δορυφορικών δικτύων στο μέλλον αναμένεται να είναι η παροχή ταχύτατης και καθολικής (δηλαδή ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης) πρόσβασης στο Internet. Μια άλλη, σημαντική κατηγορία δικτύων WWAN (αλλά και γενικότερα ασύρματων δικτύων) που σήμερα είναι ευρύτατα διαδεδομένη, είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (π.χ. GSM, UMTS), τα οποία αποτελούνται από σύνολα διασυνδεδεμένων κυψελικών δικτύων και καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο μέρος του πλανήτη, εξυπηρετώντας έναν τεράστιο αριθμό χρηστών. Μια τελευταία

κατηγορία δικτύων που κατατάσσονται στα WWAN είναι συνήθως κάποια δίκτυα που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 2MHz με πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και τα οποία χρησιμοποιούνται για την παροχή πληροφοριών σε πλοία και αεροσκάφη.

Μια σημαντική κατηγορία δικτύων τύπου WMAN αναμένεται να είναι τα δίκτυα που θα βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16, το οποίο αυτή τη στιγμή βρίσκεται υπό προτυποποίηση. Τα δίκτυα αυτού του τύπου αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για αντικατάσταση των τοπικών βρόγχων (Local Loops – LL) από ασύρματους τοπικούς βρόγχους (Wireless Local Loops – WLL). Αναμένεται να παρέχουν υπηρεσίες φωνής, δεδομένων, τηλεόρασης υψηλής ευκρινείας και διάφορων άλλων ψηφιακών υπηρεσιών. Άλλα γνωστά ασύρματα δίκτυα WMAN, τα οποία βρίσκονται σε χρήση (αν και δεν είναι τόσο διαδεδομένα, κυρίως λόγω του κόστους τους) είναι η Πολυκαναλική Πολυσημειακή Υπηρεσία Διανομής (Multichannel Multipoint Distribution Service – MMDS) και η εξέλιξη της που ονομάζεται Τοπική Πολυσημειακή Υπηρεσία Διανομής (Local Multipoint Distribution Service – LMDS). Οι υπηρεσίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την παροχή καλωδιακής τηλεόρασης και υπηρεσιών σταθερής τηλεφωνίας. Με την ραγδαία ανάπτυξη, όμως, του Internet άρχισαν να χρησιμοποιούνται και για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών πρόσβασης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί εδώ και η «απρόβλεπτη» ανάπτυξη μιας κατηγορίας ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων με βάση το πρότυπο IEEE 802.11 (το οποίο δεν σχεδιάστηκε για αυτού του είδους την χρήση), τα οποία αρχικά σχηματίστηκαν από ομάδες ατόμων με ενδιαφέροντα στον χώρο των ασυρμάτων τεχνολογιών και στην συνέχεια απέκτησαν μεγάλο αριθμό χρηστών και ευρεία γεωγραφική κάλυψη (π.χ. Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο Αθηνών – AWMN ή Ασύρματο Δίκτυο Πατρών – PWN).

Όσον αφορά τα WLAN, η πλέον διαδεδομένη κατηγορία είναι τα γνωστά σε όλους δίκτυα που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11 (Wi-Fi). Ο βασικός λόγος ύπαρξης των δικτύων αυτών είναι η ασύρματη τοπική δικτύωση, όπως για παράδειγμα σε συγκροτήματα γραφείων, στα οποία δεν υπάρχει δυνατότητα για ενσύρματη δικτύωση, αλλά και στο λεγόμενο Small Office Home Office (SOHO) περιβάλλον. Άλλα σημαντικά πρότυπα για WLAN που αναπτύχθηκαν (και συνεχίζουν να αναπτύσσονται) είναι το HiperLAN και το HomeRF.

Τέλος, όσον αφορά την κατηγορία των ασύρματων PAN, σε αυτήν το πλέον σημαντικό πρότυπο είναι το Bluetooth, το οποίο γίνεται προσπάθεια να προτυποποιηθεί και να βελτιωθεί από την επιτροπή 802.15 της IEEE. Η νέα γενιά του Bluetooth θα παρέχει αυξημένες δυνατότητες δικτύωσης μεταξύ των διαφόρων συσκευών, στοχεύοντας στην οριστική κατάργηση των καλωδίων. Μια παλαιότερη κατηγορία PAN δικτύων είναι τα δίκτυα IrDA τα οποία χρησιμοποιούν υπέρυθρες και τα οποία δεν γνώρισαν σημαντική αποδοχή.

1.2. ΜΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών έχουν σε γενικές γραμμές την ίδια δομή με τα ενσύρματα. Σε αντίθεση όμως με τα τελευταία τα ασύρματα συστήματα έχουν να αντιμετωπίσουν κάποια επιπλέον προβλήματα και ιδιαιτερότητες, γεγονός το οποίο οδηγεί σε διαφορετικές σχεδιαστικές επιλογές, σχεδόν σε κάθε επίπεδο του δικτύου. Στην συνέχεια θα αναφέρουμε σύντομα σε μερικά από τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να απασχολούν οποιονδήποτε σχεδιαστή ενός ασύρματου συστήματος.

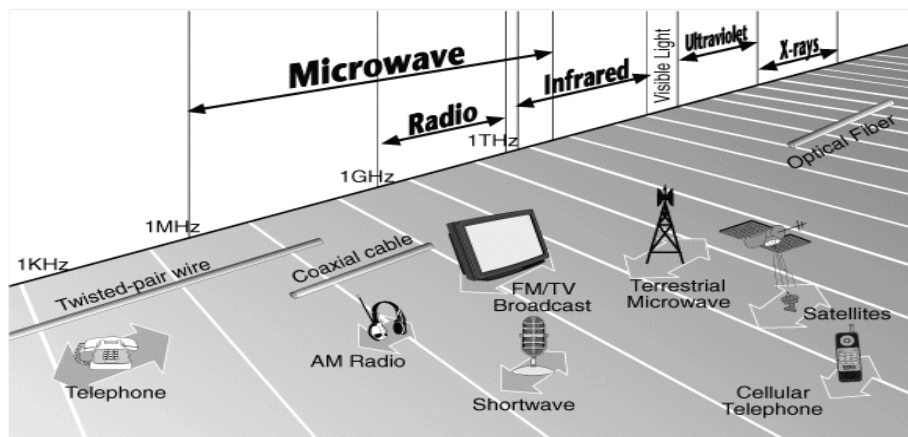
1.2.1 Τηλεπικοινωνιακά Θέματα

Στα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εισέρχεται στο μέσο διάδοσης με την βοήθεια μιας κεραίας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και το χρησιμοποιούμενο κανάλι είναι η ατμόσφαιρα (ή το κενό αν ο πομπός ή/και ο δέκτης μας βρίσκονται στο διάστημα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το ασύρματο κανάλι εκτός από τον αναπόφευκτο θερμικό θόρυβο, που οφείλεται κυρίως στην πρώτη βαθμίδα του δέκτη (κύκλωμα ανίχνευσης), να εισάγει έναν επιπλέον προσθετικό θόρυβο που προέρχεται από διαταραχές όπως ο θόρυβος «ανθρώπινων δραστηριοτήτων» (man-made noise) και ατμοσφαιρικοί θόρυβοι που συλλαμβάνονται από τις κεραίες λήψης (π.χ. θόρυβοι που δημιουργούνται από κινητήρες, κεραυνούς κ.τ.λ.). Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό πρόβλημα στα ασύρματα κανάλια είναι η διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation), η οποία οδηγεί σε υποβάθμιση του σήματος. Μια τέτοια παραμόρφωση του σήματος χαρακτηρίζεται ως μη προσθετική διαταραχή, εκδηλώνεται ως χρονικές διακυμάνσεις της έντασης του σήματος και συνήθως καλείται διάλειψη (fading). Πολλές φορές, και ιδίως στα αδόμητα δίκτυα με τα οποία ασχολείται η συγκεκριμένη εργασία, επιτρέπεται κίνηση των κόμβων, κάτι το οποίο εισάγει πρόσθετες δυσκολίες (π.χ. φαινόμενο Doppler).

Στην Εικόνα 3 φαίνονται οι κυριότερες ζώνες συχνοτήτων και μερικές χαρακτηριστικές χρήσεις τους. Επειδή οι συχνότητες είναι πεπερασμένες, θεωρούνται ως δημόσιο αγαθό και συνήθως η χρήση τους καθορίζεται από εθνικούς ή διεθνείς οργανισμούς (στην Ελλάδα από την ΕΕΤΤ), ώστε να αποφεύγεται η αλόγιστη χρήση τους και οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.

Για τα ασύρματα δίκτυα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ζώνη των μικροκυμάτων. Οι συνηθισμένες συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα ασύρματα συστήματα είναι μεταξύ 2 και 40GHz. Όσο υψηλότερη είναι η χρησιμοποιούμενη συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι και το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερος και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate). Ένα σημαντικό πρόβλημα της ζώνης των μικροκυμάτων είναι το γεγονός ότι η απόσβεση (attenuation) του σήματος αυξάνεται σημαντικά με την βροχόπτωση και ιδιαίτερα για συχνότητες μεγαλύτερες από 10GHz. Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι στις υψηλές

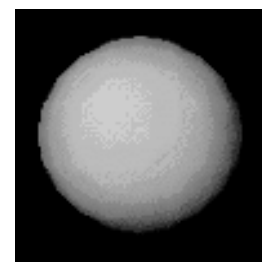
συχνότητες το κόστος κατασκευής των πομποδεκτών είναι υψηλό και άρα οι συχνότητες αυτές δεν ενδύκνυνται για χρήση από ιδιώτες.



Εικόνα 3. Κυριότερες ζώνες συχνοτήτων και οι χρήσεις τους.

Καθοριστικό ρόλο σε κάθε ασύρματο δίκτυο διαδραματίζει η κεραία του. Μια κεραία μπορεί να οριστεί σαν ένας ηλεκτρικός αγωγός ή σύστημα αγωγών που χρησιμοποιείται τόσο για την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στον χώρο όσο και για την συλλογή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από αυτόν. Στην περίπτωση του πομπού η κεραία μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ενώ στην περίπτωση του δέκτη συμβαίνει το αντίθετο. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιείται μια κοινή κεραία τόσο για λήψη όσο και για εκπομπή.

Μια συνηθισμένη κεραία εκπέμπει ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις, αλλά στην τυπική περίπτωση δεν έχει την ίδια επίδοση προς κάθε κατεύθυνση. Ο συνηθισμένος τρόπος για να περιγράψουμε την επίδοση μιας κεραίας είναι μέσω της χρήσης ενός προτύπου ακτινοβολίας (radiation pattern), το οποίο είναι ένας γραφικός τρόπος απεικόνισης των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της κεραίας ως συνάρτηση των συντεταγμένων του χώρου. Συνήθως το πρότυπο ακτινοβολίας είναι δισδιάστατο και αποτελείται από ένα σημείο που συμβολίζει την κεραία και μια καμπύλη, η απόσταση κάθε σημείου της οποίας είναι ανάλογη της ενέργειας που εκπέμπει η κεραία προς αυτήν την κατεύθυνση. Το μέγεθος του προτύπου ακτινοβολίας είναι τυχαίο και το μόνο που έχει σημασία είναι η σχετική απόσταση από την κεραία προς κάθε σημείο. Η σχετική απόσταση εκφράζει την σχετική ενέργεια που εκπέμπει η κεραία προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το απλούστερο πρότυπο ακτινοβολίας προκύπτει από μια ιδεατή κεραία που ονομάζεται ιστροπική (isotropic antenna) και αποτελείται από ένα σημείο (που συμβολίζει την κεραία) και έναν κύκλο που την περιβάλλει (Εικόνα 4). Τα σημαντικότερα είδη πραγματικών κεραιών είναι οι μη-



Εικόνα 4. Πρότυπο ακτινοβολίας για την ιστροπική κεραία.

κατευθυντικές (omnidirectional), ιδανική περίπτωση των οποίων είναι η ιστροπική, καθώς και οι κατευθυντικές (directional). Στο πρώτο είδος κεραιών χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι διπολικές κεραιές, ενώ στο δεύτερο οι παραβολικές κεραιές, οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως για την επικοινωνία με τους δορυφόρους.

Μια πολύ σημαντική διάκριση των ασύρματων δικτύων γίνεται με βάση το μοντέλο διάδοσης (propagation mode) που ακολουθούν. Ως μοντέλο διάδοσης χαρακτηρίζεται ο τρόπος με τον οποίο διαδίδεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία κεραία. Υπάρχουν τρία δυνατά μοντέλα διάδοσης, το μοντέλο εδαφικού-κύματος (ground-wave), το μοντέλο κύματος-χώρου (sky-wave) και το μοντέλο οπτικής-επαφής (Line Of Sight – LOS). Στο μοντέλο εδαφικού-κύματος τα κύματα ακολουθούν την διαμόρφωση του εδάφους και μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κυρίως για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων (π.χ. για επικοινωνία με πλοία), καθώς και για την ραδιοφωνία ΑΜ. Τα κύματα-χώρου έχουν την ιδιότητα ότι ανακλώνται από κάποια στρώματα της ιονόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μπορούν να διαδοθούν σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων (σημαντικά μικρότερη από τα εδαφικά-κύματα βέβαια).

Το μοντέλο κυμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τις ασύρματες επικοινωνίες υπολογιστών είναι το μοντέλο LOS, το οποίο ακολουθούν συνήθως και τα μικροκύματα. Στο μοντέλο LOS πρέπει να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ της κεραίας του πομπού και του δέκτη. Πολλές φορές, όμως, χάρη στις ιδιότητες της διάθλασης (diffraction) και της ανάκλασης (reflection) των κυμάτων, είναι δυνατή η επικοινωνία ακόμα και όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ των δύο κεραιών. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής διάθλασης της ατμόσφαιρας τείνει να μειώνεται με το υψόμετρο. Αυτό το φαινόμενο κάνει τα κύματα που βρίσκονται πλησιέστερα στο έδαφος να κινούνται με μικρότερη ταχύτητα από αυτά που βρίσκονται ψηλότερα, με αποτέλεσμα την κάμψη τους. Επιπρόσθετα, λόγω των ανακλάσεων ή και του διασκορπισμού (scattering) των κυμάτων εξαιτίας της πρόσκρουσής τους σε εμπόδια που συναντούν κατά την διάδοσή τους μπορεί να αλλάζουν κατεύθυνση και άρα κάποια από αυτά να φτάνουν τελικά στην κεραία του δέκτη. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται σχεδόν LOS (Near Line Of Sight – NLOS).

1.2.2 Τεχνικές Εξάπλωσης Φάσματος

Επειδή όλα τα ασύρματα συστήματα πρέπει να μοιραστούν ένα περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων, είναι απαραίτητο το φάσμα να μοιράζεται στους χρήστες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, με παράλληλη διατήρηση της απόδοσής του. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι πολυπλεξίας. Δύο από τις σημαντικότερες, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά και σε ενσύρματα συστήματα, είναι η Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access – FDMA) και η Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA). Στην FDMA το φάσμα συχνοτήτων διαιρείται σε ζώνες, με κάθε χρήστη να έχει την αποκλειστική χρήση κάποιας ζώνης. Στο TDMA οι χρήστες χρησιμοποιούν το μέσον με τη σειρά (εκ περιτροπής), με κάθε χρήστη να λαμβάνει περιοδικά όλο το εύρος ζώνης.

Μια ολοένα και περισσότερο χρησιμοποιούμενη τεχνική στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η τεχνική της εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum). Σχεδόν όλα τα σύγχρονα πρωτόκολλα (συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων) ασύρματης δικτύωσης χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνική (π.χ. IEEE 802.11, IEEE 802.16, UMTS). Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε αρχικά για στρατιωτική χρήση, αφού δυσκολεύει την υποκλοπή των μεταδιδόμενων πληροφοριών και είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις παρεμβολές. Σύντομα, όμως, χάρη στα πλεονεκτήματά της άρχισε να χρησιμοποιείται σε πολλά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών και ιδιαίτερα στις ζώνες ISM (Industrial, Scientific, Medical – ελεύθερες περιοχές του φάσματος), όπου είναι πολύ συχνό φαινόμενο οι παρεμβολές. Οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος μπορούν να θεωρηθούν τόσο ως τεχνικές διαμόρφωσης, όσο και ως τεχνικές πολυπλεξίας.

Οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος έχουν ένα σύνολο από πλεονεκτήματα τα οποία τις καθιστούν ιδανικές για χρήση σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Συγκεκριμένα :

- 1) Παρουσιάζουν ανοχή σε παρεμβολές διαφωνίας (crosstalk interference).
- 2) Είναι ανθεκτικές στο θόρυβο και κατά συνέπεια παρουσιάζουν μικρό ρυθμό σφαλμάτων bit (BER). Επίσης, εξαιτίας της ψηφιακής φύσης τους ελαχιστοποιούν την παρουσία στατικού ηλεκτρισμού (συνηθισμένο φαινόμενο στα αναλογικά συστήματα).
- 3) Οι επιδόσεις τους δεν επηρεάζονται σημαντικά από το φαινόμενο της πολύδρομης εξασθένισης (multipath fading), αλλά αντίθετα με χρήση κάποιων τεχνικών (Rake) μπορεί να το χρησιμοποιήσουν για να ενισχύσουν το λαμβανόμενο σήμα.
- 4) Είναι κατεξοχήν ασφαλή συστήματα, αφού για να μπορέσει ο δέκτης να λάβει το εκπεμπόμενο σήμα θα πρέπει να γνωρίζει την ακολουθία αλλαγής συχνοτήτων του πομπού και τον χρόνο παραμονής του σε κάθε συχνότητα (FHSS), ή τον κωδικό που αυτός χρησιμοποιεί (DSSS και CDMA). Επιπρόσθετα, χάρη στα παραπάνω είναι δύσκολο να ανιχνευθούν (αφού η ισχύς εκπομπής σε κάθε συχνότητα είναι περιορισμένη και μπορεί να θεωρηθεί ως τυχαίος θόρυβος) και δύσκολο να εμποδιστεί η λειτουργία τους, αφού ο παρεμβολέας θα πρέπει να εκπέμπει στο σύνολο των συχνοτήτων με αρκετά μεγάλη ισχύ.
- 5) Είναι ιδανικά για χρήση σε κορεσμένα φάσματα συχνοτήτων (π.χ. στις ISM ζώνες) αφού δημιουργούν περιορισμένες παρεμβολές σε άλλα συστήματα που τυχόν λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες.

- 6) Μπορούν να λειτουργούν σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις, αφού υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της χρησιμοποιούμενης ισχύος, δεδομένου ότι δεν δημιουργούν παρεμβολές στα άλλα συστήματα.

Το βασικό μειονέκτημα των μεθόδων εξάπλωσης φάσματος είναι το μεγάλο εύρος ζώνης (σε σχέση με το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας) που απαιτούν, το οποίο, όμως, όπως επίσης αναφέρθηκε, μπορεί να ισοσταθμιστεί από την δυνατότητα υποστήριξης πολλών χρηστών ταυτόχρονα στο ίδιο φάσμα. Ένα, επιπρόσθετο μειονέκτημα είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης των πομποδεκτών, η οποία ευτυχώς χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας και των ψηφιακών επεξεργαστών σήματος μπορεί να αγνοηθεί.

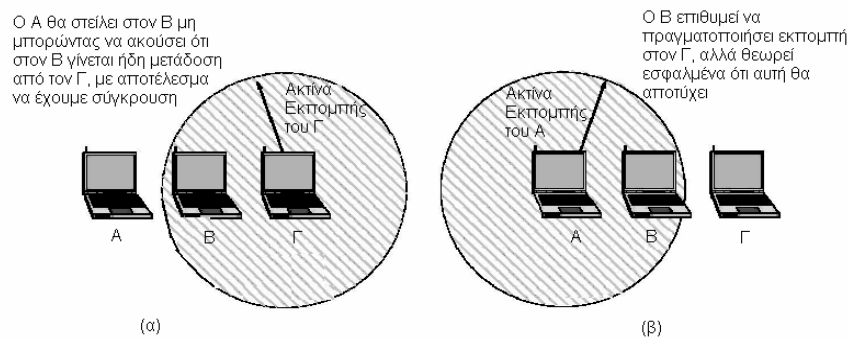
Τρεις από τις γνωστότερες τεχνικές εξάπλωσης φάσματος είναι η Εξάπλωση Σφάλματος με Συνεχή Αλλαγή Συχνότητας (Frequency-Hopping Spread Spectrum – FHSS), η Εξάπλωση Φάσματος Άμεσης Ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) και η Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA). Στην FHSS ο πομπός σε τακτά χρονικά διαστήματα αλλάζει συχνότητα μετάδοσης. Για την μετάβαση από συχνότητα σε συχνότητα χρησιμοποιείται μια γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών με όλους τους σταθμούς να χρησιμοποιούν το ίδιο φύτρο (seed) και τα ίδια χρονικά διαστήματα παραμονής σε κάθε συχνότητα (dwell time). Η DSSS από την άλλη εξαπλώνει το σήμα σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων. Η εξάπλωση γίνεται σύμφωνα με έναν κώδικα διασποράς (spreading code), ο οποίος εξαπλώνει το σήμα ανάλογα με τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται. Τέλος, η CDMA βασίζεται στην υπόθεση ότι τα πλαίσια που παρουσιάζουν διένεξη (δηλαδή που αλληλοπαρεμβάλλονται) δεν αλλοιώνονται ολοκληρωτικά, αλλά αντίθετα ότι τυχόν πολλαπλά σήματα προστίθενται γραμμικά. Έτσι, κάθε bit προς αποστολή διαιρείται σε m σύντομα διαστήματα που ονομάζονται θραύσματα (chips). Σε κάθε πομπό εκχωρείται ένας κωδικός των m bit, ο οποίος ονομάζεται ακολουθία θραυσμάτων (chip sequence). Για να μεταδώσει το bit 1 ο σταθμός στέλνει την ακολουθία θραυσμάτων του, ενώ για να μεταδώσει το bit 0 στέλνει το συμπλήρωμα ως προς 1 της ακολουθίας θραυσμάτων του.

1.2.3 Έλεγχος Πρόσβασης Στο Μέσο

Τα ασύρματα δίκτυα είναι από την φύση τους δίκτυα εκπομπής. Κάθε κόμβος έχει μία ακτίνα μετάδοσης και κάθε άλλος κόμβος που βρίσκεται εντός της μπορεί να «ακούει» τις μεταδόσεις του. Αν δύο κόμβοι μεταδώσουν ταυτόχρονα θα υπάρξει σύγκρουση και το σήμα που θα προκύψει θα είναι συνήθως παραμορφωμένο. Επομένως, είναι απαραίτητο τα ασύρματα δίκτυα να έχουν ένα μηχανισμό ελέγχου της πρόσβασης στο κοινό μέσο (Medium Access Control – MAC). Για τα ενσύρματα δίκτυα υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι αλγόριθμοι που ελέγχουν την προσπέλαση στο κοινό μέσο, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το Ethernet, ο οποίος είναι συνδυασμός μιας μεθόδου Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος και Ανίχνευση Συγκρούσεων (Carrier

Sense Multiple Access with Collision Detection – CSMA/CD) και δυαδικής εκθετικής οπισθοχώρησης.

Δυστυχώς, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα ενσύρματα δίκτυα δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και στα ασύρματα. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι στα ασύρματα δίκτυα δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν πρωτόκολλα ανίχνευσης φέροντος (carrier sense protocols). Αυτό συμβαίνει επειδή είναι δυνατόν δύο διαφορετικοί κόμβοι, έστω Α και Γ, να μην μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους (π.χ. λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ τους), αλλά να μπορούν και οι δύο να επικοινωνήσουν με έναν τρίτο, έστω Β (π.χ. ο τρίτος σταθμός βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο πρώτων). Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα σε περίπτωση που ο Α και ο Γ θέλουν να στείλουν στον Β, να εκτελούν ανίχνευση φέροντος και επειδή δεν θα ανιχνεύουν κάποια μετάδοση (αφού καθένας από τους Α και Γ δεν βρίσκεται εντός της ακτίνας εκπομπής του άλλου) να στέλνουν και οι δύο στον Β, με αποτέλεσμα την σύγκρουση, την οποία ο Α και ο Γ δεν θα αντιληφθούν. Το πρόβλημα αυτό που παρουσιάζεται όταν ένας σταθμός δεν μπορεί να εντοπίσει την παρουσία ενός δυνητικού ανταγωνιστή για το κοινό μέσο, επειδή ο ανταγωνιστής βρίσκεται πολύ μακριά, ονομάζεται πρόβλημα του κρυφού κόμβου (hidden node problem).

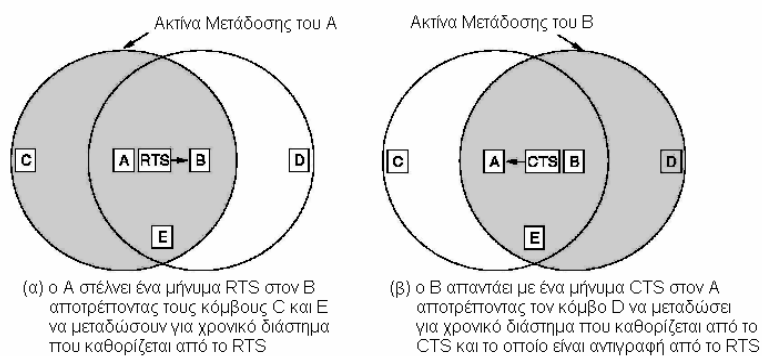


Εικόνα 5. (α) το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου και (β) το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου.

Το αντίθετο πρόβλημα μπορεί να εμφανιστεί όταν ο Β προσπαθήσει να μεταδώσει στον Γ, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται μια μετάδοση από τον Α στον Β. Ο Β θα ανιχνεύσει την μετάδοση του Α και δεν θα εκπέμψει στον Γ, παρότι στην πραγματικότητα δεν θα υπάρξει σύγκρουση. Αυτό το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου (exposed node problem). Παραδείγματα του προβλήματος του κρυμμένου και του εκτεθειμένου κόμβου φαίνονται στην Εικόνα 5. Το βασικό πρόβλημα της ανίχνευσης φέροντος είναι ότι, πριν ξεκινήσει την μετάδοσή του ένας σταθμός θέλει να ξέρει αν υπάρχει δραστηριότητα γύρω από τον παραλήπτη. Το CSMA, όμως, μπορεί να μας πληροφορήσει μόνο για τον αν υπάρχει δραστηριότητα γύρω από το σταθμό που ανιχνεύει το μέσο. Παρόλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και η ανίχνευση των μεταδόσεων που

γίνονται από γειτονικούς σταθμούς μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή πολλών συγκρούσεων και για αυτό το λόγο συχνά χρησιμοποιείται. Τέλος, η ανίχνευση των συγκρούσεων είναι τις περισσότερες φορές αδύνατη από έναν σταθμό που μεταδίδει. Αυτό συμβαίνει επειδή η ανίχνευση συγκρούσεων θα απαιτούσε την ταυτόχρονη λειτουργία ενός πομπού και ενός δέκτη σε έναν κόμβο, κάτι το οποίο συνήθως δεν είναι δυνατόν για τους κινητούς κόμβους ενός ασύρματου δικτύου, εξαιτίας της αύξησης του μεγέθους, της κατανάλωσης ισχύος και του κόστους που κάτι τέτοιο θα επέφερε.

Επομένως, σε ένα ασύρματο σύστημα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε τεχνικές πολυπλεξίας, όπως TDMA, FDMA ή κάποια από τις τεχνικές εξάπλωσης σφάλματος που αναφέραμε παραπάνω, είτε κάποιο πρωτόκολλο κρατήσεων (reservation protocol). Επίσης, είναι δυνατό κάθε χρήστη που εκπέμπει να εκπέμπει ταυτόχρονα και ένα σήμα κατειλημμένου (π.χ. σε ένα κοινόχρηστο κανάλι) το οποίο αποτρέπει όλους τους υπόλοιπους κόμβους να εκπέμψουν (π.χ. κάθε κόμβος ακούει το κοινόχρηστο κανάλι, σε περίπτωση που δεν ακούσει σήμα κατειλημμένου, εκπέμπει ένα σήμα κατειλημμένου και στην συνέχεια στέλνει τα δεδομένα του). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τεχνικές κρατήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο στην περίπτωση που υπάρχει κάποιος συντονιστής στο σύστημα, ενώ απαιτεί, όπως και το TDMA, συγχρονισμό, κάτι το οποίο είναι εγγενώς δύσκολο ακόμα και για ενσύρματα συστήματα. Συνήθως, το πρωτόκολλο MAC εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του δικτύου και κυρίως από το αν υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός βάσης ή όχι.



Εικόνα 6. Παράδειγμα της λειτουργίας του MACAW.

Ένα πολύ χρήσιμο πρωτόκολλο δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα (μια παραλλαγή του οποίου χρησιμοποιείται και στο IEEE 802.11) είναι η Πολλαπλή Πρόσβαση με Αποφυγή Συγκρούσεων για Ασύρματα (Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless – MACAW). Η βασική ιδέα του πρωτοκόλλου αυτού είναι να αποφεύγονται οι συγκρούσεις με την ανταλλαγή μικρών πλαισίων ελέγχου μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη πριν την αποστολή των δεδομένων, ώστε να ενημερώνονται όλοι οι κόμβοι εντός της εμβέλειας του παραλήπτη για την επερχόμενη εκπομπή. Συγκεκριμένα, όταν ένας χρήστης Α θέλει να στείλει δεδομένα σε έναν χρήστη Β, ξεκινάει στέλνοντας ένα πλαίσιο

αίτησης αποστολής (Request To Send – RTS) στον B. Το πλαίσιο RTS περιέχει πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους υπόλοιπους κόμβους, οι οποίοι είναι εντός της εμβέλειας του A, για να καθορίσουν τον χρόνο που θα πάρει η αποστολή δεδομένων από τον A στον B και κατά συνέπεια τον χρόνο που θα πρέπει να μείνουν «σιωπηλοί». Όταν ο B λάβει το RTS απαντάει με ένα πλαίσιο έγκρισης αποστολής (Clear To Send – CTS), το οποίο περιέχει τις ίδιες πληροφορίες με το RTS και το οποίο χρησιμοποιείται για να αποτρέψει τους κόμβους που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του B να εκπέμψουν. Ένα παράδειγμα του τρόπου λειτουργίας του MACAW φαίνεται στην Εικόνα 6.

1.2.4 Φορητό IP

Για να μπορεί κάθε χρήστης που συνδέεται σε ένα δίκτυο να χρησιμοποιεί συνδεομοστροφείς υπηρεσίες (π.χ. TCP) πρέπει να χρησιμοποιεί διαρκώς μια σταθερή διεύθυνση IP. Η διεύθυνση IP όμως, πρέπει να αντιπροσωπεύει κάθε φορά το επικοινωνιακό μέσο που χρησιμοποιείται, καθώς και το σημείο που βρίσκεται ο χρήστης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δρομολογητές δεν χρησιμοποιούν ολόκληρη την διεύθυνση IP (αφού κάτι τέτοιο θα απαιτούσε οι δρομολογητές να έχουν αποθηκευμένους και να διαχειρίζονται τεράστιους πίνακες δρομολόγησης), αλλά μόνο κάποιο τμήμα της που καθορίζει το δίκτυο στο οποίο ανήκει. Κατά συνέπεια, κάθε φορά που κάποιο τερματικό μετακινείται σε διαφορετικό δίκτυο ανατίθεται σε αυτό μια διαφορετική διεύθυνση, που αντιστοιχεί στο νέο δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στα ασύρματα συστήματα και κυρίως στα κινητά δίκτυα, τα οποία είναι από την φύση τους δυναμικά και οι κόμβοι τους επιτρέπεται να μετακινούνται από δίκτυο σε δίκτυο συνεχώς. Με βάση την κινητικότητα των τερματικών, μπορούμε να τους κατατάξουμε σε στάσιμους (stationary), που είναι οι υπολογιστές που δεν μετακινούνται ποτέ, σε αποδημητικούς (migratory), που είναι συνήθως φορητοί υπολογιστές, που είναι κατά βάση στάσιμοι, αλλά μετακινούνται από μια σταθερή τοποθεσία σε μια άλλη από καιρό σε καιρό και η τελευταία κατηγορία είναι οι περιπλανώμενοι (roaming) που είναι υπολογιστές που λειτουργούν εν κινήσει και θέλουν να διατηρούν τις συνδέσεις τους καθώς μετακινούνται. Οι αποδημητικοί και οι περιπλανώμενοι υπολογιστές αναφέρονται συχνά και ως κινητοί υπολογιστές υπηρεσίας (mobile hosts).

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος αναπτύχθηκε το φορητό IP (mobile IP), το οποίο είναι ένας μηχανισμός που υποστηρίζει την ξεκάθαρη δικτυακή συνδεσιμότητα στους κινητούς σταθμούς. Το φορητό IP επιτρέπει στον κινητό σταθμό να συνεχίσει να χρησιμοποιεί την διεύθυνση IP που του έχει ανατεθεί στο μητρικό δίκτυο (home IP address), ανεξάρτητα από το δίκτυο στο οποίο ο σταθμός είναι υλικά προσαρτημένος.

Κάθε δίκτυο που θέλει να επιτρέψει στους χρήστες του να «περιπλανιούνται» πρέπει να εγκαταστήσει έναν οικείο πράκτορα (home agent). Κάθε δίκτυο που θέλει να επιτρέψει επισκέπτες πρέπει να εγκαταστήσει έναν ξένο πράκτορα (foreign agent). Η λειτουργία κάθε ξένου πράκτορα είναι να παρακολουθεί όλους τους κινητούς υπολογιστές υπηρεσίας που συνδέονται στο δίκτυο αυτό, ενώ η λειτουργία κάθε οικείου πράκτορα είναι να

παρακολουθεί όλους τους κινητούς υπολογιστές υπηρεσίας που ανήκουν στο «οικείο» δίκτυο, αλλά έχουν «μετακομίσει» σε κάποιο άλλο δίκτυο. Όταν ένας κινητός υπολογιστής υπηρεσίας συνδεθεί σε ένα ξένο δίκτυο, επικοινωνεί με τον εκεί ξένο πράκτορα και εγγράφεται σε αυτόν. Ο ξένος πράκτορας επικοινωνεί τότε με τον οικείο πράκτορα του χρήστη δίνοντας του μια διεύθυνση επιμέλειας (care-of address), συνήθως με την διεύθυνση IP του ίδιου του ξένου πράκτορα. Όταν φτάνει ένα πακέτο στο οικείο LAN του χρήστη, σταματάει σε κάποιον δρομολογητή συνδεδεμένο στο LAN. Όταν ο δρομολογητής προσπαθήσει να επικοινωνήσει με τον «μετανάστη» κινητό υπολογιστή υπηρεσίας (χρησιμοποιώντας ένα πακέτο ARP), θα απαντήσει αντί αυτού ο οικείος πράκτορας, παραλαμβάνοντας αυτός το πακέτο. Στην συνέχεια ο οικείος πράκτορας θα ενσωματώσει ολόκληρο το πακέτο στο ωφέλιμο φορτίο ενός πακέτου IP, το οποίο και στείλει μέσω σήραγγας (tunnel) στην διεύθυνση επιμέλειας. Επιπρόσθετα, ο οικείος πράκτορας θα ενημερώσει τον αποστολέα του πακέτου για την διεύθυνση επιμέλειας, ώστε τυχόν επόμενα πακέτα που θα στείλει να μην χρειαστεί να κάνουν παρακάμψεις.

Μερικές φορές ο ίδιος ο κινητός υπολογιστής υπηρεσίας γίνεται ξένος πράκτορας του εαυτού του, γεγονός όμως που συνεπάγεται ότι ο «επισκέπτης» υπολογιστής θα πρέπει να λάβει μία από τις IP διευθύνσεις του δικτύου στο οποίο συνδέεται και επιπρόσθετα, ότι θα πρέπει πιθανόν να αποθλακώνει όλα τα IP πακέτα που λαμβάνει (με ότι αυτό συνεπάγεται στην περίπτωση που το δίκτυο στο οποίο συνδέεται είναι δίκτυο εκπομπής, π.χ. IEEE 802.11). Τέλος, το φορητό IP εισάγει και κάποια πρόσθετα ζητήματα ασφαλείας (π.χ. ένας οικείος πράκτορας να λάβει μήνυμα από έναν υποκλοπέα, το οποίο να του ζητάει να προωθή όλα τα μηνύματα που προορίζονται για κάποια διεύθυνση IP σε αυτόν), τα οποία επιλύονται συνήθως με την χρήση κρυπτογραφικών πρωτοκόλλων πιστοποίησης.

1.2.5 Ασύρματο TCP και UDP

Θεωρητικά, τα πρωτόκολλα του επιπέδου μεταφοράς θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα από την τεχνολογία του υποκείμενου επιπέδου δικτύου. Στην πραγματικότητα, όμως, το υποκείμενο δίκτυο έχει σημασία, επειδή οι περισσότερες υλοποιήσεις του TCP έχουν βελτιστοποιηθεί προσεκτικά βασιζόμενες σε υποθέσεις οι οποίες ισχύουν για ενσύρματα συστήματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των επιδόσεων των ασυρμάτων συστημάτων.

Ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα είναι ο αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης. Στις περισσότερες υλοποιήσεις του TCP οι λήξεις του χρόνου αναμονής (timeouts) προκαλούνται από συμφόρηση και όχι από χαμένα πακέτα. Κατά συνέπεια, όταν λήγει ο χρόνος αναμονής, το TCP επιβραδύνει και στέλνει με μικρότερο ρυθμό, προσπαθώντας να μειώσει το φορτίο του δικτύου. Αντίθετα, στα ασύρματα δίκτυα υπάρχουν πολλοί λόγοι πέρα από την συμφόρηση για τους οποίους μπορεί να λήξει ο χρόνος αναμονής. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε ως πηγές απώλειας πακέτων τα λάθη λόγω του θορύβου, φαινόμενο πολύ συνηθισμένο στα ασύρματα κανάλια, ή απώλειες πακέτων λόγω της μετακίνησης των χρηστών από ένα δίκτυο σε κάποιο άλλο (π.χ. στα κυβελικά δίκτυα). Κατά συνέπεια σε αντίθεση με την περίπτωση των ενσύρματων

δικτύων, στα ασύρματα δίκτυα συνήθως οι λήξεις του χρόνου αναμονής δεν προκαλούνται εξαιτίας του φόρτου του δικτύου, αλλά εξαιτίας σφαλμάτων. Επομένως, το TCP δεν χρειάζεται να μειώσει τον ρυθμό αποστολής πακέτων, αλλά να ξαναστείλει το δυνατόν συντομότερα το πακέτο. Για να γίνει το παραπάνω πρόβλημα περισσότερο σύνθετο πρέπει να αναφέρουμε ότι συνήθως τα ασύρματα δίκτυα διασυνδέονται με κάποιο ενσύρματο δίκτυο, πράγμα που σημαίνει ότι είναι αδύνατο να αλλάξουμε τον τρόπο αντιμετώπισης των λήξεων του χρόνου αναμονής από το TCP, αφού κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε πρόβλημα στο ενσύρματο δίκτυο.

Συνήθως για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιούνται δύο λύσεις. Η πρώτη από αυτές είναι το έμμεσο TCP (Indirect TCP – I-TCP), σύμφωνα με το οποίο η σύνδεση TCP σπάει σε δύο (ή περισσότερα αν είναι απαραίτητο) κομμάτια στο όριο μεταξύ του ασύρματου και του ενσύρματου τμήματος του διαδικτύου. Αυτό το σπάσιμο είναι δυνατό στην περίπτωση που η ενδιάμεση συσκευή (π.χ. σταθμός βάσης) μπορεί να διακρίνει τα δύο δίκτυα. Η συσκευή τότε διατηρεί δύο TCP συνδέσεις, μία κατά μήκος του ασύρματου δικτύου και μία κατά μήκους του ενσύρματου, χρησιμοποιώντας διαφορετικό τρόπο αντιμετώπισης στις λήξεις χρόνου αναμονής κάθε τμήματος. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της λύσης είναι ότι παραβιάζει την σημασιολογία του TCP, αφού κάθε μέρος της σύνδεσης είναι μια πλήρης σύνδεση TCP και κατά συνέπεια επιστρέφονται επιβεβαιώσεις κατά μήκος της. Δηλαδή ο αποστολέας ενός μηνύματος σε ένα κυψελικό δίκτυο θα λάβει μια επιβεβαίωση από τον σταθμό βάσης χωρίς το μήνυμα να έχει παραδοθεί στον παραλήπτη. Η δεύτερη λύση είναι η προσθήκη ενός πράκτορα παρακολούθησης (snorping agent) ο οποίος παρατηρεί και αποθηκεύει τα πακέτα TCP που στέλνονται στο ασύρματο τερματικό, καθώς και τις επιβεβαιώσεις που επιστρέφονται από αυτό. Εάν ο πράκτορας παρακολούθησης παρατηρήσει να στέλνεται ένα πακέτο TCP σε κάποιο ασύρματο σταθμό χωρίς να επιστραφεί μια επιβεβαίωση πριν να λήξει ο (σχετικά μικρός) χρόνος αναμονής του, αναμεταδίδει αμέσως το πακέτο, χωρίς να ενημερώσει τον αποστολέα του μηνύματος. Τα αντίγραφα των επιβεβαιώσεων απορρίπτονται από τον πράκτορα για να αποφευχθεί η παρερμηνεία τους ως δείγματα συμφόρησης του δικτύου. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι σε περίπτωση που η ασύρματη σύνδεση είναι αξιόπιστη και ο χρόνος αναμονής του πράκτορα είναι μικρός, μπορεί να έχουμε πολλές άσκοπες αναμεταδόσεις που συνεπάγονται σπατάλη του διαθέσιμου εύρους ζώνης και μπορεί να οδηγήσουν σε συμφόρηση.

Όσον αφορά το UDP, αν και από την φύση του πρέπει να θεωρείται αναξιόπιστο, πολλά προγράμματα το χρησιμοποιούν θεωρώντας ότι θα είναι αρκετά αξιόπιστο (κάτι που συμβαίνει στα ενσύρματα δίκτυα). Αυτό όμως, δεν ισχύει σχεδόν ποτέ στα ασύρματα δίκτυα με αποτέλεσμα τέτοια προγράμματα να είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν σε ασύρματα δίκτυα.

1.2.6 Ζητήματα Ασφαλείας

Η ασφάλεια είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σε όλα τα δίκτυα. Στα ασύρματα δίκτυα τα προβλήματα ασφαλείας είναι ακόμα μεγαλύτερα, αφού τα δίκτυα αυτά

είναι από την φύση τους δίκτυα εκπομπής και κατά συνέπεια καθένας που βρίσκεται εντός της ακτίνας εκπομπής ενός πομπού μπορεί να «ακούσει» τα μεταδιδόμενα δεδομένα. Το πρόβλημα είναι ακόμα μεγαλύτερο στα αδόμητα δίκτυα όπου τα δεδομένα δρομολογούνται στον προορισμό τους πιθανόν μέσω άλλων κόμβων. Επιπρόσθετα, σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να ανιχνευθεί η υποκλοπή δεδομένων από έναν ωτακουστή, αφού η υποκλοπή αυτή δεν επηρεάζει σε τίποτα την μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των κόμβων (ή του κόμβου και ενός σταθμού βάσης) και επιπλέον, είναι σχεδόν αδύνατο να εντοπιστεί ο ίδιος ο ωτακουστής. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ευρεία εξάπλωση των ασύρματων δικτύων, κάνει τα ασύρματα δίκτυα ελκυστικούς στόχους για τους hackers και τους crackers. Έτσι, για κάθε είδος ασυρμάτων δικτύων και κυριότερα για τα δίκτυα IEEE 802.11 έχουν αναπτυχθεί ένα σύνολο εργαλείων και τεχνικών που καθιστούν την διατήρηση της ασφαλείας αυτών των δικτύων έναν εφιάλτη ακόμα και για τους πιο έμπειρους διαχειριστές.

Σε κάθε ασύρματο δίκτυο υπάρχουν δύο βασικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Το πρώτο από αυτά είναι η προστασία των δεδομένων που εκπέμπονται με την χρήση κάποιας μεθόδου κρυπτογράφησης. Υπάρχουν πάρα πολλές διαφορετικές μέθοδοι κρυπτογράφησης που μπορούν να διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους. Οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης θα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικοί σε επιθέσεις, διατηρώντας ταυτόχρονα το επιπλέον φορτίο που εισάγουν στο δίκτυο όσο το δυνατό μικρότερο. Συχνά η διαδικασία της κρυπτογράφησης των δεδομένων πραγματοποιείται από το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων, αφού μια τέτοια υπηρεσία δεν παρέχεται από το επίπεδο δικτύου ή μεταφοράς. Το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην διασύνδεση ασύρματων και ενσύρματων δικτύων.

Πρέπει να σημειωθεί, εδώ, ότι η IETF έχει προτείνει μια σχεδίαση που ονομάζεται ασφάλεια IP (IP security – IPsec), η οποία περιγράφεται στα RFC 2401, 2402 και 2406. Η σχεδίαση αυτή σε γενικές γραμμές παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών για την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Αντί να γίνει προαιρετική η κρυπτογράφηση (επειδή είναι υπολογιστικά δαπανηρή), αποφασίστηκε να απαιτείται πάντα, αλλά να επιτρέπεται η χρήση ενός κενού αλγορίθμου (RFC 2410). Το IPsec δίνει την δυνατότητα χρησιμοποίησης πολλών υπηρεσιών, αφού όλοι οι χρήστες δεν απαιτούν την ίδια ασφάλεια και τις ίδιες επιδόσεις, ενώ παρέχει και την δυνατότητα χρησιμοποίησης πολλών διαφορετικών αλγορίθμων, αφού ένας αλγόριθμος που θεωρείται ασφαλής τώρα, μπορεί στο μέλλον να «σπάσει». Πρέπει να τονιστεί ότι όλες οι υπηρεσίες βασίζονται σε κρυπτογραφία συμμετρικού κλειδιού, επειδή είναι κρίσιμο το θέμα της υψηλής απόδοσης. Το IPsec αν και βρίσκεται στο επίπεδο του IP είναι συνδεσμοστρεφές, αφού για να υπάρχει οποιαδήποτε ασφάλεια θα πρέπει να εγκαθιδρυθεί ένα κλειδί, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα χρονικό διάστημα (ουσιαστικά αυτό είναι ένα είδος σύνδεσης). Η σύνδεση με την έννοια του IPsec ονομάζεται συσχέτιση ασφαλείας (Security Association – SA). Το IPsec παρέχει δύο καταστάσεις λειτουργίας, την κατάσταση μεταφοράς (transport mode), όπου η κεφαλίδα (header) του IPsec με τις πληροφορίες ασφαλείας εισάγεται μετά την κεφαλίδα IP και πριν από την κεφαλίδα TCP και την κατάσταση σήραγγας (tunnel mode), όπου ολόκληρο το πακέτο IP, κεφαλίδα και ωφέλιμο φορτίο ενθυλακώνονται στο σώμα ενός νέου πακέτου IPsec.

Το δεύτερο βασικό πρόβλημα είναι η δυνατότητα πιστοποίησης των χρηστών (authentication), ώστε μόνο εξουσιοδοτημένοι χρήστες να μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Σε αντίθεση με ένα ενσύρματο δίκτυο όπου μπορούμε να προσδιορίσουμε από που προέρχονται τα πακέτα που λαμβάνουμε, σε ένα ασύρματο δίκτυο η προέλευση των πακέτων δεν μπορεί να ελεγχθεί. Έτσι, απαιτείται πριν την αποστολή οποιουδήποτε πακέτου η πιστοποίηση του χρήστη, ώστε να αποτρέπεται η μη εξουσιοδοτημένη χρήση του δικτύου, αλλά και να είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός χρήστη που αντιβαίνει στους κανονισμούς λειτουργίας του. Συνήθως η πιστοποίηση γίνεται είτε με την εγκαθίδρυση ενός κοινόχρηστου κλειδιού (ανταλλαγή κλειδιού Diffie-Hellman), είτε με χρήση ενός κέντρου διανομής κλειδιών, είτε τέλος, με την χρήση κρυπτογραφίας δημοσίου κλειδιού. Ένα πρωτόκολλο πιστοποίησης ταυτότητας που χρησιμοποιείται σε πολλά πραγματικά συστήματα είναι το σύστημα Kerberos, το οποίο σχεδιάστηκε στο M.I.T. και βασίζεται σε μια παραλλαγή του αλγορίθμου Needham-Schroeder (πολύδρομο πρωτόκολλο πρόκλησης-απάντησης).

1.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Αν και μπορούμε να διακρίνουμε πολλές κατηγορίες ασύρματων δικτύων, σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε σύντομα μόνο στις τρεις βασικότερες. Έτσι, καταρχήν, θα αναφερθούμε σύντομα στα δορυφορικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούμε καθημερινά και τα οποία αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στο μέλλον. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα κυψελικά δίκτυα με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα τους τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και τα δίκτυα IEEE 802.11, τα οποία χρησιμοποιούν σημεία πρόσβασης (Access Points – AP) και, τέλος, θα αναφερθούμε στα αδόμητα δίκτυα, τα οποία είναι και τα δίκτυα στα οποία επικεντρώνουμε την προσοχή μας στην παρούσα εργασία.

1.3.1 Δορυφορικά Δίκτυα

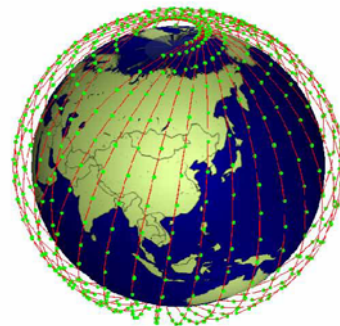
Οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του διαστήματος, για διάφορες εφαρμογές και για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι είναι οι πιο διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων φωνής και δεδομένων, καθώς και για την παροχή υπηρεσιών εύρεσης θέσης και πλοήγησης. Περιέχουν πολλούς αναμεταδότες, καθένας από τους οποίους λαμβάνει σε κάποιο τμήμα του φάσματος, ενισχύει το εισερχόμενο σήμα, και στη συνέχεια το επανεκπέμπει σε άλλη συχνότητα για να αποφευχθούν τυχόν παρεμβολές με το εισερχόμενο σήμα. Οι κατερχόμενες δέσμες ακτινών μπορεί να είναι ευρείες ώστε να καλύπτουν μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας της γης, ή να είναι στενές ώστε να καλύπτουν μια περιοχή με διάμετρο λίγες εκατοντάδες χιλιόμετρα μόνο (bent-pipe).

Υπάρχουν τρεις περιοχές που μπορούν τα τοποθετηθούν οι δορυφόροι με ασφάλεια. Οι δορυφόροι Γεωστατικής Γήινης Τροχιάς (Geostationary Earth Orbit – GEO) τοποθετούνται σε ύψος 35.000 km περίπου και έχουν το χαρακτηριστικό ότι έχουν περίοδο τροχιάς 24 ώρες όσες δηλαδή και η γη γύρω από τον εαυτό της. Έτσι ένας δορυφόρος σε γεωστατική τροχιά φαίνεται από τη γη σαν να μην κινείται και δεν χρειάζεται πολύπλοκα επεξεργαστικά συστήματα για να υπολογίζεται συνεχώς η θέση του. Αυτοί οι δορυφόροι μπορούν να καλύψουν μεγάλο μέρος της επιφάνειας της γης επειδή έχουν πολύ μεγάλο αποτύπωμα, αλλά απαιτούν ισχυρούς πομπούς λόγω της μεγάλης τους απόστασης από τη γη. Οι δορυφόροι Μέσης Γήινης Τροχιάς (Medium Earth Orbit – MEO) τοποθετούνται σε ύψος 5.000-15.000 km και από τη γη φαίνονται να κινούνται αργά, έχοντας περίοδο γύρω στις 6 ώρες. Έτσι, θα πρέπει να παρακολουθείται η θέση τους καθώς κινούνται. Έχουν μικρότερο αποτύπωμα και απαιτούν πομπούς μικρότερης ισχύος από τους GEO. Δεν χρησιμοποιούνται για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς προς το παρόν. Μια εφαρμογή που έχουν είναι το Παγκόσμιο Σύστημα Ανεύρεσης Θέσης (Global Positioning System – GPS) που χρησιμοποιεί 24 δορυφόρους MEO. Οι δορυφόροι Χαμηλής Γήινης Τροχιάς (Low Earth Orbit – LEO) τοποθετούνται σε ύψος κάτω από 1.500 km περίπου και έχουν πολύ μικρή περίοδο περιστροφής γύρω από τη γη. Κατά συνέπεια απαιτούνται πολλοί τέτοιοι δορυφόροι για να έχουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι οι σταθμοί εδάφους δεν χρειάζονται πολύ ισχύ λόγω της πολύ μικρής απόστασης από την επιφάνεια της γης. Επίσης, χρειάζονται πολύ λιγότερη ενέργεια για να τεθούν σε τροχιά. Αυτό το είδος δορυφόρων κινείται μέσα στην ατμόσφαιρα που είναι πολύ αραιή σε αυτά τα ύψη δημιουργώντας ελάχιστες τριβές. Χρησιμοποιούνται ήδη για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς (π.χ. πρόσβαση στο Internet, κινητή τηλεφωνία) όπως και οι δορυφόροι GEO.

Ένας σύγχρονος δορυφόρος έχει γύρω στους 40 αναμεταδότες, με 80 MHz εύρος ζώνης ο καθένας. Στους πρώτους δορυφόρους η διαίρεση των αναμεταδοτών σε κανάλια ήταν στατική καθώς το εύρος ζώνης διαμοιραζόταν σε σταθερές ζώνες συχνοτήτων. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται τεχνικές πολυπλεξίας. Μέχρι πρόσφατα συνηθέστερη στα δορυφορικά κανάλια ήταν η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (FDM) αν και πλέον χρησιμοποιείται κυρίως η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM). Τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών καναλιών επηρεάζουν την συμπεριφορά του συστήματος που πρέπει να υλοποιηθεί περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο μέσο δικτύωσης. Καταρχήν υπάρχει ένα όριο στην μετάδοση των δεδομένων λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός. Έτσι όσον αφορά τους GEO απαιτείται μέσος χρόνος 239,6 ms για να διαδοθεί ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα διανύοντας δύο φορές την απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και της γης. Η καθυστέρηση διάδοσης μπορεί να αυξηθεί λόγω εσωτερικής επεξεργασίας του σήματος στον δορυφόρο ή αν η σύνδεση περιλαμβάνει πολλά άλματα (hops) ή συνδέσμους μεταξύ δορυφόρων, καθώς και από άλλους παράγοντες που έχουν να κάνουν με την δρομολόγηση. Από την άλλη οι LEO έχουν μια καθυστέρηση διάδοσης της τάξης των 80ms και επιπλέον καθυστερήσεις μπορούν να εμφανιστούν όταν ένας δορυφόρος χάνεται από το πεδίο λήψης ενός επίγειου σταθμού αλλά εμφανίζεται στο πεδίο λήψης ενός άλλου, με αποτέλεσμα το κανάλι να μετακινείται σε αυτόν. Τα δορυφορικά κανάλια εξαρτώνται επίσης καθοριστικά από τον θόρυβο. Λόγω της πολύ μεγάλης απόστασης, το σήμα

εξασθενεί σε μεγάλο βαθμό. Επιπρόσθετα, οι υψηλές συχνότητες που χρησιμοποιούνται απορροφώνται συνήθως από την βροχή.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν επιχειρήσεις που προσφέρουν πρόσβαση στο Internet με χρήση δορυφόρων (συνήθως GEO). Υπάρχουν τρία είδη τέτοιων συνδέσεων. Η πρώτη από αυτές είναι η σύνδεση απευθείας στον χρήστη, η οποία ενώνει τον χρήστη με ένα δορυφορικό σύστημα απευθείας, μέσω ενός δορυφορικού πιάτου. Αν και αυτή η λύση θεωρείται πολύ ακριβή λόγω του εξοπλισμού που θα πρέπει να έχει κάποιος, το σύστημα Teledesic (Εικόνα 7) υπόσχεται μεγάλες ταχύτητες αποστολής (100 Mbps) και λήψης (720 Mbps) χρησιμοποιώντας μια μικρή σταθερή κεραία. Βέβαια το Teledesic θα χρησιμοποιεί δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (συνολικά 30), σε αντίθεση με τα υπόλοιπα συστήματα Internet over Satellite. Μέχρι τώρα η λύση που χρησιμοποιείται είναι τα δεδομένα να στέλνονται μέσω μιας φτηνής αργής γραμμής και να λαμβάνονται μέσω του GEO δορυφόρου με ταχύτητες που φτάνουν τα 45 Mbps. Το δεύτερο είδος συνδέσεων είναι η άμεση δορυφορική σύνδεση μέσω ISP. Εδώ ο ISP έχει την σύνδεση με ένα δορυφορικό σύστημα και την χειρίζεται αναλόγως. Πάλι όμως τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω μιας αργής συμβατικής σύνδεσης και λαμβάνονται μέσω του δορυφόρου. Τρίτη περίπτωση είναι η έμμεση δορυφορική σύνδεση μέσω ISP στην οποία ο ISP δεν έχει κάποια συμφωνία με κάποια δορυφορική εταιρεία αλλά μέσω άλλης εταιρείας παρόχου Internet προσφέρει αυτήν την υπηρεσία. Γενικά οι ταχύτητες αποστολής δεδομένων μέσω δορυφόρων ανέρχεται σε 5 Mbps και οι ταχύτητες λήψης 45 Mbps.



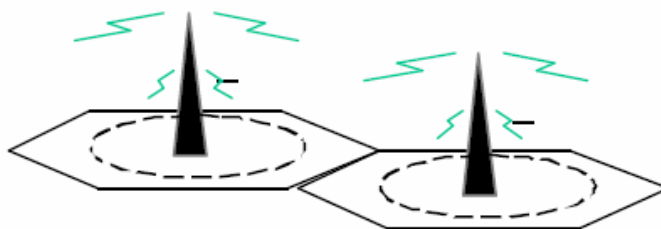
Εικόνα 7. Αστερισμός (constellation) δορυφόρων του συστήματος Teledesic.

Επιπλέον οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν τους δορυφόρους και για τηλεφωνικούς σκοπούς. Ένα σύστημα που υποσχόταν πολλά είναι το Iridium παρά το γεγονός ότι απέτυχε. Αποτελείται από 66 δορυφόρους LEO τοποθετημένους σε ύψος 750 km. Κάθε δορυφόρος υποστηρίζει μέχρι 48 κυψέλες (σημειακές ακτίνες), έτσι ώστε όλοι μαζί να καλύπτουν όλη την επιφάνεια της γης. Επίσης κάθε δορυφόρος έχει χωρητικότητα 3840 καναλιών, δίνοντας ένα σύνολο από 253.440 κανάλια για μετάδοση φωνής και δεδομένων. Με μία φορητή συσκευή σαν τα κινητά τηλέφωνα θα μπορούσε κάποιος να κάνει τηλεφωνικές κλήσεις σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Η συσκευή αυτή απαιτεί μικρή ισχύ για την εκπομπή από την γη λόγω της μικρής απόστασης με τον δορυφόρο. Η μεταγωγή γίνεται στο διάστημα μεταξύ των δορυφόρων οι οποίοι απαιτούν επιπλέον εξοπλισμό μεταγωγής μέσω δορυφόρων. Μια εναλλακτική λύση σε σχέση με το Iridium είναι το Globalstar που χρησιμοποιεί 48 δορυφόρους LEO αλλά η μεταγωγή γίνεται στο έδαφος σε αντίθεση με το Iridium.

1.3.2 Κυψελικά Δίκτυα

Τα κυψελικά δίκτυα (cellular networks) χρησιμοποιούνται κυρίως σήμερα από τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, καθώς και από διάφορα συστήματα που σχετίζονται με την μετάδοση φωνής (π.χ. ασύρματα τηλέφωνα –cordless phones– τύπου DECT) . Το γεγονός αυτό αναμένεται να αλλάξει χάρη και στην έλευση της κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς που θα υποστηρίξει και μετάδοση δεδομένων υψηλού ρυθμού. Άλλωστε τα ήδη υπάρχοντα συστήματα υποστηρίζουν συνήθως την μετάδοση σύντομων μηνυμάτων δεδομένων (π.χ. SMS, MMS ή ακόμα και μεταφορά υπερκειμένου με χρήση WAP ή i-mode). Πρέπει να σημειωθεί ότι και το IEEE 802.11, όταν λειτουργεί σε infrastructure mode, αποτελεί ουσιαστικά ένα κυψελικό δίκτυο.

Στα κυψελικά δίκτυα ο χώρος κάλυψης χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, τα οποία ονομάζονται κυψέλες (cells). Κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης (base station) και κάθε σταθμός που βρίσκεται εντός των ορίων της κυψέλης μπορεί να επικοινωνεί μόνο με τον σταθμό βάσης (βέβαια μπορεί να υπάρχουν και υβριδικές καταστάσεις όπου κάποιοι ή όλοι οι σταθμοί μπορεί να επικοινωνούν άμεσα με κάποιους άλλους ή και με έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης) ένα παράδειγμα ενός τέτοιου δικτύου με δύο σταθμούς βάσης φαίνεται στην Εικόνα 8. Σε κάθε σταθμό βάσης εκχωρείται ένα μέρος από το συνολικό φάσμα συχνοτήτων με χρήση κάποιας μεθόδου πολύπλεξης, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών σταθμών βάσης. Επιπρόσθετα, κάθε χρήστης που βρίσκεται σε μία κυψέλη χρησιμοποιεί έναν πομπό μικρής ισχύος ώστε να ακούγεται σε μια μικρή μόνο γεωγραφική περιοχή. Τα μεγέθη των κυψελών μπορεί να έχουν διαφορετικά μεγέθη τα οποία μπορεί να κυμαίνονται από μερικές δεκάδες μέτρα (π.χ. ένα γραφείο μιας εταιρείας) μέχρι δεκάδες χιλιόμετρα (π.χ. κυψέλες κινητής τηλεφωνίας σε αγροτικές περιοχές).



Εικόνα 8. Κυψελικό δίκτυο με δύο σταθμούς βάσης.

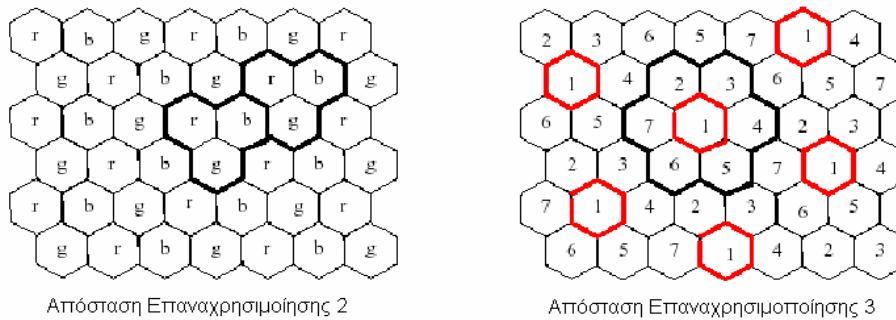
Συχνά, κυρίως στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, οι κυψέλες οργανώνονται έτσι ώστε γειτονικοί σταθμοί βάσης να είναι περίπου ισαπέχοντες, με αποτέλεσμα η μορφή των κυψελών να μπορεί να προσεγγιστεί από εξάγωνα (Εικόνα 9). Κάθε χρήστης προσδιορίζει την κυψέλη στην οποία ανήκει με βάση την ισχύ του σήματος που λαμβάνει από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι είναι πιθανόν ένας χρήστης να

μην επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης που βρίσκεται πλησιέστερα σε αυτόν (π.χ. λόγω ύπαρξης φυσικών εμποδίων). Οι σταθμοί βάσης μπορεί να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους είτε με την χρήση ραδιοκυμάτων είτε με την χρήση ενός ενσύρματου δικτύου (π.χ. στην κινητή τηλεφωνία κάθε σταθμός βάσης επικοινωνεί με ένα Κινητό Κέντρο Μεταγωγής (Mobile Switching Center – MSC), το οποίο με την σειρά του μπορεί να συνδέεται με το Δημόσιο Δίκτυο Σταθερής Τηλεφωνίας – PSTN).



Εικόνα 9. Πρότυπα διάδοσης ακτινοβολίας σε κυψελικά δίκτυα.

Ο βασικός λόγος χρήσης κυψελικών δικτύων είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, που αυτά παρέχουν. Η ιδέα της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων είναι ότι κυψέλες που απέχουν τόσο μεταξύ τους, ώστε να μην δημιουργούνται παρεμβολές, μπορούν να χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δυνατότητα υποστήριξης περισσότερων χρηστών από το δίκτυο, από αυτούς που θα μπορούσε να υποστηρίξει σε περίπτωση που ολόκληρο το φάσμα χρησιμοποιούνταν σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Συγκεκριμένα αν θεωρήσουμε ένα κυψελικό δίκτυο με συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης που αντιστοιχεί σε S κανάλια και υποθέσουμε ότι ανά N κυψέλες, ή όπως λέγεται ομάδα (cluster), μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν τα ίδια κανάλια χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές τότε ο διαθέσιμος αριθμός καναλιών ανά κυψέλη θα είναι $k = S/N$. Αν μια ομάδα αντιγραφεί M φορές μέσα σε ένα δίκτυο ο συνολικός αριθμός καναλιών στο σύστημα θα είναι $C = MkN = \Lambda S/N$, όπου $\Lambda = MN$ είναι ο συνολικός αριθμός κυψελών στο σύστημα. Από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι η χωρητικότητα ενός καναλιού είναι ανάλογη του αριθμού M , των φορών που μια ομάδα συχνοτήτων (καναλιών) ξαναχρησιμοποιείται. Το N που ονομάζεται μέγεθος του cluster (και τυπικά είναι ίσος με 4, 7 ή 12) καθορίζει το άνω όριο της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών και ο αντίστροφός του, $1/N$ ορίζει τον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων (frequency reuse factor), ο οποίος αντιπροσωπεύει το ποσοστό του συνόλου των διαθέσιμων συχνοτήτων του συστήματος που ανατίθεται σε κάθε κυψέλη. Για μια απεικόνιση της ιδέας της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και των ομάδων δείτε την Εικόνα 10.



Εικόνα 10. Πρότυπα επαναχρησιμοποίησης συχνотήτων για $N=3$ και για $N=7$.

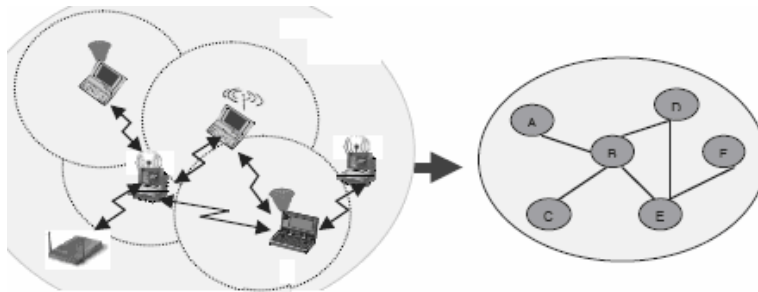
Οι κυριότερες παρεμβολές που εμφανίζονται σε κυψελικά δίκτυα και οι οποίες καθορίζουν κατά συνέπεια τον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνотήτων είναι οι παρεμβολές που δημιουργούν χρήστες που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι σε διαφορετικές κυψέλες (co-channel interference) και οι παρεμβολές που δημιουργούν χρήστες που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη και χρησιμοποιούν γειτονικά κανάλια (adjacent channel interference). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί χωρητικότητας στα κυψελικά δίκτυα καθορίζονται κυρίως από παρεμβολές και όχι από τον θόρυβο του καναλιού.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα σε κυψελικά δίκτυα είναι η κινητικότητα των χρηστών. Η κινητικότητα των χρηστών δημιουργεί ένα σύνολο από προβλήματα τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν. Έτσι, το βασικό πρόβλημα που προκύπτει από την κινητικότητα των χρηστών είναι η ανάγκη για αλλαγή του χρησιμοποιούμενου καναλιού, διαδικασία που ονομάζεται handoff ή handover, ενώ συχνά στα ασύρματα LAN λέγεται roaming. Η ανάγκη για αλλαγή καναλιού προκύπτει όταν ένας χρήστης μετακινείται από μία κυψέλη σε μία άλλη, κάτι το οποίο δεν σημαίνει υποχρεωτικά και γεωγραφική μετακίνηση, αλλά απλώς την μείωση της ισχύος του σήματος του σταθμού βάσης στον οποίο ανήκε ο χρήστης. Με την διαδικασία του handoff η διαχείριση του χρήστη μεταφέρεται από τον ένα σταθμό βάσης σε έναν γειτονικό. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από το handoff είναι η πιθανότητα στην κυψέλη στην οποία θέλει να μεταβεί ο χρήστης να μην υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια, με αποτέλεσμα ο χρήστης να απορριφθεί. Εξαιτίας αυτού και κάποιων άλλων προβλημάτων, τα handoffs θα πρέπει να εκτελούνται επιτυχώς και όσο το δυνατό σπανιότερα.

Τελειώνοντας την περιγραφή των κυψελικών δικτύων, πρέπει να αναφέρουμε ότι το κύριο πλεονέκτημά των κυψελικών δικτύων είναι η δυνατότητα αύξησης του υποστηριζόμενου αριθμού χρηστών τους με απλό τρόπο. Από την άλλη τα βασικότερα μειονεκτήματά τους έχουν να κάνουν με την αντιμετώπιση της κινητικότητας των χρηστών, όπως για παράδειγμα προβλήματα που προκύπτουν από την ανάγκη αλλαγής της δικτυακής διεύθυνσης των υπολογιστών. Τα προβλήματα αυτά ενισχύουν την ανάγκη για ανάπτυξη νέων λύσεων, μία από τις οποίες είναι τα αδόμητα δίκτυα.

1.3.3 Αδόμητα Δίκτυα

Τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα (wireless ad hoc networks) αποτελούνται από κόμβους (σταθμούς) που συνδέονται δυναμικά μεταξύ τους (Εικόνα 11). Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν υποθέτουν την ύπαρξη μιας σταθερής υποδομής. Οι κόμβοι ενός αδόμητου δικτύου μπορούν να είναι κινητοί ή σταθεροί με μεταβαλλόμενες ακτίνες μετάδοσης. Βασικό χαρακτηριστικό των αδόμητων δικτύων είναι ότι οι κόμβοι τους παίζουν ενεργό ρόλο κατά την δρομολόγηση των πακέτων, προωθώντας εκτός από τα δικά τους πακέτα και τα πακέτα γειτονικών κόμβων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που ο αποστολέας και ο παραλήπτης ενός πακέτου δεν βρίσκονται εντός της ακτίνας ο ένας του άλλου (ή πιθανόν μόνο ο ένας από τους δύο βρίσκεται εντός της ακτίνας του άλλου).



Εικόνα 11. Ένα αδόμητο δίκτυο και η τοπολογία που προκύπτει.

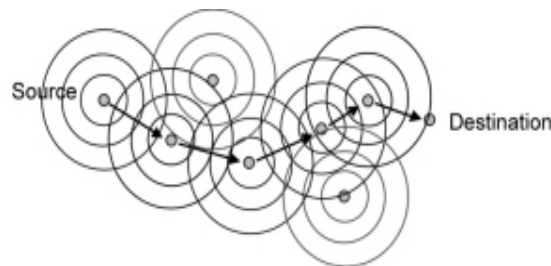
Η σημασία των αδόμητων δικτύων είναι πολύ μεγάλη, κυρίως χάρη στην μεγάλη ευκολία και ταχύτητα με την οποία μπορούν να εγκατασταθούν, αφού δεν απαιτούν την ύπαρξη κάποιας σταθερής υποδομής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της δυναμικής τους φύσης είναι η εύκολη προσθήκη και απομάκρυνση νέων κόμβων, καθώς και το γεγονός ότι κάθε κόμβος εξαρτάται μόνο από τους γειτονικούς του, με αποτέλεσμα αυξημένη αξιοπιστία. Έτσι, τα αδόμητα δίκτυα χρησιμοποιούνται συχνά σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης όπου πρέπει να υπάρχει γρήγορη ανάπτυξη επικοινωνιακών δικτύων με περιορισμένες ή μηδενικές υποδομές σε πιθανόν εχθρικό περιβάλλον (π.χ. σε εχθρική χώρα, σε δάση, στην θάλασσα, σε περιοχές που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές). Επιπρόσθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις που υπάρχει άμεση ανάγκη για την παροχή δικτυακών υπηρεσιών χωρίς την ύπαρξη των αναγκαίων υποδομών (π.χ. σε ένα συνέδριο, σε μία συνάντηση εργασίας σε ένα ξενοδοχείο κ.α.). Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται μερικές από τις κυριότερες εφαρμογές που (αναμένεται ότι θα) χρησιμοποιούνται τα αδόμητα δίκτυα.

Εφαρμογή	Περιγραφή / Παρεχόμενες Υπηρεσίες
Τακτικά Δίκτυα	Στρατιωτικού τύπου επιχειρήσεις, αυτοματοποιημένα πεδία μαχών
Δίκτυα Αισθητήρων	Συλλογές από συσκευές ενσωματωμένων αισθητήρων (embedded sensor devices), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την συλλογή σε πραγματικό χρόνο πληροφοριών (π.χ. με μετεωρολογικά δεδομένα, σεισμικά δεδομένα)
Υπηρεσίες Ανάγκης	Επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης (π.χ. άμεση ανάπτυξη δικτύων επικοινωνιών σε περιπτώσεις σεισμών, παρακολούθηση ασθενή κατά την διάρκεια της μεταφοράς του στο νοσοκομείο)
Παροχή Οικιακών και Εταιρικών Δικτυακών Υπηρεσιών	Π.χ. δικτύωση των οικιακών συσκευών (τηλεόρασης, στερεοφωνικού, υπολογιστή, ψηφιακής βιντεοκάμερας κ.τ.λ.), διασύνδεση των PDA των υπαλλήλων της αποθήκης μιας εταιρίας
Εμπορικές Χρήσεις	Ηλεκτρονικό Εμπόριο: π.χ. αγορές από παντού Επιχειρήσεις: π.χ. πρόσβαση σε εταιρικές πληροφορίες ενώ βρισκόμαστε σε κίνηση Υπηρεσίες εν Κινήσει (vehicular services): π.χ. ανταλλαγή πληροφοριών για την κατάσταση του δρόμου μεταξύ διερχόμενων οχημάτων, πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες, ανταλλαγή μουσικής
Εκπαιδευτικές Εφαρμογές	Ταχύτατη ανάπτυξη δικτύων σε αίθουσες διδασκαλίας, συνεδριακούς χώρους, κατά την διάρκεια της επίσκεψης στο μουσείο κ.τ.λ.
Διασκέδαση	Π.χ. παιχνίδια πολλών χρηστών (multiuser games), ρομποτικά κατοικίδια
Υπηρεσίες με Βάση την Γεωγραφική Θέση (location-aware services)	Π.χ. αυτόματη μεταφορά του χώρου εργασίας στην τρέχουσα θέση, προβολή πληροφοριών για τα εστιατόρια και τα βενζινάδικα της περιοχής στην οποία βρισκόμαστε

Πίνακας 1. Εφαρμογές των ασύρματων αδόμητων δικτύων.

Κύριο χαρακτηριστικό των αδόμητων δικτύων είναι ότι παρουσιάζουν σημαντική ανομοιογένεια, αφού κάθε κόμβος μπορεί να διαφέρει από τους υπόλοιπους σε πολλά χαρακτηριστικά, όπως την υπολογιστική ισχύ, την ακτίνα εκπομπής ή την διάρκεια ζωής των μπαταριών του (όταν π.χ. είναι ένας φορητός υπολογιστής ή ένας PDA). Επιπλέον, τα διάφορα αδόμητα δίκτυα μπορεί να διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους, όπως τους χρησιμοποιούμενους ρυθμούς επικοινωνίας, το αν συνυπάρχουν ή όχι με άλλα δίκτυα τα οποία έχουν κάποια σταθερή υποδομή ή το αν υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών και με τι ρυθμούς. Πολλές φορές, τα κινητά αδόμητα δίκτυα (mobile ad hoc networks), δηλαδή τα αδόμητα δίκτυα των οποίων οι κόμβοι είναι δυνατόν να κινούνται εν λειτουργία, αναφέρονται ως MANET.

Στην επόμενη γενιά ασύρματων συστημάτων (4G), τα MANET αναμένεται, όπως αναφέρθηκε, να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο. Στην γενική περίπτωση σχηματίζονται δυναμικά από ένα αυτόνομο σύστημα κινητών κόμβων (mobile nodes). Οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινούνται τυχαία και ανεξέλεγκτα, με αποτέλεσμα η τοπολογία (topology) του δικτύου να μπορεί να μεταβληθεί ραγδαία και απροσδιόριστα. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να λειτουργεί σε πλήρη αυτονομία (standalone) ή να διασυνδέεται με το Internet (ή γενικότερα κάποιο ενσύρματο δίκτυο). Εξαιτίας της φύσης τους, τα MANET δεν μπορεί να βασίζονται και κατά συνέπεια δεν απαιτούν την ύπαρξη οποιασδήποτε σταθερής υποδομής, όπως για παράδειγμα έναν σταθμό βάσης. Ενώ, επίσης, καθώς στην γενική περίπτωση τα δρομολόγια μεταξύ των κόμβων απαιτούν περισσότερα από ένα άλματα (hops), είναι συνηθισμένο τα δίκτυα αυτά να αποκαλούνται multihop ασύρματα αδόμητα δίκτυα (Εικόνα 12).



Εικόνα 12. Τα MANET αναφέρονται συχνά και ως “multihop wireless ad hoc networks”, εφόσον τα δρομολόγια μεταξύ των κόμβων απαιτούν συνήθως περισσότερα από ένα άλματα (hops).

Σημαντικό ρόλο σε κάθε αδόμητο δίκτυο διαδραματίζει η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων, τόσο μικρότερος θα είναι ο μέσος αριθμός μεταδόσεων που θα απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου από ένα κόμβο σε κάποιον άλλο. Από την άλλη μεριά η μικρή ακτίνα εκπομπής των κόμβων μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων, καθώς και τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα εκπομπής, τόσο περισσότερες μεταδόσεις θα μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπρόσθετα, η ακτίνα μετάδοσης παίζει καθοριστικό ρόλο και στην κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου, η οποία

είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στα περισσότερα αδόμητα δίκτυα. Έτσι, η ακτίνα μετάδοσης θα πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατό μικρότερη, φροντίζοντας όμως ταυτόχρονα να μην είναι τόσο μικρή ώστε το δίκτυο να παύει να είναι συνεκτικό.

Δυστυχώς, αν και η προσέγγιση της αδόμητης αρχιτεκτονικής των συστημάτων έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως την ευκολία ανάπτυξης (deployment), την αυτό-οργάνωση (self-organization), την αυτό-διαμόρφωση (self-configuration), την αυτό-διαχείριση (self-administration) και την ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance), δυστυχώς δεν έρχεται δωρεάν. Τα MANET εκτός από τα παραδοσιακά προβλήματα που κληρονομούν από τα ασύρματα δίκτυα, έχουν να αντιμετωπίσουν και πολλά προβλήματα που οφείλονται στην κίνησή τους, στην multihop φύση τους και στην έλλειψη σταθερής υποδομής. Συγκεκριμένα, οι σχεδιαστές ενός MANET έχουν να αντιμετωπίσουν τα ακόλουθα προβλήματα:

- **Έλλειψη κεντρικής υποδομής:** Η έλλειψη οποιασδήποτε κεντρικής οντότητας σημαίνει ότι η διαχείριση του δικτύου πρέπει να μοιραστεί/ανατεθεί σε όλους (ή σε αρκετούς) από τους κόμβους του δικτύου. Αυτό καθιστά δύσκολη την ανίχνευση λαθών, αλλά και γενικότερα την διαχείριση του δικτύου (π.χ. διαμοιρασμό των πόρων του).
- **Δυναμικά Μεταβαλλόμενη Τοπολογία:** Στα MANET η τυχαία κίνηση των κόμβων σε συνδυασμό με την multihop φύση τους οδηγεί σε συχνές και απρόβλεπτες αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, με αποτέλεσμα συχνές αλλαγές στα δρομολόγια και διαμερισμούς (partitions) του δικτύου, οι οποίες οδηγούν σε απώλεια πακέτων.
- **Περιορισμοί στο Φυσικό Επίπεδο:** Από την φύση τους τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν εκπομπή για την μετάδοση της κίνησής τους και έχουν συνήθως περιορισμένη ακτίνα μετάδοσης. Αυτό οδηγεί σε προβλήματα όπως το πρόβλημα του κρυμμένου ή του εκτεθειμένου τερματικού και άλλων παρόμοιων. Η ύπαρξη συγκρούσεων θα πρέπει να θεωρείται δεδομένη, όπως επίσης και η αυξημένη απώλεια πακέτων λόγω λαθών στην μετάδοση.
- **Περιορισμένο Εύρος Ζώνης και Ποιότητα των Συνδέσμων:** Επειδή τα ασύρματα κανάλια διαθέτουν περιορισμένο εύρος ζώνης, είναι χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενα, επιρρεπή σε λάθη και εγγενώς ανασφαλή, ενώ η χωρητικότητά τους θα είναι πάντα μικρότερη από των ενσύρματων καναλιών. Κατά συνέπεια η αντιμετώπιση προβλημάτων συμφόρησης είναι αναπόφευκτα περισσότερο προβληματική.
- **Διαφοροποιήσεις στις Δυνατότητες Κόμβων και Συνδέσμων:** Κάθε κόμβος σε ένα MANET μπορεί να είναι εξοπλισμένος με μία ή περισσότερες ασύρματες διεπαφές (radio interfaces), οι οποίες μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες λήψης ή/και εκπομπής και οι οποίες ενδέχεται ακόμα και να λειτουργούν σε

διαφορετικές ζώνες συχνότητας. Αυτή η ετερογένεια στις ασύρματες δυνατότητες των κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε ασύμμετρους συνδέσμους. Επιπρόσθετα, κάθε κινητός κόμβος μπορεί να έχει διαφορετική διαμόρφωση υλικού ή/και λογισμικού, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις όσον αφορά τις επεξεργαστικές ικανότητες. Επομένως, ο σχεδιασμός δικτυακών πρωτοκόλλων για τόσο ετερογενή δίκτυα μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και να απαιτεί δυναμική προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες των ασύρματων καναλιών ή/και των κινητών κόμβων (αλλαγές στην διαθέσιμη ενέργεια, αλλαγές στην ποσότητα/κατανομή της κίνησης, αλλαγές στις παρεχόμενες υπηρεσίες κ.τ.λ.).

- **Λειτουργία με Περιορισμένη Ενέργεια:** Μιας και συνήθως οι κινητοί κόμβοι λειτουργούν με μπαταρίες, η ενέργεια που διαθέτουν είναι περιορισμένη. Αυτό με την σειρά του περιορίζει τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές που αυτοί οι κόμβοι μπορούν να υποστηρίξουν. Το πρόβλημα αυτό ενισχύεται στα MANET, εφόσον κάθε κόμβος αναλαμβάνει και τον ρόλο δρομολογητή, προωθώντας πακέτα για λογαριασμό άλλων κόμβων.
- **Ευρωστία (Robustness) και Αξιοπιστία του Δικτύου:** Στα MANET η συνεκτικότητα του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της δρομολόγησης και της προώθησης μέσω πολλαπλών κόμβων. Παρόλο που αυτό αντικαθιστά τους περιορισμούς για εξασφάλιση συνεκτικότητας των ενσύρματων δικτύων, εισάγει επίσης και αρκετές σχεδιαστικές προκλήσεις. Εξαιτίας καταστροφών συνδέσμων, εγωιστικής συμπεριφοράς, συμφόρησης, έλλειψης ενέργειας ή και άλλων λόγων, πολλές φορές κάποιος κόμβος αδυνατεί να προωθήσει πακέτα. Αναξιόπιστοι κόμβοι και σύνδεσμοι έχουν σοβαρή επίδραση στην συνολική απόδοση του δικτύου, ενώ η έλλειψη κεντρικού ελέγχου και διαχείρισης καθιστά την εύκολη και γρήγορη ανίχνευση και απομόνωσή τους εξαιρετικά περίπλοκη.
- **Ασφάλεια του Δικτύου:** Πέρα από τα προβλήματα ασφαλείας όλων των ασύρματων δικτύων, τα MANET έχουν να αντιμετωπίσουν και το γεγονός ότι η κίνηση αναγκαστικά διέρχεται μέσω αναξιόπιστων ή και ενδεχομένως κακόβουλων κόμβων. Ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να υποκλέψουν, αλλοιώσουν ή ακόμα και να παρεμποδίσουν την κίνηση που διέρχεται από αυτούς. Εξαιτίας της έλλειψης κεντρικής υποδομής δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένας κεντρικός έλεγχος ασφαλείας και άρα η ασφάλεια επαφίεται σε κάθε ξεχωριστό κόμβο.
- **Κλιμακωσιμότητα (Scalability) του Δικτύου:** Οι περισσότεροι υπάρχοντες αλγόριθμοι διαχείρισης δικτύων έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία σε σταθερά σχετικά μικρού μεγέθους ασύρματα δίκτυα. Πολλές εφαρμογές των MANET αφορούν μεγάλα δίκτυα με αρκετές εκατοντάδες (ή και χιλιάδες στην περίπτωση των δικτύων αισθητήρων) κόμβους. Η κλιμακωσιμότητα του δικτύου είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ανάπτυξη αυτών των δικτύων. Η πρόοδος προς ένα μεγάλο δίκτυο που θα αποτελείται από κόμβους περιορισμένων δυνατοτήτων δεν είναι τετριμμένη και παρουσιάζει πολλές προκλήσεις σε θέματα όπως η

διευθυνσιοδότηση (addressing), η δρομολόγηση (routing), η διαχείριση της θέσης (location management), η διαχείριση του δικτύου, η διαλειτουργικότητα (interoperability), η ασφάλεια (security), η δημιουργία υψηλής χωρητικότητας ασύρματων τεχνολογιών και πολλά ακόμη.

- **Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS):** Οι εγγυήσεις για παροχή ορισμένης QoS είναι κρίσιμη για την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων (multimedia). Οι απαιτήσεις QoS τυπικά αναφέρονται σε ένα ευρύ σύνολο μετρικών, συμπεριλαμβανομένων της ρυθμαπόδοσης (throughput), της απώλειας πακέτων, της καθυστέρησης (delay), της διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter), του ρυθμού λαθών και διαφόρων άλλων. Τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί των ασύρματων δικτύων και ειδικότερα των MANET καθιστούν την επίτευξη των απαιτούμενων χαρακτηριστικών QoS εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση.

Τα παραπάνω προβλήματα εισάγουν ένα μεγάλο πλήθος προκλήσεων και ερευνητικών κατευθύνσεων, κάποιες από τις οποίες συνδέονται άμεσα με τα αδόμητα δίκτυα, όπως η δρομολόγηση που μας απασχολεί σε αυτή την εργασία, και κάποιες που έχουν να κάνουν γενικά με τα ασύρματα δίκτυα. Στον Πίνακα 2 φαίνονται κάποιες από τις βασικές προκλήσεις για κάθε δικτυακό επίπεδο.

Παρά τον μεγάλο όγκο έρευνας και την πρόσφατη πρόοδο στον τομέα των αδόμητων δικτύων, τόσο στην ερευνητική κοινότητα όσο και στην βιομηχανία, ένας μεγάλος αριθμός των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραμένει ανοιχτός. Έτσι, για να μπορέσουν τα MANET να αναπτυχθούν σε μεγάλη κλίμακα και να γίνουν αντικείμενο εμπορικής εκμετάλλευσης είναι επιτακτική η ανάγκη της αντιμετώπισης τους. Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, θα επικεντρωθούμε στο πρόβλημα της δρομολόγησης μεταξύ μιας πηγής και ενός μοναδικού προορισμού (unicasting), το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας για την παροχή των υπηρεσιών των MANET.

Δικτυακά Επίπεδα (OSI)

Προκλήσεις σε κάθε επίπεδο

E7: Επίπεδο Εφαρμογών E6: Επίπεδο Παρουσίασης E5: Επίπεδο Συνόδου	Νέες εμπορικές εφαρμογές (killer applications) Αυτό-ρύθμιση του δικτύου (auto-configuration) Υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία (location-aware services) Ασφάλεια	<u>Όλα τα στρώματα</u> Διαχείριση ενέργειας QoS Αξιοπιστία Κλιμακωσιμότητα Πειραματική αξιολόγηση μέσω προσομοίωσης ή/και υλοποιήσεων Βελτίωση απόδοσης Δημιουργία εργαλείων υποστήριξης υλικού και λογισμικού
E4: Επίπεδο Μεταφοράς	Ασύρματο TCP, UDP	
E3: Επίπεδο Δικτύου	Δρομολόγηση Διευθυνσιοδότηση Πολυδιανομή (multicasting)	
E2: Επίπεδο Συνδέσμου Μετάδοσης Δεδομένων	Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο (Medium Access Control – MAC) Αποτελεσματικότερη διόρθωση λαθών	
E1: Φυσικό Επίπεδο	Αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της κατανομής του μεταξύ των χρηστών	

Πίνακας 2. Κυριότερες ερευνητικές προκλήσεις στα αδόμητα δίκτυα.

2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Το πρόβλημα της δρομολόγησης είναι η κύρια λειτουργία του επιπέδου δικτύου και αφορά πρωτίστως τα δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Στα περισσότερα δίκτυα τα πακέτα πρέπει να κάνουν περισσότερα από ένα άλματα για να ολοκληρώσουν το ταξίδι τους. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι το τμήμα του λογισμικού του επιπέδου δικτύου που είναι αρμόδιο να αποφασίσει ποια γραμμή εξόδου (επόμενο άλμα) πρέπει να ακολουθήσει ένα εισερχόμενο πακέτο. Εάν το δίκτυο χρησιμοποιεί στο εσωτερικό του αυτοδύναμα πακέτα, η απόφαση αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται εκ νέου για κάθε πακέτο καθώς αυτό φτάνει, αφού το καλύτερο δρομολόγιο μπορεί να έχει μεταβληθεί από την προηγούμενη φορά.

Η δρομολόγηση περιλαμβάνει μια σειρά από διαδικασίες, όπως είναι η παρακολούθηση της τοπολογίας του δικτύου, η διάχυση της σχετικής με την τοπολογία πληροφορίας στους κόμβους του δικτύου, ο εντοπισμός των χρηστών μέσα στο δίκτυο, η επιλογή των καταλληλότερων διαδρομών και η προώθηση των πακέτων στις επιλεγμένες διαδρομές. Συχνά είναι χρήσιμο να γίνεται διάκριση ανάμεσα στη δρομολόγηση, η οποία είναι η λήψη της απόφασης σχετικά με τα δρομολόγια που θα χρησιμοποιούνται και της προώθησης (forwarding), η οποία είναι η ενέργεια που εκτελείται όταν φτάνει ένα πακέτο στον δρομολογητή. Οι διαδρομές που παράγουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης πρέπει συχνά να πληρούν κάποιες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), όπως ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, μέγιστη καθυστέρηση, μικρή μεταβλητότητα της καθυστέρησης (jitter), αξιοπιστία και άλλες, ανάλογα με την κατηγορία και την χρήση του δικτύου. Αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου ή στην κατάσταση των κόμβων και των συνδέσμων (π.χ. φορτίο ενός συνδέσμου, ενεργειακή κατάσταση ενός κόμβου κ.τ.λ.) καθιστούν αναγκαίες τροποποιήσεις σε υπάρχουσες διαδρομές. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης θα πρέπει να εντοπίζει και να ανταποκρίνεται γρήγορα στις αλλαγές στην κατάσταση του δικτύου και στις διαδρομές, με όσο το δυνατόν μικρότερη επιβάρυνση των πόρων του δικτύου, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ωφέλιμη ρυθμαπόδοση (throughput) των χρηστών.

Για την πραγματοποίηση της δρομολόγησης σε ένα δίκτυο απαιτείται η γνώση της τρέχουσας κατάστασής του. Υπάρχουν δύο τρόποι μέσω των οποίων ένας κόμβος μπορεί να έχει γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Ο πρώτος τρόπος αφορά την τοπική κατάσταση (local state) κάθε κόμβου, η οποία αφορά τις πληροφορίες που διαθέτει για την κατάστασή του, καθώς και για την κατάσταση των γειτόνων του (π.χ. μήκος ουρών, καθυστέρηση αποστολής ενός πακέτου σε κάθε γείτονά του κ.τ.λ.). Ο δεύτερος αφορά την καθολική κατάσταση (global state), η οποία αφορά το σύνολο των τοπικών καταστάσεων. Αντίθετα με την τοπική κατάσταση που (υποτίθεται) ότι είναι διαθέσιμη σε κάθε κόμβο κάθε στιγμή, η καθολική κατάσταση μπορεί να γίνει γνωστή μόνο μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων. Κάτι τέτοιο, όμως, εξαιτίας της κινητικότητας των κόμβων και των συχνών τοπολογικών αλλαγών είναι ιδιαίτερα δαπανηρό, ιδιαίτερα σε μεγάλα δίκτυα. Έτσι, εισάγεται το μοντέλο της μη-ακριβούς κατάστασης του δικτύου (imprecise network state model). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο οι αποφάσεις της δρομολόγησης επιτρέπεται να

βασίζονται σε ελλιπής πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου, μειώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο το κόστος από την συχνή ενημέρωση για αλλαγές στην τοπολογία..

Η πιο απλή μέθοδος δρομολόγησης που έχει προταθεί είναι η μέθοδος της πλημμύρας (flooding) κατά την οποία κάθε πακέτο μεταδίδεται σε ολόκληρο το δίκτυο. Προφανώς, η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά αναποτελεσματική, αφού σπαταλά μεγάλο μέρος των πόρων του δικτύου. Παρόλα αυτά η μέθοδος της πλημμύρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ειδικές περιπτώσεις δικτύων ή σε περιπτώσεις που επιθυμούμε την διανομή κάποιας πληροφορίας σε ολόκληρο το δίκτυο, ενώ είναι το βέλτιστο πρωτόκολλο δρομολόγησης όσον αφορά την από άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση των πακέτων. Μια ακόμα απλή μέθοδος δρομολόγησης είναι η μέθοδος της δρομολόγησης εκτροπής (deflection ή hot-potato routing), σύμφωνα με την οποία κάθε δρομολογητής προωθεί κάθε εισερχόμενο πακέτο σε οποιονδήποτε εξερχόμενο σύνδεσμο έχει το μικρότερο φορτίο, ακόμα και αν έτσι απομακρύνεται από τον προορισμό του. Παρόλο που αυτή η μέθοδος φαίνεται αναποτελεσματική, παρουσιάζει ενδιαφέρον σε περιπτώσεις όπου ο αποθηκευτικός χώρος των δρομολογητών είναι περιορισμένος.

Στην γενική περίπτωση, το πρόβλημα της δρομολόγησης αντιστοιχίζεται στην εύρεση ενός μονοπατιού σε ένα κατευθυνόμενο γράφο (graph). Συγκεκριμένα κάθε κόμβος του δικτύου αντιστοιχίζεται σε μια κορυφή του γράφου και κάθε σύνδεσμος μεταξύ δύο κόμβων αντιστοιχίζεται σε μια ακμή του γράφου. Για να διαλέξει ένα δρομολόγιο ανάμεσα σε ένα συγκεκριμένο ζεύγος κόμβων, ο αλγόριθμος δρομολόγησης υπολογίζει απλώς την συντομότερη διαδρομή ανάμεσά τους στο γράφο. Η έννοια της συντομότερης διαδρομής (shortest path) αξίζει κάποια επεξήγηση. Ένας τρόπος μέτρησης του μήκους μιας διαδρομής είναι το πλήθος των αλμάτων από κόμβο σε κόμβο. Ένα άλλο μέτρο είναι η γεωγραφική απόσταση μεταξύ των κόμβων. Υπάρχουν, όμως, πολλά ακόμα μέτρα σύγκρισης. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε σε κάθε ακμή μια ετικέτα με την μέση καθυστέρηση αναμονής και μετάδοσης των πακέτων στον αντίστοιχο σύνδεσμο. Αν χρησιμοποιήσουμε αυτές τις ετικέτες του γραφήματος, η συντομότερη διαδρομή θα είναι η ταχύτερη. Στην γενική περίπτωση οι ετικέτες των ακμών μπορεί να υπολογίζονται ως συναρτήσεις της απόστασης, του εύρους ζώνης, της μέσης κίνησης, του κόστους επικοινωνίας, του μέσου μήκους της ουράς αναμονής, της μετρούμενης καθυστέρησης και άλλων παραγόντων.

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα σε δύο κόμβους ενός γράφου. Ο γνωστότερος μεταξύ αυτών είναι ο αλγόριθμος του Dijkstra [19]. Η κεντρική ιδέα αυτού του αλγορίθμου είναι η εύρεση των συντομότερων διαδρομών από έναν κόμβο u προς όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου κατά σειρά αυξανόμενου μήκους. Ο αλγόριθμος διατηρεί για κάθε κόμβο v το κόστος $d[v]$ της τρέχουσας συντομότερης διαδρομής από τον u στον v . Αρχικά, ισχύει $d[u]=0$ και $d[k]=\infty$, για $k \neq u$. Όταν ο αλγόριθμος τερματίσει το $d[v]$ θα περιέχει την απόσταση του συντομότερου μονοπατιού από τον u στον v ή ∞ αν δεν υπάρχει τέτοιο μονοπάτι. Η βασική λειτουργία του αλγορίθμου του Dijkstra είναι η χαλάρωση των ακμών (edge relaxation): εάν υπάρχει μια ακμή από τον κόμβο k στον κόμβο v , τότε το συντομότερο μονοπάτι από τον u στον k (με κόστος $d[k]$) μπορεί να επεκταθεί σε ένα

μονοπάτι από τον u στον v με την προσθήκη της ακμής (k, v) . Το νέο μονοπάτι θα έχει μήκος $d[k] + w(k, v)$, όπου $w(k, v)$ είναι το κόστος της ακμής.

Ο αλγόριθμος του Dijkstra χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις στατικής δρομολόγησης, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου τα δρομολόγια μεταξύ των κόμβων δεν μεταβάλλονται σύμφωνα με τις αλλαγές του δικτύου (π.χ. αλλαγές στην τοπολογία ή στο φόρτο). Τα σύγχρονα δίκτυα υπολογιστών συνήθως χρησιμοποιούν δυναμικούς (ή προσαρμοστικούς) αλγόριθμους δρομολόγησης, οι οποίοι τείνουν να εκμεταλλεύονται καλύτερα τους πόρους του δικτύου και να ανταποκρίνονται καλύτερα σε αστοχίες. Οι δύο δημοφιλέστερες κατηγορίες δυναμικών αλγορίθμων δρομολόγησης είναι η δρομολόγηση με διανύσματα απόστασης (Distance Vectors) και η δρομολόγηση με κατάσταση συνδέσμων (Link States).

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης με διανύσματα απόστασης λειτουργούν υποχρεώνοντας κάθε δρομολογητή να διατηρεί έναν πίνακα που δίνει την καλύτερη γνωστή απόσταση προς κάθε προορισμό. Οι πίνακες αυτοί ενημερώνονται μέσω ανταλλαγής πληροφοριών με τους γείτονες κάθε κόμβου. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται αναφέρεται ως κατανεμημένος, ασύγχρονος Bellman-Ford και ήταν ο αρχικός αλγόριθμος δρομολόγησης του ARPANET, ενώ χρησιμοποιείται και στο Internet με το όνομα Routing Information Protocol (RIP). Στον αλγόριθμο Bellman-Ford θεωρούμε ότι κάθε κόμβος γνωρίζει την “απόσταση” από τους γείτονες του. Για παράδειγμα αν η απόσταση μετριέται σε άλματα, τότε όλοι οι γείτονες του έχουν απόσταση ένα, ενώ αν το μέτρο είναι το μήκος των ουρών, ο δρομολογητής απλώς εξετάζει κάθε ουρά. Κάθε T msec, κάθε δρομολογητής στέλνει σε κάθε γείτόνά του μια λίστα με το εκτιμώμενο κόστος προς κάθε προορισμό. Έτσι ένας κόμβος $i \neq 1$, μπορεί να υπολογίσει την απόσταση του από τον κόμβο 1, εκτελώντας περιοδικά την αναδρομή:

$$D_i = \min_{j \in N(i)} [d_{ij} + D_j],$$

όπου D_i και D_j είναι η εκτίμηση της απόστασης των κόμβων i και j από τον 1, $N(i)$ είναι το σύνολο των γειτόνων του i και d_{ij} είναι η απόσταση του i από τον j .

Η ιδέα της δρομολόγησης με κατάσταση συνδέσμων είναι απλή και μπορεί να οριστεί σε πέντε μέρη. Κάθε δρομολογητής πρέπει να κάνει τα εξής:

- Να ανακαλύψει τους γείτονες του και να μάθει τις διευθύνσεις δικτύου τους.
- Να μετρήσει το κόστος προς κάθε έναν από τους γείτονές του.
- Να κατασκευάσει ένα πακέτο που να περιέχει όλα όσα έμαθε.
- Να στείλει αυτό το πακέτο σε όλους τους άλλους δρομολογητές.
- Να υπολογίσει τη συντομότερη διαδρομή προς όλους τους άλλους δρομολογητές.

Ουσιαστικά, η πλήρης τοπολογία και όλες οι καθυστερήσεις μετρούνται πειραματικά και διανέμονται σε κάθε δρομολογητή. Στη συνέχεια μπορεί να εκτελεστεί ο αλγόριθμος του Dijkstra για να βρει τη συντομότερη διαδρομή προς κάθε άλλο δρομολογητή. Τα δύο πιο γνωστά πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα σε κατάσταση συνδέσμων είναι τα Open Shortest Path First (OSPF) και Intermediate System-Intermediate System (IS-IS), τα οποία είναι ουσιαστικά και τα δύο πιο δημοφιλή πρωτόκολλα δρομολόγησης στο Internet.

Προφανώς, καθεμιά από τις παραπάνω βασικές κατηγορίες αλγορίθμων παρουσιάζεται σε αρκετές παραλλαγές, ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές, όπως για παράδειγμα την ιεραρχική δρομολόγηση, ενώ κάθε κατηγορία δικτύων (οπτικά, δορυφορικά, ασύρματα, κυψελικά κ.τ.λ.) παρουσιάζει συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες που διαφοροποιούν το πρόβλημα της δρομολόγησης.

2.1. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΚΙΝΗΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η ανάπτυξη αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στα MANET και θεμελιώδης για την παροχή των υπηρεσιών για τα οποία προορίζονται. Ορισμένοι μοναδικοί συνδυασμοί χαρακτηριστικών των MANET κάνουν το πρόβλημα της δρομολόγησης εξαιρετικά ενδιαφέρον. Πρώτον, οι κόμβοι σε ένα MANET επιτρέπεται να κινούνται ανεξέλεγκτα και άναρχα, με αποτέλεσμα ένα πολύ δυναμικά μεταβαλλόμενο δίκτυο με ραγδαίες και συνεχείς τοπολογικές αλλαγές, οι οποίες οδηγούν σε συχνές καταστροφές και επανυπολογισμούς δρομολογίων. Ένα “καλό” πρωτόκολλο δρομολόγησης για ένα τέτοιο περιβάλλον θα πρέπει, επομένως, να προσαρμόζεται δυναμικά και γρήγορα στην μεταβαλλόμενη τοπολογία του δικτύου. Δεύτερον, τα ασύρματα κανάλια που χρησιμοποιούν τα MANET παρέχουν σημαντικά χαμηλότερο εύρος ζώνης, το οποίο επιπλέον αυξομειώνεται σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες (π.χ. λόγω παρεμβολών, κακών καιρικών συνθηκών κ.τ.λ.). Το γεγονός ότι τα ασύρματα δίκτυα είναι εκ φύσεως δίκτυα εκπομπής και οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων περιορισμένες αφήνει ελάχιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης για κάθε κόμβο. Συνεπώς, είναι ζωτικής σημασίας για κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης για MANET να είναι αποδοτικό όσον αφορά το εύρος ζώνης, προσθέτοντας ελάχιστες επιβαρύνσεις στο δίκτυο (routing overhead) και περιορίζοντας τις μεταδόσεις στις απολύτως απαραίτητες. Τρίτον, συχνά οι κόμβοι των MANET αποτελούνται από φορητές συσκευές, οι οποίες λειτουργούν με μπαταρίες και άρα διαθέτουν περιορισμένους ενεργειακούς πόρους. Έτσι, αν επιθυμούμε οι κόμβοι να παραμένουν ενεργοί για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, θα πρέπει τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των MANET να είναι αποδοτικά και όσον αφορά και την διαχείριση της ενέργειας των κόμβων, κάτι το οποίο ενισχύει την απαίτηση για μικρές επιβαρύνσεις από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Σαν συμπέρασμα, μπορούμε να πούμε ότι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα MANET πρέπει να ικανοποιούν ταυτόχρονα τους αντικρουόμενους στόχους για δυναμική προσαρμογή και μικρές επιβαρύνσεις, παρέχοντας επιπρόσθετα μια γενικά καλή απόδοση του δικτύου.

Τα κλασσικά πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν σχεδιαστεί για ενσύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένου του Internet, είναι ανεπαρκή για τα MANET, καθώς δεν υποθέτουν μόνο (σχεδόν) στατική τοπολογία, αλλά εισάγουν επίσης και υψηλές επιβαρύνσεις. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε μια έντονη ερευνητική δραστηριότητα και στην ανάπτυξη πολλών εξειδικευμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για MANET. Ενώ κάποια από τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί είναι ουσιαστικά εκδόσεις υπάρχοντων πρωτοκόλλων για ενσύρματα δίκτυα, βελτιστοποιημένες για λειτουργία σε MANET, πολλά από τα υπόλοιπα έχουν εισάγει νέες ιδέες για το πρόβλημα της δρομολόγησης, όπως για παράδειγμα την κατ' απαίτηση (on-demand ή reactive) δρομολόγηση. Σύμφωνα, με αυτή την κατηγορία πρωτοκόλλων τα δρομολόγια δημιουργούνται και συντηρούνται μόνο όταν και για όσο χρειάζονται. Η λογική αυτή βρίσκεται σε αντίθεση με την παραδοσιακή, βασιζόμενη σε πίνακες (table-driven ή proactive) λογική, η οποία απαντάται στο Internet. Άλλες “επαναστατικές” τεχνικές έχουν να κάνουν με την εκμετάλλευση πληροφοριών για την γεωγραφική θέση των κόμβων (π.χ. με την χρήση δεκτών GPS) ή πληροφοριών για την ενέργεια ή την ισχύ του σήματος των κόμβων.

Στην έως τώρα συζήτηση έχουμε υποθέσει σιωπηρά ότι ο γράφος που αναπαριστά το υποκείμενο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί μη κατευθυνόμενος (undirected). Στην πραγματικότητα η υπόθεση αυτή μπορεί να μην ισχύει στα κινητά (και γενικότερα στα ασύρματα) δίκτυα για διάφορους λόγους, όπως διαφορετικές εμβέλειες μετάδοσης των κόμβων (λόγω π.χ. μειωμένης ισχύς εκπομπής) ή παρουσία παρεμβολών. Ακόμα και στην περίπτωση ενός απόλυτα ομογενούς δικτύου οι διάφορες παρεμβολές καθιστούν το ασύρματο κανάλι τοπικά μεταβαλλόμενο. Συνήθως, οι κατευθυνόμενοι σύνδεσμοι (unidirectional links) αγνοούνται, καθώς υπάρχουν τόσο θεωρητικές [18], όσο και πειραματικές [36] ενδείξεις που υποδηλώνουν ότι η χρήση τέτοιων συνδέσμων δεν συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Αντίθετα, η προσπάθεια χρήσης τους εισάγει μεγάλη πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων. Άλλωστε πολλά από τα ευρέως διαδεδομένα MAC πρωτόκολλα, όπως το IEEE 802.11, επιβάλλουν από την φύση τους την χρήση μόνο μη κατευθυνόμενων συνδέσμων (unidirectional links). Η αποφυγή της χρήσης κατευθυνόμενων συνδέσμων είναι συνήθως απλή και σε περίπτωση που δεν παρέχεται από το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης (MAC sublayer), μπορεί να αναγνωριστούν εύκολα με την ανταλλαγή αναγνωριστικών μηνυμάτων (beacons) μεταξύ των κόμβων.

Γενικότερα, οι υποθέσεις που γίνονται συνήθως από την πλειοψηφία των αλγορίθμων δρομολόγησης για MANET είναι :

- 1) Κάθε κόμβος έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό (unique identity) με βάση το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί μονοσήμαντα μέσα στο δίκτυο. Επιπλέον, κάθε κόμβος είναι σε θέση να στείλει και να λάβει πακέτα.
- 2) Υπάρχει ένα υποκείμενο υποεπίπεδο MAC, με δυνατότητες παροχής ενημέρωσης για την κατάσταση του δικτύου, καθώς και για την πραγματοποίηση κρατήσεων.

- 3) Κάθε κόμβος περιοδικά εκπέμπει ένα αναγνωριστικό μήνυμα (beacon), ώστε να δηλώσει την παρουσία του (και τα σχετιζόμενα με αυτόν χαρακτηριστικά QoS), επιτρέποντας έτσι σε κάθε κόμβο να γνωρίζει την ύπαρξη και τα χαρακτηριστικά των γειτόνων του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που πολλά γνωστά πρωτόκολλα δεν απαιτούν (αν και ωφελούνται) από την χρήση κάποιου μηχανισμού αναγνώρισης (beaconing), όπως για παράδειγμα τα πολύ γνωστά AODV και DSR, η χρήση beacons είναι συνήθως ζωτικής σημασίας. Αυτό οφείλεται στη δυναμική φύση των MANET, αφού χωρίς την χρήση τους, οι κόμβοι δεν θα ήταν σε θέση να γνωρίζουν τους γείτονές τους.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για MANET μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση αρκετά από τα χαρακτηριστικά τους. Συνήθως στην βιβλιογραφία διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι τα πρωτόκολλα βασισμένα σε πίνακες (proactive ή table-driven). Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας διατηρούν πίνακες με πληροφορίες δρομολόγησης, τους οποίους ενημερώνουν περιοδικά με την καινούργια κατάσταση του δικτύου. Την δεύτερη κατηγορία αποτελούν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης κατ' απαίτηση (reactive ή on-demand driven). Τα πρωτόκολλα αυτά ανακαλύπτουν και συντηρούν δρομολόγια μόνο όταν και για όσο αυτά χρειάζονται.

Προφανώς σε ένα τόσο μεγάλο αριθμό πρωτοκόλλων που έχουν προταθεί, όλα τα πρωτοκόλλα δεν μπορούν να ενταχθούν στις δύο παραπάνω κατηγορίες. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε, επίσης, πρωτόκολλα βασισμένα σε περιορισμούς (constraint-based), τα οποία, σε αντίθεση με τις παραπάνω κατηγορίες που βασίζουν τις αποφάσεις δρομολόγησης τους στην αρχή της συντομότερης διαδρομής, επιλέγουν τα δρομολόγια τους με βάση ποικίλα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα την κατανάλωση ενέργειας ή την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Μια ακόμα κατηγορία αποτελείται από πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν σύνολα υποστήριξης (support groups), δηλαδή σύνολα κόμβων των οποίων η κίνηση καθορίζεται από το ίδιο το πρωτόκολλο. Οι κόμβοι του συνόλου υποστήριξης παραλαμβάνουν μηνύματα από τους αποστολείς όταν τους συναντούν τυχαία στην περιοχή του δικτύου και αναλαμβάνουν να τα παραδώσουν στον προορισμό εκ μέρους τους. Γνωστά είναι, επίσης, αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στην γεωγραφική θέση των κόμβων (geographical routing). Επιπρόσθετα, όπως και στα ενσύρματα δίκτυα, υπάρχουν πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν κάποια μορφή ιεραρχίας ή γενικότερα διαχωρίζουν τους κόμβους του δικτύου σε ομάδες (hierarchical routing ή cluster-based routing). Μερικές ακόμα εξωτικές τεχνικές βασίζονται σε έννοιες της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), κάνοντας χρήση για παράδειγμα τεχνικών νοημοσύνης σμήνους (swarm intelligence), προσπαθώντας δηλαδή να μιμηθούν την κίνηση σμηνών εντόμων. Τέλος, υπάρχουν φυσικά και υβριδικές λύσεις, οι οποίες προσπαθούν να συνδυάσουν δύο ή περισσότερες από τις παραπάνω τεχνικές.

Η έρευνα σχετικά με το πρόβλημα της δρομολόγησης στα MANET είναι ιδιαίτερα έντονη την τελευταία δεκαετία, με αποτέλεσμα να έχει προταθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος τεχνικών και πρωτοκόλλων. Σε αυτή την εργασία θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στο πρόβλημα της δρομολόγησης μεταξύ μιας πηγής και ενός μοναδικού προορισμού (unicast

routing), καθώς αυτή η συζήτηση επαρκεί για την κατανόηση και των υπόλοιπων προβλημάτων που σχετίζονται με την δρομολόγηση (π.χ. multicasting, geocasting, παροχή QoS κ.ά.). Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα μελετήσουμε ξεχωριστά καθεμιά από τις δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στα MANET, παρουσιάζοντας για καθεμιά από αυτές σύντομα μερικά από τα ενδεικτικότερα πρωτόκολλα της. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στα πρωτόκολλα DSDV, AODV και ABR, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν και στην συνέχεια της εργασίας. Για τον ίδιο λόγο θα παρουσιαστεί και το πρωτόκολλο RUNNERS, το οποίο ακολουθεί την προσέγγιση του συνόλου υποστήριξης.

2.2. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ ΠΙΝΑΚΕΣ

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για αδόμητα δίκτυα που βασίζονται σε πίνακες (proactive ή table-driven) είναι ουσιαστικά μια επέκταση των παραδοσιακών πρωτοκόλλων δρομολόγησης με διανύσματα απόστασης και με κατάσταση συνδέσμων, τα οποία έχουν αναπτυχθεί για χρήση στο ενσύρματο Internet. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας πρωτοκόλλων είναι ότι κάθε κόμβος στο δίκτυο διατηρεί ένα δρομολόγιο προς κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Η δημιουργία και η συντήρηση των δρομολογίων επιτυγχάνεται μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων ενημέρωσης (updates), τα οποία περιέχουν πληροφορίες σχετικές με την δρομολόγηση. Μηνύματα ενημέρωσης ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων του δικτύου είτε περιοδικά (periodic updates) είτε μετά από κάποιο συμβάν (event-triggered updates). Οι περιοδικές ανταλλαγές μηνυμάτων ενημέρωσης συμβαίνουν σε τακτά χρονικά διαστήματα, ανεξάρτητα από την κινητικότητα ή τα χαρακτηριστικά κίνησης (traffic) του δικτύου. Αντίθετα οι βασιζόμενες σε συμβάντα ενημερώσεις συμβαίνουν όταν πραγματοποιείται κάποιο σημαντικό γεγονός, όπως για παράδειγμα η δημιουργία ή καταστροφή ενός συνδέσμου. Η αύξηση της κινητικότητας του δικτύου (και όχι μόνο) επιδρά καθοριστικά στον αριθμό αυτής της κατηγορίας ενημερώσεων, καθώς συνήθως οδηγεί σε αύξηση των καταστροφών, αλλά και των σχηματισμών συνδέσμων.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας πρωτοκόλλων είναι ότι υπάρχει διαθέσιμη μια διαδρομή προς κάθε κόμβο στο δίκτυο οποτεδήποτε χρειαστεί. Επειδή κάθε κόμβος διατηρεί με συνέπεια ενημερωμένες διαδρομές προς κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο, ένας κόμβος πηγή που παραλαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων, αρκεί να ελέγξει τον πίνακα δρομολόγησής του και να ξεκινήσει την μετάδοσή του, επιτυγχάνοντας έτσι μικρότερες καθυστερήσεις παράδοσης των πακέτων. Επίσης, συχνά, τα οδηγούμενα από πίνακες πρωτόκολλα επιτυγχάνουν την εύρεση των βέλτιστων (συντομότερων διαδρομών), δεδομένου ενός μοντέλου για το κόστος των ακμών του υποκείμενου γράφου του δικτύου. Από την άλλη, το βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι έχει μεγάλο κόστος σε πακέτα ελέγχου (routing overhead) σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων ή υψηλής μεταβλητότητας της τοπολογίας του δικτύου (π.χ. λόγω υψηλής κινητικότητάς ή μεγάλου

αριθμού παρεμβολών). Επιπρόσθετα, η ανάγκη για διατήρηση πληροφοριών σχετικών με την δρομολόγηση αυξάνεται με ρυθμό $O(n)$, όπου n το μέγεθος του δικτύου, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο λόγω των περιορισμένων πόρων των φορητών υπολογιστικών συσκευών, που συνήθως αποτελούν τους κόμβους ενός MANET. Σε γενικές γραμμές, τα οδηγούμενα από πίνακες πρωτόκολλα έχουν την τάση να συμπεριφέρονται καλά σε δίκτυα όπου υπάρχει μεγάλος αριθμός ενεργών συνεδριών (data sessions). Σε αυτές τις περιπτώσεις το κόστος συντήρησης των δρομολογίων που χρησιμοποιούνται από τις συνεδρίες δικαιολογείται λόγω της αυξημένης αξιοποίησής τους (utilization).

2.2.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

Το Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) πρωτόκολλο προτάθηκε το 1994 από τους C. Perkins και P. Bhagwat [40] και έχει επικρατήσει ουσιαστικά σαν το βασικό παράδειγμα οδηγούμενου από πίνακες πρωτοκόλλου δρομολόγησης για αδόμητα δίκτυα. Το DSDV αποτελεί μια επέκταση του γνωστού αλγορίθμου RIP, βελτιστοποιημένη για λειτουργία σε αδόμητα δίκτυα. Ο βασικός σχεδιαστικός στόχος του DSDV ήταν η βελτίωση της συμπεριφοράς, κυρίως όσον αφορά την αστάθεια και τους κύκλους δρομολόγησης (routing loops) που επιδείκνυε ο RIP σε συνθήκες καταστροφών συνδέσμων, κάτι το οποίο οδηγούσε σε χρονικά εξαρτώμενη αντίληψη της τοπολογίας του δικτύου. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι παρόμοιος με αυτόν του RIP. Τα πακέτα μεταδίδονται μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιώντας πίνακες δρομολόγησης αποθηκευμένους σε κάθε κόμβο. Κάθε πίνακας δρομολόγησης, σε κάθε κόμβο, περιέχει όλους τους διαθέσιμους προορισμούς και τον αριθμό των αλμάτων που απαιτούνται για καθένα από αυτούς, όπως επίσης και το επόμενο άλμα προς κάθε προορισμό. Προφανώς, αντί για τον αριθμό των αλμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη μετρική (π.χ. καθυστέρηση). Κάθε καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης συνδέεται με έναν αριθμό ακολουθίας (sequence number) που είναι και ο μεγαλύτερος που έχει δει ο κόμβος για τον συγκεκριμένο προορισμό. Επειδή, εξαιτίας της δυναμικής φύσης των αδόμητων δικτύων, οι πληροφορίες που περιέχονται στους πίνακες δρομολόγησης γίνονται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα ασυνεπείς, απαιτείται η περιοδική εκπομπή των τοπολογικών αλλαγών (periodic updates). Επίσης, σε περίπτωση σημαντικών τοπολογικών αλλαγών (π.χ. κάποιας δημιουργίας ή καταστροφής συνδέσμου) οι κόμβοι επανεκπέμπουν άμεσα τις πληροφορίες για την καινούργια τοπολογία του δικτύου (incremental updates). Πρέπει να τονιστεί ότι, όπως και σε κάθε άλλο πρωτόκολλο που κάνει χρήση διανυσμάτων απόστασης, η εκπομπή των τοπολογικών πληροφοριών γίνεται ασύγχρονα.

Οι κύριες τοπολογικές πληροφορίες που εκπέμπει κάθε κόμβος για κάθε προορισμό είναι ο αριθμός των αλμάτων από τον κόμβο μέχρι τον προορισμό και ο αριθμός ακολουθίας του προορισμού. Κάθε κόμβος ανανεώνει τις πληροφορίες του πίνακα δρομολόγησής του βασιζόμενος στον αριθμό ακολουθίας για κάθε προορισμό. Συγκεκριμένα, ο πίνακας δρομολόγησης ενημερώνεται μόνο στην περίπτωση που ο αριθμός ακολουθίας που περιέχεται σε αυτόν είναι μικρότερος από αυτόν που περιέχεται στο μήνυμα των τοπολογικών αλλαγών. Μεταξύ επιλογών με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας

προτιμάται αυτή με την μικρότερη τιμή για τον αριθμό των αλμάτων. Οι αριθμοί ακολουθίας για έναν προορισμό ανανεώνονται κάθε φορά που συμβαίνει μια τοπολογική αλλαγή που σχετίζεται με τον συγκεκριμένο προορισμό. Ο λόγος ύπαρξής τους είναι η διάκριση μεταξύ παλιών (stale) και νέων δρομολογίων και αποδεικνύεται ότι με την βοήθεια τους αποφεύγεται η δημιουργία κύκλων δρομολόγησης. Επίσης, για την αποφυγή άσκοπων ενημερώσεων (λόγω της ασύγχρονης φύσης του πρωτοκόλλου), το πρωτόκολλο εισάγει κάποια χρονικά όρια μεταξύ ενός συμβάντος (π.χ. καταστροφή ενός συνδέσμου) και της αποστολής μιας αυξητικής ενημέρωσης για αυτό.

2.3. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ

Ένα μεγάλο ποσοστό του κόστους δρομολόγησης των βασιζόμενων σε πίνακες πρωτοκόλλων πηγάζει από το γεγονός ότι κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί ένα δρομολόγιο προς κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο σε κάθε χρονική στιγμή. Σε ένα ενσύρματο δίκτυο, όπου η συνδεσμολογία μεταβάλλεται σχετικά σπάνια και το δίκτυο έχει γενικά αρκετούς πόρους, η διατήρηση ενημερωμένων εγγραφών της τοπολογίας αξίζει το κόστος. Το προφανές πλεονέκτημα είναι ότι υπάρχει άμεσα διαθέσιμο ένα δρομολόγιο μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου, όταν αυτό απαιτείται. Από την άλλη, σε ένα αδόμητο δίκτυο η συνδεσμολογία μπορεί να αλλάζει συχνά και κατά συνέπεια το κόστος συντήρησης των δρομολογίων είναι, συνήθως, ιδιαίτερα υψηλό. Εξαιτίας κυρίως αυτού του λόγου, η κατ' απαίτηση προσέγγιση διαφοροποιείται ριζικά από τις παραδοσιακές τεχνικές δρομολόγησης του Internet στο ότι δεν διατηρεί συνεχώς δρομολόγια μεταξύ όλων των κόμβων του δικτύου. Αντίθετα, ένα δρομολόγιο ανακαλύπτεται μόνο όταν πραγματικά απαιτείται. Συγκεκριμένα, όταν ένας κόμβος-πηγή επιθυμεί να στείλει πακέτα δεδομένων σε κάποιον προορισμό, αρχικά ελέγχει εάν διαθέτει ήδη κάποιο δρομολόγιο προς τον προορισμό. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει δρομολόγιο, εκτελεί μια διαδικασία *ανακάλυψης δρομολογίου (route discovery)*, μέσω της οποίας ανακαλύπτει ένα κατάλληλο δρομολόγιο (εφόσον, φυσικά, ένα τέτοιο δρομολόγιο υπάρχει). Άρα, σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η ανακάλυψη δρομολογίων γίνεται *κατ' απαίτηση*. Εφόσον δύο κόμβοι δεν χρειάζεται ποτέ να επικοινωνήσουν, τότε δεν χρειάζεται να σπαταλήσουν τους πόρους τους για να συντηρήσουν ένα δρομολόγιο μεταξύ τους. Η ανακάλυψη δρομολογίων τυπικά αποτελείται από την εκπομπή σε όλο το δίκτυο μιας αίτησης (request) για την δημιουργία του δρομολογίου.

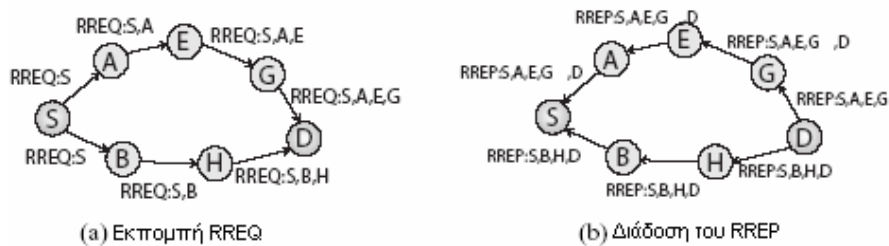
Το κύριο πλεονέκτημα της κατ' απαίτηση προσέγγισης είναι ότι το κόστος σηματοδοσίας (signaling overhead) στην γενική περίπτωση μειώνεται (για την επίτευξη συγκρίσιμων επιδόσεων του δικτύου) σε σχέση με αυτό της βασιζόμενης σε πίνακες προσέγγισης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις δικτύων με χαμηλή ή μέτρια κίνηση. Όταν η κίνηση στο δίκτυο αυξάνεται και ο αριθμός των ενεργών συνόδων δεδομένων (data sessions) στο δίκτυο γίνεται μεγαλύτερος, τότε το κόστος για την ανακάλυψη δρομολογίων πλησιάζει και σε αρκετές περιπτώσεις ξεπερνά αυτό των βασιζόμενων σε πίνακες πρωτοκόλλων. Το βασικό μειονέκτημα της κατ' απαίτηση δρομολόγησης είναι η εισαγωγή μιας

καθυστέρησης εύρεσης δρομολογίου (route acquisition latency). Αυτό συμβαίνει γιατί όταν απαιτηθεί ένα δρομολόγιο από κάποια πηγή και το δρομολόγιο δεν είναι διαθέσιμο, τα πακέτα δεδομένων θα πρέπει να εισαχθούν σε κάποια ουρά εωσότου βρεθεί το δρομολόγιο (ή αποφασιστεί ότι δεν υπάρχει τέτοιο δρομολόγιο). Κατά συνέπεια υπάρχει μια καθυστέρηση στην έναρξη της συνόδου δεδομένων. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζεται και σε περιπτώσεις που κάποιος σύνδεσμος του δρομολογίου καταστρέφεται, οπότε και τα πακέτα καθυστερούν μέχρι να ανακαλυφθεί ένα νέο δρομολόγιο προς τον προορισμό, ενώ, επιπλέον, συχνά τα πακέτα που βρίσκονται καθοδόν (on the fly) απορρίπτονται. Ένα ακόμα, όχι ιδιαίτερα προφανές, πρόβλημα της κατ' απαίτηση δρομολόγησης είναι ότι συχνά τα χρησιμοποιούμενα δρομολόγια, με την πάροδο του χρόνου, παύουν να είναι βέλτιστα. Αυτό συμβαίνει γιατί στα κλασικά κατ' απαίτηση πρωτόκολλα ένα δρομολόγιο χρησιμοποιείται από την στιγμή της ανακάλυψης μέχρι την στιγμή της καταστροφής του. Όμως, είναι πολύ πιθανό κατά την διάρκεια της ζωής ενός δρομολογίου, εξαιτίας των χαρακτηριστικών των MANET, να δημιουργηθεί κάποιο καταλληλότερο δρομολόγιο, το οποίο εντούτοις δεν θα χρησιμοποιηθεί.

2.3.1 Dynamic Source Routing (DSR) Protocol

Η βασική ιδιότητα του DSR πρωτοκόλλου [31], το οποίο είναι και το πρώτο κατ' απαίτηση πρωτόκολλο για MANET που προτάθηκε, είναι η έννοια της δρομολόγησης πηγής (source routing). Δρομολόγηση πηγής έχουμε όταν ο αποστολέας ενός πακέτου γνωρίζει την πλήρη (άλμα-προς-άλμα) διαδρομή μέχρι τον προορισμό, την οποία και περιλαμβάνει στην κεφαλίδα (header) κάθε πακέτου. Κάθε διαδρομή που γνωρίζει ο κόμβος αποθηκεύεται σε μια κρυφή μνήμη διαδρομών (route cache). Κάθε φορά που ο κόμβος επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο ερευνά την κρυφή μνήμη για μια διαδρομή μέχρι τον προορισμό του πακέτου. Σε περίπτωση που μια τέτοια διαδρομή δεν υπάρχει χρησιμοποιείται ο πρώτος μηχανισμός που παρέχει το πρωτόκολλο, αυτός της ανακάλυψης δρομολογίου (route discovery). Η ανακάλυψη ενός δρομολογίου (Εικόνα 13) πραγματοποιείται με μια διαδικασία πλημμύρας του δικτύου με μηνύματα τύπου αίτησης δρομολογίου (route request – RREQ). Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα τέτοιο μήνυμα το επανεκπέμπει, εκτός και αν είναι ο ενδεικνυόμενος, στο RREQ μήνυμα, προορισμός ή αν γνωρίζει μια διαδρομή προς αυτόν (η οποία θα είναι αποθηκευμένη στην κρυφή μνήμη διαδρομών του). Στην περίπτωση αυτή απαντάει στο RREQ μήνυμα με ένα μήνυμα απάντησης διαδρομής (route reply – RREP) το οποίο δρομολογείται πίσω στην πηγή του RREQ μηνύματος. Κατά την διάδοση του RREQ μηνύματος προς τον προορισμό, οι κόμβοι από τους οποίους διέρχεται προστίθενται στην κεφαλίδα του. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται στην συνέχεια, με ανεστραμμένη σειρά, για την δρομολόγηση του μηνύματος RREP πίσω στην πηγή¹.

¹ Προφανώς κάτι τέτοιο απαιτεί την ύπαρξη μη κατευθυνόμενων συνδέσμων στο δίκτυο (bidirectional links), κάτι το οποίο συνήθως ισχύει (π.χ. στα δίκτυα IEEE 802.11). Πάντως, για την αντιμετώπιση καταστάσεων όπου οι σύνδεσμοι είναι κατευθυνόμενοι έχουν προταθεί ήδη κάποιες κατάλληλες τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου.



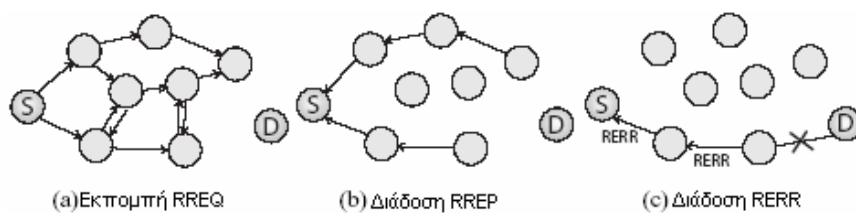
Εικόνα 13. Διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίου από το DSR πρωτόκολλο.

Ο δεύτερος μηχανισμός που παρέχει το DSR πρωτόκολλο είναι η συντήρηση δρομολογίου (route maintenance). Ο μηχανισμός αυτός συνίσταται από διαδικασίες για την αντιμετώπιση τυχών καταστροφών δρομολογίων, τα οποία χρησιμοποιούνται από κάποιους κόμβους. Έτσι, αν κάποιος σύνδεσμος που περιέχεται σε κάποιο δρομολόγιο καταστραφεί, τότε οι κόμβοι πηγής όλων των δρομολογίων που τον περιέχουν ενημερώνονται με την χρήση ενός μηνύματος σφάλματος διαδρομής (route error – RERR). Όταν η πηγή λάβει το RERR μήνυμα απομακρύνει από την κρυφή μνήμη της όλα τα δρομολόγια που περιέχουν αυτό τον σύνδεσμο. Προφανώς, σε περίπτωση που κάποια από τις διαδρομές που απομακρύνθηκε από την κρυφή μνήμη συνεχίζει να είναι απαραίτητη, μια νέα διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίου θα πραγματοποιηθεί.

Εκτός όλων των παραπάνω, πρέπει να αναφέρουμε ότι στην παραπάνω βασική λειτουργία του πρωτοκόλλου μπορεί να προστεθεί ένα μεγάλο σύνολο βελτιώσεων. Έτσι, για παράδειγμα κάθε κόμβος που προωθεί ένα πακέτο, μπορεί να εξάγει από την κεφαλίδα του την διαδρομή από τον εαυτό του μέχρι τον προορισμό του πακέτου και να την αποθηκεύσει στην κρυφή μνήμη του για μελλοντική χρήση. Επιπλέον με την διαδικασία του salvaging ένας κόμβος που διαπιστώνει ότι ένας από τους συνδέσμους του έχει καταστραφεί, αντί να ενημερώσει την πηγή ενός πακέτου που τον περιλαμβάνει με ένα RERR μήνυμα μπορεί να ελέγξει την κρυφή μνήμη του για μια διαδρομή μέχρι τον προορισμό. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος που προωθεί ένα RERR πακέτο προς την πηγή, μπορεί να χρησιμοποιήσει την πληροφορία του RERR πακέτου για να απομακρύνει τα ασυνεπή δρομολόγια από την κρυφή μνήμη του. Τέλος, σε περίπτωση που το MAC πρωτόκολλο παρέχει την δυνατότητα ωτακουστικής λειτουργίας (promiscuous mode), δηλαδή την ικανότητα ένας κόμβος να λαμβάνει πακέτα που δεν προορίζονται για αυτόν, τότε μπορεί να «ακούει» τις μεταδόσεις των άλλων κόμβων και να ενημερώνει την κρυφή μνήμη του με τις πληροφορίες που συγκεντρώνει από αυτές.

2.3.2 Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) Protocol

Το AODV πρωτόκολλο [41] είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός των DSR και DSDV πρωτοκόλλων (ή κατά μια άλλη έννοια μια κατ' απαίτηση εκδοχή του DSDV). Δανείζεται τον βασικό κατ' απαίτηση μηχανισμό αναζήτησης δρομολογίων του DSR, χρησιμοποιώντας όμως ταυτόχρονα πίνακες δρομολόγησης και αριθμούς ακολουθίας σε κάθε κόμβο, καθώς και περιοδικά σήματα αναγνώρισης (beacons), όπως το DSDV. Όταν μια πηγή S χρειάζεται ένα δρομολόγιο σε έναν προορισμό D, εκπέμπει ένα μήνυμα αίτησης δρομολογίου, το οποίο περιλαμβάνει τον πιο πρόσφατο αριθμό ακολουθίας για τον συγκεκριμένο προορισμό. Το μήνυμα αίτησης δρομολογίου μεταδίδεται σε ολόκληρο το δίκτυο μέχρι να συναντήσει ένα κόμβο (συμπεριλαμβανομένου του προορισμού) που ξέρει ένα δρομολόγιο στον D με αριθμό ακολουθίας μεγαλύτερο ή ίσο με αυτόν που περιέχει το μήνυμα (προφανώς ο D πάντα θα έχει έναν αριθμό ακολουθίας μεγαλύτερο ή ίσο από αυτόν του S). Κάθε κόμβος που προωθεί το μήνυμα δημιουργεί μια αντίστροφη καταχώρηση (δηλαδή μια καταχώρηση για τον κόμβο S) στον πίνακα δρομολόγησης του. Επιπλέον, κάθε κόμβος που γνωρίζει μια διαδρομή στον D, εκδίδει ένα μήνυμα απάντησης δρομολογίου που περιέχει την απόσταση του από τον D, καθώς και τον πιο πρόσφατο αριθμό ακολουθίας για τον D. Κάθε κόμβος που συμμετέχει στην προώθηση του μηνύματος απάντησης δρομολογίου πίσω στον S, δημιουργεί μια κανονική καταχώρηση (δηλαδή μια καταχώρηση για τον D) στον πίνακα δρομολόγησης του. Πρέπει να σημειωθεί ότι για οποιονδήποτε προορισμό, κάθε κόμβος διατηρεί μόνο την πληροφορία για τον αριθμό των αλμάτων (ή γενικά για το κόστος του δρομολογίου), το επόμενο άλμα προς τον προορισμό, καθώς και τον τελευταίο (μεγαλύτερο) αριθμό ακολουθίας του. Επίσης, είναι αρκετά πιθανό ο κόμβος πηγή να ανακαλύψει περισσότερα από ένα δρομολόγια, οπότε και επιλέγει το καταλληλότερο από αυτά για την δρομολόγηση των πακέτων του. Τα υπόλοιπα δρομολόγια καταργούνται μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος χωρίς να χρησιμοποιηθούν (δηλαδή κάθε καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου απομακρύνεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα από την τελευταία χρήση του).



Εικόνα 14. Ανακάλυψη και συντήρηση δρομολογίων από το AODV πρωτόκολλο.

Για την συντήρηση των δρομολογίων ο AODV απαιτεί την περιοδική εκπομπή HELLO μηνυμάτων, με εξορισμού διάστημα μεταξύ των εκπομπών ίσο με ένα δευτερόλεπτο. Αποτυχία για λήψη τριών διαδοχικών μηνυμάτων HELLO από κάποιο κόμβο εκλαμβάνεται ως ένδειξη της καταστροφής του συνδέσμου με αυτόν τον κόμβο.

Εδώ, βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες εργασίες, έχειδειχθεί ότι η λειτουργικότητα των HELLO μηνυμάτων του AODV πρωτοκόλλου μπορεί να αντικατασταθεί από τις ικανότητες ανίχνευσης κατεστραμμένων συνδέσμων που μπορεί να παρέχει το MAC πρωτόκολλο (π.χ. IEEE 802.11). Βέβαια η παραπάνω τροποποίηση αλλοιώνει την φύση του πρωτοκόλλου, εφόσον οι απαρχαιωμένες καταχωρίσεις του πίνακα δρομολόγησης μπορούν να απομακρυνθούν μόνο όταν υπάρχει κίνηση, οδηγώντας σε ελαφρώς χειρότερες επιδόσεις. Κάθε φορά που με κάποια από τις παραπάνω τεχνικές εντοπιστεί ένας κατεστραμμένος σύνδεσμος, κάθε κόμβος που έχει προωθήσει πακέτα μέσω αυτού στο πρόσφατο παρελθόν, ενημερώνεται μέσω ενός μηνύματος σφάλματος δρομολογίου το οποίο περιέχει άπειρη τιμή για το κόστος του δρομολογίου. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα τέτοιο μήνυμα και εξακολουθεί να χρειάζεται το δρομολόγιο, ξεκινάει μια νέα διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίου.

Όπως και στην περίπτωση του DSR, ένα πλήθος βελτιώσεων έχει προταθεί για την βελτίωση της απόδοσης του AODV. Μία από αυτές της βελτιώσεις είναι η αντικατάσταση της πλημμύρας στην διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίων από μια τεχνική αναζήτησης εκτεινόμενου δακτυλίου (expanding ring search). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή η διάδοση των RREQ μηνυμάτων επιτρέπεται (μέσω ελέγχου του πεδίου TTL των IP πακέτων) σε ολοένα και εκτεινόμενες περιοχές του δικτύου, μέχρι να ανακαλυφθεί ένα δρομολόγιο προς τον προορισμό. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα ότι αρχικά ελέγχεται η περιοχή του δικτύου που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους που βρίσκονται σε απόσταση 2 άλμάτων από την πηγή, στην συνέχεια η περιοχή των κόμβων με απόσταση έως 4 άλματα από την πηγή (εφόσον στην πρώτη αναζήτηση δεν ανακαλύφθηκε κάποιο δρομολόγιο προς τον προορισμό), στην συνέχεια οι κόμβοι που απέχουν έως 8 άλματα από την πηγή κ.ο.κ. Μια ακόμα βελτίωση όσον αφορά την συντήρηση των δρομολογίων είναι αντί ένας κόμβος να στέλνει ένα RERR μήνυμα στην πηγή, να προσπαθεί ο ίδιος να ανακαλύψει ένα δρομολόγιο προς τον προορισμό. Εάν ο κόμβος καταφέρει να ανακαλύψει ένα δρομολόγιο λιγότερα πακέτα θα χαθούν, εφόσον η καθυστέρηση επιδιόρθωσης του δρομολογίου θα είναι μικρότερη. Σε περίπτωση που η επιδιόρθωση του δρομολογίου αποτύχει, ακολουθείται κανονικά η διαδικασία της αποστολής του RERR μηνύματος.

Επιπλέον των παραπάνω τεχνικών, έχουν προταθεί και κάποιες προσθήκες στο AODV, οι οποίες βελτιώνουν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τις επιδόσεις του πρωτοκόλλου. Έτσι, για παράδειγμα έχει προταθεί η χρήση χαριστικών RREP (gratuitous RREP), τα οποία στέλνονται στον προορισμό για να τον ενημερώσουν για την καταστροφή του δρομολογίου. Αυτή η τακτική μπορεί να βοηθήσει στην συνηθισμένη περίπτωση που υπάρχει κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις του δρομολογίου (π.χ. κίνηση TCP). Μια άλλη προσθήκη είναι η χρήση επιβεβαιώσεων των RREP (RREP acknowledgements – RREP-ACKs), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση της παράδοσης των μηνυμάτων RREP στον επόμενο κόμβο προς την πηγή. Τα RREP-ACKs είναι χρήσιμα στις περιπτώσεις που στο δίκτυο μπορεί να υπάρχουν κατευθυνόμενοι σύνδεσμοι και αποτρέπουν την χρήση τους σε δρομολόγια.

2.3.3 Associativity Based Routing (ABR) Protocol

Το ABR πρωτόκολλο [45] σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Cambridge το 1996. Το βασικό χαρακτηριστικό του ABR είναι η έννοια της συσχέτισης (associativity). Το ABR είναι, όπως και το DSR, πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής και κατά συνέπεια δεν απαιτεί περιοδικές ενημερώσεις των δρομολογίων του. Το ABR εκτός από πρωτόκολλο κατ' απαίτησης δρομολόγησης, μπορεί να χαρακτηριστεί και ως πρωτόκολλο δρομολόγησης βασιζόμενο σε περιορισμούς (constraint-based), αφού όπως θα δούμε επιβάλλει την δημιουργία δρομολογίων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Η βασική ιδέα της συσχέτισης είναι ότι στα MANET δεν έχει νόημα να επιλέγεις ένα δρομολόγιο με βάση την συντομότερη διαδρομή, εφόσον το δρομολόγιο θα καταστραφεί ή θα καταστεί άχρηστο λόγω της κινητικότητας των κόμβων. Αυτό που προτείνει το πρωτόκολλο είναι κάθε κόμβος του δικτύου να μαθαίνει την «συσχέτιση» του με τους κόμβους που το περιβάλλουν και με βάση αυτή να επιλέγει την καλύτερη διαδρομή. Η σταθερότητα μιας περιοχής καθορίζεται με την χρήση ticks συσχέτισης. Η συσχέτιση στο ABR μπορεί να συνοψολογίζει έναν αριθμό μετρικών, όπως την καθυστέρηση των συνδέσμων, την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων, το φόρτο των συνδέσμων και πολλά άλλα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα αν ορίσουμε την συσχέτιση ως το χρονικό διάστημα που δύο κόμβοι μένουν εντός της εμβέλειας ο ένας του άλλου, δηλαδή ως το χρονικό διάστημα που ο μεταξύ τους σύνδεσμος παραμένει ενεργός, μπορούμε να ορίσουμε την μεταξύ τους συσχέτιση ως τον αριθμό σημάτων αναγνώρισης (beacons) που έχουν ανταλλάξει.

Αυτό που διαφοροποιεί το ABR από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα είναι η χρήση της συσχέτισης ως κύριας μετρικής για την επιλογή δρομολογίων. Κατ' αυτό τον τρόπο τα δρομολόγια που επιλέγονται είναι σταθερότερα και κατά συνέπεια καταστρέφονται σπανιότερα. Η λειτουργία του ABR μπορεί να διασπαστεί λογικά σε τρεις φάσεις: την φάση ανακάλυψης δρομολογίων, την φάση επανακατασκευής δρομολογίων και την φάση καταστροφής δρομολογίων.

Η φάση ανακάλυψης δρομολογίων αποτελείται από την εκπομπή μιας αίτησης και έναν κύκλο αναμονής-απάντησης (await-reply) ή έναν BQ-REPLY κύκλο όπως αναφέρεται συχνότερα. Αρχικά όλοι οι κόμβοι εκτός από τους γείτονες του προορισμού D δεν διαθέτουν δρομολόγια προς αυτόν. Κάθε κόμβος που επιθυμεί ένα δρομολόγιο προς τον D εκπέμπει ένα BQ μήνυμα σε ολόκληρο το δίκτυο αναζητώντας κόμβους που έχουν ένα δρομολόγιο προς τον D. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος (intermediate node) που λαμβάνει το BQ προσθέτει την διεύθυνσή του και την τιμή της συσχέτισης των συνδέσμων του με τους γείτονές του και το επανεκπέμπει, μαζί πιθανόν και με κάποιες άλλες απαραίτητες μετρικές. Ο επόμενος ενδιάμεσος κόμβος θα αφαιρέσει τις πληροφορίες της συσχέτισης που εισήγαγε στο BQ, θα της αξιοποιήσει για την επιλογή του δρομολογίου και στην συνέχεια θα προσθέσει τις δικές του. Κατά συνέπεια το BQ μήνυμα είναι μεταβλητού μεγέθους.

Η δεύτερη φάση του ABR είναι η κατ' απαίτηση επιδιόρθωση δρομολογίων (on-demand route recovery phase). Αυτή η φάση είναι χρήσιμη επειδή, όπως είδαμε, τόσο τα δρομολόγια όσο και η τοπολογία ενός MANET μεταβάλλονται συνεχώς. Η επιλογή ενός δρομολογίου που αναμένεται να μην καταστραφεί για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν είναι από μόνη της αρκετή, καθώς το δρομολόγιο μπορεί να καταστραφεί εξαιτίας της κίνησης ή της απενεργοποίησης κάποιων κόμβων. Τα κύρια χαρακτηριστικά της επιδιόρθωσης δρομολογίων που παρέχει το ABR είναι:

- Μερική ανακάλυψη δρομολογίων με την χρήση μηνυμάτων τοπικών αιτήσεων (localized queries – LQ).
- Διαγραφή άκυρων δρομολογίων (invalid route erasure).
- Ανανέωση έγκυρων δρομολογίων (valid route update).
- Ανακάλυψη νέων δρομολογίων (στην χειρότερη περίπτωση).

Οι παραπάνω λειτουργίες μπορεί να ενεργοποιηθούν από κινήσεις των κόμβων του δικτύου, οι οποίες οδηγούν σε καταστροφές συνδέσμων ή γενικότερα από σημαντικά συμβάντα στο δίκτυο (π.χ. επικίνδυνη μείωση της διαθέσιμης ενέργειας ενός κόμβου).

Η τελευταία φάση του ABR είναι η κατ' απαίτηση διαγραφή δρομολογίων (on-demand route deletion phase). Η ανάγκη για διαγραφή δρομολογίων προκύπτει σαν μέρος της συντήρησης, αφού δρομολόγια που δεν χρησιμοποιούνται οδηγούν σε σπατάλη πόρων και επιπλέον μελλοντική χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, εφόσον οι πληροφορίες τους μπορεί να είναι απαρχαιωμένες. Υπάρχουν δύο διαθέσιμες μέθοδοι για την διαγραφή δρομολογίων: η απαλής κατάστασης (soft state) και η σκληρής κατάστασης (hard state). Στην μαλακή προσέγγιση, η λήξη μιας διαδρομής βασίζεται στην έλλειψη κίνησης ή στην λήξη ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος παρακολουθεί την κίνηση κάθε δρομολογίου και σε περίπτωση που διαπιστώσει ότι η κίνηση βρίσκεται κάτω από ένα κατώφλι, την θεωρεί ως ληγμένη. Στην περίπτωση της σκληρής κατάστασης, η λήξη ενός δρομολογίου πραγματοποιείται με την μετάδοση ενός συγκεκριμένου μηνύματος ελέγχου. Λεπτομερέστερα, όταν ένα δρομολόγιο δεν χρειάζεται πλέον, ένα μήνυμα διαγραφής δρομολογίου (route delete message – RD) εκπέμπεται από την πηγή κατά μήκος της, ώστε όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι να την απομακρύνουν από τους πίνακες δρομολόγησής τους.

2.4. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ ΣΥΝΟΛΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Σε αντίθεση με τις δύο παραπάνω μεθόδους που απαιτούν την εύρεση και την συντήρηση δρομολογίων μεταξύ δύο κόμβων που επιθυμούν να επικοινωνήσουν, η προσέγγιση των συνόλων υποστήριξης προτείνει κάτι τελείως διαφορετικό. Το κίνητρο αυτής της κατηγορίας πρωτοκόλλων είναι η παροχή υπηρεσιών δρομολόγησης ακόμα και σε περιπτώσεις που το δίκτυο είναι τόσο δυναμικό που οι αλλαγές συμβαίνουν ταχύτερα από το χρόνο που απαιτείται για την διάδοσή τους στο δίκτυο (αυτά τα δίκτυα αναφέρονται συχνά και ως συνδυαστικά ασταθή – combinatorically unstable). Σε τέτοιες περιπτώσεις δικτύων, η δρομολόγηση είναι αδύνατη με τις δύο προηγούμενες τεχνικές, εφόσον τα δεδομένα των πινάκων δρομολόγησης δεν μπορούν να διατηρηθούν συνεπή. Η προσέγγιση αυτών των πρωτοκόλλων είναι να εκμεταλλεύονται την φυσική κίνηση των κόμβων, ανταλλάσσοντας δεδομένα μόνο όταν δύο κόμβοι συναντιούνται τυχαία. Είναι προφανές, φυσικά, ότι εάν οι χρήστες είναι διεσπαρμένοι σε απομονωμένες περιοχές, τις οποίες δεν εγκαταλείπουν συχνά, τότε δεν υπάρχει κανένας τρόπος να επικοινωνήσουν μεταξύ τους.

Μια λύση είναι το πρωτόκολλο δρομολόγησης να αναλαμβάνει να αντιμετωπίσει τέτοιες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση των συνόλων υποστήριξης προτείνει την ιδέα το ίδιο το πρωτόκολλο δρομολόγησης να αναγκάζει ένα υποσύνολο των κόμβων του δικτύου να κινούνται σύμφωνα με τις ανάγκες του. Αυτό το υποσύνολο κόμβων ονομάζεται σύνολο υποστήριξης (support group) του δικτύου και συμβολίζεται με Σ . Υποθέτοντας ότι τέτοιοι κόμβοι είναι διαθέσιμοι, ο σχεδιαστής μπορεί να τους χρησιμοποιήσει κατάλληλα, ορίζοντας την κίνησή τους σε ορισμένες χρονικές στιγμές που καθορίζει ο αλγόριθμος. Έτσι, ακόμα και αν οι χρήστες είναι απλωμένοι σε απομονωμένες περιοχές, είναι τώρα δυνατόν να επικοινωνήσουν, καθώς το πρωτόκολλο αντιμετωπίζει αυτή την κατάσταση.

Το πρωτόκολλο RUNNERS [16] ορίζει την κίνηση των κόμβων του Σ σαν ένα τυχαίο περίπατο (random walk) στον γράφο που αναπαριστά το δίκτυο. Ο γράφος αυτός προκύπτει εάν χωρίσουμε την περιοχή του δικτύου σε ίσου όγκου κύβους με βάση την ακτίνα μετάδοσης των κόμβων και θεωρήσουμε κάθε κύβο σαν έναν κόμβο και κάθε κοινή επιφάνεια μεταξύ δύο κύβων σαν ένα σύνδεσμο μεταξύ των κόμβων. Υπό αυτή την έννοια κάθε μέλος του Σ μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας δρομέας (runner) που τρέχει στον γράφο. Κάθε φορά που δύο κόμβοι υποστήριξης συναντιούνται ανταλλάσσουν μεταξύ τους, μέσω μιας διαδικασίας συγχρονισμού, όλα τα πακέτα που δεν έχουν παραδοθεί ακόμα, καθώς και αποδείξεις παράδοσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των μηνυμάτων από τις μνήμες τους. Κάθε αποστολέας που θέλει να στείλει ένα μήνυμα σε κάποιον προορισμό περιμένει μέχρι να συναντήσει κάποιο κόμβο του συνόλου υποστήριξης και του παραδίδει το μήνυμα. Η παρουσία των κόμβων υποστήριξης γίνεται αντιληπτή είτε μέσω του πρωτοκόλλου MAC είτε μέσω ενός μηχανισμού σηματοδότησης παρόμοιου με αυτόν του AODV.

3. ΜΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΑΔΟΜΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Στα MANET, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όταν δύο κόμβοι επιθυμούν να επικοινωνήσουν δεν χρειάζεται να βρίσκονται αναγκαστικά ο καθένας εντός της εμβέλειας μετάδοσης του άλλου, εφόσον κάποιοι «ενδιάμεσοι» κόμβοι συμφωνούν να προωθούν πακέτα εκ μέρους τους. Ο απλούστερος τρόπος για την εγκαθίδρυση επικοινωνίας σε τέτοια δίκτυα είναι η μέθοδος της πλημμύρας. Όπως όμως αναφέρθηκε, η μέθοδος της πλημμύρας εισάγει σοβαρές επιβαρύνσεις στο δίκτυο και στους κόμβους, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την πρόταση πολλών εναλλακτικών προσεγγίσεων για το πρόβλημα της δρομολόγησης. Μία προσέγγιση προσπαθεί να κατασκευάζει και να συντηρεί δυναμικά μονοπάτια μεταξύ των κόμβων (π.χ. DSDV, AODV). Αντίθετα, μια άλλη προσέγγιση προσπαθεί να αποφύγει την δημιουργία και την συντήρηση δρομολογίων, εκμεταλλευόμενη την φυσική κίνηση των κόμβων και τις τυχαίες συναντήσεις τους στην περιοχή του δικτύου (π.χ. RUNNERS).

Οι αλγόριθμοι που ακολουθούν την προσέγγιση της κατασκευής και συντήρησης δρομολογίων δημιουργούν μια δυναμική δομή δεδομένων που περιγράφει την τοπολογία του δικτύου (π.χ. έναν δυναμικό γράφο), μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων. Χρησιμοποιώντας αυτή την δυναμική δομή δεδομένων, μηνύματα μπορούν να μεταδίδονται διαμέσου ενός περιορισμένου αριθμού ενδιάμεσων κόμβων που διασυνδέουν την πηγή με τον προορισμό, σχηματίζοντας μονοπάτια δρομολόγησης (routing paths) ή απλούστερα δρομολόγια (routes). Αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω σε κατ' απαίτηση (reactive ή on-demand) πρωτόκολλα ή σε οδηγούμενα από πίνακες (proactive ή table-driven) πρωτόκολλα. Ως οδηγούμενα από πίνακες πρωτόκολλα χαρακτηρίζονται αυτά που συντηρούν συνεχώς δρομολόγια προς κάθε πιθανό προορισμό (π.χ. DSDV), ενώ ως κατ' απαίτηση πρωτόκολλα χαρακτηρίζονται αυτά που ανακαλύπτουν και συντηρούν δρομολόγια προς κάποιον προορισμό, μόνο όταν κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο (π.χ. AODV).

Από την άλλη, οι αλγόριθμοι που ακολουθούν την προσέγγιση του «συνόλου υποστήριξης» είναι σχεδιασμένοι για εξαιρετικά δυναμικά μεταβαλλόμενα δίκτυα, δηλαδή δίκτυα με μεγάλη κινητικότητα των χρηστών ή, γενικότερα, συχνές αλλαγές στην τοπολογία. Αυτή η κατηγορία αλγορίθμων αντί να προσπαθεί να κατασκευάσει και να συντηρήσει μονοπάτια μεταξύ πηγής και προορισμού, προσπαθεί να εκμεταλλευτεί την φυσική κίνηση των κόμβων και προτείνει ανταλλαγή πακέτων, μόνο όταν δύο κόμβοι συναντιούνται τυχαία. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, όπως είδαμε, προτείνει τον εξαναγκασμό ενός μικρού υποσυνόλου των κόμβων του δικτύου, το οποίο ονομάζεται «σύνολο υποστήριξης», να κινούνται σύμφωνα με τις ανάγκες του πρωτοκόλλου. Υποθέτοντας την διαθεσιμότητα τέτοιων κόμβων, ο σχεδιαστής του δικτύου μπορεί να τους χρησιμοποιήσει κατάλληλα, καθορίζοντας την κίνηση τους σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, τις οποίες καθορίζει το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις που απαιτείται ταχεία ανάπτυξη ενός δικτύου (π.χ. στρατιωτικές ή διασωστικές επιχειρήσεις) και είναι

διαθέσιμος ένας αριθμός από κατάλληλα οχήματα (π.χ. ελικόπτερα) ή αυτόνομες κινητές μονάδες (independent controlled mobile modules), όπως για παράδειγμα robots.

Πρόσφατες μελέτες [12] υποδεικνύουν ότι καθεμιά από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες πρωτοκόλλων είναι καταλληλότερη για ένα συγκεκριμένο είδος δικτύου και προφίλ χρηστών. Συγκεκριμένα, τα πρωτόκολλα που ακολουθούν την προσέγγιση της δημιουργίας και συντήρησης δρομολογίων συμπεριφέρονται καλά σε συνθήκες χαμηλής κινητικότητας του δικτύου, ενώ η επιδόσεις τους υποβαθμίζονται σημαντικά σε περιπτώσεις υψηλά κινητικών χρηστών. Στην εργασία [8] αποδεικνύεται ότι στην ύπαρξη κινητικότητας των χρηστών, τα πρωτόκολλα που δημιουργούν και συντηρούν δρομολόγια μπορεί να απαιτήσουν $\Omega(n^2)$ ανταλλαγές μηνυμάτων για να σταθεροποιηθούν. Επιπρόσθετα, οι αναλύσεις που παρέχονται στις [24, 34] υποδεικνύουν ότι στην προσέγγιση της κατασκευής δρομολογίων, η χωρητικότητα του δικτύου είναι ένας ακόμη σημαντικός περιοριστικός παράγοντας. Λεπτομερέστερα, η ρυθμαπόδοση (throughput) του δικτύου τείνει να μηδενιστεί καθώς ο αριθμός των κόμβων του δικτύου αυξάνει. Αντίθετα, η προσέγγιση του συνόλου υποστήριξης πάντα επιτυγχάνει στην παράδοση των μηνυμάτων [16] και επιπλέον φαίνεται να επωφελείται από την αύξηση της κινητικότητας των χρηστών [12]. Παρόλα αυτά, οι επιδόσεις του πρωτοκόλλου όσον αφορά την από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση παράδοσης των μηνυμάτων (end-to-end delay) είναι πολύ χαμηλές σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν κατασκευή δρομολογίων (φυσικά για την περίπτωση των μηνυμάτων που τελικά παραδίδονται).

Για την βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων κατασκευής δρομολογίων, καθώς ο αριθμός των κόμβων και/ή η περιοχή του δικτύου αυξάνεται, ένας αριθμός από πρωτόκολλα βασιζόμενα στην δημιουργία ομάδων (clusters) έχουν προταθεί, κάποια ιεραρχικά (hierarchical) [26] και κάποια επίπεδα (flat) [17]. Οι [24, 38] προσπαθούν να συνδυάσουν την οδηγούμενη από πίνακες και την κατ' απαίτηση προσέγγιση στο Zone Routing Protocol (ZRP), το οποίο περιορίζει την οδηγούμενη από πίνακες προσέγγιση σε μια ζώνη γύρω από τον κόμβο, ενώ χρησιμοποιεί κατ' απαίτηση ανακάλυψη δρομολογίων για απομακρυσμένους προορισμούς.

Με βάση τα παραπάνω, η [13] προσπαθεί να σχεδιάσει νέα πρωτόκολλα τα οποία επιτυγχάνουν καλά αποτελέσματα (όσον αφορά τα ποσοστά παράδοσης και την από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση των πακέτων) σε αδόμητα δίκτυα αποτελούμενα από κόμβους με μικτούς ρυθμούς κινητικότητας των χρηστών (mixed mobility rates). Η βασική ιδέα είναι η σύνθεση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων (πρωτόκολλα που δημιουργούν δρομολόγια και πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν σύνολα υποστήριξης) κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης να επωφελείται από τα πολύ υψηλά ποσοστά παράδοσης πακέτων της προσέγγισης των συνόλων υποστήριξης, παραδίδοντας ταυτόχρονα τα πακέτα με μικρή καθυστέρηση, συγκρίσιμη με αυτή που επιτυγχάνεται από τα πρωτόκολλα που κατασκευάζουν και συντηρούν δρομολόγια. Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν ότι αυτή η μέθοδος παράγει καλά αποτελέσματα και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις το υβριδικό πρωτόκολλο ξεπερνάει τις επιδόσεις των επιμέρους πρωτοκόλλων, επιτυγχάνοντας μικρότερη μέση καθυστέρηση και διατηρώντας ταυτόχρονα υψηλά ποσοστά παράδοσης.

Σε αυτή την εργασία, συνεχίζουμε την παραπάνω ερευνητική προσπάθεια προτείνοντας μια μετρική που ονομάζουμε *σταθερότητα* (*stability*) και την οποία χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίσουμε την σχετική κινητικότητα των κόμβων. Η μετρική χρησιμοποιεί την έννοια της *συσχέτισης* (*associativity*) [45], η οποία είναι ο χρόνος (σε beacons) κατά τον οποίο δύο κόμβοι συσχετίζονται (δηλαδή διατηρούν ένα σύνδεσμο). Σύμφωνα με την τιμή της σταθερότητάς του, κάθε κόμβος κατατάσσεται σε μια *κλάση κινητικότητας* (*mobility class*). Με βάση τις κλάσεις κινητικότητας, προτείνουμε ένα νέο framework πρωτοκόλλων, το οποίο λειτουργεί πάνω από το επίπεδο δικτύου και το οποίο για κάθε ζεύγος πηγής και προορισμού καθορίζει την στρατηγική δρομολόγησης (από αυτές που είναι διαθέσιμες στον κόμβο) που ανταποκρίνεται καλύτερα στην κινητικότητα του δικτύου.

Σε αντίθεση με την [13], στην παρούσα εργασία ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στον περιορισμό των απαιτούμενων αλλαγών στο λογισμικό που υλοποιεί τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Έτσι, στην περίπτωση μας δεν απαιτείται ο επανασχεδιασμός και η εξαρχής υλοποίηση των αρχικών πρωτοκόλλων. Αυτή η σχεδιαστική επιλογή μας επιτρέπει την ενσωμάτωση με σχετικά ελάχιστη προσπάθεια ενός μεγάλου αριθμού πρωτοκόλλων δρομολόγησης, τα οποία έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία (για παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε τα διαθέσιμα πρωτόκολλα δρομολόγησης για αδόμητα δίκτυα που έχουν υλοποιηθεί στον προσομοιωτή ns-2, χωρίς να προβούμε σε σημαντικές αλλαγές). Η εκτενής πειραματική αξιολόγηση (μέσω προσομοίωσης με χρήση λογισμικού) υποδεικνύει τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτής της ευαίσθητης στην κινητικότητα προσέγγισης (δείτε το Κεφάλαιο 4 που ακολουθεί). Συγκεκριμένα, για την περίπτωση που οι κόμβοι του δικτύου ακολουθούν πρότυπα κίνησης με διαφορετικές ταχύτητες, η προσομοίωση έδειξε ότι το framework που προτείνουμε επιτυγχάνει πολύ υψηλές επιδόσεις αναφορικά με τα ποσοστά παράδοσης, την από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση, καθώς και τον αριθμό αλμάτων που απαιτούνται για την παράδοση των πακέτων, σε σχέση με τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί.

3.1. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Ένα κινητό αδόμητο ασύρματο δίκτυο αποτελούμενο από γεωγραφικά διεσπαρμένους κινητούς κόμβους, οι οποίοι μπορούν να ανταλλάσσουν μηνύματα με άλλους κόμβους που βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης απόστασης γύρω τους (εμβέλεια μετάδοσης). Δύο κόμβοι που βρίσκονται καθέναν εντός της εμβέλειας μετάδοσης του άλλου λέγονται *γειτονικοί κόμβοι* ή απλώς *γείτονες*, ενώ ως *γειτονιά* ορίζεται κάθε σύνολο κόμβων με την ιδιότητα ότι οποιαδήποτε δύο μέλη του είναι γείτονες.

Υποθέτουμε ότι υπάρχει ένα υποκείμενο πρωτόκολλο επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων, το οποίο επιτρέπει την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων, παρέχοντας κάποια μορφή ελέγχου λαθών, έτσι ώστε τα μηνύματα που

παραδίδονται να είναι με μεγάλη πιθανότητα σωστά. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων παρέχει την δυνατότητα λήψης μηνυμάτων που δεν έχουν σαν τελικό προορισμό τον συγκεκριμένο κόμβο (promiscuous receiver mode). Ένα παράδειγμα τέτοιου πρωτοκόλλου είναι το διάσημο IEEE 802.11. Καμία υπόθεση δεν γίνεται για το φυσικό επίπεδο. Τέλος, θεωρούμε ότι σε κάθε κόμβο είναι διαθέσιμος ένας μηχανισμός σηματοδότησης (beaconing), ο οποίος μπορεί είτε να παρέχεται από το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων είτε να είναι εύκολο να υλοποιηθεί με την βοήθεια του κατ' απαίτηση πρωτοκόλλου (π.χ. τα HELLO μηνύματα του AODV).

Για την διευκόλυνση του αναγνώστη, στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε τον ορισμό της *συσχέτισης ενός συνδέσμου* (link's associativity) και ακολούθως εισάγουμε τον ορισμό της έννοιας της *σταθερότητας* (stability) και της *κλάσης κινητικότητας* (mobility class).

Ορισμός 1 (Συσχέτιση Συνδέσμου) Η *συσχέτιση ενός συνδέσμου* ορίζεται ως ο αριθμός των διαδοχικών σημάτων (beacons) που έχουν ληφθεί από τον συγκεκριμένο σύνδεσμο.

Για να χαρακτηρίσουμε την κινητικότητα των κόμβων (δηλαδή εάν κινούνται αργά ή γρήγορα) εισάγουμε μια μετρική, την οποία ονομάζουμε σταθερότητα των κόμβων. Η διαίσθηση μας είναι ότι σε γειτονιές όπου δεν συμβαίνουν συχνές τοπολογικές αλλαγές, ένας αλγόριθμος κατασκευής δρομολογίων δεν θα εισάγει μεγάλες επιβαρύνσεις όσον αφορά τα μηνύματα ελέγχου. Αντίθετα, σε γειτονιές όπου η τοπολογία συνεχώς μεταβάλλεται (με νέους κόμβους να έρχονται και παλιούς κόμβους να αποχωρούν) οι αλγόριθμοι κατασκευής δρομολογίων θα απαιτούν έναν μεγάλο αριθμό μηνυμάτων ελέγχου για να μπορέσουν να διατηρήσουν ενημερωμένη την δομή δεδομένων που καταγράφει την τοπολογία του δικτύου. Επίσης, είναι δυνατόν σε περιπτώσεις που το δίκτυο δεν είναι συνδυαστικά σταθερό (combinatorically unstable), δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η συχνότητα των τοπολογικών αλλαγών είναι μεγαλύτερη από τον χρόνο διάδοσης των μηνυμάτων ελέγχου, η επικοινωνία να καταστεί εντελώς αδύνατη.

Ορισμός 2 (Σταθερότητα Κόμβου) Εάν με $nbrs_u^{in}$ συμβολίσουμε την συλλογή των συσχετίσεων όλων των εισερχόμενων συνδέσμων του κόμβου u και εάν $|nbrs_u^{in}|$ συμβολίζει τον πληθάριθμο (cardinality) του $nbrs_u^{in}$ και $nbrs_u^{in}(i)$ την i -στή τιμή της συλλογής, τότε ορίζουμε την σταθερότητα ενός κόμβου u την χρονική στιγμή t ως

$$Stab_t^u = w_1 \cdot \frac{\sum_{k=1}^{|nbrs_u^{in}|} nbrs_u^{in}(k)}{|nbrs_u^{in}|} + w_2 \cdot Stab_{t-1}^u ,$$

όπου $w_1 + w_2 = 1$.

Τα δύο βάρη w_1 και w_2 είναι παράμετροι του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιούνται ως παράμετροι ωρίμανσης (aging factors) για την τιμή της σταθερότητας. Αυτός ο ορισμός της σταθερότητας επιλέχθηκε καθώς βοηθάει στον περιορισμό των ταλαντώσεων μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων της σταθερότητας, οι οποίες έχουν ανεπιθύμητες παρενέργειες που θα συζητηθούν στην συνέχεια. Παρατηρήστε, ότι εάν ένας κόμβος u κινείται αργά (δηλαδή έχει υψηλή τιμή $Stab_u$) και βρίσκεται σε μια περιοχή χαμηλής πυκνότητας κόμβων (δηλαδή μικρό $|nbrs_u^{in}|$), όταν ένας γρήγορος κόμβος v εισέλθει στην γειτονιά του, η σταθερότητα του u θα πέσει απότομα και όταν ο v εγκαταλείψει την γειτονιά θα επανέλθει στην προηγούμενη τιμή της. Αυτή η παρατήρηση είναι αποτέλεσμα της πειραματικής αξιολόγησης (δείτε Ενότητα 4.4)

Με βάση την τιμή της σταθερότητάς του, κάθε κόμβος κατατάσσει τον εαυτό του σε μια κλάση κινητικότητας, μέσω της χρήσης κατάλληλων κατωφλίων (thresholds). Στην συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τρεις κλάσεις κινητικότητας και συγκεκριμένα «αργή», «μέτρια» και «γρήγορη», αλλά η επέκταση σε περισσότερες κλάσεις, εφόσον χρειάζεται, είναι άμεση. Στην περίπτωση μας, απαιτείται η χρήση δύο κατωφλίων, έστω T_{slow} και T_{fast} , τα οποία πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε $T_{fast} < T_{slow}$. Οι τιμές των κατωφλίων μετρούνται όπως και οι τιμές της συσχέτισης και της σταθερότητας σε ticks. Η επιλογή τους είναι κατά βάση πειραματική και εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του υποκείμενου δικτύου.

Ορισμός 3 (Κατάταξη Κόμβου) Ένας κόμβος με σταθερότητα $Stab$ κατατάσσεται στην κλάση «αργός» εάν $Stab > T_{slow}$, στην κλάση «φυσιολογικός» αν $T_{fast} \leq Stab \leq T_{slow}$ και στην κλάση «γρήγορος» εάν $Stab < T_{fast}$.

Ο ορισμός που χρησιμοποιούμε για την σταθερότητα (ή κινητικότητα) ενός κόμβου είναι παρόμοιος με την μετρική για την κινητικότητα που ορίστηκε στην [30] και προσπαθεί να συλλάβει και να ποσοτικοποιήσει το είδος της κίνησης που σχετίζεται με ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για κινητά αδόμητα δίκτυα. Παρόλα αυτά, σε αντίθεση με την [30], όπου η αντίστοιχη μετρική χρησιμοποιείται για τον (εξωτερικό) χαρακτηρισμό των επιδόσεων των πρωτοκόλλων δρομολόγησης κατά την διάρκεια της πειραματικής αξιολόγησης, η μετρική μας ορίζεται για τους πραγματικούς κόμβους (λογισμικό) με σκοπό την (εσωτερική) εκτίμηση της σχετικής τους (σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους) κίνησης, η οποία και καθορίζει την συχνότητα δημιουργίας και καταστροφής συνδέσμων. Ο ορισμός μας δεν βασίζεται σε καμία καθολική (global) μετρική, όπως για παράδειγμα την γεωγραφική θέση των κόμβων ή τις ταχύτητές τους, αλλά μόνο σε μετρικές που μπορούν να υπολογιστούν τοπικά από τους πράκτορες λογισμικού (software agents) που υλοποιούν το πρωτόκολλο.

3.2. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΤΗ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

Το framework που προτείνουμε μπορεί να διαχωριστεί λογικά σε τρεις διαφορετικές υπηρεσίες (services), δηλαδή ουσιαστικά σε πράκτορες λογισμικού (software agents). Η πρώτη υπηρεσία είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό της συσχέτισης των συνδέσμων του κόμβου και την κατάταξη του κόμβου σε κάποια κλάση κινητικότητας. Την αποκαλούμε *υπηρεσία κατάταξης κινητικότητας (Mobility Classification Service – MCS)*. Η δεύτερη υπηρεσία καθορίζει το πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου, βασιζόμενη στις πληροφορίες που παρέχει η πρώτη υπηρεσία (MCS), καθώς και οι πράκτορες λογισμικού των διαθέσιμων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Η υπηρεσία αυτή ονομάζεται *υπηρεσία επιλογής στρατηγικής (Strategy Selection Service – SSS)*. Η τρίτη υπηρεσία ονομάζεται *υπηρεσία δρομολόγησης (Routing Service – RS)* και είναι η υπηρεσία που υλοποιεί ουσιαστικά την δρομολόγηση (δηλαδή παρεμβάλλεται μεταξύ του επιπέδου διαδικτύου και του επιπέδου δικτύου). Είναι παρόμοια με έναν πράκτορα που υλοποιεί ένα κανονικό πρωτόκολλο δρομολόγησης και αναλαμβάνει να διανείμει τα πακέτα στους κατάλληλους πράκτορες των διαθέσιμων πρωτοκόλλων δρομολόγησης, σύμφωνα με την επιλογή της SSS.

Η βασική ιδέα είναι να επιτρέψουμε σε κάθε κόμβο να εκτελεί διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης ταυτόχρονα και να επιτρέψουμε στο ευαίσθητο στην κινητικότητα των κόμβων framework μας να ελέγχει την λειτουργία τους (ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας τους πράκτορες που υλοποιούν τα πρωτόκολλα) και επαναδρομολογώντας όλη την κίνηση του κόμβου διαμέσου της RS. Ο σχεδιασμός μας βασίζεται στο πρότυπο «εργοστασίου» (Factory design pattern) [21], έτσι ώστε τα υπόλοιπα τμήματα λογισμικού, τα οποία βασίζονται στο πρωτόκολλο δρομολόγησης, να μην χρειάζεται να καθορίζουν κάθε φορά το πρωτόκολλο δρομολόγησης που πρέπει να χρησιμοποιήσουν. Κατ' αυτό τον τρόπο περιορίζουμε την επίδραση της απόφασης για το ποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης θα χρησιμοποιήσουμε στο εσωτερικό του framework. Η σχεδίαση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την αλλαγή (switching) μεταξύ των διαθέσιμων πρωτοκόλλων σε αυτό που είναι καταλληλότερο (για παράδειγμα οδηγούμενο από πίνακες, κατ' απαίτηση, βασιζόμενο σε ομάδες, βασιζόμενο σε σύνολα υποστήριξης κ.τ.λ.) με βάση την παρατηρούμενη κατάσταση του δικτύου. Σε αυτή την εργασία η επιλογή του καταλληλότερου πρωτοκόλλου γίνεται αποκλειστικά με βάση την κλάση κινητικότητας των κόμβων πηγής και προορισμού, δηλαδή ουσιαστικά επιλέγεται κάθε φορά το πρωτόκολλο που αναμένεται να έχει την καλύτερη προσαρμογή στην κινητικότητα του δικτύου. Όμως, είναι μάλλον βέβαιο, ότι το framework μπορεί να επεκταθεί ώστε να υποστηρίζει επιλογές στρατηγικών δρομολόγησης με βάση άλλα χαρακτηριστικά του υποκείμενου δικτύου, όπως την ενεργειακή κατάσταση των κόμβων, την γεωγραφική τους θέση, τις απαιτήσεις για QoS κ.α. Όμως, λόγω έλλειψης χρόνου, η έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση αφήνεται ως μελλοντική εργασία.

Βασικός στόχος του σχεδιασμού μας ήταν η δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε την πληθώρα πρωτοκόλλων δρομολόγησης για MANET που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, ενσωματώνοντας τα στο framework μας με την ελάχιστη δυνατή

προσπάθεια. Κάθε απόπειρα να υλοποιήσουμε εξ αρχής ή να επανασχεδιάσουμε κάποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης για MANET, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εσωτερικό κομμάτι του framework μας θα ήταν εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα. Ασφαλώς, κάποιος επιπρόσθετος κώδικας πρέπει να γραφτεί για την διασύνδεση των υπαρχόντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης με την RS και την SSS, αλλά πιστεύουμε ότι η προσπάθεια αυτή αξίζει τον κόπο δεδομένης της βελτίωσης των επιδόσεων που επιτυγχάνεται.

Στην συνέχεια υποθέτουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι τα εξής τρία πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι διαθέσιμα:

- P_1 - ένα οδηγούμενο από πίνακες πρωτόκολλο,
- P_2 - ένα κατ' απαίτηση πρωτόκολλο και
- P_3 - ένα πρωτόκολλο που βασίζεται σε σύνολα υποστήριξης.

Για στατικούς ή αργά κινούμενους κόμβους (δηλαδή κόμβους με υψηλή τιμή σταθερότητας), επιτρέπουμε στο P_1 να δημιουργήσει δρομολόγια μεταξύ στατικών/αργών κόμβων του δικτύου. Για κόμβους που κινούνται πιο γρήγορα ή, γενικότερα, η γειτονιά τους μεταβάλλεται συχνότερα, αλλάζουμε στο πρωτόκολλο P_2 , το οποίο περιορίζει το κόστος (σε μηνύματα ελέγχου) μόνο σε αυτό που είναι απαραίτητο για την συντήρηση των ενεργών δρομολογίων. Τέλος, όταν ο κόμβος αυξάνει την ταχύτητα του υπερβολικά (ή το δίκτυο γίνεται εξαιρετικά δυναμικό) αποφεύγουμε τελείως την κατασκευή και συντήρηση δρομολογίων και χρησιμοποιούμε το σύνολο υποστήριξης του δικτύου για την αναμετάδοση (relaying) των μηνυμάτων κάνοντας χρήση του P_3 . Για την συζήτηση που θα ακολουθήσει, χρησιμοποιούμε ως P_1 το DSDV, ως P_2 το AODV και ως P_3 το RUNNERS.

Κατάταξη	Ενεργά Πρωτόκολλα	Παράδειγμα
Αργός	P_1, P_2	DSDV, AODV
Φυσιολογικός	P_2	AODV
Γρήγορος	P_3	RUNNERS

Πίνακας 3. Επιλογή πρωτόκολλου με βάση τις κινητικές κατηγορίες των κόμβων.

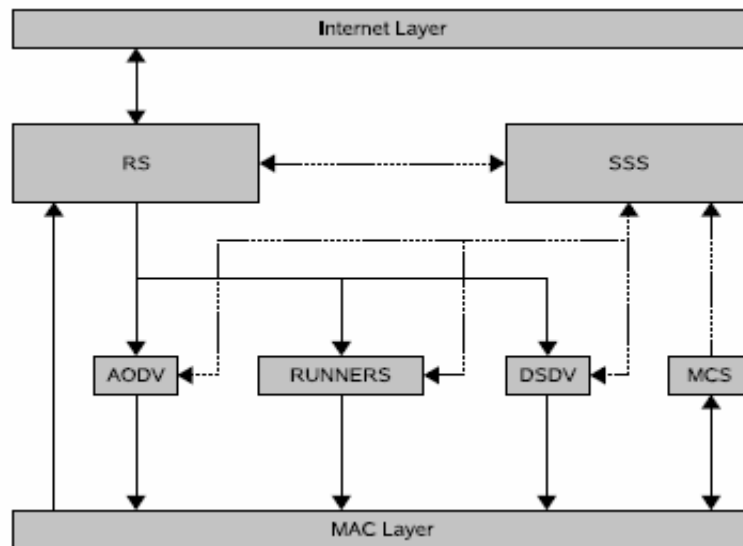
Περιγράφοντας τον τρόπο λειτουργίας του framework με περισσότερες λεπτομέρειες, η MCS χρησιμοποιώντας έναν απλό μηχανισμό σηματοδότησης, υπολογίζει περιοδικά την σταθερότητα του κόμβου (με την χρήση του Ορισμού 2) και κατατάσσει τον κόμβο σε μια κλάση κινητικότητας (με την χρήση του Ορισμού 3). Σύμφωνα με την κλάση κινητικότητας που αναφέρει η MCS, η SSS ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί κάποια από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα δρομολόγησης (δείτε τον Πίνακα 3). Με τον όρο απενεργοποίηση εννοούμε ότι το αντίστοιχο πρωτόκολλο δρομολόγησης σταματά να παράγει και να

επεξεργάζεται μηνύματα ελέγχου. Συγκεκριμένα, το DSDV σταματά να εκδίδει μηνύματα ενημέρωσης (update), είτε περιοδικού τύπου (periodic) είτε αυξητικού τύπου (incremental), με αποτέλεσμα οι πίνακες δρομολόγησης των κόμβων να περιέχουν καταχωρήσεις μόνο για αργούς κόμβους, τα δρομολόγια για τους οποίους αναμένεται κατά συνέπεια να έχουν αυξημένη αξιοπιστία. Επιπλέον, για να αποφύγουμε την κατάσταση όπου δύο αργοί κόμβοι συνδέονται μέσω ενός ασταθούς συνδέσμου (δηλαδή ενός συνδέσμου με τιμή συσχέτισης μικρότερη από T_{slow}), ο οποίος θεωρείται αναξιόπιστος, οι καταχωρήσεις στον πίνακα δρομολόγησης προς αυτούς απενεργοποιούνται με την χρήση άπειρης τιμής για την χρησιμοποιούμενη μετρική. Παρομοίως, το AODV σταματά να συμμετέχει στην διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίων, έτσι ώστε οι νέες κατ' απαίτηση διαδρομές να μην συμπεριλαμβάνουν τον κόμβο. Τέλος, το RUNNERS σταματά να θεωρεί ότι ο κόμβος συμμετέχει στο σύνολο υποστήριξης του δικτύου, με αποτέλεσμα να μην συμμετέχει πλέον σε συγχρονισμούς των buffers του με άλλους κόμβους υποστήριξης ή να παραλαμβάνει πακέτα από αποστολείς.

Κάθε φορά που η RS παραλαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων, αποφασίζει με βάση την υπόδειξη της SSS το καλύτερο πρωτόκολλο για την αποστολή του πακέτου και παραδίδει το πακέτο στον πράκτορα δρομολόγησης (routing agent) του. Πιο συγκεκριμένα, αν η κλάση του κόμβου είναι γρήγορος, τότε το πακέτο παραδίδεται στο RUNNERS και όταν είναι φυσιολογικός παραδίδεται στο AODV. Η περίπτωση που ο κόμβος χαρακτηρίζεται ως αργός είναι ειδική στο ότι η RS πρέπει να εξασφαλίσει ότι το DSDV έχει δρομολόγιο προς τον προορισμό του πακέτου (δηλαδή ο κόμβος προορισμού και όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι αργοί). Σε περίπτωση που το δρομολόγιο δεν υπάρχει, το πακέτο παραδίδεται στο AODV. Για να ωφεληθούμε από την ύπαρξη του συνόλου υποστήριξης σε περίπτωση διαμερισμένων (disconnected) δικτύων, όταν ένα πακέτο δεν μπορεί να παραδοθεί από το AODV (δηλαδή το AODV δεν μπορεί να ανακαλύψει ένα δρομολόγιο προς τον προορισμό), το πακέτο παραδίδεται επίσης και στο RUNNERS. Το γεγονός ότι οι γρήγοροι κόμβοι δεν συμμετέχουν στον μηχανισμό ανακάλυψης δρομολογίων (εφόσον απενεργοποιούν το AODV) εξασφαλίζει ότι το AODV δεν θα ανακαλύψει κάποιο δρομολόγιο προς έναν γρήγορο προορισμό και άρα ότι θα χρησιμοποιηθεί ο προηγούμενος μηχανισμός για την παράδοση του πακέτου (δηλαδή θα γίνει χρήση του συνόλου υποστήριξης).

Επειδή το framework είναι ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της σταθερότητας (για παράδειγμα εάν ένας κόμβος αρχίσει να κινείται γρήγορα και κάποιοι σταθεροί σύνδεσμοι καταστραφούν, η σταθερότητα του θα μειωθεί σημαντικά), ανεπιθύμητες ταλαντώσεις κυρίως μεταξύ των καταστάσεων γρήγορος και φυσιολογικός μπορεί να παρατηρηθούν. Το πρόβλημα αυτό επιδεινώνεται εάν παρατηρήσουμε ότι για να λειτουργήσει αποδοτικά ένα πρωτόκολλο βασισμένο σε σύνολα υποστήριξης, απαιτείται να υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός κόμβων υποστήριξης. Έτσι, εάν έπειτα από κάποιες καταστροφές συνδέσμων παραδοθούν κατά λάθος κάποια πακέτα στον πράκτορα δρομολόγησης του RUNNERS ή παραδοθούν ενώ δεν υπάρχουν αρκετοί κόμβοι υποστήριξης στο δίκτυο, η απόδοση του framework θα μειωθεί δραματικά. Για να αποφύγουμε αυτά τα προβλήματα χρησιμοποιούμε δύο τεχνικές. Η πρώτη είναι η χρήση μιας «περιόδου διακυμάνσεων» (fluctuation period) κατά την οποία, ενώ η κλάση κινητικότητας του κόμβου θεωρείται

γρήγορη, το πρωτόκολλο RUNNERS παραμένει απενεργοποιημένο. Η δεύτερη είναι η καταγραφή των HELLO μηνυμάτων (beacons) που έχουν ληφθεί από κόμβους υποστήριξης και η δυνατότητα παράδοσης πακέτων στον πράκτορα δρομολόγησης του RUNNERS μόνο όταν ο αριθμός των HELLO μηνυμάτων είναι μεγαλύτερος από κάποιο κατώφλι.



Εικόνα 15. Αρχιτεκτονική του framework – Η συνεχείς γραμμές απεικονίζουν ροές πακέτων, ενώ οι διακεκομμένες συμβολίζουν ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων πρακτόρων λογισμικού (interprocess communication).

Για μια γραφική απεικόνιση της διασύνδεσης των τριών υπηρεσιών, από τις οποίες αποτελείται το framework (MCS, SSS και RS) με το κατώτερο (MAC) και το ανώτερο (Internet) στρώμα, καθώς και με τους πράκτορες των πρωτοκόλλων δρομολόγησης μπορείτε να δείτε την Εικόνα 15.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ MSA

Καθώς η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων και κατά συνέπεια των MANET αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς, είναι επιτακτική η ανάγκη κατασκευής υψηλού επιπέδου λογισμικού για την υποστήριξή τους. Η ανάπτυξη και επικράτηση νέων συστημάτων και βελτιωμένων σχεδιασμών ανέκαθεν βασιζόταν και θα συνεχίσει να βασίζεται στην ικανότητα παροχής εκτιμήσεων της απόδοσης τους μέσω αναλυτικών μεθόδων ή προσομοίωσης. Έτσι και στα ασύρματα δίκτυα η μοντελοποίηση (modeling) και η προσομοίωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση σχεδιασμών που απευθύνονται σε αυτά. Μέχρι σήμερα, η μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση έχει προσφέρει σημαντικές γνώσεις για την κατανόηση των δυνατοτήτων και των προβλημάτων των ασύρματων δικτύων. Παρόλα αυτά, οι αναλυτικές μέθοδοι πολλές φορές δεν είναι αρκετά γενικές ή, στο άλλο άκρο, αρκετά λεπτομερείς για την αξιολόγηση και σύγκριση των διάφορων ασύρματων συστημάτων και των υπηρεσιών τους. Κατά συνέπεια σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση προσομοίωσης είναι ο μόνος τρόπος για τους μηχανικούς να ελέγξουν τις επιδόσεις των διαφόρων λύσεων, ώστε να λάβουν κρίσιμες σχεδιαστικές αποφάσεις.

Η βασιζόμενη σε υπολογιστές, διακριτών γεγονότων προσομοίωση (discrete-event simulation) είναι μια από τις πιο ευέλικτες μεθόδους αξιολόγησης των επιδόσεων πολύπλοκων συστημάτων, όπως τα MANET. Ο στόχος μιας βασιζόμενης σε προσομοίωση μελέτης είναι η κατασκευή ενός προσομοιωτή που μιμείται την συμπεριφορά και τις μεταβάσεις μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων του πραγματικού συστήματος. Η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων της προσομοίωσης προσφέρει εκτιμήσεις για τις επιδόσεις του υπό μελέτη συστήματος, οι οποίες, αν και όχι εντελώς ακριβείς, προσφέρουν στις περισσότερες περιπτώσεις (εφόσον τηρούν κάποιες προϋποθέσεις [32]) αρκετά ενδεικτικά αποτελέσματα. Μια σωστή μελέτη μέσω προσομοίωσης περιλαμβάνει μια σειρά από βήματα, των οποίων ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την φύση του συστήματος που αναλύεται και των στόχων της ανάλυσης. Τα θεμελιώδη βήματα κάθε προσομοίωσης είναι

- 1) Καθορισμός του προβλήματος.
- 2) Ορισμός και τεκμηρίωση (validation) του χρησιμοποιούμενου μοντέλου.
- 3) Κατασκευή και τεκμηρίωση του προσομοιωτή.
- 4) Σχεδιασμός των πειραμάτων.
- 5) Ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Τα δύο πρώτα βήματα της προσομοίωσης, δηλαδή ο καθορισμός του προβλήματος και το χρησιμοποιούμενο μοντέλο αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Έτσι, θα πρέπει στην συνέχεια

να επιλέξουμε ή να κατασκευάσουμε τον προσομοιωτή που θα χρησιμοποιήσουμε και κατόπιν να σχεδιάσουμε και να εκτελέσουμε τα πειράματά μας.

Εξαιτίας των διαφορετικών αναγκών και των διαφορετικών προσεγγίσεων στο πρόβλημα της προσομοίωσης, πολλές κατηγορίες προσομοιωτών έχουν προταθεί. Οι τρεις διαφορετικές κατηγορίες προσομοίωσης που μπορούν να διακριθούν είναι: συνεχείς (continuous), διακριτές (discrete) και υβριδικές (hybrid). Η συνεχής προσομοίωση μοντελοποιεί καταστάσεις, όπου οι αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος συμβαίνουν ομαλά και συνεχόμενα στον χρόνο, για παράδειγμα η ροή ενός υγρού μέσα σε ένα σύστημα σωληνώσεων, η μοντελοποίηση του καιρού ή η προσομοίωση σε επίπεδο ηλεκτρικού κυκλώματος μιας ηλεκτρονικής συσκευής. Η διακριτή προσομοίωση αναφέρεται στην μοντελοποίηση συστημάτων, όπου οι αλλαγές καταστάσεων συμβαίνουν μόνο σε διακριτές στιγμές στον χρόνο, όπως για παράδειγμα σε προσομοιώσεις λογικών κυκλωμάτων, ψηφιακών συστημάτων ή συστημάτων ουρών (π.χ. ουρές στα ταμεία μιας τράπεζας). Τέλος, πολλά συστήματα είναι υβριδικά, δηλαδή περιέχουν συνδυασμούς συνεχών και διακριτών χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα μια πλατφόρμα ξεφορτώματος δεξαμενοπλοίων, όπου τα δεξαμενόπλοια περιμένουν σε ουρά ενώ το πετρέλαιο ξεφορτώνεται μέσω σωληνώσεων.

Η απόφαση για το εάν θα χρησιμοποιηθεί διακριτή ή συνεχής προσομοίωση για την μοντελοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος εξαρτάται πρωτίστως από τους στόχους της μελέτης. Για παράδειγμα όταν μελετάμε την ροή της κίνησης σε έναν οδικό δίκτυο από την άποψη ενός οχήματος πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διακριτή προσομοίωση. Αντίθετα, αν μελετάμε την κίνηση από την άποψη ενός συγκοινωνιολόγου και η κίνηση των αυτοκινήτων αντιμετωπίζεται αθροιστικά ως ένα συνεχές ρεύμα, τότε η κίνηση θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί μέσω της χρήσης διαφορικών εξισώσεων και να προσομοιωθεί μέσω ενός συνεχούς μοντέλου. Καθώς τα MANET αποτελούν ένα διακριτό σύστημα για την αξιολόγηση τους χρησιμοποιούνται διακριτοί προσομοιωτές.

Ένας διακριτών-γεγονότων προσομοιωτής προχωράει από μια κατάσταση, η οποία περιγράφεται από ένα σύνολο μεταβλητών που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά του συστήματος, στην επόμενη, κάθε φορά που συμβαίνει ένα στιγμιαίο γεγονός. Κάθε τέτοιο γεγονός σχετίζεται με κάποια χρονική στιγμή της προσομοίωσης, η οποία ονομάζεται χρονοσφραγίδα (timestamp) και η οποία καθορίζει τον χρόνο πραγματοποίησής του. Επίσης, η πραγματοποίηση κάθε γεγονότος μπορεί με την σειρά της να οδηγήσει στην δημιουργία άλλων, μελλοντικών γεγονότων. Η δημιουργία νέων γεγονότων και η εξάρτηση των μεταβάσεων μεταξύ τους στις μεταβλητές που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος (τις οποίες προηγούμενα γεγονότα πιθανόν να μεταβάλλουν), ορίζουν μια μερική διάταξη (partial order) ή μια αιτιολογική διάταξη (causal order) μεταξύ τους. Σχετιζόμενα γεγονότα λέγεται ότι είναι αιτιολογικά εξαρτημένα (causally dependent), ενώ τα ασυσχέιστα ονομάζονται ταυτόχρονα (concurrent). Για την εξασφάλιση της ορθότητας της προσομοίωσης, τα αιτιολογικά εξαρτημένα γεγονότα πρέπει να επεξεργάζονται με την σειρά που ορίζει η αιτιολογική τους διάταξη, σε αντίθεση με τα ταυτόχρονα γεγονότα που μπορεί να επεξεργάζονται ασφαλώς με οποιαδήποτε σειρά. Κατά συνέπεια για να εξασφαλίσουμε την αυστηρή χρονολογική σειρά επεξεργασίας των γεγονότων, τα γεγονότα

πρέπει να επεξεργάζονται ένα την φορά, οδηγώντας έτσι αναπόφευκτα σε ένα σειριακό πρόγραμμα.

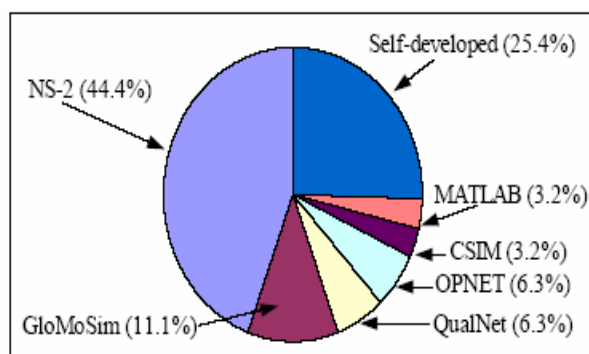
Καθώς, όπως αναφέρθηκε, η σημασία της προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, έχει κατασκευαστεί ένας μεγάλος αριθμός προσομοιωτών για την αξιολόγηση των αδόμητων δικτύων ή και ακόμα κάποιων ειδικών κατηγοριών αυτών (π.χ. δίκτυα αισθητήρων). Επίσης, εξαιτίας της φύσης των αδόμητων δικτύων είναι δυνατό η αξιολόγηση τους να γίνει και με την χρήση γενικότερων προσομοιωτών που στοχεύουν σε έρευνα δικτύων (όχι αναγκαστικά ασύρματων), αλλά και προσομοιωτές καταναμημένων συστημάτων. Μέχρι σήμερα, η ερευνητική κοινότητα δεν έχει καταλήξει σε κάποιον κοινά αποδεκτό προσομοιωτή, αλλά ούτε καν σε κάποια κοινά αποδεκτά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει κάποιος προσομοιωτής (π.χ. αν θα πρέπει να είναι λεπτομερής, παρέχοντας ακριβείς μοντελοποιήσεις για όλα τα χαρακτηριστικά του δικτύου ή αν θα πρέπει να είναι αφαιρετικός, δίνοντας έμφαση στις υπό μελέτη ιδιότητες του εξεταζόμενου αλγορίθμου).

Ενδεικτικά της κατάστασης που επικρατεί και της δυσκολίας του προβλήματος της προσομοίωσης των αδόμητων δικτύων είναι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία [10], όπου γίνεται μια απόπειρα σύγκρισης των τριών δημοφιλέστερων προσομοιωτών για αδόμητα δίκτυα (ns-2, GloMoSim, OPNET). Η εργασία αυτή υποδεικνύει ότι εξαιτίας των διαφορών στην μοντελοποίηση των διαφόρων δικτυακών επιπέδων και της κίνησης των κόμβων, καθώς και στις διαφορετικές προσεγγίσεις στην υλοποίηση τόσο του προσομοιωτή όσο και των υπό προσομοίωση αλγορίθμων μεταξύ των προσομοιωτών, ακόμα και στην περίπτωση ενός εξαιρετικά τετριμμένου αλγορίθμου, όπως ο αλγόριθμος της πλημμύρας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφέρουν δραματικά. Επιπλέον, πολύ συχνό φαινόμενο στους προσομοιωτές είναι η ύπαρξη λαθών (bugs) ή ανακολουθιών στις υλοποιήσεις των πρωτοκόλλων με την αντίστοιχη περιγραφή τους. Αυτά τα προβλήματα και πολλά ακόμα (των οποίων η παρουσίαση θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο άλλης εργασίας), υποδηλώνουν ότι τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης είναι αυστηρά και μόνο ενδεικτικά της απόδοσης των πρωτοκόλλων και δεν θα πρέπει να οδηγούν από μόνα τους στην εξαγωγή συμπεράσματος.

Στην πράξη βέβαια, η συντριπτική πλειοψηφία των εργασιών που σχετίζονται με αδόμητα δίκτυα βασίζεται σε αποτελέσματα προσομοίωσης για την επικύρωση των αποτελεσμάτων τους, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από την εργασία [32]. Η εργασία αυτή μελετά την αξιοπιστία και τα συχνότερα λάθη των προσομοιώσεων που εμφανίζονται στις εργασίες που έχουν δημοσιευτεί σε ένα από τα μεγαλύτερα συνέδρια του χώρου (MobiHoc) στο διάστημα 2000-2004. Συγκεκριμένα, η εργασία αυτή αναφέρει ότι σε ένα σύνολο 111 εργασιών, το 75.7% των εργασιών χρησιμοποιεί προσομοίωση. Επίσης, παραθέτει στατιστικά αποτελέσματα (Εικόνα 16) για την χρήση συγκεκριμένων προσομοιωτών, από τα οποία φαίνεται ότι οι τέσσερις δημοφιλέστεροι προσομοιωτές είναι ο ns-2, ο GloMoSim, ο QualNet και ο OPNET, ενώ αρκετά συνηθισμένη είναι και η χρήση «αυτοσχέδιων» προσομοιωτών.

Ο Network Simulator 2 (ns-2) [2] είναι ένας διακριτών-γεγονότων προσομοιωτής, ο οποίος ξεκίνησε το 1989 σαν διαφοροποίηση του προσομοιωτή δικτύων REAL. Αν και αρχικά προοριζόταν για ενσύρματα δίκτυα, το Monarch Group του CMU (τώρα στο Rice

University) επέκτεινε τις δυνατότητές του για προσομοίωση ασύρματων δικτύων, όπως τα MANET ή τα ασύρματα LAN. Το βασικότερο, ίσως, πλεονέκτημα του ns-2 είναι η δημοφιλία του και ο μεγάλος αριθμός πρωτόκολλων που έχουν υλοποιηθεί σε αυτόν. Τα περισσότερα από τα μειονεκτήματά του προέρχονται κυρίως από το γεγονός ότι είναι ανοικτού κώδικα (open-source). Συγκεκριμένα, η τεκμηρίωση (documentation) που παρέχεται είναι συχνά περιορισμένη ή παρωχημένη σε σχέση με την τρέχουσα έκδοση του προσομοιωτή. Ευτυχώς, χάρη στην μεγάλη κοινότητα που χρησιμοποιεί τον ns-2, τα περισσότερα προβλήματα μπορούν να λυθούν γρήγορα μέσω μιας αναζήτησης στο Internet ή μέσω των σχετικών newsgroups. Το δεύτερο πρόβλημα, είναι ότι συχνά εμφανίζονται ασυνέπειες στον κώδικα μεταξύ διαδοχικών εκδόσεων του προσομοιωτή, κάτι που μπορεί να δυσκολέψει την σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι η ανυπαρξία εργαλείων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τα αρχεία εξόδου του προσομοιωτή, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο διαφορετικοί άνθρωποι να μετράνε διαφορετικές τιμές για το ίδιο όνομα μετρικής. Τέλος, δύο προβλήματα που έχουν να κάνουν με την φύση της υλοποίησης του ns-2 (ο οποίος είναι γραμμένος σε C++ και προσβάσιμος μέσω OTcl) είναι η δυσκολία εκσφαλμάτωσης (debugging) και η αδυναμία κλιμάκωσης σε μεγάλο αριθμό κόμβων του δικτύου, λόγω των μεγάλων απαιτήσεων του ns-2 σε μνήμη και αποθηκευτικό χώρο (για τα αρχεία εξόδου του).



Εικόνα 16. Ποσοστά χρήσης προσομοιωτή στο συνέδριο MobiHoc για το διάστημα 2000-2004.

Ο GloMoSim [1] είναι ένα κλιμακώσιμο (scalable) περιβάλλον προσομοίωσης για ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά στο Computing Laboratory του UCLA. Σχεδιάστηκε με την χρήση των δυνατοτήτων παράλληλης διακριτών-γεγονότων προσομοίωσης που παρέχει μια βασισόμενη στην C γλώσσα παράλληλης προσομοίωσης, η Parsec. Ο GloMoSim μέχρι σήμερα διαθέτει την δυνατότητα προσομοίωσης μόνο καθαρά ασύρματων δικτύων. Η κατασκευή του βασίζεται στην ύπαρξη πολλών επιπέδων και παρέχει API για την επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων, κάτι το οποίο επιτρέπει την ταχεία ενσωμάτωση πρωτοκόλλων για διαφορετικά επίπεδα. Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του δικτύου, ο χρήστης χρησιμοποιεί δύο αρχεία κειμένου, τα app.conf και Config.in, το πρώτο από τα οποία περιέχει την περιγραφή της

κίνησης που πρέπει να δημιουργηθεί (είδος εφαρμογής, ρυθμός κτλ.) και το δεύτερο περιέχει τον καθορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων. Το βασικό πρόβλημα του GloMoSim είναι ότι η αρχιτεκτονική του είναι ιδιαίτερα άκαμπτη, με αποτέλεσμα η ενσωμάτωση κάποιων πρωτοκόλλων που «ξεφεύγουν» από το OSI να είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Ο OPNET Modeler είναι ένας ιδιαίτερα ισχυρός δικτυακός προσομοιωτής που αναπτύσσεται από την OPNET. Μπορεί να προσομοιώσει κάθε είδους ενσύρματο δίκτυο, ενώ παρέχει και μια υλοποίηση του IEEE 802.11. Παρόλο που ο OPNET Modeler προορίζεται μάλλον για εταιρείες που θέλουν να αναδιοργανώσουν το δίκτυο τους, είναι δυνατό κάποιος να υλοποιήσει το πρωτόκολλό του, χρησιμοποιώντας μια πληθώρα υπαρχόντων μερών. Το βασικό πλεονέκτημα του είναι η χρήση ενός ιεραρχικού γραφικού περιβάλλοντος για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, καταρχήν ο χρήστης πρέπει να επιλέξει και να διαμορφώσει τους κόμβους που θέλει να χρησιμοποιήσει (π.χ. ασύρματος κόμβος, σταθμός εργασίας, δρομολογητής, εξυπηρετητής κτλ.). Στην συνέχεια μπορεί να διαμορφώσει την τοπολογία του δικτύου συνδέοντας τις διάφορες οντότητες του δικτύου μεταξύ τους. Το τελευταίο βήμα αφορά τον καθορισμό των στατιστικών που πρέπει να συλλεγούν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Όταν κάποιος θέλει να ενσωματώσει ένα νέο πρωτόκολλο στον OPNET Modeler, μπορεί να το κάνει περιγράφοντας το σαν μια μηχανή καταστάσεων (state machine). Κάθε κατάσταση καθορίζει κάποιον κώδικα που πρέπει να εκτελεστεί κάθε φορά που συμβαίνει μια μετάβαση σε αυτήν. Μια μετάβαση μεταξύ δύο καταστάσεων συμβαίνει κάθε φορά που κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες πραγματοποιούνται. Παρά το γεγονός ότι η μηχανές καταστάσεων είναι η πιο πρακτική είσοδος σε διακριτούς προσομοιωτές και επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση μεγάλου μέρους υλοποιημένων πρωτοκόλλων, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να κατασκευαστούν (ιδιαίτερα ξεκινώντας από την περιγραφή ενός πρωτοκόλλου σε ψευδοκώδικα), να εκσφαλματωθούν, να επεκταθούν και να επαληθευτεί η ορθότητά τους.

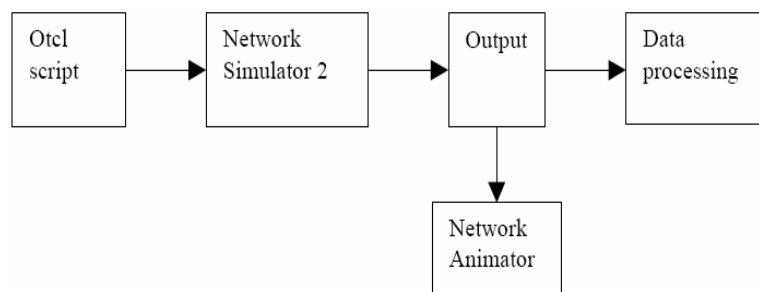
Στα πλαίσια της αξιολόγησης του πρωτοκόλλου μας, επιλέχθηκε να γίνει χρήση του ns-2. Η επιλογή αυτή έγινε με βάση αρκετές από τις παραμέτρους που αναφέραμε, όπως την «ανοιχτή» φύση του προσομοιωτή, την δημοφιλία του, την πληθώρα υλοποιήσεων πρωτοκόλλων που παρέχει, τον τρόπο υλοποίησης του και άλλες. Έτσι, στην αμέσως επόμενη ενότητα θα παρουσιάσουμε σύντομα τον ns-2, στην συνέχεια θα αναφερθούμε σύντομα στις υλοποιήσεις των πρωτοκόλλων που πραγματοποιήσαμε σε αυτόν, ενώ κατόπιν θα παρουσιάσουμε το στήσιμο (setup) της προσομοίωσης μας και τα αποτελέσματα της.

4.1. Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ NS-2

Ο προσομοιωτής Network Simulator 2 (ns-2) είναι το αποτέλεσμα μιας συνεχιζόμενης προσπάθειας έρευνας και ανάπτυξης ενός προσομοιωτή διακριτών γεγονότων με στόχο την έρευνα δικτύων. Προσφέρει θεμελιώδη υποστήριξη για την

προσομοίωση ενός πλήθους πρωτοκόλλων όλων των δικτυακών επιπέδων τόσο για ενσύρματα όσο και για ασύρματα (τοπικά και δορυφορικά) δίκτυα. Εξαιτίας των δυνατοτήτων που διαθέτει και του πλήθους των προσφερόμενων υλοποιήσεων πρωτοκόλλων, έχει άτυπα καθιερωθεί ως ο βασικότερος προσομοιωτής για την αξιολόγηση πρωτοκόλλων για MANET. Στην παρούσα ενότητα θα περιγράψουμε σύντομα (καθώς ο ns-2 αποτελεί ένα εξαιρετικά περίπλοκο σύστημα με μεγάλο αριθμό δυνατοτήτων, το οποίο αναπτύσσεται καθημερινά) κάποια από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της τρέχουσας έκδοσης (2.27) του προσομοιωτή και κυρίως των χαρακτηριστικών του που χρειάζονται για την πειραματική αξιολόγηση της MSA.

Ο ns-2 βασίζεται σε έναν αντικειμενοστραφή προσομοιωτή που είναι γραμμένος σε C++ και σε έναν διερμηνευτή της OTcl (αντικειμενοστραφής επέκταση της scripting γλώσσας Tcl) που χρησιμοποιείται για να εκτελούνται τα σενάρια (scripts) του χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης γράφει ένα σενάριο OTcl, όπου καθορίζει τις παραμέτρους του δικτύου (τις πηγές, τους προορισμούς, τον τύπο της κίνησης) και πια πρωτόκολλα θα χρησιμοποιήσει. Το σενάριο έπειτα χρησιμοποιείται από τον προσομοιωτή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης είναι ένα ή περισσότερα αρχεία καταγραφής (trace file), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των δεδομένων της προσομοίωσης (π.χ. υπολογισμό καθυστέρησης και ποσοστού παράδοσης), καθώς και για την γραφική απεικόνισή της (π.χ. μέσω του Network Animator – NAM). Μια γενική άποψη της δομής του ns-2 φαίνεται στην Εικόνα 17 που ακολουθεί.

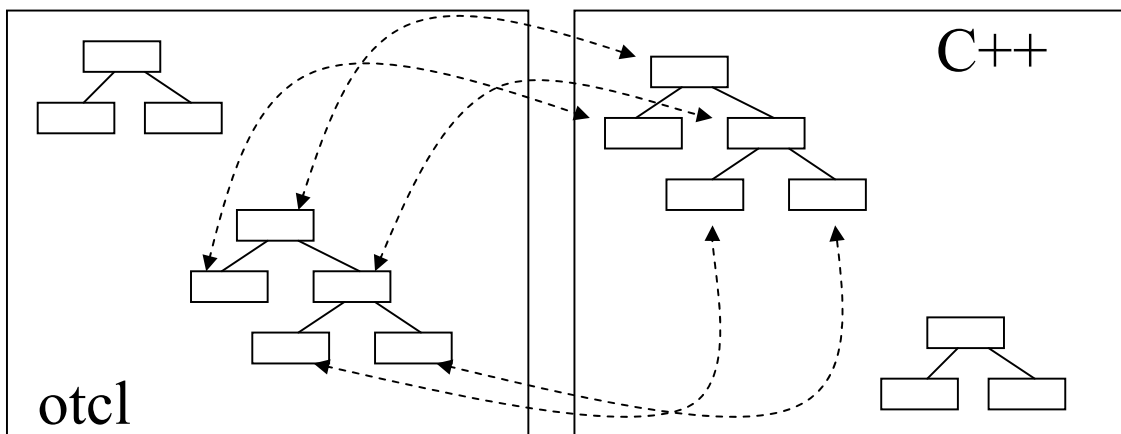


Εικόνα 17. Γενική άποψη της δομής του ns-2.

4.1.1 Δομή του ns-2

Ο προσομοιωτής περιλαμβάνει ένα πολύ μεγάλο αριθμό από εφαρμογές, πρωτόκολλα, τύπους δικτύων, στοιχεία δικτύων και μοντέλα κίνησης. Αυτά ονομάζονται “Αντικείμενα Προσομοίωσης”. Χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού γιατί στην πραγματικότητα έχει δύο διαφορετικά πράγματα να κάνει.

Από τη μία η λεπτομερής προσομοίωση πρωτοκόλλων χρειάζεται μία γλώσσα προγραμματισμού συστήματος η οποία θα μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά byte και κεφαλίδες πακέτων και να υλοποιεί αλγόριθμους που εκτελούνται πάνω από μεγάλα σύνολα δεδομένων. Για αυτές τις ενέργειες ο γρήγορος χρόνος εκτέλεσης είναι σημαντικός. Από την άλλη ένα μεγάλο μέρος της έρευνας αφορά παραμέτρους και σχηματισμούς ελαφρά διαφοροποιημένους καθώς και γρήγορη εξέταση ενός αριθμού σεναρίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ταχύτητα αλλαγής και επανεκτέλεσης είναι περισσότερο σημαντική. Αφού η παραμετροποίηση τρέχει μια φορά, ο γρήγορος χρόνος σχεδιασμού σε αυτό το κομμάτι είναι περισσότερο σημαντικός. Ο ns-2 επιτυγχάνει και τους δύο στόχους. Η C++, ως γλώσσα προγραμματισμού, είναι γρήγορη στην εκτέλεση αλλά αργή στην αλλαγή του κώδικα, κάτι που την κάνει κατάλληλη για λεπτομερή υλοποίηση πρωτοκόλλων. Αντίθετα, η OTcl, ως γλώσσα κωδικοποίησης σεναρίων (scripting language), εκτελείται πολύ πιο αργά αλλά είναι ιδανική για γρήγορες αλλαγές στον κώδικα, κάτι που την κάνει ιδανική για παραμετροποίηση και έλεγχο των προσομοιώσεων. Δηλαδή έχουμε έναν συμβιβασμό ανάμεσα στην μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης που παρέχεται από μια γλώσσα όπως η C++ και στους μικρούς χρόνους γραφής ενός σεναρίου σε μια γλώσσα όπως η OTcl. Αυτή η διαλειτουργικότητα υλοποιείται με την παρουσία δύο ιεραρχιών κλάσεων, οι οποίες είναι η μεταφρασμένη ιεραρχία της C++ και η διερμηνευμένη ιεραρχία της OTcl, μεταξύ των οποίων υπάρχει μία προς μία αντιστοιχία κλάσεων (Εικόνα 18).



Εικόνα 18. Απεικόνιση της «1-1» αντιστοιχίας μεταξύ των κλάσεων της μεταφρασμένης ιεραρχίας της C++ και της διερμηνευμένης ιεραρχίας της OTcl.

Η μεταφρασμένη ιεραρχία της C++ επιτρέπει να επιτυγχάνεται αποδοτικότητα στην προσομοίωση και ταχύτερη εκτέλεση. Αυτό επιτρέπει την μείωση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων και των γεγονότων. Η OTcl χρησιμοποιείται για τον καλύτερο έλεγχο της προσομοίωσης. Στα σενάρια OTcl που δίνονται από το χρήστη

καθορίζονται η τοπολογία του δικτύου, τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα κάθε επιπέδου, καθώς και οι εφαρμογές που θα προσομοιωθούν. Επίσης, καθορίζονται τα δεδομένα που θα καταγραφούν και, μερικώς, η μορφή τους. Η OTcl μπορεί να κάνει χρήση των μεταφρασμένων αντικειμένων σε C++ μέσω μιας OTcl διεπαφής (interface), αφού δημιουργείται ένα αντικείμενο OTI για κάθε αντικείμενο C++.

Ο ns-2, όπως αναφέραμε, είναι προσομοιωτής διακριτών γεγονότων (discrete events). Αυτό σημαίνει ότι η χρονική πρόοδος μιας προσομοίωσης εξαρτάται από τη χρονική ακολουθία των γεγονότων, τα οποία διατηρούνται από έναν χρονοπρογραμματιστή (scheduler). Έτσι, κάθε γεγονός είναι ένα αντικείμενο στην ιεραρχία κλάσεων της C++ με ένα μοναδικό αναγνωριστικό (id), έναν προγραμματισμένο χρόνο πραγματοποίησης και έναν δείκτη σε ένα αντικείμενο που χειρίζεται το γεγονός. Ο χρονοπρογραμματιστής χρησιμοποιεί μία διατεταγμένη δομή δεδομένων με τα γεγονότα, τα οποία πρόκειται να εκτελεστούν, και τα εκτελεί διαδοχικά. Οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες θα συμβούν τα γεγονότα καθορίζονται από το σενάριο του χρήστη (αλλά και από την τύχη).

4.1.2 Προσομοίωση στον ns-2

Μία ολοκληρωμένη προσομοίωση περιγράφεται από μία κλάση της OTcl, την Simulator. Η κλάση αυτή παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές για την παραμετροποίηση μιας προσομοίωσης και για την επιλογή ενός τύπου χρονοπρογραμματιστή, ο οποίος καθοδηγεί την προσομοίωση. Ένα σενάριο προσομοίωσης συνήθως αρχίζει με τον ορισμό ενός στιγμιότυπου (instance) αυτής της κλάσης και την κλήση διαφόρων μεθόδων για τη δημιουργία κόμβων, τοπολογιών, καθώς και για την διαμόρφωση άλλων παραμέτρων της προσομοίωσης (π.χ. τεχνολογία φυσικού επιπέδου, επίπεδα θορύβου).

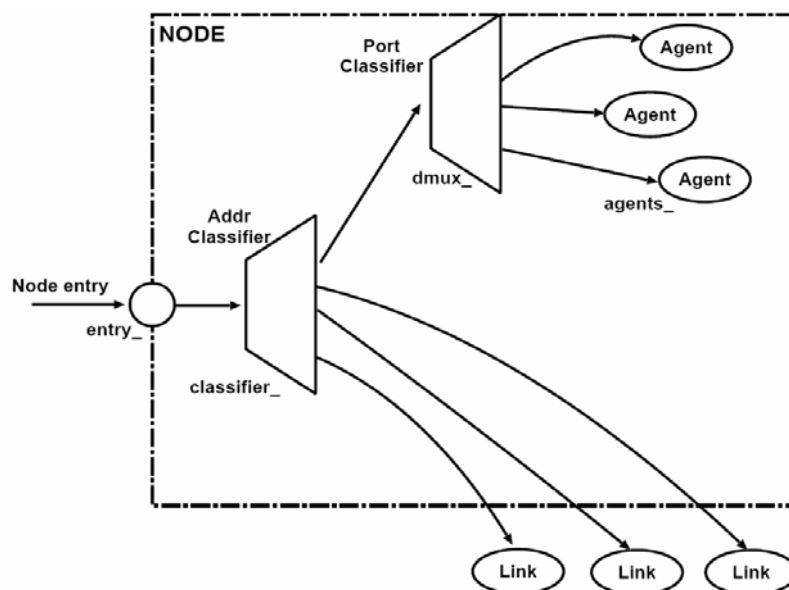
Κάθε φορά που δημιουργείται ένα καινούργιο αντικείμενο προσομοίωσης, η διαδικασία αρχικοποίησης πραγματοποιεί τις ακόλουθες ενέργειες :

- αρχικοποίηση της δομής (format) του πακέτου προσομοίωσης
- δημιουργία του χρονοπρογραμματιστή
- δημιουργία ενός “null agent”

Η αρχικοποίηση της δομής του πακέτου προσομοίωσης θέτει τα πεδία που καθορίζουν το πακέτο και χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο χρονοπρογραμματιστής τρέχει την προσομοίωση σε μια ακολουθία που καθορίζεται από τα γεγονότα που συμβαίνουν, η οποία όμως μπορεί να αντικατασταθεί μέσω εναλλακτικών χρονοπρογραμματιστών. Υπάρχουν τέσσερις τύποι χρονοπρογραμματιστή στον ns-2: μια απλή συνδεδεμένη λίστα, ένας σωρός (heap), μία χρονική σειρά (που είναι και ο προεπιλεγμένος τύπος) και πραγματικού χρόνου. Ο χρονοπρογραμματιστής λειτουργεί επιλέγοντας το επόμενο προγραμματισμένο γεγονός, εκτελώντας το μέχρι να τελειώσει και

μετά γυρνώντας για να εκτελέσει το επόμενο. Σαν μονάδα μέτρησης του χρόνου χρησιμοποιούνται τα δευτερόλεπτα. Το γεγονός ότι ο ns-2 χρησιμοποιεί ένα νήμα εκτέλεσης (single-threaded), εξασφαλίζει ότι μόνο ένα γεγονός μπορεί να εκτελείται κάθε χρονική στιγμή. Αν παραπάνω από ένα γεγονότα είναι προγραμματισμένα να εκτελεστούν την ίδια στιγμή τότε εκτελείται πρώτο αυτό που εισήχθη στον χρονοπρογραμματιστή πρώτο (first-scheduled-first dispatched). Τέλος, ο null agent είναι στην γενική περίπτωση μια καταβόθρα για χαμένα πακέτα ή για πακέτα που δεν χρησιμοποιούνται ή δεν καταγράφονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Όπως αναφέρθηκε, μέσω των σεναρίων, δημιουργούνται κόμβοι, συνδέσεις κόμβων και γενικά η τοπολογία της προσομοίωσης. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν κόμβοι που συνδέονται μεταξύ τους με μονόδρομες (simplex) ή αμφίδρομες (duplex) συνδέσεις και να οριστούν τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. εύρος ζώνης, καθυστέρηση διάδοσης). Στην συνέχεια πρέπει να οριστούν όλα τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα σε κάθε δικτυακό επίπεδο (π.χ. πρωτόκολλο δρομολόγησης) που χρησιμοποιούνται, καθώς και οι εφαρμογές που εκτελούνται πάνω από το δίκτυο και οι οποίες είναι υπεύθυνες για την δημιουργία της κίνησης, μαζί με όλες τις παραμέτρους τους (π.χ. χρησιμοποιούμενη μετρική για το πρωτόκολλο δρομολόγησης, ρυθμός παραγωγής πακέτων για μια CBR πηγή).



Εικόνα 19. Γραφική αναπαράσταση της απλούστερης δομής ενός αντικείμενου κόμβου.

Κάθε κόμβος του δικτύου είναι ένα αντικείμενο, το οποίο με τη σειρά του ενσωματώνει άλλα αντικείμενα, κυρίως του τύπου classifiers (ταξινομητές). Μια απλή μορφή ενός αντικείμενου κόμβου είναι να αποτελείται από δύο άλλα αντικείμενα έναν classifier διεύθυνσης και έναν classifier θύρας (port). Ο σκοπός αυτών των classifier είναι

να διανέμουν τα εισερχόμενα πακέτα στον σωστό πράκτορα (agent) ή εξωτερικό σύνδεσμο (Εικόνα 19). Όλοι οι κόμβοι περιέχουν τουλάχιστον τα ακόλουθα συστατικά:

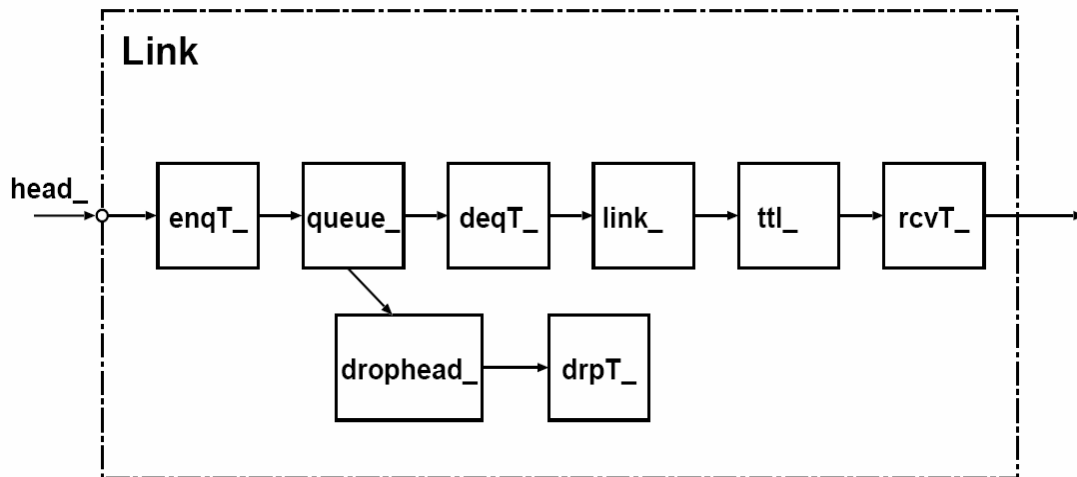
- ένα αναγνωριστικό ή μια διεύθυνση, που αυξάνεται κατά ένα για κάθε κόμβο που δημιουργείται
- μία λίστα με τους γειτονικούς κόμβους
- μία λίστα με τους διαθέσιμους πράκτορες
- ένα αναγνωριστικό του τύπου του κόμβου
- ένα στοιχείο δρομολόγησης

Μια διεπαφή OTcl, προσφέρει μια σειρά από εντολές για την διαμόρφωση των κόμβων. Στην Εικόνα 21 φαίνονται οι παράμετροι που μπορεί να πάρει αυτό το σύνολο εντολών, ανάλογα με τον τύπο του δικτύου και τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά του. Κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο η διαδικασία που ακολουθεί είναι να εξετάζει τα πεδία του πακέτου, συνήθως την διεύθυνση και θύρα προορισμού και μερικές φορές αυτήν του αποστολέα και έπειτα να παραδίδει τις τιμές σε ένα εξερχόμενο αντικείμενο το οποίο είναι ο επόμενος, στην κατεύθυνση της ροής, παραλήπτης του πακέτου αυτού. Στον ns-2 αυτό εκτελείται από ένα απλό αντικείμενο classifier. Ο classifier παρέχει έναν τρόπο να συσχετίζεται ένα πακέτο με κάποια λογικά κριτήρια και να γίνεται ανάκληση μιας αναφορά σε κάποιο άλλο αντικείμενο της προσομοίωσης σύμφωνα με αυτή τη συσχέτιση. Στόχος του είναι να προωθήσει σωστά κάθε εισερχόμενο πακέτο σε ένα κατάλληλο εξωτερικό αντικείμενο.

Οι σύνδεσμοι (links) είναι ο δεύτερος τομέας όσον αφορά την τοπολογία του δικτύου που προσομοιώνεται. Όπως και οι κόμβοι που αποτελούνται από classifiers έτσι και μία απλή σύνδεση αποτελείται από μία ακολουθία από συνδέσμων. Η κλάση Link παρέχει μερικές στοιχειώδεις λειτουργίες. Η κλάση SimpleLink παρέχει την ικανότητα να συνδέει δύο κόμβους με σημείο-προς-σημείο (point-to-point) σύνδεση, καθορίζοντας τα χαρακτηριστικά της. Κάθε σύνδεσμος χρησιμοποιεί μία ουρά τύπου queue_type και αποτελείται από πέντε μεταβλητές (Εικόνα 20), οι οποίες είναι:

- **head_** Δείχνει στο σημείο εισόδου του συνδέσμου.
- **queue_** Αναφορά στην κύρια ουρά του συνδέσμου.
- **link_** Αναφορά στο στοιχείο που πραγματικά μοντελοποιεί το σύνδεσμο.
- **tll_** Αναφορά στο στοιχείο που διαχειρίζεται το ttl πεδίο σε κάθε πακέτο.

- **drophead_** Αναφορά σε ένα αντικείμενο που είναι η κεφαλή μιας ουράς από στοιχεία για την επεξεργασία των χαμένων (dropped) πακέτων.



Εικόνα 20. Γραφική απεικόνιση της δομής ενός αντικειμένου Link του ns-2.

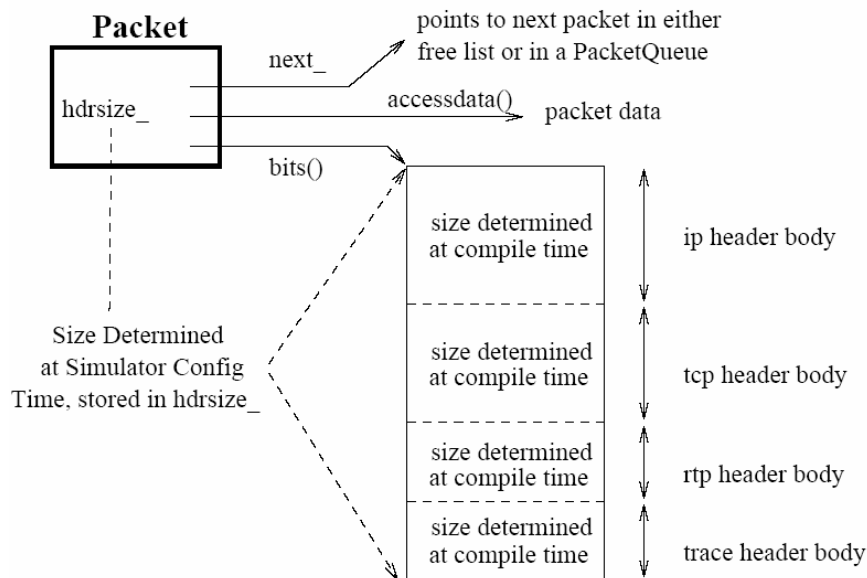
Οι ουρές αναπαριστούν τοποθεσίες όπου τα πακέτα μπορεί να διατηρούνται (ή να πετάγονται). Ο προγραμματισμός πακέτων (packet scheduling) αναφέρεται στην διαδικασία απόφασης για το ποια πακέτα πρέπει να κρατηθούν και ποια να πεταχτούν. Η διαχείριση της ουράς αναφέρεται σε ορισμένους κανόνες που απαιτούνται για την διαχείριση του χώρου μιας συγκεκριμένης ουράς. Ο ns-2 παρέχει υποστήριξη για drop-tail First-In-First-Out (FIFO) ουρές, Random Early Detection (RED), Class-Based Queuing (CBQ) και παραλλαγές της Fair Queuing. Στη συνήθη περίπτωση όπου ένα στοιχείο καθυστέρησης ακολουθεί την έξοδο μιας ουράς, τότε η ουρά πιθανόν να μπλοκαριστεί μέχρι να ενεργοποιηθεί και πάλι από τον γείτονα σε αυτήν την κατεύθυνση. Επίσης οι ουρές μπορεί να μπλοκαριστούν ή να ελευθερωθούν εξαναγκαστικά από τους γειτονικούς κόμβους σε αυθαίρετες χρονικές στιγμές. Η απώλεια πακέτων υλοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι ουρές να περιέχουν έναν προορισμό drop, ο οποίος είναι ένα αντικείμενο που λαμβάνει όλα τα πακέτα που πετάγονται από μια ουρά. Αυτό είναι χρήσιμο για τη διατήρηση στατιστικών για τα χαμένα πακέτα. Γενικά, κάθε ουρά μπλοκάρει όταν ένα πακέτο μεταδίδεται από αυτήν προς κάποιον γειτονικό κόμβο. Η ουρά μετάδοσης ενός κόμβου υλοποιείται σαν κομμάτι του αντικειμένου Link, καθώς είναι η είσοδος στον αντίστοιχο σύνδεσμο. Οι καθυστερήσεις του συνδέσμου αναπαριστά το χρόνο που απαιτείται για ένα πακέτο να τον διασχίσει. Το ποσοστό του χρόνου που απαιτείται για να διασχίσει ένα πακέτο ορίζεται να είναι $s/b + d$, όπου s είναι το μέγεθος του πακέτου, b είναι η ταχύτητα του συνδέσμου σε bits/sec και d είναι η καθυστέρηση διάδοσης του συνδέσμου σε δευτερόλεπτα. Η υλοποίηση των καθυστερήσεων είναι στενά συνδεδεμένη με τις διαδικασίες μπλοκαρίσματος.

option	available values	default
general		
addressType	flat, hierarchical	flat
MPLS	ON, OFF	OFF
both satellite- and wireless-oriented		
wiredRouting	ON, OFF	OFF
llType	LL, LL/Sat	""
macType	Mac/802_11, Mac/Csma/Ca, Mac/Sat, Mac/Sat/UnslottedAloha, Mac/Tdma	""
ifqType	Queue/DropTail, Queue/DropTail/PriQueue	""
phyType	Phy/WirelessPhy, Phy/Sat	""
wireless-oriented		
adhocRouting	DIFFUSION/RATE, DIFFUSION/PROB, DSDV, DSR, FLOODING, OMNIMCAST, AODV, TORA	""
propType	Propagation/TwoRayGround, Propagation/Shadowing	""
propInstance	Propagation/TwoRayGround, Propagation/Shadowing	""
antType	Antenna/OmniAntenna	""
channel	Channel/WirelessChannel, Channel/Sat	""
topoInstance	<topology file>	""
mobileIP	ON, OFF	OFF
energyModel	EnergyModel	""
initialEnergy	<value in Joules>	""
rxPower	<value in W>	""
txPower	<value in W>	""
idlePower	<value in W>	""
agentTrace	ON, OFF	OFF
routerTrace	ON, OFF	OFF
macTrace	ON, OFF	OFF
movementTrace	ON, OFF	OFF
errProc	UniformErrorProc	""
FECProc	?	?
toraDebug	ON, OFF	OFF
satellite-oriented		
satNodeType	polar, geo, terminal, geo-repeater	""
downlinkBW	<bandwidth value, e.g. "2Mb">	""

Εικόνα 21. Διαθέσιμες εντολές για την διαμόρφωση ενός κόμβου στον ns-2.

Οι πράκτορες (agents) αναπαριστούν τα σημεία στα οποία τα πακέτα κατασκευάζονται ή καταστρέφονται και χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση των πρωτοκόλλων όλων των δικτυακών επιπέδων. Η κλάση Agent έχει ένα τμήμα της υλοποίησής της σε OTcl και ένα τμήμα σε C++. Απλοϊκά, εάν οι κόμβοι ήταν τα τμήματα

υλικού (hardware) της προσομοίωσης, οι πράκτορες αποτελούν τα τμήματα λογισμικού (software). Κάθε πράκτορας προσαρτάται σε έναν κόμβο και η πρόσβαση στις υπηρεσίες που παρέχει γίνεται μέσω ενός προκαθορισμένου API που θα πρέπει να υλοποιεί.



Εικόνα 22. Ενδεικτική δομή ενός πακέτου IP (που ενθυλακώνει ένα πακέτο TCP) στον ns-2.

Μια ακόμα κατηγορία αντικειμένων που μας ενδιαφέρει είναι τα αντικείμενα της κλάσης **Packet**, τα οποία είναι οι θεμελιώδεις μονάδες για την ανταλλαγή πακέτων μεταξύ αντικειμένων της προσομοίωσης (Εικόνα 22). Η δομή των κεφαλίδων των πακέτων όλων των πρωτοκόλλων του ns-2 καταγράφεται σε μια λίστα και κάθε αντικείμενο τύπου **Packet** παρέχει πληροφορίες για την εύρεση της θέσης της κατάλληλης κεφαλίδας στην λίστα. Τα καινούργια πρωτόκολλα μπορούν να ορίσουν τις δικές τους κεφαλίδες πακέτων ή να επεκτείνουν υπάρχοντες επικεφαλίδες με επιπρόσθετα πεδία. Υπάρχουν 4 κλάσεις για την διαχείριση των πακέτων και των επικεφαλίδων τους γενικά. Αυτές είναι :

Packet: Ορίζει την δομή του πακέτου και παρέχει διαδικασίες για το χειρισμό μιας ελεύθερης λίστας για αντικείμενα αυτού του τύπου.

p_info: Χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση ενός αριθμητικού αναγνωριστικού με έναν τύπο πακέτου

PacketHeader: Παρέχει μια βασική κλάση για κάθε επικεφαλίδα πακέτου ρυθμισμένη μέσα στην προσομοίωση

PacketHeaderManager: Ορίζει μία κλάση που χρησιμοποιείται για να συλλέγει και να διαχειρίζεται επικεφαλίδες που τροποποιούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Για την συλλογή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης συνήθως χρησιμοποιούνται κάποια αρχεία καταγραφής (trace files), τα οποία στην συνέχεια μπορούν να υποστούν επεξεργασία για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μετρικών. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί

Event	Time	From node	To node	Pkt type	Pkt size	Flags	Fid	Src addr	Dst addr	Seq num	Pkt id
-------	------	-----------	---------	----------	----------	-------	-----	----------	----------	---------	--------

Εικόνα 23. Πεδία ενός ίχνους του ns-2.

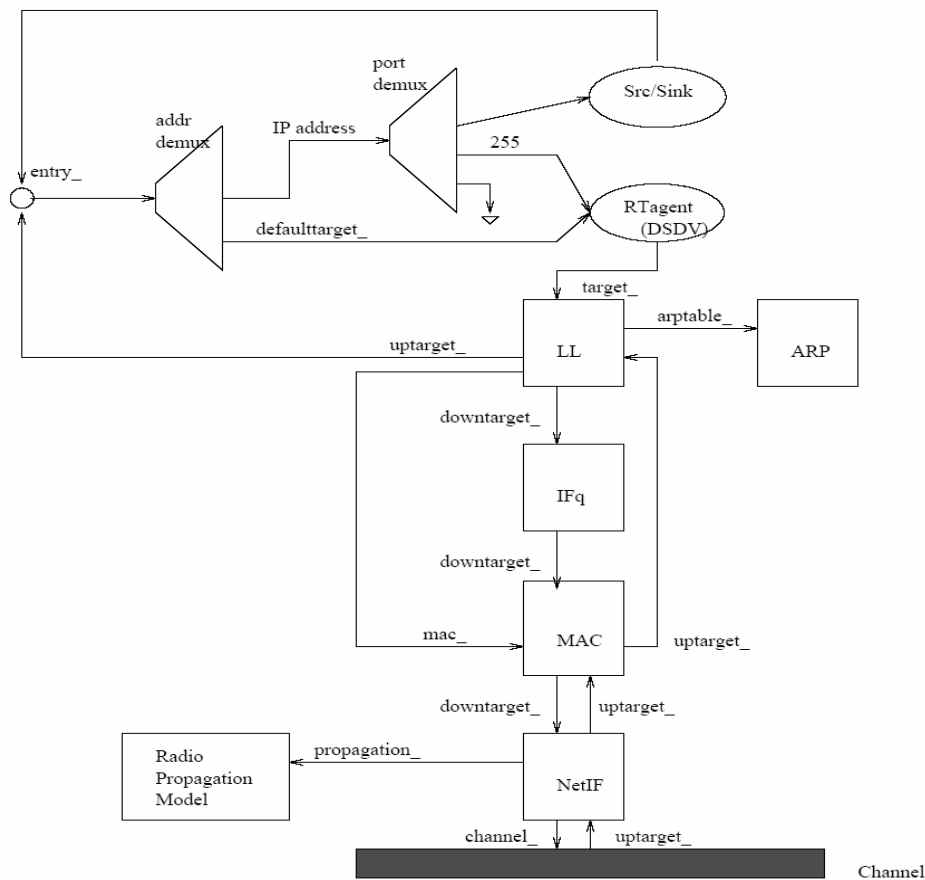
τύποι/δυνατότητες καταγραφής και παρακολούθησης που υποστηρίζονται από τον ns-2. Η πρώτη που ονομάζεται ίχνη (traces) καταγράφει κάθε ξεχωριστό πακέτο καθώς καταφθάνει, αναχωρεί ή απορρίπτεται από μια ουρά συνδέσμου. Ο δεύτερος τύπος που ονομάζεται ελεγκτές (monitors) συγκεντρώνει στατιστικά στοιχεία για διάφορες ενδιαφέρουσες ποσότητες (π.χ. αποστολές και λήψεις πακέτων σε μια ουρά). Ο ns-2 παρέχει την δυνατότητα καταγραφής συμβάντων που συμβαίνουν σε κάθε επίπεδο του δικτύου. Όταν χρησιμοποιούνται ίχνη ο ns-2 εισάγει τέσσερα αντικείμενα σε κάθε σύνδεσμο: EnqT, DecT, RecvT και DrpT. Το πρώτο καταγράφει πληροφορίες που αφορούν ένα πακέτο που καταφθάνει και εισάγεται στην ουρά εισόδου του συνδέσμου. Αν το πακέτο υπερχειλίζει την ουρά τότε το χαμένο πακέτο διαχειρίζεται από το DrpT. Το DecT καταγράφει πληροφορίες την στιγμή που το πακέτο βγαίνει από την ουρά. Τέλος το RecvT δίνει πληροφορίες σχετικά με τα πακέτα που έχουν ληφθεί από το άλλο άκρο του συνδέσμου. Κάθε συμβάν καταγράφεται στο αρχείο καταγραφής σαν μια σειρά από δώδεκα πεδία (Εικόνα 23). Η σημασία κάθε πεδίου φαίνεται στην συνέχεια:

- **Event:** Καταγράφει τον τύπο του συμβάντος (αποστολή, λήψη, απόρριψη πακέτου)
- **Time:** Καταγράφει τον χρόνο (προσομοίωσης) του συμβάντος.
- **From node:** Ο κόμβος-είσοδος του συνδέσμου που συμβαίνει το γεγονός.
- **To node:** Ο κόμβος-έξοδος του συνδέσμου που συμβαίνει το γεγονός.
- **Pkt type:** Ο τύπος του πακέτου (π.χ. CBR, TCP, ARP)

- **Pkt size:** Το μέγεθος του πακέτου.
- **Flags:** Καταγράφει κάποιες ιδιότητες σχετικές με το πακέτο.
- **Fid:** Το flow-id του IPv6.
- **Src addr:** Η διεύθυνση IP της πηγής στην μορφή address:port
- **Dst addr:** Η διεύθυνση IP του προορισμού στην μορφή address:port
- **Seq num:** Ο αριθμός ακολουθίας του πακέτου IP.
- **Pkt id:** Μοναδικό (καθολικό) αναγνωριστικό που χρησιμοποιείται από τον ns-2 για να διακρίνει μονοσήμαντα το πακέτο.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί εδώ ότι στην περίπτωση προσομοίωσης MANET τα παραπάνω είδη ιχνών δεν χρησιμοποιούνται, αλλά αντίθετα, όπως θα δούμε, γίνεται χρήση αντικειμένων cmu-trace.

Τελειώνοντας θα αναφερθούμε σύντομα στο πλέον διαδεδομένο εργαλείο απεικόνισης των αρχείων καταγραφής του ns-2, τον Network Animator (NAM). Ο NAM αναπτύχθηκε για το χειρισμό και την απεικόνιση μεγάλων συνόλων δεδομένων προσομοίωσης που μπορούν να προέρχονται από προσομοιώσεις διαφορετικών τύπων δικτύων. Έτσι, ο NAM είναι σε θέση να διαβάζει απλές εντολές γεγονότων προσομοίωσης από ένα μεγάλο αρχείο καταγραφής (ειδικό γι' αυτόν), ενώ για να μπορεί να χειρίζεται μεγάλους όγκους δεδομένων ένα ελάχιστο ποσοστό πληροφορίας διατηρείται κάθε στιγμή στην μνήμη. Οι εντολές των γεγονότων συντηρούνται σε ένα αρχείο και ξαναδιαβάζονται από αυτό όταν χρειαστεί. Το πρώτο βήμα για τη χρησιμοποίηση του NAM είναι να παραχθεί ένα αρχείο καταγραφής για αυτόν. Το αρχείο αυτό περιέχει πληροφορίες για την τοπολογία και επίσης για τα πακέτα που ανταλλάσσονται. Συνήθως το αρχείο αυτό παράγεται από τον ίδιο τον ns-2. Μέσω του γραφικού του περιβάλλοντος ο NAM παρέχει την δυνατότητα τροποποίησης του τρόπου απεικόνισης, καθώς και παρακολούθησης συγκεκριμένων γεγονότων.



Εικόνα 24. Δομή ενός MobileNode.

4.1.3 Προσομοίωση MANET στον ns-2

Το ασύρματο μοντέλο που αναπτύχθηκε αρχικά από το Monarch Group του CMU (σήμερα στο Rice University) αποτελείται βασικά από την κλάση MobileNode (Εικόνα 24)², μια επέκταση ουσιαστικά της κλάσης Node, με επιπρόσθετα στοιχεία υποστήριξης που επιτρέπουν προσομοίωση MANET, ασύρματων LAN και άλλων κατηγοριών ασύρματων δικτύων. Ένα αντικείμενο τύπου MobileNode είναι στην ουσία ένα αντικείμενο τύπου Node με τις επιπλέον λειτουργικότητες ενός ασύρματου και κινητού κόμβου, όπως

² Η δομή του MobileNode που χρησιμοποιείται για δρομολόγηση με το πρωτόκολλο DSR είναι ελαφρώς διαφορετική από τον κόμβο που παρουσιάστηκε παραπάνω. Η κλάση DSRNode προέρχεται από την κλάση MobileNode. Αυτή δεν χρησιμοποιεί απόπλεξη διεύθυνσης ή classifiers και όλα τα πακέτα που λαμβάνονται από τον κόμβο παραδίδονται στον agent δρομολόγησης του DSR από προεπιλογή, ο οποίος στην συνέχεια τα χειρίζεται κατάλληλα.

για παράδειγμα την ικανότητα να κινείται μέσα σε μία καθορισμένη τοπολογία, ικανότητα να λαμβάνει και να στέλνει σήματα από και προς ένα ασύρματο κανάλι, περιορισμένη ενέργεια κτλ. Μια ειδοποιός διαφορά όμως είναι ότι ένας MobileNode κόμβος δεν μπορεί να είναι συνδεδεμένος με την χρήση συνδέσμων με άλλα αντικείμενα των κλάσεων Node ή MobileNode. Τα χαρακτηριστικά κινητικότητας ενός MobileNode, που περιλαμβάνουν, χωρίς να εξαντλούνται, την κίνηση του κόμβου, την περιοδική ανανέωση της θέσης του κόμβου και την διατήρηση των ορίων της τοπολογίας, είναι υλοποιημένα σε C++. Αντίθετα, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συστατικών του δικτύου μέσα σε ένα MobileNode είναι υλοποιημένα σε OTcl.

Η στοίβα δικτύου για ένα αντικείμενο MobileNode αποτελείται στην γενική περίπτωση από τα παρακάτω στοιχεία:

Επίπεδο Συνδέσμων (Link Layer – LL)

Το LL που χρησιμοποιείται από τα αντικείμενα MobileNode είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιούν τα LAN. Πολλά πρωτόκολλα μπορούν να υλοποιηθούν σε αυτό το επίπεδο, όπως για παράδειγμα πρωτόκολλα κατακερματισμού (fragmentation) και επανασυναρμολόγησης (reassembly) πακέτων ή αξιόπιστα συνδεσμοστρεφή πρωτόκολλα ανταλλαγής πακέτων μεταξύ των κόμβων. Μία άλλη σημαντική λειτουργία του είναι ότι θέτει την διεύθυνση MAC του προορισμού στην MAC κεφαλίδα του πακέτου. Η μόνη διαφορά με το LL του LAN, είναι ότι το MobileNode έχει ένα ARP module συνδεδεμένο με αυτό, αναλαμβάνοντας έτσι όλες τις μετατροπές από IP σε MAC διευθύνσεις. Συνήθως όλα τα εξερχόμενα πακέτα παραδίδονται στο LL από τον πράκτορα δρομολόγησης, μέσω της χρήσης μιας κατάλληλης ουράς. Για όλα τα εισερχόμενα πακέτα, το επίπεδο MAC του κόμβου παραδίδει τα πακέτα στο LL το οποίο στην συνέχεια τα παραδίδει στον κατάλληλο πράκτορα (μέσω του node_entry_point).

Πρωτόκολλο Μετάφρασης Διευθύνσεων

Το πρωτόκολλο μετάφρασης διευθύνσεων (Address Resolution Protocol – ARP) υλοποιεί το γνωστό ομώνυμο πρωτόκολλο, δεχόμενο αιτήσεις από το LL για την μετάφραση IP διευθύνσεων στις αντίστοιχες MAC διευθύνσεις.

Ουρά Διεπαφής

Η ουρά διεπαφής (interface queue) είναι η ουρά στην οποία αποθηκεύονται τα εξερχόμενα πακέτα μέχρι να μεταδοθούν από την διεπαφή δικτύου. Συνήθως υλοποιείται μέσω της κλάσης PriQueue, η οποία υλοποιεί μια ουρά προτεραιότητας (priority queue) και χρησιμοποιείται για να δώσει προτεραιότητα στα πακέτα ελέγχου του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, τοποθετώντας τα στην κεφαλή της ουράς.

Πρωτόκολλο Πρόσβασης στο Μέσο

Το πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control – MAC), αναλαμβάνει να συντονίσει την πρόσβαση των κόμβων στο κοινό μέσο μετάδοσης (ατμόσφαιρα). Στον ns-2 παρέχεται μια υλοποίηση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11b (και συγκεκριμένα της Distributed Coordination Function – DCF, η οποία χρησιμοποιεί ένα RTS/CTS/DATA/ACK μηχανισμό), καθώς και ένα TDMA πρωτόκολλο.

Διεπαφή Δικτύου

Η διεπαφή δικτύου (network interface) αναπαριστά το φυσικό επίπεδο (συσκευές μετάδοσης/λήψης) που χρησιμοποιείται από το αντικείμενο MobileNode και το οποίο επιτρέπει την πρόσβαση στο ασύρματο κανάλι. Η ασύρματη διεπαφή δικτύου υλοποιείται από την κλάση Phy/WirelessPhy. Αυτή η κλάση υλοποιεί μια διεπαφή που μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει πακέτα από το ασύρματο κανάλι, τα οποία μπορεί να αλλοιώνονται λόγω συγκρούσεων και τα οποία υπόκεινται στο καθοριζόμενο μοντέλο μετάδοσης ραδιοκυμάτων, ενώ προσεγγίζει έναν DSSS ασύρματο πομποδέκτη (Lucent WaveLan DSSS).

Μοντέλο Διάδοσης Ραδιοκυμάτων

Ο ns-2 χρησιμοποιεί ως μοντέλο διάδοση ραδιοκυμάτων (radio propagation model) Free-space εξασθένιση ($1/r^2$) για κοντινές αποστάσεις και μια προσέγγιση του Two ray Ground ($1/r^4$) για μακρινές αποστάσεις. Επίσης, η προσέγγιση υποθέτει κατοπτρική ανάκλαση (specular reflection) από επίπεδη επιφάνεια εδάφους.

Κεραία

Ο ns-2 παρέχει υποστήριξη για μη-κατευθυντική κεραία με μοναδιαίο κέρδος.

Τα αντικείμενα MobileNode είναι σχεδιασμένα να κινούνται και στις τρεις διαστάσεις αν και η τρίτη συνήθως δεν χρησιμοποιείται. Συνεπώς ο κόμβος έχει συντεταγμένες X, Y, Z(=0) που συνεχώς ανανεώνονται καθώς ο κόμβος κινείται. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί ελέγχου της κίνησης των κόμβων. Με την πρώτη μέθοδο η αρχική θέση του κόμβου, ο προορισμός του και η ταχύτητα κίνησης του, κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, καθορίζονται ξεχωριστά με την χρήση συγκεκριμένων εντολών. Αυτές οι εντολές περιέχονται συνήθως σε ένα ξεχωριστό αρχείο σεναρίου κίνησης. Με αυτή την μέθοδο, η ανανέωση της κίνησης και της θέσης του κόμβου πραγματοποιείται μόνο όταν η θέση του σε μια δεδομένη χρονική στιγμή είναι απαραίτητο να βρεθεί. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε από μια ερώτηση από έναν γειτονικό κόμβο που ψάχνει να βρει πληροφορίες γι' αυτόν τον κόμβο, όπως την μεταξύ τους απόσταση, είτε ακόμα από μια εντολή που αλλάζει κάποιο στοιχείο της κίνησης του κόμβου, όπως για παράδειγμα την ταχύτητά του. Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τυχαία κίνηση του κόμβου. Στη μέθοδο αυτή η κίνηση

ξεκινάει από μια τυχαία αρχική θέση και στην συνέχεια η κατεύθυνση της κίνησης και η ταχύτητα του κόμβου επιλέγεται τυχαία σε κάθε χρονική στιγμή. Αντίθετα με τις μεθόδους που παράγουν την κίνηση του κόμβου, η τοπολογία του δικτύου πρέπει να οριστεί πριν δημιουργηθούν οι κόμβοι.

Όπως αναφέραμε και στην περιγραφή της δομής και των δυνατοτήτων του ns-2, η κύρια έξοδος του είναι ASCII αρχεία καταγραφής που περιγράφουν τα συμβάντα του δικτύου. Επίσης, όπως αναφέρθηκε, τα αρχεία καταγραφής στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων (δηλαδή της χρήσης αντικειμένων MobileNode), χρησιμοποιούν στην τρέχουσα έκδοση (εξορισμού) αντικείμενα τύπου cmu-trace. Το εγχειρίδιο χρήσης (manual) του ns-2 αναφέρει ότι μελλοντικά θα υπάρξει σύγκλιση μεταξύ όλων των ιχνών που χρησιμοποιεί ο ns-2 (συμπεριλαμβανομένων των αρχείων εξόδου για τον NAM) με την χρήση των αντικειμένων new-trace, τα οποία όμως στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δεν χρησιμοποιήθηκαν.

Τα αντικείμενα τύπου cmu-trace μπορεί να έχουν έναν από τρεις τύπους και συγκεκριμένα τους CMUTrace/Drop, CMUTRACE/Recv και CMUTrace/Send. Αυτοί οι τύποι χρησιμοποιούνται για την καταγραφή πακέτων που απορρίπτονται, λαμβάνονται ή στέλνονται αντίστοιχα από τους πράκτορες δρομολόγησης, το επίπεδο MAC ή τις ουρές διεπαφών του ns-2. Η γενική δομή των ασύρματων ιχνών που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση μας (παλιά μορφή των ασύρματων ιχνών) φαίνεται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί:

Συμβάν	Συμβολισμός	Τύπος	Τιμή
Ασύρματο Συμβάν	s: Αποστολή r: Παραλαβή d: Απόρριψη f: Προώθηση	% .9f %d (%6.2f %6.2f) %3s %4s %d %s %d [%x %x %x %x]	
		% .9f _%d_ %3s %4s %d %s %d [%x %x %x %x]	
		double	Χρόνος
		int	Διεύθυνση Κόμβου
		double	X Συντεταγμένη (Δεν χρησιμοποιείται στην περίπτωση μας)
		double	Y Συντεταγμένη (Δεν χρησιμοποιείται στην περίπτωση μας)
		string	Τύπος του Trace (Στην περίπτωση μας AGT για trace των CBR πηγών ή RTR για trace των πρωτοκόλλων δρομολόγησης)
		string	Σκοπός (Στην περίπτωση μας δεν χρησιμοποιείται)
		int	Αναγνωριστικό Πακέτου (Μοναδικό για κάθε πακέτο)

		string	Είδος Πακέτου
		int	Μέγεθος Πακέτου
		hexadecimal	Χρόνος Αποστολής των Δεδομένων
		hexadecimal	MAC Διεύθυνση του Προορισμού
		hexadecimal	MAC Διεύθυνση της Πηγής
		hexadecimal	Τύπος του Πακέτου (ARP, IP)

Πίνακας 4. Δομή των ασύρματων ιχνών του ns-2.

Ανάλογα με τον τύπο του πακέτου το ασύρματο ίχνος μπορεί να περιλαμβάνει περαιτέρω πληροφορίες. Στην περίπτωση μας οι επιπλέον πληροφορίες που καταγράφονται για τα πακέτα που μας ενδιαφέρουν φαίνονται στον Πίνακα 5.

Συμβάν	Τύπος	Τιμή
DSR Trace	%d [%d %d] [%d %d %d %d->%d] [%d %d %d %d->%d]	
	int	Αριθμός Κόμβων που Έχουν Διασχισθεί
	int	Routing Request Flag
	int	Route Request Sequence Number
	int	Routing Reply Flag
	int	Route Request Sequence Number
	int	Μήκος του Reply
	int	Πηγή
	int	Προορισμός
	int	Error Report Flag
	int	Αριθμός Λαθών
	int	Κόμβος στον Οποίο Πρέπει να Αναφερθεί το Λάθος
	int	Link Error From
	int	Link Error To
AODV Trace	[0x%x %d %d [%d %d] [%d %d]] (REQUEST)	
	hexadecimal	Τύπος
	int	Αριθμός Hop
	int	Αναγνωριστικό Εκπομπής
	int	Προορισμός

	int	Αριθμός Ακολουθίας Προορισμού
	int	Πηγή
	int	Αριθμός Ακολουθίας Πηγής
	[0x%x %d [%d %d] %f] (%s)	
	hexadecimal	Τύπος
	int	Αριθμός Hop
	int	Προορισμός
	int	Αριθμός Ακολουθίας Προορισμού
	double	Χρόνος Ζωής
	string	Λειτουργία (REPLY, ERROR, HELLO – στην περίπτωση μας δεν χρησιμοποιείται)
CBR Trace	[%d] %d %d	
	int	Αριθμός Ακολουθίας
	int	Αριθμός Προωθήσεων του Πακέτου
	int	Ελάχιστος Δυνατός Αριθμός Προωθήσεων για το Πακέτο

Πίνακας 5. Δομή των επιπλέον πληροφοριών που καταγράφονται στα ίχνη των πακέτων DSR, AODV και CBR.

Με βάση τους παραπάνω πίνακες που περιγράφουν την δομή των αρχείων καταγραφής, είμαστε σε θέση να παρακολουθήσουμε την λειτουργία των πρωτοκόλλων αλλά και γενικότερα της κατάστασης του δικτύου. Για παράδειγμα στον Πίνακα 6 μπορούμε να παρακολουθήσουμε την διαδικασία ανακάλυψης ενός δρομολογίου από το DSR. Συγκεκριμένα, αρχικά παρατηρούμε ότι η CBR πηγή στον κόμβο 9 προσπαθεί να στείλει ένα πακέτο στον κόμβο 11. Επειδή δεν υπάρχει κάποιο δρομολόγιο από τον κόμβο 9 στον κόμβο 11, ο πράκτορας δρομολόγησης του κόμβου 9 ξεκινάει μια διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίου, εκπέμποντας ένα RREQ μήνυμα. Ο κόμβος 11 απαντάει με ένα RREP μήνυμα. Το ίχνος με συμβάν SFESTs χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει την δημιουργία μιας καινούργιας σύνδεσης, ενώ στην συνέχεια η καινούργια σύνδεση χρησιμοποιείται για την αποστολή του πακέτου με αναγνωριστικό 1103.

```
s 14.093302663 _9_ AGT --- 1103 cbr 512 [0 0 0 0] ----- [9:2 11:0 32 0] [0] 0 1
r 14.093302663 _9_ RTR --- 1103 cbr 512 [0 0 0 0] ----- [9:2 11:0 32 0] [0] 0 1
s 14.094715440 _9_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 0 0 0] ----- [9:255 11:255 32 0] 1 [1 1] [0
1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
r 14.095987978 _6_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0] 1
[1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
```

```

r 14.095987992 _14_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0]
l [1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
r 14.095988072 _12_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0]
l [1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
r 14.095988072 _3_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0] 1
l [1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
r 14.095988266 _5_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0] 1
l [1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
r 14.095988268 _11_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0]
l [1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
r 14.095988270 _7_ RTR --- 1104 DSR 32 [0 ffffffff 9 800] ----- [9:255 11:255 32 0] 1
l [1 1] [0 1 0 0->0] [0 0 0 0->0]
s 14.104548390 _11_ RTR --- 1105 DSR 44 [0 0 0 0] ----- [11:255 9:255 254 9] 2 [0 1]
l [1 1 2 9->11] [0 0 0 0->0]
r 14.109113187 _9_ RTR --- 1105 DSR 44 [13a 9 b 800] ----- [11:255 9:255 254 9] 2 [0
1] [1 1 2 9->11] [0 0 0 0->0]
SFESTs 14.109113187 _9_ 1103 [9 -> 11] 1(1) to 11 [9 |11 ]
s 14.109113187 _9_ RTR --- 1103 cbr 548 [0 0 0 0] ----- [9:2 11:0 32 11] [0] 0 1
r 14.115095671 _11_ RTR --- 1103 cbr 548 [13a b 9 800] ----- [9:2 11:0 32 11] [0] 1 1
r 14.115095671 _11_ AGT --- 1103 cbr 512 [13a b 9 800] ----- [9:2 11:0 32 11] [0] 1 1

```

Πίνακας 6. Μέρος αρχείου καταγραφής που παρουσιάζει μια ανακάλυψη δρομολογίου από το DSR.

Τέλος, πριν κλείσουμε την ενότητα, πρέπει να αναφέρουμε ότι όσον αφορά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για MANET που παρέχονται από την τρέχουσα έκδοση του ns-2 (2.27) αυτά είναι τα DSDV, DSR, AODV και TORA. Όμως, εκτός από τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα, υπάρχει και ένα μεγάλο πλήθος υλοποιήσεων ή και βελτιώσεων/επεκτάσεων των υπάρχοντων πρωτοκόλλων που διατίθενται από τις ερευνητικές ομάδες που τα έχουν προτείνει.

4.2. ΕΠΑΝΑΣΧΕΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ RUNNERS

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο ns-2 παρέχει υλοποιήσεις για τα δύο από τα τρία πρωτόκολλα που θα ενσωματωθούν στο MSA framework, τα DSDV και AODV. Το τρίτο πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή το RUNNERS, είχε υλοποιηθεί μόνο σε έναν αφαιρετικό προσομοιωτή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Χατζηγιαννάκη [11], τον adhocSim. Παρόλο που η υλοποίηση του πρωτοκόλλου στον adhocSim είναι (επί της αρχής) σωστή, υπάρχει ένα

μεγάλο πλήθος από χαμηλού επιπέδου λεπτομέρειες, οι οποίες έχουν αγνοηθεί. Αυτό μας ανάγκασε να επανασχεδιάσουμε και να υλοποιήσουμε από την αρχή το πρωτόκολλο RUNNERS στον περισσότερο ρεαλιστικό προσομοιωτή ns-2. Η πλειοψηφία των προβλημάτων σχετίζονταν με το υποπρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό των μηνυμάτων που αποθηκεύονται από τους κόμβους υποστήριξης, όταν δύο ή περισσότεροι τέτοιοι κόμβοι συναντιούνται (δηλαδή βρίσκονται αρκετά κοντά για να μπορούν να επικοινωνήσουν). Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2, κάθε μέλος του συνόλου υποστήριξης χρειάζεται να αποθηκεύει όλα τα μηνύματα που δεν έχουν παραδοθεί ακόμα, καθώς και μια λίστα με αποδείξεις παράδοσης που προορίζονται για τους αποστολείς των μηνυμάτων. Κάθε φορά που δύο κόμβοι υποστήριξης συναντιούνται, ανταλλάσσουν τα μηνύματα και τις αποδείξεις αυτές, χρησιμοποιώντας το *υποπρωτόκολλο συγχρονισμού*, έναν κατανεμημένο αλγόριθμο που βασίζεται μερικώς στο πρωτόκολλο επικύρωσης δύο φάσεων (two-phase commit – 2PC), το οποίο περιγράφεται με λεπτομέρειες στην [35]. Κατά αυτό τον τρόπο, ένα μήνυμα που έχει παραδοθεί από κάποιον συγκεκριμένο κόμβο υποστήριξης θα απομακρυνθεί σταδιακά από την μνήμη όλων των υπόλοιπων κόμβων υποστήριξης.

Στην αρχική υλοποίηση και καθώς ο *ad hocSim* χρησιμοποιεί μηνύματα και όχι πακέτα, το πρωτόκολλο χρησιμοποιούσε ένα μήνυμα για την μετάδοση όλων των πληροφοριών που αποθηκεύονταν στους αποθηκευτικούς χώρους (buffers) κάθε κόμβου. Δηλαδή, από κάθε κόμβο στέλνονταν ένα μήνυμα που περιείχε όλα τα πακέτα που δεν είχαν ακόμα παραδοθεί και ένα μήνυμα με όλες τις αποδείξεις παράδοσης. Δυστυχώς, στην πραγματικότητα (και άρα και στον ns-2) κάθε τέτοιο μήνυμα θα πρέπει να παραδοθεί ως ένα σύνολο από μικρού μεγέθους (ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο MAC πρωτόκολλο) πακέτα. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μια τεράστια αύξηση στον αριθμό των πακέτων που ανταλλάσσονται σε κάθε συγχρονισμό με αποτέλεσμα τον κατακλυσμό και άρα την αχρήστευση του ασύρματου καναλιού. Επιπρόσθετα, η αρχική υλοποίηση υπέθετε απεριόριστο αποθηκευτικό χώρο για την αποθήκευση μηνυμάτων και αποδείξεων, καθώς και την εύρεση των γειτόνων ενός κόμβου από ένα υποκείμενο πρωτόκολλο (δηλαδή ουσιαστικά από τον ίδιο τον *ad hocSim*). Τέλος, ο *ad hocSim* παρείχε εγγυημένη παράδοση των μηνυμάτων που στέλνονται (και άρα εγγυημένη παράδοση των αποδείξεων παράδοσης), κάτι το οποίο προφανώς δεν ισχύει στα πραγματικά δίκτυα.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, για να αποφύγουμε την υπερβολική χρήση του ασύρματου μέσου, καθώς και για να εξαλείψουμε οποιεσδήποτε υποθέσεις δεν ισχύουν στα πραγματικά περιβάλλοντα, αποφασίσαμε να εισάγουμε στο πρωτόκολλο έναν μηχανισμό αποφυγής ταυτόχρονων συγχρονισμών δύο ή περισσότερων κόμβων υποστήριξης. Τέτοιου είδους συγχρονισμοί οδηγούν σε μεγάλο αριθμό συγκρούσεων και κατά συνέπεια σε σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων του πρωτοκόλλου. Έτσι, τροποποιήσαμε τον 2PC αλγόριθμο ώστε να επιτρέπεται σε κάθε γειτονιά του δικτύου, σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή, να πραγματοποιείται μόνο ένας συγχρονισμός (χωρίς φυσικά να μπορούμε να παρέχουμε αυστηρές εγγυήσεις γι' αυτό, εφόσον αναφερόμαστε σε ένα κατανεμημένο και ασύγχρονο περιβάλλον). Αυτό επιτυγχάνεται με το να αναθέτουμε στον κόμβο υποστήριξης με την μικρότερη διεύθυνση σε κάθε γειτονιά (για τον ορισμό της γειτονιάς δείτε στην ενότητα 3.1) τον ρόλο *συντονιστή (coordinator)*. Κάθε κόμβος υποστήριξης

στέλνει περιοδικά, έστω κάθε T msec, μια αίτηση συγχρονισμού ($SYN1$) στον συντονιστή της γειτονιάς του (ο συντονιστής μιας γειτονιάς στέλνει το μήνυμα στον εαυτό του), η οποία περιλαμβάνει το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από τον τελευταίο του συγχρονισμό. Ο συντονιστής συγκεντρώνει αυτές τις αιτήσεις σε μια ουρά προτεραιοτήτων (με βάση τα χρονικά διαστήματα από τον τελευταίο συγχρονισμό) και περιοδικά επιτρέπει στον κόμβο υποστήριξης του οποίου η αίτηση βρίσκεται στην κορυφή της ουράς να συγχρονίσει, στέλνοντας του ένα $SYN2$ μήνυμα. Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος υποστήριξης εκτελεί ήδη συγχρονισμό, ο συντονιστής απλώς του ξαναστέλνει ένα $SYN2$ μήνυμα ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις αδιεξόδων (deadlocks) λόγω χαμένων μηνυμάτων $SYN2$. Όταν ένας κόμβος υποστήριξης ολοκληρώσει τον συγχρονισμό, ενημερώνει τον συντονιστή στέλνοντας του ένα μήνυμα $SYN3$. Για την αποφυγή προβλημάτων εξαιτίας της απώλειας κάποιου μηνύματος $SYN3$, ο κόμβος υποστήριξης ξαναστέλνει περιοδικά το $SYN3$ εφόσπου ο συντονιστής λάβει κάποιο από αυτά και απαντήσει, με την σειρά του, επίσης με ένα μήνυμα $SYN3$. Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία συγχρονισμού τερματίζεται είτε όταν ο κόμβος υποστήριξης που την πραγματοποιεί είτε ο συντονιστής αντιληφθούν ότι ο μεταξύ τους σύνδεσμος έχει καταστραφεί. Η καταστροφή του συνδέσμου μπορεί να διαπιστωθεί είτε εξαιτίας της απώλειας μηνυμάτων $HELLO$ είτε εξαιτίας ενός αριθμού ενημερώσεων (callbacks) από το επίπεδο MAC (IEEE 802.11) για αποτυχία παράδοσης ενός πακέτου. Στην τελευταία περίπτωση ο κόμβος υποστήριξης υποθέτει ότι ενδέχεται να υπάρχει σε εξέλιξη ταυτόχρονος συγχρονισμός και κάποιου άλλου κόμβου (και κατά συνέπεια οι αποτυχίες παράδοσης των πακέτων οφείλονται σε συγκρούσεις) και τερματίζει τον συγχρονισμό ακολουθώντας την κανονική διαδικασία (δηλαδή την ανταλλαγή μηνυμάτων $SYN3$). Επιπλέον, κατά την διάρκεια του συγχρονισμού, οι μεταδόσεις των πακέτων διασκορπίζονται τυχαία και ομοιόμορφα σε ολόκληρο το διάστημα $[0 \ T]$ msec, ώστε να αποφεύγονται μεγάλες «εκρήξεις» (bursts) πακέτων.

Επιπρόσθετα, για να αποφευχθούν κάποιες άχρηστες μεταδόσεις πακέτων, συμπεριλάβαμε στην κεφαλίδα κάθε πακέτου δύο νέα πεδία. Το πρώτο από αυτά τα πεδία καταγράφει τους κόμβους υποστήριξης που είναι γνωστό ότι έχουν λάβει ένα αντίγραφο του πακέτου, ενώ το δεύτερο πεδίο καταγράφει τον συνολικό αριθμό συγχρονισμών κατά τους οποίους το πακέτο έχει μεταδοθεί. Αυτά τα δύο πεδία και μια περιορισμένου μεγέθους ουρά αποθήκευσης των πακέτων, η οποία απορρίπτει το πρώτο (δηλαδή το παλιότερο) πακέτο στην ουρά (ώστε η χρήση μνήμης από το πρωτόκολλο δρομολόγησης να περιορίζεται), επιτρέπει την αποφυγή της χρήσης αποδείξεων παράδοσης, οι οποίες σε ένα περιβάλλον όπου η παράδοση των πακέτων δεν είναι εγγυημένη και το επιπλέον κόστος δρομολόγησης εξαιρετικά ανεπιθύμητο, μπορεί να επιβάλλει κάποια πρόσθετα σχεδιαστικά ζητήματα. Τέλος, ενσωματώσαμε το «τετριμμένο» πρωτόκολλο των αποστολών [12, 16] στο πρωτόκολλο RUNNERS, ώστε κάθε κόμβος υποστήριξης να μπορεί να λειτουργήσει και ως απλός κόμβος (αποστολέας) στο δίκτυο.

4.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Κάθε πείραμα σε κάποιον προσομοιωτή απαιτεί τον ορισμό ενός μεγάλου πλήθους παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν καθοριστικά την τελική έκβαση του πειράματος [32]. Έτσι, καταρχήν πρέπει να ληφθεί απόφαση για τα χαρακτηριστικά της περιοχής του δικτύου που θα προσομοιωθεί και η οποία αποτελεί ουσιαστικά το «θέατρο» της προσομοίωσης.

4.3.1 Περιοχή Προσομοίωσης

Η περιοχή προσομοίωσης (simulated area), συνήθως επιλέγεται ως ένα παραλληλόγραμμο (rectangle) και φράσσεται από κάποια όρια/σύνορα (borders). Η περιοχή προσομοίωσης συνήθως επιλέγεται ως δυσδιάστατη, αλλά μπορεί ακόμα να είναι μονοδιάστατη ή και τρισδιάστατη, ενώ αναπαρίσταται από ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ως εξής:

Μονοδιάστατη (1-D) περιοχή: είναι ένα απλό γραμμικό μονοπάτι για ένα σύνολο κόμβων (π.χ. ένα απλό μοντέλο για την προσομοίωση ενός αυτοκινητόδρομου). Η σχετική παράμετρος είναι μια συντεταγμένη x κατά μήκος του γραμμικού μονοπατιού, η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $[\min X \max X]$. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψελικά συστήματα, υποθέτοντας ένα γραμμικό μονοπάτι μεταξύ ενός συνόλου παρακείμενων κυψελών, και χρησιμοποιείται συχνά για την προσομοίωση συστημάτων MANET.

Δυσδιάστατη (2-D) περιοχή: είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες περιοχές, καθώς επιτρέπουν την ενσωμάτωση και την αντιστοίχιση οποιουδήποτε πιθανού μονοπατιού σε μια πραγματική (επίπεδη) γεωγραφική περιοχή. Κάθε τμήμα μιας πραγματικής γεωγραφικής περιοχής μπορεί να αντιστοιχηθεί σε ένα 2-D πλέγμα με την χρήση δύο συντεταγμένων (x, y) , οι οποίες παίρνουν τιμές από τα διαστήματα $[\min X \max X]$ και $[\min Y \max Y]$ αντίστοιχα. Ορίζοντας υποπλέγματα (subgrids) μπορούμε να υπολογίσουμε και να διαχειριστούμε την κατανομή των κόμβων (ή γενικότερα αντικειμένων της προσομοίωσης) στην περιοχή του δικτύου. Για παράδειγμα, ιεραρχίες πλεγμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διευκολύνουν την διαχείριση γειτονικών αντικειμένων σε παρακείμενα κελιά και κατά συνέπεια για τον ορισμό πολιτικών κατανομής (π.χ. n κόμβοι ανά κυψέλη του πλέγματος).

Τρισδιάστατη (3-D) περιοχή: σε ορισμένες περιπτώσεις τα 2-D μοντέλα μπορεί να επεκταθούν στον τρισδιάστατο χώρο με την χρήση μιας ακόμα συντεταγμένης. Για

παράδειγμα, όταν μοντελοποιούμε κινητικότητα των χρηστών εντός ενός πολυώροφου κτιρίου, το μοντέλο της κινητικότητας των χρηστών μπορεί να περιλαμβάνει κατακόρυφες κινήσεις (π.χ. σκάλες ή ανελκυστήρες).

Κάθε προσομοίωση μπορεί να εμπλουτιστεί με την χρήση εμποδίων, τα οποία επηρεάζουν την κίνηση των χρηστών, καθώς και την διάδοση των ραδιοκυμάτων. Το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης έχει αξία μόνο σε συνδυασμό με τον αριθμό των κόμβων του δικτύου, αλλά και με το μοντέλο κίνησης των κόμβων που χρησιμοποιείται.

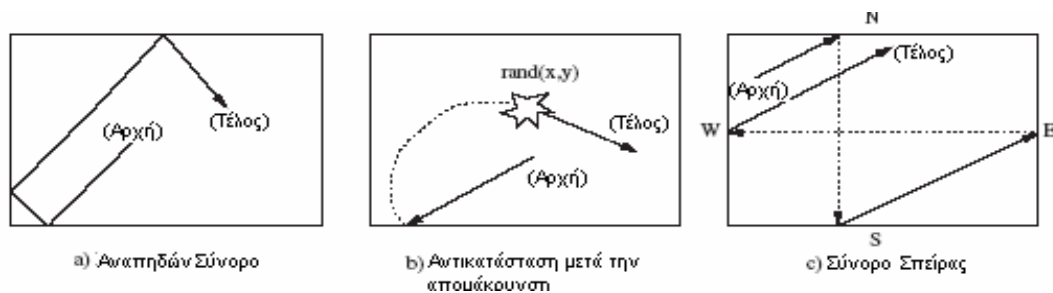
Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό της περιοχής προσομοίωσης είναι η πολιτική συνόρων (boundary policy) που χρησιμοποιείται. Η πολιτική συνόρων χαρακτηρίζει την συμπεριφορά των κόμβων, όταν εξαιτίας της κίνησης τους, φτάνουν τα σύνορα της περιοχής προσομοίωσης. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες πιθανές λύσεις και η επιλογή της κατάλληλης βασίζεται κυρίως στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο κίνησης, καθώς μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά την χωρική κατανομή (spatial distribution) των κόμβων. Οι τρεις συχνότερα χρησιμοποιούμενες πολιτικές είναι η παρακάτω:

Αναπηδών σύνορο (bouncing boundary): ορίζει ότι οι κόμβοι που αναμένεται να φύγουν από την περιοχή προσομοίωσης αναπηδούν πίσω προς αυτή (Εικόνα 25.a). Αυτή η απλή λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που ο αριθμός των κόμβων πρέπει να παραμένει σταθερός (δηλαδή έχουμε ένα κλειστό σύστημα). Η αναπήδηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση διάφορων τεχνικών, όπως για παράδειγμα κατοπτρική ανάκλαση (mirror reflection), όπου η γωνία ανάκλασης του κόμβου είναι ίση με την γωνία πρόσπτωσης, ή τυχαία ανάκλαση (random reflection), όπου η γωνία ανάκλασης επιλέγεται τυχαία. Αυτή η πολιτική συνόρων θεωρείται γενικά μη ρεαλιστική για μεγάλες περιοχές και αρκετά προσεγγιστική για προσομοίωση κινητικότητας σε εσωτερικούς χώρους (π.χ. ανθρώπους που κινούνται σε ένα δωμάτιο). Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα η κατάσταση του κόμβου που αναπηδά να διατηρείται ή να επαναρχικοποιείται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου που προσομοιώνεται (π.χ. όταν προσομοιώνονται πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν την ιστορία του κόμβου, είναι θεμιτό οι κόμβοι να διατηρούν την κατάστασή τους).

Αντικατάσταση μετά την απομάκρυνση (leave and replace): παραλλαγή της πολιτικής του αναπηδώντος συνόρου που αντικαθιστά έναν κόμβο που φεύγει από τα σύνορα του δικτύου με έναν κλώνο του, ο οποίος τοποθετείται σε μια τυχαία θέση της περιοχής προσομοίωσης (Εικόνα 25.b). Όπως και στην περίπτωση του αναπηδώντος συνόρου, η «κλωνοποίηση» του κόμβου επιτρέπει την διατήρηση της κατάστασης και του ιστορικού του ή όχι, ανάλογα με τις επιλογές του σχεδιαστή του πειράματος. Αυτή η πολιτική μπορεί να οδηγήσει σε μη ομοιόμορφη σταθερή κατάσταση (steady-state) χωρική κατανομή των κόμβων, οδηγώντας σε συγκέντρωση των κόμβων γύρω από το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης [9, 5]. Διαισθητικά, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κόμβοι φεύγουν από τα σύνορα και

επανέρχονται διαλέγοντας τυχαία κατανεμημένη θέση στο «εσωτερικό» της περιοχής. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε πολωμένη (συγκεκριμένα μειωμένη) πιθανότητα εύρεσης κάποιου κόμβου που κινείται από τα σύνορα προς το εσωτερικό της περιοχής προσομοίωσης. Κατά συνέπεια αυτή η πολιτική σπάνια θεωρείται χρήσιμη για την προσομοίωση MANET.

Σύνορο σπείρας (torus boundary): στην πολιτική αυτή, όταν ένας κόμβος φτάσει το βόριο, δυτικό, νότιο ή ανατολικό σύνορο μιας ορθογώνιας περιοχής επανεισέρχεται στην περιοχή προσομοίωσης με την ίδια κατεύθυνση και ταχύτητα από τα νότια, ανατολικά, βόρεια ή δυτικά αντίστοιχα (Εικόνα 25.ε). Διαισθητικά η παραλληλόγραμμη περιοχή προσομοίωσης αναδιπλώνεται γύρω από τον εαυτό της, βοράς με νότο και ανατολή με δύση, σαν ένας δακτύλιος. Ο λόγος που η πολιτική συνόρου σπείρας επιλέγεται αρκετά συχνά οφείλεται τόσο στην απλότητα υλοποίησής της, όσο και στο γεγονός ότι διευκολύνει την διαχείριση ομοιόμορφα κατανεμημένων πυκνοτήτων κόμβων, καθώς και των κατευθύνσεών τους (σύμφωνα με το μοντέλο κίνησης που υλοποιείται). Το φαινόμενο πλήρους συσχέτισης (correlation) εξισορροπεί τους κόμβους που εγκαταλείπουν την περιοχή προσομοίωσης με τους κόμβους που εισέρχονται σε αυτή. Προφανώς και σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιαστής του πειράματος μπορεί να επιλέξει εάν οι κόμβοι θα διατηρήσουν την κατάστασή τους και το ιστορικό τους ή όχι (χωρίς όμως να επιτρέπεται να αλλάξει την διεύθυνση και την ταχύτητά τους).



Εικόνα 25. Πολιτικές συνόρων της περιοχής προσομοίωσης.

4.3.2 Αριθμός Κόμβων

Συνήθως, όταν η προσομοίωση στοχεύει στην εκτίμηση κάποιων μετρικών του δικτύου (π.χ. ρυθμαπόδοση), απαιτείται ο αριθμός των κόμβων στην περιοχή προσομοίωσης να παραμένει σταθερός. Λεπτομερέστερα, καθώς κάποιοι κόμβοι στην περιοχή προσομοίωσης μπορεί για κάποιον λόγο να μην θεωρούνται ενεργοί (π.χ. επειδή βρίσκονται σε κατάσταση λήθαργου –sleep mode– ή επειδή έχει τελειώσει η διαθέσιμη

ενέργειά τους), συνήθως απαιτείται ο αριθμός των ενεργών κόμβων να παραμένει σταθερός. Γενικότερα, ανάλογα με τις μεταβολές του αριθμού των κόμβων στην περιοχή προσομοίωσης μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

Κλειστά συστήματα (closed systems): στα κλειστά συστήματα ο αρχικός αριθμός ενεργών κόμβων είναι σταθερός και κάθε κόμβος παραμένει ζωντανός (δηλαδή διατηρεί την λειτουργικότητα του) για ολόκληρη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Ισορροπημένα συστήματα (balanced systems): στα ισορροπημένα συστήματα κάθε φορά που ένας κόμβος εγκαταλείπει τον «κόσμο» της προσομοίωσης (π.χ. επειδή κινείται εκτός των συνόρων της περιοχής προσομοίωσης ή επειδή απενεργοποιεί την διεπαφή δικτύου του), ένα νέο στιγμιότυπο του κόμβου εισάγεται στην περιοχή προσομοίωσης με βάση την χρησιμοποιούμενη χωρική κατανομή.

Ανοιχτά συστήματα (open systems): σε αυτά τα συστήματα κόμβοι εισέρχονται (ή ενεργοποιούνται) και απομακρύνονται (ή απενεργοποιούνται) από το δίκτυο σύμφωνα με πολιτικές που ορίζει ο σχεδιαστής. Συγκεκριμένα, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει μια κατανομή για τις διαδοχικές αφίξεις κόμβων (π.χ. κατανομή Poisson ή εκθετική κατανομή), πολιτικές για την απομάκρυνση κόμβων από το δίκτυο (π.χ. όταν βγαίνουν εκτός συνόρων της περιοχής προσομοίωσης ή όταν τελειώνει η μπαταρία τους), καθώς και την αρχική κατανομή των κόμβων κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί, ώστε ο ρυθμός αφίξεων να μην είναι γρήγορος, καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του συστήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ασυμπτωτικός αριθμός κόμβων στο δίκτυο δεν είναι άνω φραγμένος και μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα πόλωσης στις μετρικές που εξαρτώνται από την πυκνότητα των κόμβων στο δίκτυο (π.χ. μέτρηση της αξιοπιστίας των συνδέσμων ενός δικτύου). Έτσι, για να έχουμε ένα σταθερό σύστημα θα πρέπει ο αριθμός των κόμβων που εισέρχονται στο δίκτυο να ισορροπείται στατιστικά από τον αριθμό των κόμβων που το εγκαταλείπουν, ώστε ακόμα και αν ο αριθμός των κόμβων δεν έχει σταθερή τιμή (όπως στα κλειστά και στα ισορροπημένα συστήματα) να συγκλίνει ασυμπτωτικά σε μια σταθερή τιμή.

Συνήθως, για την αρχική κατανομή των κόμβων χρησιμοποιείται ομοιόμορφη ή κανονική τυχαία επιλογή των συντεταγμένων τους εντός της περιοχής προσομοίωσης. Αυτή η επιλογή δεν προσφέρει καμία εγγύηση για την ανυπαρξία διαμερισμών (partitionings) του δικτύου. Μια πιθανή λύση είναι η διάσπαση της περιοχής προσομοίωσης σε ένα πλέγμα τετραγωνικών κελιών, με μέγεθος που μπορεί να καθοριστεί από τον ελάχιστο βαθμό συνδεσιμότητας του δικτύου που επιθυμείται, και η κατανομή των κόμβων κατά τέτοιο τρόπο ώστε τουλάχιστον ένας κόμβος να βρίσκεται σε κάθε κελί του πλέγματος. Περισσότερα για την αρχική κατανομή των κόμβων, θα αναφέρουμε στην συζήτηση σχετικά με τα διάφορα μοντέλα κίνησης των κόμβων.

4.3.3 Εμβέλεια Μετάδοσης, Διάδοση Ραδιοκυμάτων, Λάθη Μετάδοσης & Μοντελοποίηση Παρεμβολών

Η υλοποίηση ενός λεπτομερούς φυσικού μοντέλου για τις ασύρματες μεταδόσεις, το οποίο να περιλαμβάνει μοντέλα διάδοσης, κινητικότητας, λαθών και παρεμβολών είναι ένα από τα δυσκολότερα κομμάτια της προσομοίωσης και απαιτεί μεγάλο αριθμό προσεγγίσεων και υποθέσεων (π.χ. δείτε [28, 44]). Γι' αυτό το λόγο θα αποφύγουμε να εισέλθουμε σε λεπτομέρειες και θα υποδείξουμε μόνο μερικά θέματα μοντελοποίησης που σχετίζονται με τα MANET.

Όπως είναι γνωστό, η ασύρματη μετάδοση βασίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία κωδικοποιεί πληροφορίες με την χρήση ενός μεγάλου πλήθους πιθανών τεχνικών διαμόρφωσης (modulation) και κωδικοποίησης (coding). Η εξασθένιση των μεταδιδόμενων κυμάτων μπορεί να μοντελοποιηθεί με την χρήση απλών αναλυτικών προσεγγίσεων. Στην γενική περίπτωση, εάν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι ανίχνευσης (detection threshold) η επικοινωνία είναι δυνατή. Σε διαφορετική περίπτωση, για να μπορέσει να υπάρξει επικοινωνία (εγκαθίδρυση συνδέσμου) μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη θα πρέπει είτε να αυξηθεί η ισχύς μετάδοσης είτε να μειωθεί η σχετική μεταξύ τους απόσταση (φυσικά υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, όπως για παράδειγμα η χρήση κεραίων μεγαλύτερου κέρδους).

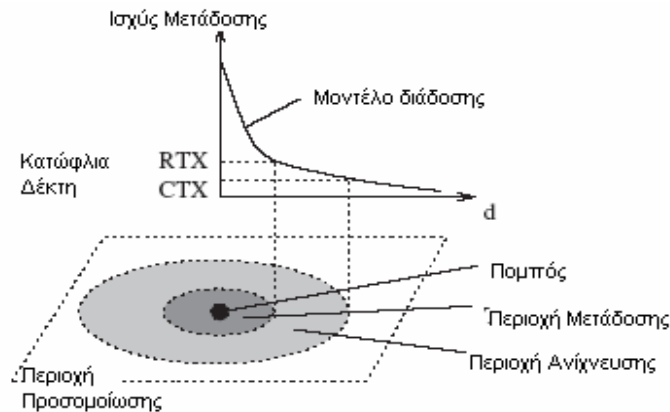
Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο διάδοσης στην περίπτωση της προσομοίωσης MANET είναι το Free Space Propagation Model: εάν P_t είναι η ισχύς μετάδοσης του σήματος, τότε η ισχύς λήψης P_r είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης ($1/d^2$).

Το Free Space Propagation Model μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω στο Two-Ray Ground Reflection Model για να περιγράψει καλύτερα τα φαινόμενα κοντά και μακριά από τους δέκτες. Το μοντέλο αυτό είναι ίδιο με το Free Space Propagation Model μέχρι μια απόσταση αναφοράς (reference distance), η οποία συνήθως επιλέγεται γύρω στα 100m, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις η ισχύς λήψης P_r γίνεται ανάλογη του $1/d^\beta$, $\beta > 2$.

Τόσο το Free Space όσο και το Two-Ray Ground μοντέλο υποθέτουν ιδανική διάδοση σε μια κυκλική περιοχή γύρω από τον πομπό. Για την μοντελοποίηση ακανόνιστων περιοχών κάλυψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Shadowing Propagation Model. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από δύο κομμάτια. Το πρώτο ουσιαστικά χρησιμοποιεί το Free Space Propagation Model, ενώ το δεύτερο μεταβάλλει στατιστικά και τυχαία την εμβέλεια μετάδοσης.

Ο σχεδιαστής της προσομοίωσης πρέπει να ορίσει το κατώφλι λήψης (receiving threshold – RTX) και το κατώφλι ανίχνευσης φέροντος (carrier-sense threshold – CTX) για κάθε συσκευή. Για κάθε μετάδοση που προσομοιώνεται, απαιτείται η εφαρμογή του μοντέλου διάδοσης και στην συνέχεια υπολογισμός για κάθε δέκτη του εάν το λαμβανόμενο σήμα είναι αρκετό για λήψη (δηλαδή μεγαλύτερο από RTX) ή σε

διαφορετική περίπτωση εάν είναι αρκετό για ανίχνευση του φέροντος (δηλαδή μεγαλύτερο του CTX). Τα συμβάντα λήψης ή ανίχνευσης φέροντος μπορεί να περαστούν και στα κομμάτια του προσομοιωτή που είναι αφοσιωμένα στον χειρισμό συμβάντων υψηλότερων επιπέδων (π.χ. MAC).



Εικόνα 26. Ισχύς μετάδοσης, διάδοση και περιοχή ανίχνευσης.

Με κάθε ασύρματο πομπό συνδέονται τρεις περιοχές. Η πρώτη είναι η περιοχή μετάδοσης (transmission area) ή περιοχή κάλυψης (coverage area) του ασύρματου πομπού (Εικόνα 26) και ορίζεται ως η περιοχή όπου το σήμα του πομπού μπορεί να ανιχνευθεί και να αποκωδικοποιηθεί σωστά (με μια μικρή πιθανότητα σφάλματος). Αυτή η περιοχή εξαρτάται μεταξύ άλλων από την κεραία του πομπού (συγκεκριμένα την κατευθυντικότητα και το κέρδος της), την ισχύ μετάδοσης, το μοντέλο διάδοσης, στο κατώφλι λήψης (RTX) ή με άλλα λόγια την ευαισθησία (sensitivity) της διεπαφής δικτύου του δέκτη, καθώς και στην επίδραση των διάφορων παρεμβολών και του θορύβου στο ασύρματο κανάλι. Η δεύτερη είναι η περιοχή ανίχνευσης ενός ασύρματου πομπού και είναι η περιοχή όπου το σήμα μπορεί να ανιχνευθεί από έναν μηχανισμό ανίχνευσης του μέσου, χωρίς αναγκαστικά να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σωστά (Εικόνα 26). Έτσι, ο κόμβος μπορεί να αντιληφθεί ότι το ασύρματο μέσο είναι κατειλημμένο, κάτι το οποίο απαιτείται από αρκετά πρωτόκολλα MAC. Τέλος, η περιοχή παρεμβολών ενός ασύρματου πομπού είναι η περιοχή εντός της οποίας το ασύρματο σήμα δεν μπορεί να ανιχνευθεί (και προφανώς ούτε να αποκωδικοποιηθεί), αλλά μπορεί να διαδοθεί προσθέτοντας παρεμβολές και θόρυβο σε οποιαδήποτε μετάδοση βρίσκεται σε εξέλιξη. Το αθροιστικό αποτέλεσμα του θορύβου μπορεί να οδηγήσει σε λάθη στην μετάδοση.

Η ύπαρξη εμποδίων στην περιοχή της προσομοίωσης μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τις περιοχές κάλυψης και παρεμβολών και μάλιστα με σχεδόν εντελώς απρόβλεπτους τρόπους. Η κατάσταση χειροτερεύει ακόμη περισσότερο με την ύπαρξη κινητικότητας των κόμβων. Επιπλέον, εάν οι κεραίες των κόμβων θεωρηθούν κατευθυντικές και εάν ο λωβός μετάδοσης δεν είναι ιστροπικός, η προσέγγιση της

περιοχής κάλυψης γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη και κατά συνέπεια ανακριβής.

Για την μοντελοποίηση των επιδράσεων των παρεμβολών υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων που πρέπει να οριστούν και κατά συνέπεια η ρεαλιστική μοντελοποίηση είναι εξαιρετικά δύσκολη αν όχι αδύνατη, τουλάχιστον χωρίς ένα εξαιρετικά υψηλό υπολογιστικό κόστος. Σαν μια απλή περιγραφή του πλήθους των προβλημάτων, παραθέτουμε μια σύντομη λίστα με τις λεπτομέρειες του συστήματος που περιέχονται στα θεωρητικά μοντέλα και οι οποίες συχνά παραλείπονται λόγω της πολυπλοκότητας και των εκτεταμένων υπολογισμών που απαιτούν για την προσομοίωσή τους³:

Απόσβεση (fading): ένα φυσικό φαινόμενο, εξαρτώμενο από την συχνότητα, το οποίο εισάγει καθυστέρηση και μεταβολές στην φάση μεταξύ του κυρίως μεταδιδόμενου σήματος (το οποίο ακολουθεί το κυρίαρχο μονοπάτι – dominant path) και πολλών δευτερευόντων σημάτων (τα οποία ακολουθούν εναλλακτικά μονοπάτια) και τα οποία προκαλούνται από εμπόδια και την κίνηση των κόμβων. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε διακυμάνσεις της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Η συχνότερη μοντελοποίηση του είναι με την χρήση προσθετικού λευκού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise – AWGN) για την αναπαράσταση της απόσβεσης σε ιδανικά κανάλια και με εξασθενίσεις Rayleigh ή Ricean για την περίπτωση καναλιών με μεγάλες εξασθενίσεις [42].

Σκίαση (shadowing): εξασθένιση της ισχύος του σήματος που οφείλεται σε φυσικά εμπόδια. Το φαινόμενο αυτό ευθύνεται κυρίως για τις ακανόνιστες περιοχές κάλυψης.

Φαινόμενο Doppler: αλλαγή στην συχνότητα ενός κύματος εξαιτίας της σχετικής κίνησης μεταξύ πομπού και δέκτη. Προφανώς, ένα ιδιαίτερα σημαντικό φαινόμενο για τα MANET, όπου σε αντίθεση με τα περισσότερα «κοινά» ασύρματα δίκτυα έχουμε κίνηση τόσο του πομπού όσο και του δέκτη.

Ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction) και διασκορπισμός (scattering): αλλαγές στο σήμα που οφείλονται σε εμπόδια. Η μοντελοποίηση αυτών των φαινομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προσομοίωση σεναρίων σε εσωτερικό χώρο.

Καθένα από τα παραπάνω φαινόμενα μπορεί να έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά δεδομένων των υλοποιήσεων στο φυσικό επίπεδο και των διαφορετικών τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται. Η συνολική επίδραση όλων των παραπάνω φαινομένων (και αρκετών άλλων που δεν αναφέρονται) μοντελοποιείται

³ Στα MANET τα συγκεκριμένα προβλήματα γίνονται ακόμα δυσκολότερο να μοντελοποιηθούν λόγω της σχετικής κίνησης πομπού και δέκτη.

συνήθως με την χρήση μιας απλής πιθανότητας λάθους για μια δεδομένη ποσότητα πληροφορίας που λαμβάνεται (π.χ. bit) από το φυσικό κανάλι. Η ιδέα είναι να αποκρύψουμε όλα αυτά τα φαινόμενα σε ένα «μαύρο κουτί» (black box) που περιγράφει την επίδραση όλων και το οποίο ονομάζουμε πιθανότητα λάθους bit (Bit Error Probability – BER). Προφανώς, αυτή είναι μια ισχυρή και πιθανόν, σε ορισμένες περιπτώσεις, μη αποδεκτή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς του ασύρματου μέσου. Παρόλα αυτά στην γενική περίπτωση επιτρέπει την προσομοίωση των ασύρματων συστημάτων χωρίς την ανάγκη για μεγάλα υπολογιστικά κόστη. Το BER καθορίζεται από τον σχεδιαστή του πειράματος είτε άμεσα, είτε έμμεσα μέσω του ορισμού άλλων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα το λόγο σήματος προς θόρυβο (Sound to Noise Ratio – SNR) στον δέκτη και τα κατώφλια RTX και CTX.

4.3.4 Μοντέλο Κίνησης

Η κινητικότητα των χρηστών είναι το κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα MANET από τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα. Κατά συνέπεια η μοντελοποίηση της κινητικότητας είναι πρωταρχικής σημασίας για κάθε ανάλυση, μέσω προσομοίωσης, οποιουδήποτε ασύρματου συστήματος. Η κινητικότητα, όπως είδαμε και προηγουμένως, επιδρά σε πολλά επίπεδα του δικτύου (π.χ. φυσικό επίπεδο, επίπεδο δικτύου). Έτσι, η συμπεριφορά των πρωτοκόλλων (διαφόρων επιπέδων) εξαρτάται σημαντικά από το φυσικό μοντέλο κίνησης των χρηστών και αποδίδει βέλτιστα για ένα συγκεκριμένο πρότυπο κίνησης. Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα κίνησης των MANET θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά αποδίδοντας κατά το δυνατό την φυσική συμπεριφορά του υπό προσομοίωση συστήματος. Επιπλέον, εξαιτίας της ανυπαρξίας υποδομών στα MANET, τα περισσότερα από τα μοντέλα κίνησης που χρησιμοποιούνται για τα κυψελικά συστήματα (και τα οποία στην πράξη φαίνεται να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα) δεν είναι κατάλληλα. Για παράδειγμα, τα μοντέλα Markov ή τυχαίοι περίπατοι (random walks), τα οποία περιγράφονται μέσω πιθανοτήτων μετάβασης από κυψέλη σε κυψέλη, ή τα μοντέλα ροής-υγρών (fluid-flow models), των οποίων το κύριο χαρακτηριστικό είναι η περιγραφή της κίνησης σε όρους «μέσου αριθμού χρηστών που διασχίζουν κάποιο σύνορο» είναι εγγενώς ακατάλληλα για την περίπτωση των MANET.

Γενικά, για την μοντελοποίηση της κίνησης σε ένα MANET χρησιμοποιούνται συνήθως δύο προσεγγίσεις: ίχνη κίνησης (motion traces) και συνθετικά μοντέλα (synthetic models). Τα ίχνη κίνησης παρέχουν ακριβής και ρεαλιστικές πληροφορίες για τα πρότυπα κίνησης και την συμπεριφορά των χρηστών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις φραγμένων σεναρίων (π.χ. αυτοκινητόδρομοι). Βασίζονται στην καταγραφή και αναπαραγωγή, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, της πραγματική κίνησης ενός συνόλου πραγματικών δειγμάτων. Το βασικό πρόβλημα αυτής της τεχνικής είναι η δυσκολία συγκέντρωσης των στοιχείων, καθώς και ο μεγάλος όγκος (και κατά συνέπεια η δυσκολία επεξεργασίας) των δεδομένων. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ίχνη παρέχουν ικανοποιητικές προσεγγίσεις για την κίνηση σταθερής κατάστασης (steady-state mobility) των χρηστών μόνο εάν η κίνηση των τελευταίων καταγραφεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, συχνά η συλλογή των

δειγμάτων απαιτεί ειδικό εξοπλισμό που μπορεί να μην είναι διαθέσιμος. Το βασικό πλεονέκτημα των ιχνών κίνησης είναι ότι λύνουν το πρόβλημα της αρχικοποίησης και της κατανομής των κόμβων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με ντετερμινιστικό τρόπο. Ένα ακόμα ιδιαίτερα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητα που έχουν να συλλαμβάνουν την πραγματική συσχέτιση της κινητικότητας των κόμβων με την πραγματική εφαρμογή που χρησιμοποιεί ο χρήστης (π.χ. αν ένας χρήστης δεν έχει ικανοποιητικό σήμα όταν μιλάει στο κινητό του θα αρχίσει να κινείται).

Από την άλλη, τα συνθετικά μοντέλα προσπαθούν να πετύχουν μια ρεαλιστική αναπαράσταση της κίνησης των χρηστών χωρίς να καταφύγουν στην χρήση ιχνών. Στην βιβλιογραφία έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός συνθετικών πρωτοκόλλων, τα περισσότερα από τα οποία βασίζονται σε τυχαία κίνηση και στοχεύουν στην ικανότητα μαθηματικής επαλήθευσης παρά στην ρεαλιστική περιγραφή της κίνησης των χρηστών. Πρόσφατα, τα μοντέλα που βασίζονται σε τυχαία κίνηση έχουν επεκταθεί με την εισαγωγή φαινομένων συσχετίσεων, περιορισμών και συμπεριφοράς ομάδας στοχεύοντας στην ρεαλιστικότερη αναπαράσταση συγκεκριμένων καταστάσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε μια λίστα των περισσότερο γνωστών συνθετικών μοντέλων που έχουν προταθεί για την περιγραφή της κίνησης των MANET, μαζί με μια σύντομη περιγραφή τους:

Random Mobility Model: Αποτελεί μια διακριτή εκδοχή του μοντέλου κίνησης κατά Brown. Είναι εντελώς απρόβλεπτο και έχει την ιδιότητα της αμνησίας (memoryless property) για την ταχύτητα και την κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι η τρέχουσα ταχύτητα και κατεύθυνση δεν εξαρτώνται από προηγούμενες ταχύτητες ή κατευθύνσεις και κατά συνέπεια η ταχύτητα και η κατεύθυνση δεν παρουσιάζουν κανένα βαθμό αυτοσυσχετίσης. Το μοντέλο αυτό είναι συνήθως μη ρεαλιστικό. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι η ευκολία υλοποίησης και η δυνατότητα εύκολης μαθηματικής ανάλυσης. Σε δυσδιάστατο χώρο συνήθως υλοποιείται ως εξής: κάθε κόμβος κινείται από την τρέχουσα θέση του στην νέα θέση του, η οποία καθορίζεται από μια ψευδοτυχαία και ομοιόμορφη επιλογή κατεύθυνσης (με την μορφή πολικών συντεταγμένων) και με μια ομοιόμορφη επιλογή ταχύτητας. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση διατηρούνται σταθερές για χρονικά διαστήματα t_s και t_d αντίστοιχα.

Random Waypoint Model: Είναι παρόμοιο με το Random Mobility Model, αλλά προσθέτει τις έννοιες της εποχής και της παύσης, προσπαθώντας να κάνει το μοντέλο κίνησης περισσότερο ρεαλιστικό. Κάθε κόμβος εκτελεί μια ακολουθία εποχών, καθεμιά από τις οποίες ορίζεται σαν ένα διάστημα κίνησης ακολουθούμενο από ένα διάστημα παύσης. Στην αρχή κάθε κίνησης ο κόμβος επιλέγει τις συντεταγμένες του νέου προορισμού (σε αντίθεση με το Random Mobility Model, το οποίο επιλέγει κατεύθυνση) ομοιόμορφα από την περιοχή προσομοίωσης. Η ταχύτητα επιλέγεται ομοιόμορφα από το διάστημα $[\min Speed \ \max Speed]$. Στο τέλος κάθε διαστήματος κίνησης πραγματοποιείται ένα δεδομένο «διάστημα παύσης» p_i

ομοιόμορφα επιλεγμένο από το διάστημα $[0 \text{ } \max PauseTime]$.

Random Direction Model: Το συγκεκριμένο μοντέλο δημιουργήθηκε για να διορθώσει τα προβλήματα των κυμάτων πυκνότητας (density waves) στον μέσο αριθμό γειτόνων που παράγονται από το Random Waypoint μοντέλο. Στο Random Waypoint μοντέλο, οι κόμβοι τείνουν να έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης. Το Random Direction μοντέλο λύνει το πρόβλημα επιλέγοντας οι κόμβοι του δικτύου να κινούνται με τον τρόπο του Random Walk μοντέλου, αλλά όταν φτάνουν στα σύνορα της περιοχής προσομοίωσης να κάνουν παύση για κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια να επιλέγουν μια γωνία μεταξύ 0 και 180 μοιρών.

City Section Mobility Model: Το μοντέλο αυτό προσπαθεί να προσομοιώσει την κίνηση σε ένα οδικό δίκτυο μιας πόλης. Αποτελείται από δρόμους στους οποίους οι κόμβοι κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες (π.χ. δρόμοι ταχείας κυκλοφορίας, συνοικιακοί δρόμοι). Κάθε κόμβος ξεκινάει από κάποιο σημείο της περιοχής προσομοίωσης, επιλέγει τυχαία έναν προορισμό και ακολουθεί την συντομότερη διαδρομή (μέσα από το οδικό δίκτυο) προς αυτόν. Για να γίνει ρεαλιστικότερη η προσομοίωση, οι κόμβοι επιτρέπεται να επιταχύνουν, να επιβραδύνουν και να σταματούν, ενώ επιβάλλεται να διατηρούν μια απόσταση ασφαλείας μεταξύ τους.

Nomadic Community Mobility Model: Το μοντέλο αυτό αφορά την κίνηση ομάδων κόμβων, οι οποίοι μετακινούνται συλλογικά από σημείο σε σημείο (π.χ. ομάδες στρατιωτών). Στο συγκεκριμένο μοντέλο, κάθε κόμβος που ανήκει σε μια ομάδα χρησιμοποιεί ένα ατομικό μοντέλο κίνησης (π.χ. Random Waypoint) για να κινείται γύρω από ένα σημείο αναφοράς. Όταν το σημείο αναφοράς αλλάζει, όλοι οι κόμβοι της ομάδας μετακινούνται στο νέο σημείο αναφοράς.

Pursue Mobility Model: Το μοντέλο αυτό προσπαθεί να προσομοιώσει την κίνηση ενός κόμβου που ακολουθεί κάποιον άλλο κόμβο στόχο. Για παράδειγμα αυτό το μοντέλο θα μπορούσε να προσομοιώνει την κίνηση αστυνομικών οχημάτων που καταδιώκουν ένα ύποπτο όχημα.

4.3.5 Φόρτο

Η επιλογή του φόρτου (workload) του δικτύου, δηλαδή της ποσότητας των δεδομένων που θα ανταλλαχθούν μεταξύ των κόμβων, είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος της προσομοίωσης. Παρά το γεγονός ότι ο χαρακτηρισμός του φόρτου του δικτύου είναι ένα πρόβλημα που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα για πολλά χρόνια, στα MANET κανένας δεν γνωρίζει ποια θα είναι η κύρια χρήση τους και κατά συνέπεια

μπορούμε να κάνουμε μόνο υποθέσεις για τον χαρακτηρισμό της κίνησής τους. Σαν χειρότερη περίπτωση, η προσομοίωση μπορεί να γίνει κάτω από ασυμπτωτικές συνθήκες φόρτου (asymptotic workload conditions). Αυτό σημαίνει ότι η υπόθεση που γίνεται για το σύστημα είναι ότι οι πηγές της κίνησης στο δίκτυο έχουν πάντα πακέτα προς μετάδοση. Αυτή η υπόθεση είναι χρήσιμη για την μελέτη της σταθερότητας και της αντίδρασης του δικτύου σε περιπτώσεις συμφόρησης (congestion) ή ακόμα και για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων κλιμάκωσης του δικτύου.

Μιας και η προηγούμενη υπόθεση είναι μη ρεαλιστική, συνήθως γίνεται χρήση διαφορετικών παραμετροποιήσιμων μοντέλων. Το πλέον συνηθισμένο μοντέλο κίνησης για τα MANET είναι το μοντέλο κίνησης συνεχούς ρυθμού bit (Constant Bit Rate – CBR), σύμφωνα με το οποίο κάθε πηγή (αποστολέας) κίνησης, δημιουργεί μια συνεχή ροή πακέτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί υποθέτοντας ότι μια δεδομένη ποσότητα δεδομένων δημιουργείται σε σταθερά χρονικά διαστήματα (π.χ. 1 πακέτο μεγέθους 1024 bytes κάθε sec). Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται συνήθως για την προσέγγιση κίνησης που παράγεται από εφαρμογές φωνής. Μπορεί εύκολα να επεκταθεί με διάφορους τρόπους, ώστε να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό. Για παράδειγμα το μοντέλο κίνησης Variable Bit Rate (VBR) μπορεί να προσεγγίσει κίνηση δεδομένων (για παράδειγμα tftp) ή εφαρμογών πραγματικού χρόνου (real time applications), όπως εφαρμογές βίντεο. Το VBR ορίζεται από πηγές κίνησης που δημιουργούν μεταβλητής ποσότητας δεδομένα σαν συνάρτηση του χρόνου, βασισμένες σε κατανομές άφιξης πακέτων.

4.3.6 Μετρικές

Για την περίπτωση της μέτρησης των επιδόσεων των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για MANET θα μπορούσε να οριστεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος μετρικών. Αυτές που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

- **Ρυθμαπόδοση (throughput):** Σκοπός κάθε πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των bits που μεταδίδονται διατηρώντας παράλληλα στην ελάχιστη δυνατή τιμή την μέση καθυστέρηση παράδοσης. Η ρυθμαπόδοση συνήθως ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός bit δεδομένων που παραδόθηκαν στον προορισμό προς τον συνολικό χρόνο που απαιτήθηκε για την παράδοσή τους.
- **Κόστος δρομολόγησης (routing overhead):** Κάθε πόρους του συστήματος που δεν χρησιμοποιείται αυστηρά για την μετάδοση των πραγματικών δεδομένων. Για παράδειγμα ο αριθμός των bit ελέγχου στην κεφαλίδα κάθε πακέτου μπορεί να θεωρηθεί σαν κόστος. Συνήθως, αυτό που χαρακτηρίζεται σαν κόστος δρομολόγησης στα MANET είναι ο αριθμός των πακέτων που μεταδίδονται και δεν περιέχουν δεδομένα.

- **Ρυθμός παράδοσης (delivery rate):** Αφορά τον αριθμό των πακέτων (ή των bit) που παραδίδονται σωστά προς τον αριθμό των συνολικά απεσταλμένων πακέτων. Αποτελεί μια καλή ένδειξη για την αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου δρομολόγησης.
- **Από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση (end-to-end delay):** Ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για την παράδοση του πακέτου (από την παραλαβή του πακέτου από τον πράκτορα δρομολόγησης του αποστολέα μέχρι την παράδοση του από τον πράκτορα δρομολόγησης του παραλήπτη στο υπερκείμενο πρωτόκολλο).
- **Μήκος δρομολογίων (routes' length):** Μετράει το μήκος των μονοπατιών που επιλέγει ο αλγόριθμος (σε μονάδες της χρησιμοποιούμενης μετρικής). Έχει ενδιαφέρον σε περιπτώσεις αλγορίθμων που προσπαθούν να βρουν συντομότερες διαδρομές. Επίσης μπορεί να εκφραστεί και με την μορφή της διαφοράς του μήκους του μονοπατιού από το βέλτιστο δυνατό (εφόσον ο προσομοιωτής παρέχει αυτή την πληροφορία).
- **Κατανάλωση Ισχύος (power consumption):** Μετράει την κατανάλωση ισχύος των κόμβων εξαιτίας της επικοινωνίας.

Φυσικά ανάλογα με το πρωτόκολλο ή την εφαρμογή που προσομοιώνουμε μπορεί να χρειάζεται να μετρηθούν και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση εφαρμογών βίντεο, η τιμή του jitter, η οποία μετράει την διακύμανση της από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης.

4.4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η πειραματική αξιολόγηση μας, όπως ήδη αναφέρθηκε βασίστηκε στον προσομοιωτή ns-2 και συγκεκριμένα την έκδοση 2.27 αυτού. Η επιλογή των διαφόρων παραμέτρων της προσομοίωσης μας, εκτός από την συζήτηση που προηγήθηκε, βασίστηκε και στις δυνατότητες που παρέχει ο ns-2, καθώς και στα διάφορα εργαλεία που έχουν υλοποιηθεί για αυτόν και τα οποία κάνουν ευκολότερο τον ορισμό του μοντέλου κίνησης και του φόρτου (π.χ. τα setdest και cborgen του Monarch Project). Καταρχήν, όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο ns-2 (παραμετροί του φυσικού επιπέδου, του MAC, του IP, των CBR κτλ.), επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που έχουν ανατεθεί

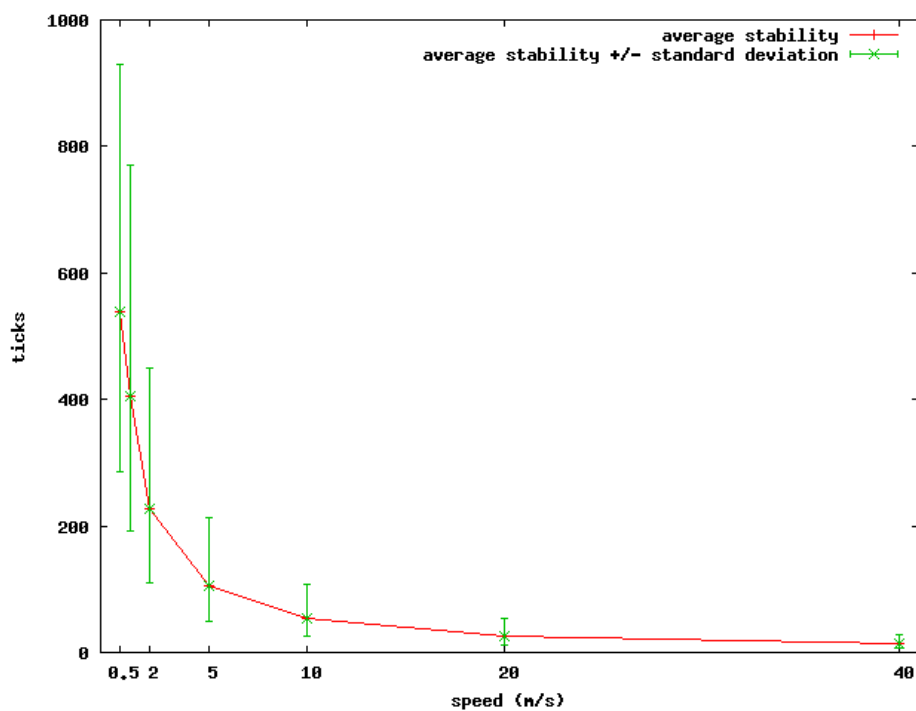
εξορισμού στην έκδοση 2.27 του ns-2. Έτσι για παράδειγμα η ακτίνα εκπομπής των κόμβων καθορίζεται στα 250m. Ως πρωτόκολλο MAC χρησιμοποιήθηκε το IEEE 802.11b με ρυθμό μετάδοσης 11Mbps. Επίσης, ως περιοχή προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένα ορθογώνιο μεγέθους 2200×300 m, περιοχή η οποία αποτρέπει τον συχνό διαμερισμό του δικτύου, επιτρέποντας παράλληλα την ύπαρξη σχετικά μεγάλων (σε αριθμό αλμάτων) μονοπατιών.

Σαν μοντέλο κίνησης των κόμβων επιλέχθηκε το Random Waypoint μοντέλο, του οποίου οι παράμετροι επιλέχθηκαν με βάση της υποδείξεις της εργασίας [47], η οποία μελετά την συμπεριφορά του μοντέλου και αναλύει το πρόβλημα της εξασθένησης της ταχύτητας (speed decay). Συγκεκριμένα, η [47] αποδεικνύει ότι το μοντέλο αποτυγχάνει να φτάσει σε σταθερή κατάσταση (steady state), υπό την έννοια ότι η μέση ταχύτητα των κόμβων συνεχώς μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, οδηγώντας σε αναξιόπιστα ή ακόμα και παραπλανητικά αποτελέσματα. Βασιζόμενοι στις υποδείξεις της για την αποφυγή του προβλήματος, εξισώσαμε την ελάχιστη με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα των κόμβων (δηλαδή χρησιμοποιήσαμε σταθερές ταχύτητες). Στην συνέχεια προχωρήσαμε σε δύο κατηγορίες πειραμάτων: (i) την ομοιόμορφη περίπτωση (uniform case), όπου οι 20 κόμβοι κινούνται με σταθερή ταχύτητα επιλεγμένη από το σύνολο $\{0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 40\}$ m/sec και (ii) την μη-ομοιόμορφη περίπτωση (non-uniform case), όπου οι κόμβοι χωρίζονται σε τρεις ομάδες των 7 κόμβων η καθεμία (δηλαδή έχουμε συνολικά 21 κόμβους στο δίκτυο), με του κόμβους κάθε ομάδας να κινούνται με διαφορετικές σταθερές ταχύτητες (π.χ. 2m/sec για την πρώτη ομάδα, 10m/sec για την δεύτερη ομάδα και 20m/sec για την τρίτη ομάδα) και για διαστήματα παύσης (pause times) $\{0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100\}$ sec.

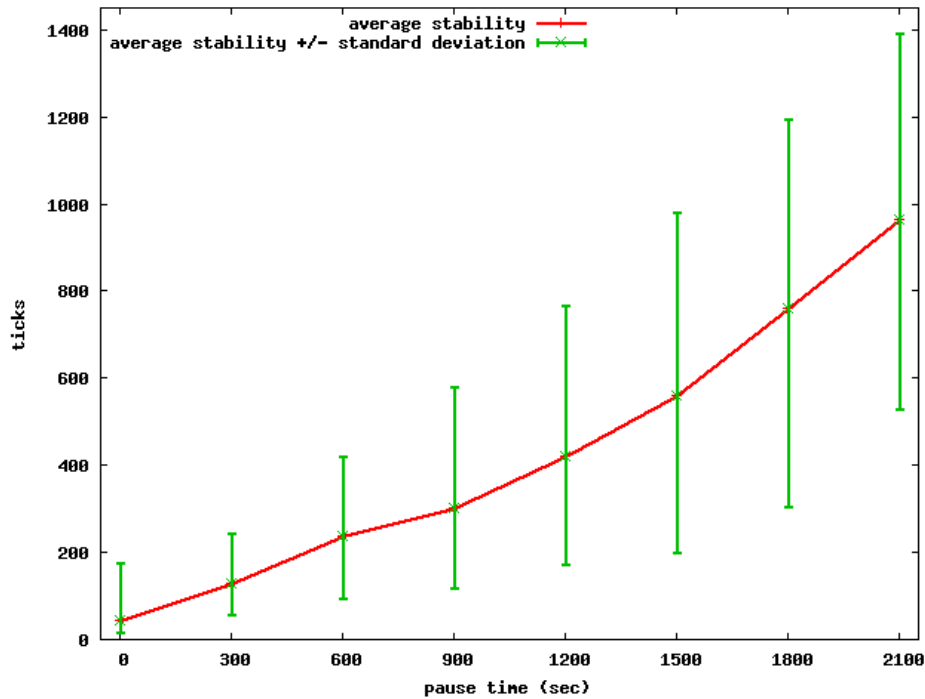
Για κάθε πείραμα, αρχικά επιτρέπουμε στην προσομοίωση να εξελιχθεί για 1000 sec, ώστε να φτάσει σε σταθερή κατάσταση, όπως προτείνεται από την εργασία [9], πριν αρχίσουμε να καταγράφουμε την έξοδο του πειράματος. Στην συνέχεια ένας τυχαίος αριθμός, μέχρι το πολύ 20, ζεύγη κόμβων επιλέγεται και μια ροή CBR πακέτων δημιουργείται μεταξύ τους. Πρέπει να σημειωθεί, ότι επιτρέπεται δύο ροές να έχουν ένα ή και τα δύο άκρα τους κοινά. Κάθε CBR πηγή δημιουργεί δεδομένα με ρυθμό 5 πακέτα/sec (με κάθε πακέτο να έχει μέγεθος 512 bytes) και η ροή πακέτων ξεκινά σε κάποια τυχαία (και ομοιόμορφα επιλεγμένη) χρονική στιγμή στο διάστημα $[1000 \ 1250]$ sec, έστω T_{start} , και τερματίζει σε μια τυχαία επιλεγμένη χρονική στιγμή στο διάστημα $[T_{start} \ 2000]$ sec. Κατόπιν επιτρέπουμε στην προσομοίωση να συνεχίσει για 100 sec ακόμα (ώστε τα πρωτόκολλα και ειδικά το RUNNERS να ολοκληρώσουν την λειτουργία τους). Κατά συνέπεια ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης για κάθε πείραμα είναι 2100 sec (από τα οποία, όμως, μόνο τα 1100 τελευταία sec χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των διάφορων μετρικών). Η επιλογή των CBR πηγών έγινε ώστε η μελέτη του προτεινόμενου framework να γίνει με όσο το δυνατό λιγότερες επιδράσεις από άλλα πρωτόκολλα (διαφορετικών επιπέδων) που χρησιμοποιούνται ή τις υλοποιήσεις αυτών (όπως για παράδειγμα το TCP). Επίσης, η επιλογή των παραμέτρων των CBR πηγών έγινε έτσι ώστε να αποφεύγονται κατά το δυνατό φαινόμενα συμφόρησης του δικτύου (τα οποία θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τις μετρήσεις), διατηρώντας, όμως, ταυτόχρονα ικανοποιητική

κίνηση στο δίκτυο για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μετρικών. Επιπρόσθετα, μιας και κάθε προσομοίωση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών (Pseudo Random Number Generator – PRNG) που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής, πραγματοποιήσαμε κάθε πείραμα τουλάχιστον 20 φορές ώστε τα αποτελέσματά μας να αναφέρονται στην μέση περίπτωση, ακολουθώντας της οδηγίες της [32].

Το πρώτο πείραμα που πραγματοποιήσαμε, αφορά τον υπολογισμό της μέσης τιμής της σταθερότητας (δείτε ορισμό 2), όπως μετριέται από την MCS, όταν επιλέξουμε $w_1 = w_2 = 0,5$. Για την ομοιόμορφη περίπτωση (χρησιμοποιώντας διάστημα παύσης ίσο με 0 sec), τα αποτελέσματα που παίρνουμε φαίνονται στην Εικόνα 27. Παρατηρούμε ότι η τιμή της σταθερότητας αρχικά μειώνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό, καθώς η ταχύτητα των κόμβων αυξάνεται και συνεχίζει να μειώνεται, αλλά με μικρότερο ρυθμό, για υψηλότερες ταχύτητες (μεγαλύτερες από 10 m/sec). Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται να υποδεικνύει την ύπαρξη ενός κατωφλίου γύρω στα 5 m/sec, το οποίο πιστεύουμε ότι οφείλεται στο μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης και στην πυκνότητα των κόμβων που επιλέξαμε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων μας.



Εικόνα 27. Μέτρηση της σταθερότητας για την ομοιόμορφη περίπτωση.

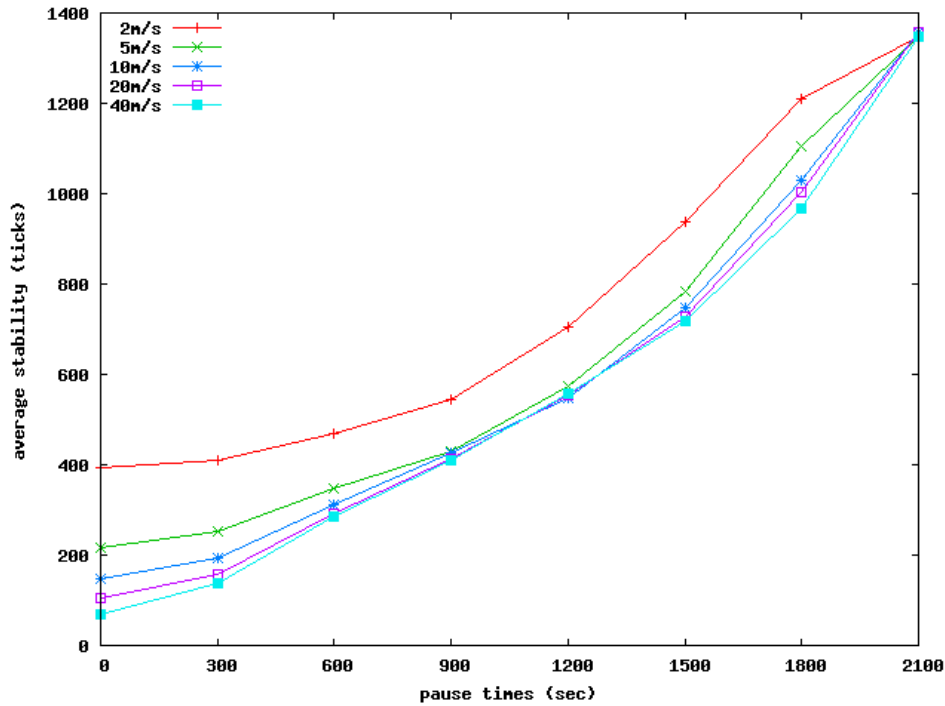


Εικόνα 28. Μετρούμενη σταθερότητα για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση (περίπτωση μικτών ταχυτήτων).

Για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση, η μέση μετρούμενη σταθερότητα φαίνεται στην Εικόνα 28. Η δεύτερη αυτή περίπτωση υπονοεί μια κάπως πιο γραμμική αύξηση της τιμής της σταθερότητας, όσο τα διαστήματα παύσης γίνονται μεγαλύτερα, συμπεριφορά η οποία μπορεί να αιτιολογηθεί εν μέρει από την [47]. Και στις δύο προηγούμενες γραφικές παραστάσεις έχουμε εισάγει την τυπική απόκλιση της σταθερότητας γύρω από τη μέση τιμή με την μορφή μπαρών λάθους (error bars). Είναι εμφανές ότι η απόκλιση από τη μέση τιμή είναι υψηλή και ιδιαίτερα για την περίπτωση μικρής κινητικότητας του δικτύου (δηλαδή μικρές ταχύτητες ή μεγάλα διαστήματα παύσης). Πιστεύουμε ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται, επίσης, στην περιοχή προσομοίωσης και στην πυκνότητα των κόμβων που επιλέξαμε για την εκτέλεση των πειραμάτων μας. Παρόλα αυτά έχουμε την αίσθηση ότι ο ορισμός της σταθερότητας που χρησιμοποιήσαμε είναι κατάλληλος για τον σκοπό μας.

Με σκοπό να κατανοήσουμε καλύτερα την επίδραση της ταχύτητας και των διαστημάτων παύσης στον χαρακτηρισμό των κόμβων με βάση την τιμή της σταθερότητάς τους, εκτελέσαμε και ένα τρίτο σύνολο πειραμάτων, στο οποίο οι κόμβοι κινούνται με μέγιστες ταχύτητες επιλεγμένες από το σύνολο $\{2, 5, 10, 20, 40\}$ m/sec και με ελάχιστη ταχύτητα 0 m/sec (δηλαδή ουσιαστικά αγνοούμε τις υποδείξεις της εργασίας [47]). Ως διαστήματα παύσης επιλέγονται πάλι τα $\{0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100\}$ sec. Τα αποτελέσματα αυτής της κατηγορίας πειραμάτων, όσον αφορά την μέση σταθερότητα,

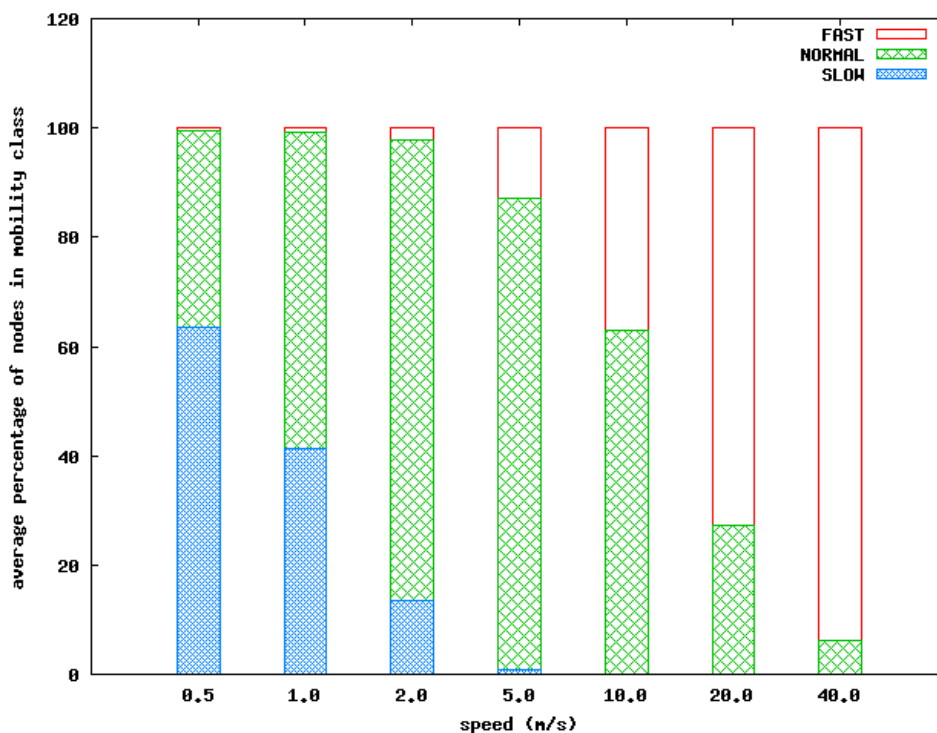
φαίνονται στην Εικόνα 29, όπου και είναι εμφανές ότι το μέγεθος του διαστήματος παύσης κυριαρχεί επί της μέγιστης ταχύτητας, όπως αναλύεται στην [47].



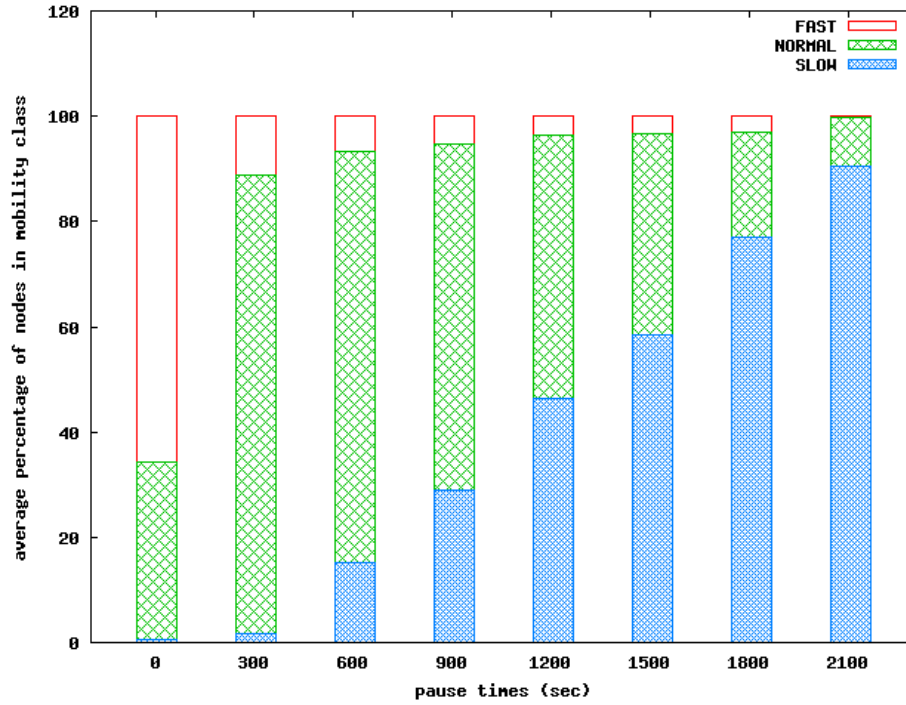
Εικόνα 29. Μέση σταθερότητα για διαφορετικές μέγιστες ταχύτητες και διαστήματα παύσης.

Στην συνέχεια, μελετήσαμε την κατάταξη των κόμβων με βάση την σταθερότητα (ορισμός 3), όπως αυτή υπολογίζεται από την SSS. Οι μετρήσεις έγιναν με τιμές για τα κατώφλια ίσες με $T_{slow} = 200$ και $T_{fast} = 35$, οι οποίες επιλέχθηκαν με βάση τις μετρήσεις της σταθερότητας που παρουσιάσαμε στις τρεις προηγούμενες γραφικές. Τα ποσοστά των κόμβων που κατατάσσονται ως «αργοί», «φυσιολογικοί» και «γρήγοροι» παρουσιάζονται στην Εικόνα 30 για την ομοιόμορφη περίπτωση και στην Εικόνα 31 για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση. Πιστεύουμε ότι αυτές οι γραφικές παραστάσεις επιβεβαιώνουν πειραματικά την μέθοδο που προτείνουμε για την κατάταξη των κόμβων σε κλάσεις κινητικότητας σύμφωνα με την σταθερότητά τους. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι σε συνθήκες χαμηλής κινητικότητας του δικτύου (δηλαδή μικρών ταχυτήτων ή μεγάλων διαστημάτων παύσης) το μεγαλύτερο ποσοστό κόμβων κατατάσσεται στην κλάση «αργός». Αντίθετα, καθώς η κινητικότητα του δικτύου αυξάνεται (δηλαδή οι κόμβοι αποκτούν μεγαλύτερες ταχύτητες ή τα διαστήματα παύσης γίνονται μικρότερα), ο χαρακτηρισμός των κόμβων αλλάζει από «αργός» σε «φυσιολογικός» και από «φυσιολογικός» σε «γρήγορος».

Σαν επόμενο πείραμα, μελετάμε συγκριτικά τις επιδόσεις καθενός από τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα τόσο ξεχωριστά όσο και στο πλαίσιο του MSA framework. Αυτή η κατηγορία πειραμάτων, εκτός από την αξιολόγηση της MSA, έχει και το πλεονέκτημα της επανάληψης της μελέτης σχετικά με την επίδραση της κινητικότητας στις επιδόσεις των τριών αρχικών πρωτοκόλλων (AODV, DSDV και RUNNERS). Στο παρελθόν, πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει ενδιαφέροντα αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα αυτά της εργασίας [30], και ιδιαιτέρως για την περίπτωση των AODV και DSDV. Πρόσφατα, στις εργασίες [12, 13], τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για MANET μελετήθηκαν σε μια περισσότερο «θεμελιώδη» βάση, με αναφορά στην προσέγγιση που ακολουθούν. Συγκεκριμένα, οι εργασίες αυτές προσπαθούν να συγκρίνουν την κατηγορία πρωτοκόλλων που δημιουργούν και συντηρούν μονοπάτια (αντιπροσωπευόμενη από το AODV και το ZRP) με την κατηγορία πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν σύνολα υποστήριξης (αντιπροσωπευόμενη από το RUNNERS). Σε αυτή την εργασία συνεχίζουμε αυτή την προσπάθεια συμπεριλαμβάνοντας στα πειράματά μας και το DSDV. Σε αντίθεση, όμως, με τις [12, 13] που χρησιμοποιούν τον αφαιρετικό, υψηλού-επίπεδου προσομοιωτή adhocSim [11], η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τον ns-2, ο οποίος παρέχει περισσότερο λεπτομερή μοντέλα για τα χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας δικτύου. Όμως, παρά το γεγονός ότι ο ns-2 επιτρέπει την μελέτη των πρωτοκόλλων σε ένα ρεαλιστικότερο περιβάλλον, η χρήση του αποτρέπει την προσομοίωση μεγάλων δικτύων (σε όρους αριθμού κόμβων και κινητικότητας αυτών), λόγω των μεγάλων υπολογιστικών απαιτήσεων



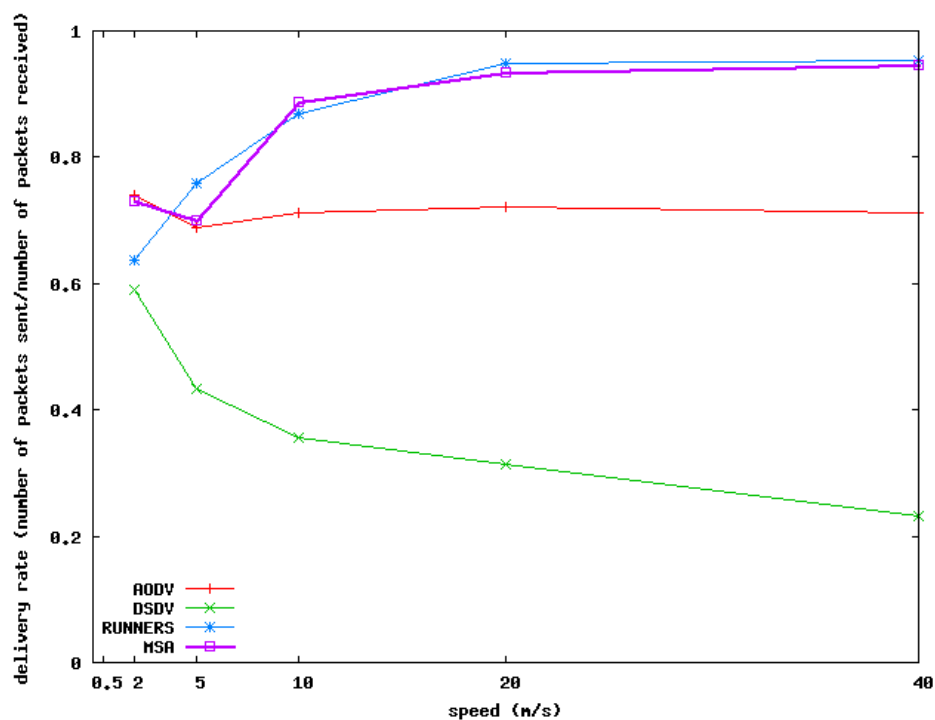
Εικόνα 30. Κατάταξη των κόμβων με βάση την σταθερότητα για την ομοιόμορφη περίπτωση.



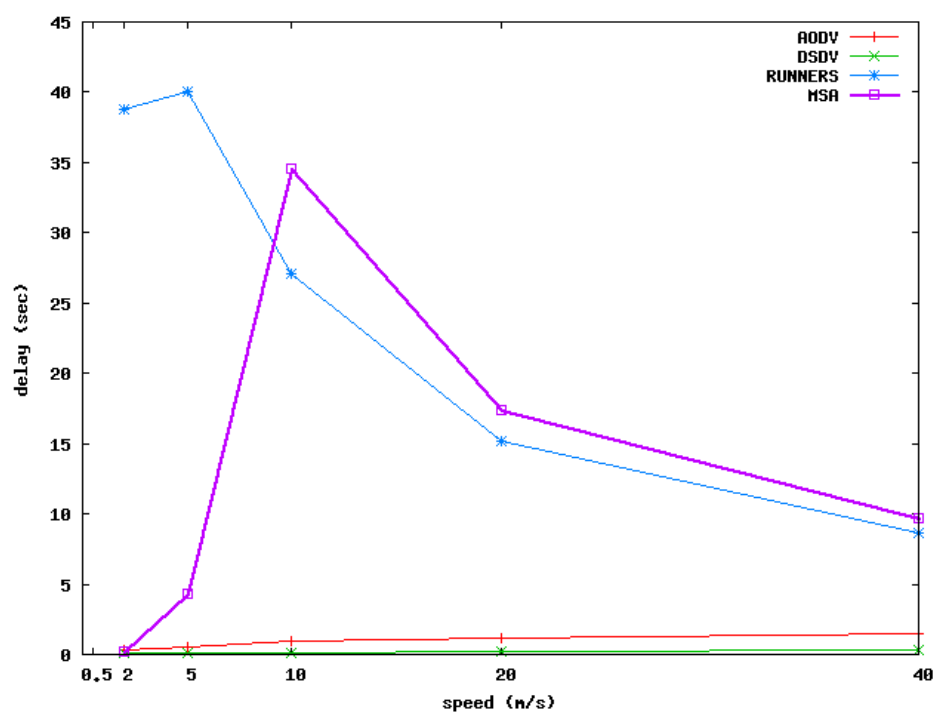
Εικόνα 31. Κατάταξη των κόμβων με βάση την σταθερότητα για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση.

που έχει (κυρίως σε μνήμη και χρόνο εκτέλεσης). Λεπτομερέστερα, η περιοχή προσομοίωσης που χρησιμοποιούμε (μεγέθους 2200×300 m), όπου 20 κόμβοι κινούνται και επικοινωνούν, είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτήν που χρησιμοποιείται στην [12], καθώς βασίζομενοι στο μοντέλο κίνησης που εισάγεται στην [26], τα πειράματα της [12] αφορούν περιοχές μεγέθους 1250×1250 m, 2820×2820 m και 4000×4000 m στις οποίες κινούνται 100 κόμβοι.

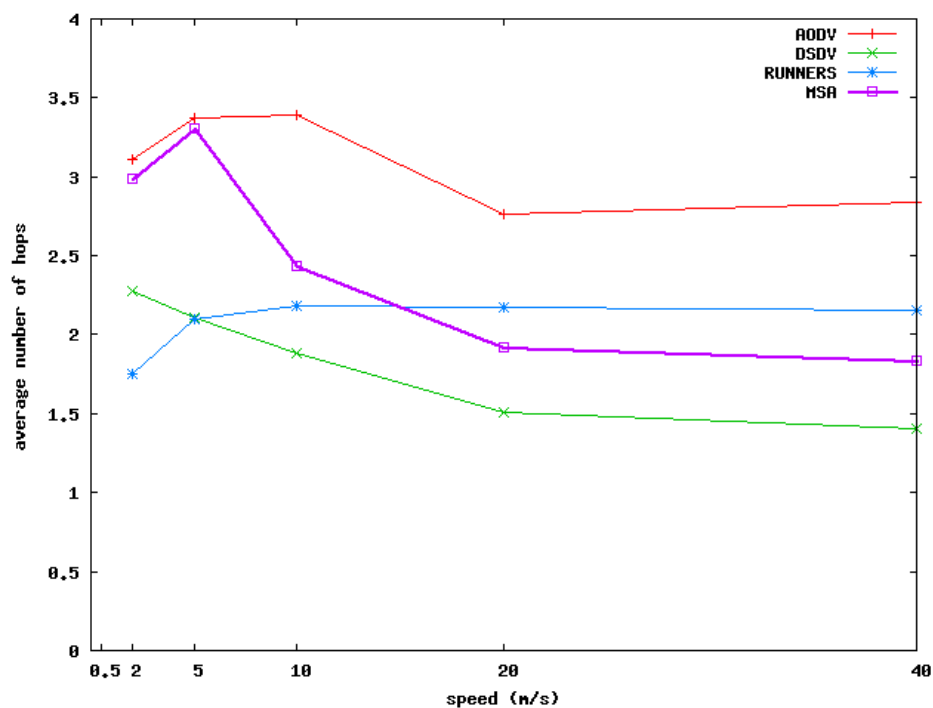
Σε επίπεδο χρησιμοποιούμενων μετρικών, ακολουθούμε τις επιλογές της [12] και χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες 4 μετρικές, τις οποίες ορίσαμε στην υποενότητα 4.3.6: (i) ρυθμό παράδοσης (*delivery rate*) ή ρυθμό επιτυχίας (*success rate*), (ii) από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση (*end-to-end delay* ή *latency*), (iii) αριθμός αλμάτων ή μήκος μονοπατιού και (iv) συνολικός αριθμός απεσταλμένων πακέτων (*δεδομένων και ελέγχου*) από το πρωτόκολλο MAC. Να σημειώσουμε εδώ η [12] σε αντίθεση με την εργασία μας μετράει τον αριθμό μεταδιδόμενων μηνυμάτων και όχι πακέτων, ενώ επιπλέον η χρήση του ns-2 μας επιτρέπει να μετρήσουμε τον αριθμό των μεταδιδόμενων πακέτων με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς και για το πρωτόκολλο RUNNERS, του οποίου το κόστος δρομολόγησης δεν καταγράφεται στην εργασία [12]. Επίσης, για κάθε περίπτωση, καταγράφουμε το ποσοστό των πακέτων που η RS παρέδωσε σε καθέναν από τους πράκτορες των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων, δηλαδή ουσιαστικά το ποσοστό των πακέτων που μεταδόθηκαν χρησιμοποιώντας καθένα από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα. Για την ομοιόμορφη περίπτωση, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 32 – 36.



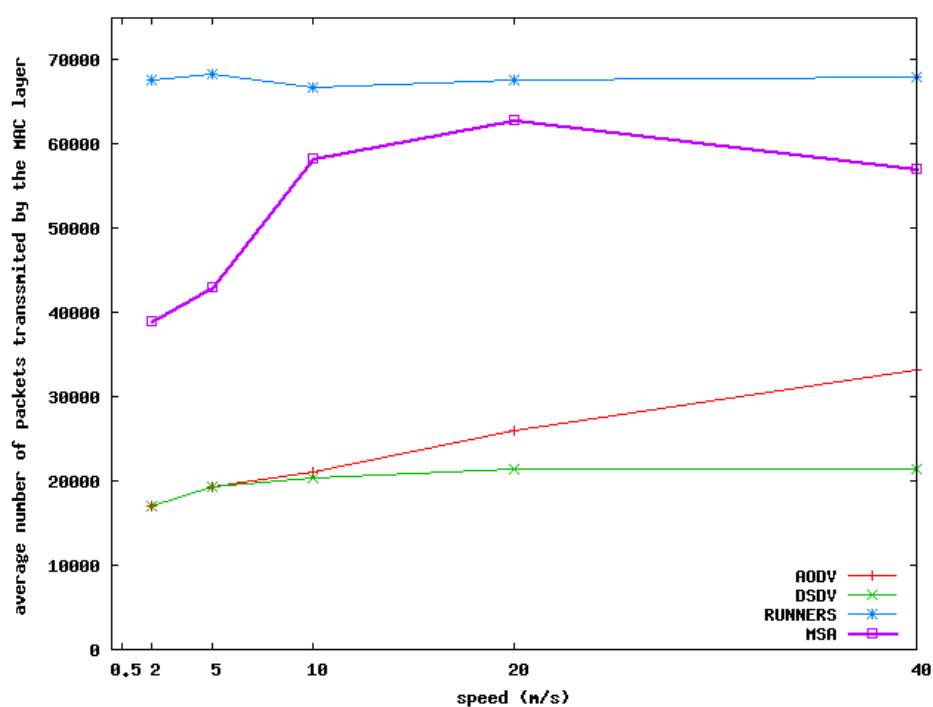
Εικόνα 32. Ρυθμός παράδοσης για την ομοιόμορφη περίπτωση.



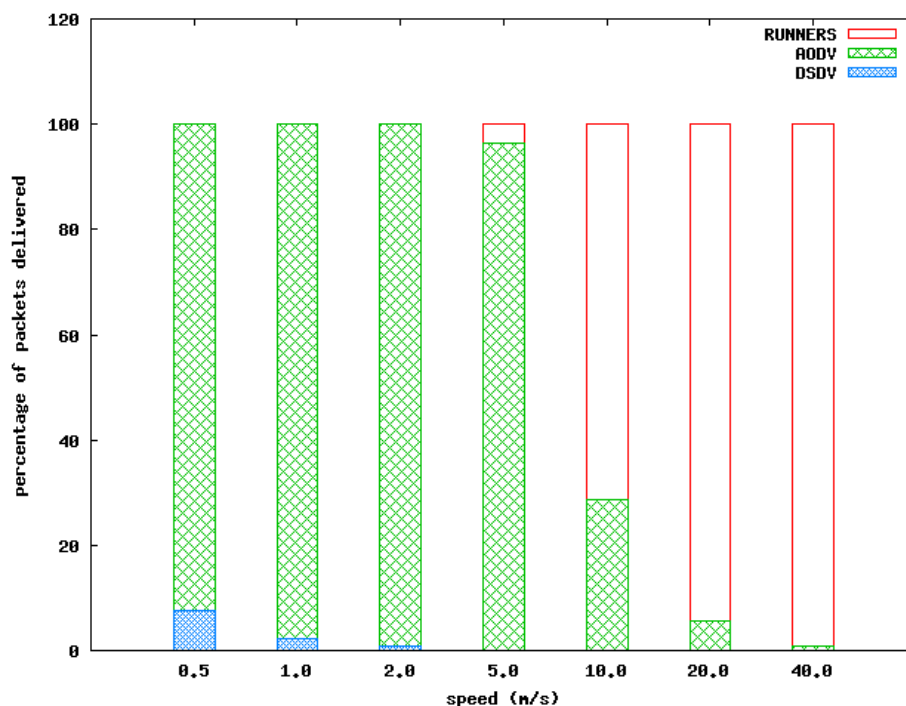
Εικόνα 33. Καθυστερήση για την ομοιόμορφη περίπτωση.



Εικόνα 34. Μήκος μονοπατιών για την ομοιόμορφη περίπτωση.



Εικόνα 35. Αριθμός μεταδιδόμενων πακέτων από το πρωτόκολλο MAC για την ομοιόμορφη περίπτωση.



Εικόνα 36. Επιλογή πρωτοκόλλου για την ομοιόμορφη περίπτωση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την επίδραση της κινητικότητας στις επιδόσεις των τριών πρωτοκόλλων δρομολόγησης (DSDV, AODV και RUNNERS). Είναι προφανές ότι καθώς η ταχύτητα των κόμβων αυξάνεται, οι επιδόσεις των πρωτοκόλλων που ακολουθούν την προσέγγιση κατασκευής και συντήρησης δρομολογίων μειώνονται. Ειδικότερα, ο υψηλότερος ρυθμός παράδοσης του DSDV επιτυγχάνεται όταν οι κόμβοι του δικτύου κινούνται με πολύ μικρές ταχύτητες, ενώ καθώς η ταχύτητα αυξάνει μειώνεται δραματικά, πέφτοντας στο απογοητευτικό 21% για ταχύτητα των κόμβων ίση με 40 m/sec.

Στην πραγματικότητα, ακόμα και για ποσοστά παράδοσης της τάξης του 21% των απεσταλμένων πακέτων, η Εικόνα 34 υποδεικνύει ότι στη μέση περίπτωση κάθε πακέτο πρέπει να κάνει 1,5 άλματα για να φτάσει στον τελικό του προορισμό, υπονοώντας ότι το DSDV επιτυγχάνει στην παράδοση των πακέτων σχεδόν μόνο όταν η πηγή και ο προορισμός βρίσκονται εντός της εμβέλειας ο ένας του άλλου. Φυσικά σε τέτοιες περιπτώσεις είναι αναμενόμενο ο ρυθμός παράδοσης να είναι πολύ μικρός. Το AODV από την άλλη συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα από το DSDV καθώς η ταχύτητα των κόμβων αυξάνεται, επιτυγχάνοντας ένα σχεδόν σταθερό ποσοστό παράδοσης ίσο με 70%. Η κατ' απαίτηση συμπεριφορά του AODV επιτυγχάνει την δημιουργία μονοπατιών που είναι κατά μέσο όρο μακρύτερα από αυτά που επιτυγχάνει να διατηρήσει το DSDV. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του πρωτοκόλλου RUNNERS, το οποίο παρουσιάζει μια εντελώς διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα άλλα δύο πρωτόκολλα. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός παράδοσης του RUNNERS, σε αντίθεση με τα άλλα δύο

πρωτόκολλα, εμφανίζεται να αυξάνεται, καθώς η ταχύτητα των κόμβων αυξάνεται, με ταυτόχρονη μείωση της παρατηρούμενης καθυστέρησης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός, ότι καθώς η ταχύτητα των κόμβων αυξάνεται γίνεται πιθανότερο να συναντήσουν κάποιον κόμβο που να ανήκει στο σύνολο υποστήριξης (ή τον ίδιο τον τελικό προορισμό). Κατά αυτό τον τρόπο τα πακέτα τους θα παραδοθούν στο σύνολο υποστήριξης και κατά συνέπεια στον τελικό προορισμό τους συντομότερα. Επομένως, το πρωτόκολλο RUNNERS εμφανίζεται ως ιδιαίτερα κατάλληλο για περιπτώσεις δικτύων υψηλής κινητικότητας, καθώς η αύξηση της ταχύτητας αναμένεται να βελτιώσει τις επιδόσεις του.

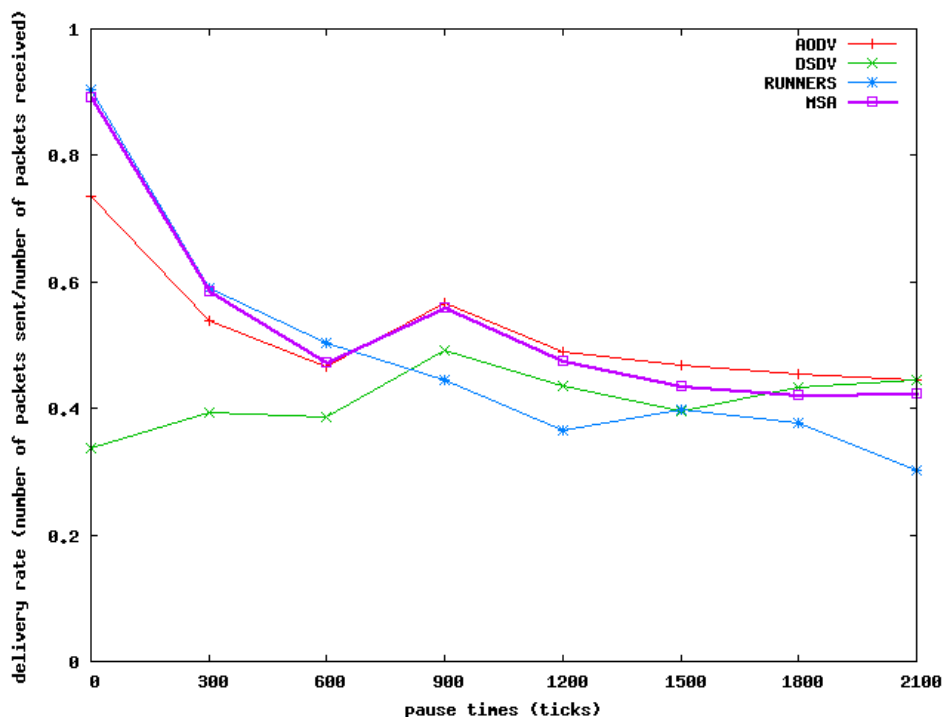
Με βάση τις προηγούμενες παρατηρήσεις και τις τιμές των T_{slow} , T_{fast} , w_1 και w_2 που επιλέξαμε, στην συνέχεια θα συζητήσουμε την απόδοση της βασισμένης στην κινητικότητα προσέγγισης μας (που αναφέρεται ως MSA στις γραφικές παραστάσεις). Όταν οι κόμβοι είναι στατικοί ή κινούνται αργά (δηλαδή για ταχύτητες 0.5 m/sec ή μικρότερες), η SSS ενεργοποιεί συχνότερα το DSDV πρωτόκολλο, το οποίο επιτυγχάνει για τέτοιες περιπτώσεις υψηλούς ρυθμούς παράδοσης με πολύ μικρές καθυστερήσεις (ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλού φόρτου του δικτύου). Στην συνέχεια, καθώς η κινητικότητα των κόμβων αυξάνεται, το framework αλλάζει το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο από το DSDV στο AODV (κάτι το οποίο φαίνεται ξεκάθαρα στην Εικόνα 32), το οποίο παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις σε τέτοιες συνθήκες. Τέλος, για περιπτώσεις υψηλής κινητικότητας του δικτύου (συγκεκριμένα για ταχύτητες μεγαλύτερες από 5 m/sec) το framework ενεργοποιεί το RUNNERS, το οποίο επιτυγχάνει τις υψηλότερες δυνατές επιδόσεις (όσον αφορά τον ρυθμό παράδοσης) από όλα τα διαθέσιμα πρωτόκολλα. Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου για κάθε περίπτωση είναι εμφανής στην Εικόνα 36, η οποία καταγράφει το ποσοστό των πακέτων που παραδίδονται στον πράκτορα καθενός από τα τρία πρωτόκολλα. Το μικρό ποσοστό πακέτων που παραδίδονται μέσω του DSDV μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι το DSDV είναι ενεργό σε περιοχές του δικτύου που αποτελούνται μόνο από αργούς κόμβους και κατά συνέπεια συντηρεί δρομολόγια μόνο για έναν περιορισμένο αριθμό προορισμών (δείτε ενότητα 3.2).

Σημειώνουμε, εδώ, ότι στα πειράματά μας, το AODV δεν κάνει χρήση μηνυμάτων HELLO, τα οποία θα μπορούσαν να βελτιώσουν ελαφρώς την απόδοσή του, αλλά βασίζεται αποκλειστικά στο υποκείμενο πρωτόκολλο MAC (συγκεκριμένα στο IEEE 802.11) για την αναγνώριση κατεστραμμένων συνδέσμων. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων ελέγχου που καταγράφεται για το AODV είναι σημαντικά μικρότερος από ότι αν γινόταν χρήση των HELLO μηνυμάτων (συγκεκριμένα, αφού κάθε κόμβος στέλνει ένα HELLO μήνυμα κάθε δευτερόλεπτο θα είχαμε συνολικά 1100×20 επιπλέον πακέτα). Υπό αυτό το πρίσμα, το κόστος δρομολόγησης της MSA και του RUNNERS δεν είναι πολύ υψηλότερο από αυτό του AODV.

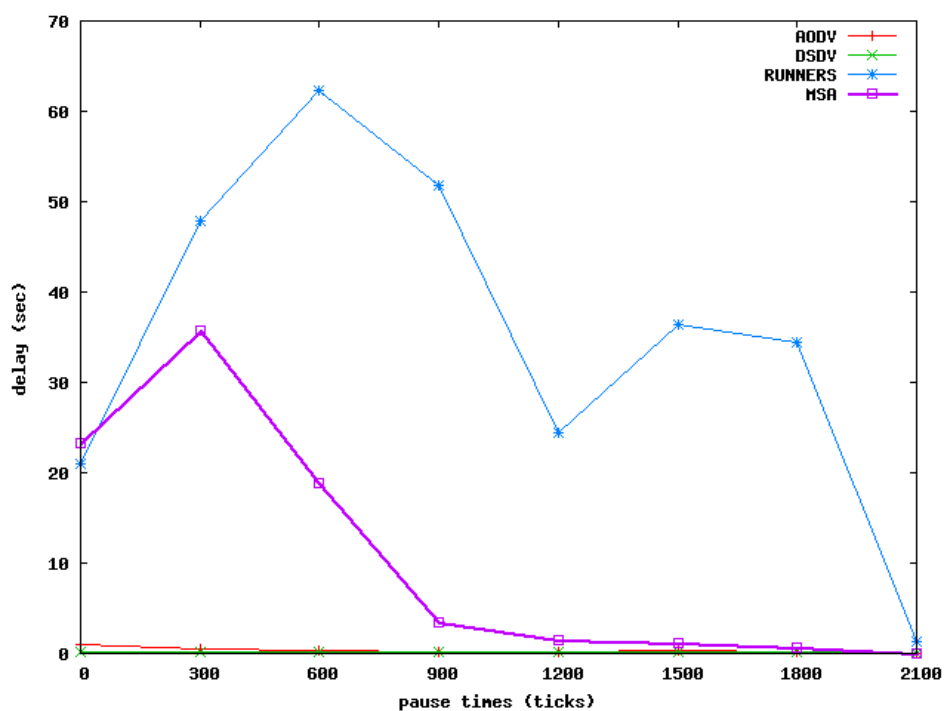
Όσον αφορά την περίπτωση των μικτών ταχυτήτων (μη-ομοιόμορφη περίπτωση), τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε φαίνονται στις Εικόνες 37 – 41. Αξίζει να τονιστεί εδώ ότι, από όσο είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε, είναι η πρώτη φορά που το συγκεκριμένο σύνολο πρωτοκόλλων και στρατηγικών δρομολόγησης μελετάται συγκριτικά για την περίπτωση μικτών ταχυτήτων.

Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος κατά μία έννοια επιβεβαιώνουν τον σχεδιασμό μας, καθώς στην περίπτωση δυναμικών συστημάτων, όπου οι κόμβοι τείνουν να κινούνται συνεχώς (δηλαδή για περιπτώσεις που το διάστημα παύσης είναι μικρό), η Εικόνα 41 υποδηλώνει ότι η πλειοψηφία των πακέτων παραδίδεται μέσω του πρωτοκόλλου RUNNERS, ενώ ένα ποσοστό της τάξης του 20% των πακέτων παραδίδεται μέσω του AODV. Επίσης, καθώς το δίκτυο γίνεται λιγότερο δυναμικό και η κόμβοι αρχίζουν να παραμένουν στατικοί για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, το framework επιλέγει ολοένα και συχνότερα το AODV εις βάρος του RUNNERS. Τέλος, όταν το δίκτυο γίνεται στατικό (δηλαδή για μεγάλα διαστήματα παύσης), η MSA αρχίζει να παραδίδει πακέτα χρησιμοποιώντας και το DSDV. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση ότι ακόμα και για σχετικά μικρά διαστήματα παύσης (π.χ. 600 sec), η MSA χρησιμοποιεί και τα τρία διαθέσιμα πρωτόκολλα για την παράδοση των πακέτων.

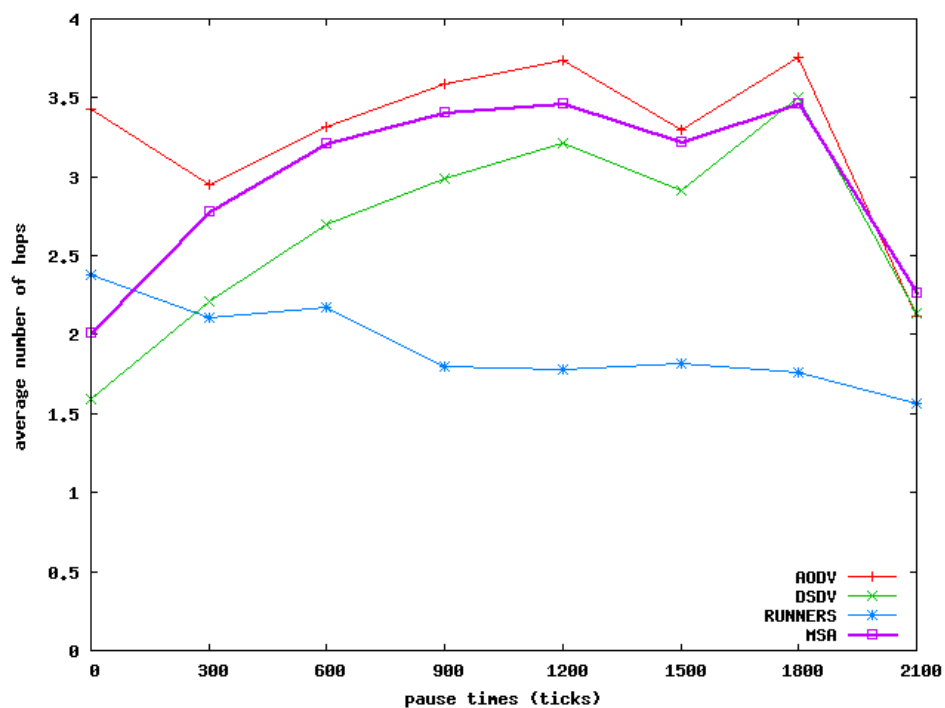
Κλείνοντας, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των μικτών ταχυτήτων τα πειράματα υποδεικνύουν ότι ο συνδυασμός των τριών πρωτοκόλλων είναι λιγότερο αποδοτικός από ότι στην ομοιόμορφη περίπτωση. Εντούτοις είμαστε στην ευχάριστη θέση να διαπιστώσουμε ότι η ευαίσθητη στην κινητικότητα προσέγγιση μας επιτυγχάνει να επιλέξει την καλύτερη στρατηγική (με βάση τα κριτήρια που έχουμε θέσει) ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες. Με άλλα λόγια, εάν εξασφαλίσουμε ότι οι κόμβοι είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν πρωτόκολλα δρομολόγησης που είναι κατάλληλα για κάθε πιθανή κατάσταση κινητικότητας του δικτύου, η MSA θα καταφέρει να επιλέξει αυτό που ταιριάζει καλύτερα στην πραγματική κατάσταση του.



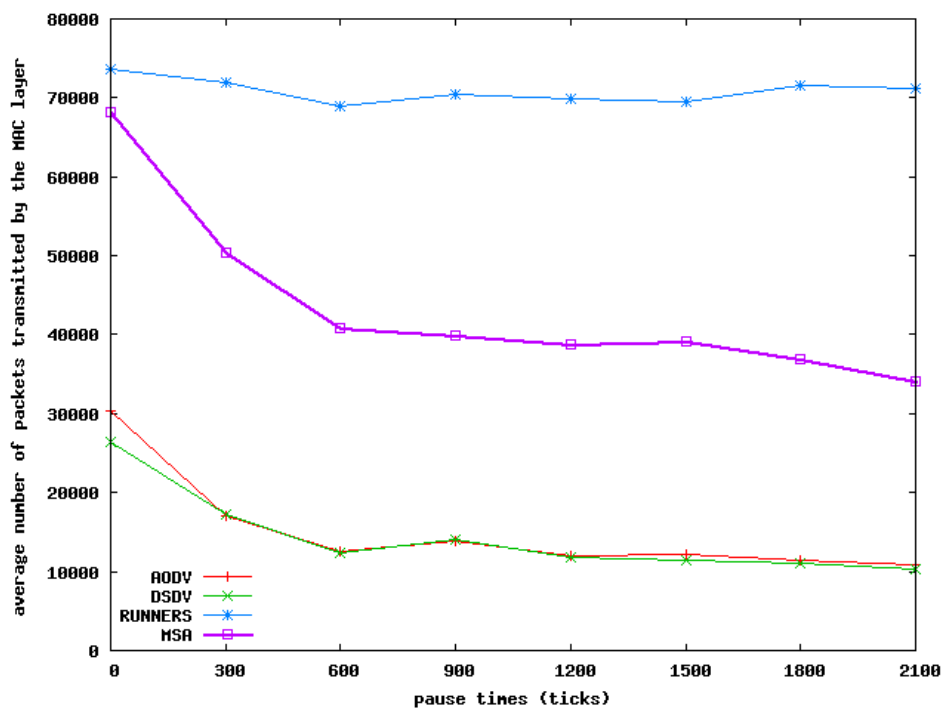
Εικόνα 37. Ρυθμός παράδοσης για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση.



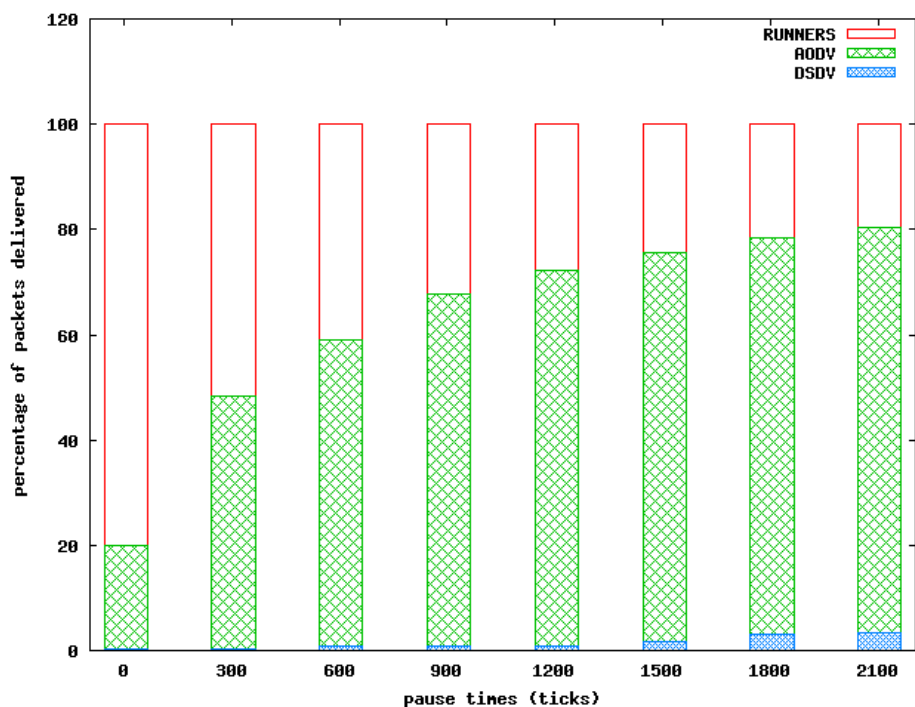
Εικόνα 38. Καθυστέρηση για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση.



Εικόνα 39. Μήκος μονοπατιών για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση.



Εικόνα 40. Αριθμός μεταδιδόμενων πακέτων από το πρωτόκολλο MAC για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση.



Εικόνα 41. Επιλογή πρωτοκόλλου για την μη-ομοιόμορφη περίπτωση.

5. ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

Όταν επιλέξαμε τα πρωτόκολλα πάνω στα οποία θα βασιστεί η MSA (δείτε Κεφάλαιο 3) κατά την πειραματική αξιολόγηση, θεωρήσαμε το DSDV ως το πλέον κατάλληλο για την δρομολόγηση μεταξύ αργών (και εντελώς στατικών) κόμβων. Η επιλογή αυτή έγινε με βάση την παρατήρηση ότι το DSDV παρουσιάζει την μικρότερη από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση (για τα πακέτα που τελικά παραδίδει), καθώς και την παρατήρηση ότι όταν το δίκτυο είναι στατικό, το DSDV προσεγγίζει τις επιδόσεις του AODV όσον αφορά το ποσοστό παράδοσης πακέτων, χωρίς να εισάγει υψηλό κόστος (εφόσον δεν υπάρχουν πολλές καταστροφές συνδέσμων). Κατά συνέπεια αναμέναμε ότι η χρήση του θα οδηγούσε σε μείωση της μέσης καθυστέρησης με παράλληλη διατήρηση του ρυθμού παράδοσης πακέτων στα υψηλά επίπεδα του AODV (το οποίο επιλέχθηκε για τους φυσιολογικούς κόμβους). Παρόλα αυτά η πειραματική αξιολόγηση υπέδειξε ότι το DSDV δεν ανταποκρίνεται ικανοποιητικά ούτε σε συνθήκες μικρής δυναμικότητας του δικτύου. Μάλιστα, το AODV φαίνεται σε αρκετές περιπτώσεις να ξεπερνά τις επιδόσεις του DSDV ακόμα και για πολύ μικρή κινητικότητα του δικτύου, μια παρατήρηση που αναφέρεται και από την [30]. Σε μια προσπάθεια βελτίωσης των επιδόσεων του δικτύου σε τέτοιες συνθήκες, δηλαδή περαιτέρω μείωσης της παρατηρούμενης καθυστέρησης σε περιπτώσεις στατικών διαδρομών παρουσιάζουμε σε αυτή την ενότητα ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης βασισμένο σε ομαδοποίηση (cluster-based) των κόμβων. Σε αντίθεση με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούν ομαδοποίηση, το πρωτόκολλο μας κάνει χρήση της έννοιας της σταθερότητας (και άρα της κινητικότητας) των κόμβων για την δημιουργία των ομάδων. Το πρωτόκολλο που προτείνουμε μπορεί να ιδωθεί ως μια επέκταση της MSA, όπου πλέον οι αργοί κόμβοι οργανώνονται σε ιεραρχίες ομάδων αντί να χρησιμοποιούν το DSDV.

Η πρόταση μας αφορά ουσιαστικά την οργάνωση, σε ιεραρχίες ομάδων, των γειτονιών του δικτύου που αποτελούνται από αργούς κόμβους. Το κίνητρο πίσω από αυτή τη σχεδιαστική επιλογή είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού δημιουργιών/καταστροφών ομάδων με το να αγνοούμε εκείνους τους κόμβους που τείνουν να κινούνται (σε σχέση με τους γείτονές τους) συχνά. Υπό αυτό το πρίσμα, επιλέγουμε οι κλίκες (cliques) του δικτύου (δηλαδή σύνολα κόμβων που ανά δύο συνδέονται με ένα σύνδεσμο) που αποτελούνται από αργούς κόμβους να οργανώνονται αναδρομικά σε ιεραρχίες ομάδων, τις οποίες ονομάζουμε *υπερκόμβους* (*hypernodes*). Εξαιτίας της ειδικής δομής των υπερκόμβων, οι εκπομπές στο εσωτερικό τους έχουν μικρότερο κόστος, κάτι το οποίο αναμένουμε να συμβάλλει στην μείωση του κόστους δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, τυχών καταστροφές συνδέσμων στο εσωτερικό τους μπορούν να αντικατασταθούν διαφανώς (transparently) από ένα ή περισσότερα εναλλακτικά μονοπάτια, γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με τον περιορισμένο αριθμό (αναμενόμενων) τοπολογικών αλλαγών των υπερκόμβων εισάγει την *αξιοπιστία* (*reliability*) ενός δρομολογίου ως νέο κριτήριο επιλογής για το υποκείμενο, κατ' απαίτηση πρωτόκολλο δρομολόγησης. Ένα άλλο πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου είναι ότι η δρομολόγηση εντός ενός υπερκόμβου μπορεί να γίνει ιδιαίτερα αποδοτικά με χρήση ενός μεγάλου πλήθους τεχνικών που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία (π.χ. ιεραρχική

δρομολόγηση, δρομολόγηση βασισμένη σε πίνακες ή ακόμα και δρομολόγηση εκτροπής) με βάση της ανάγκες του δικτύου ή του σχεδιαστή του.

5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ

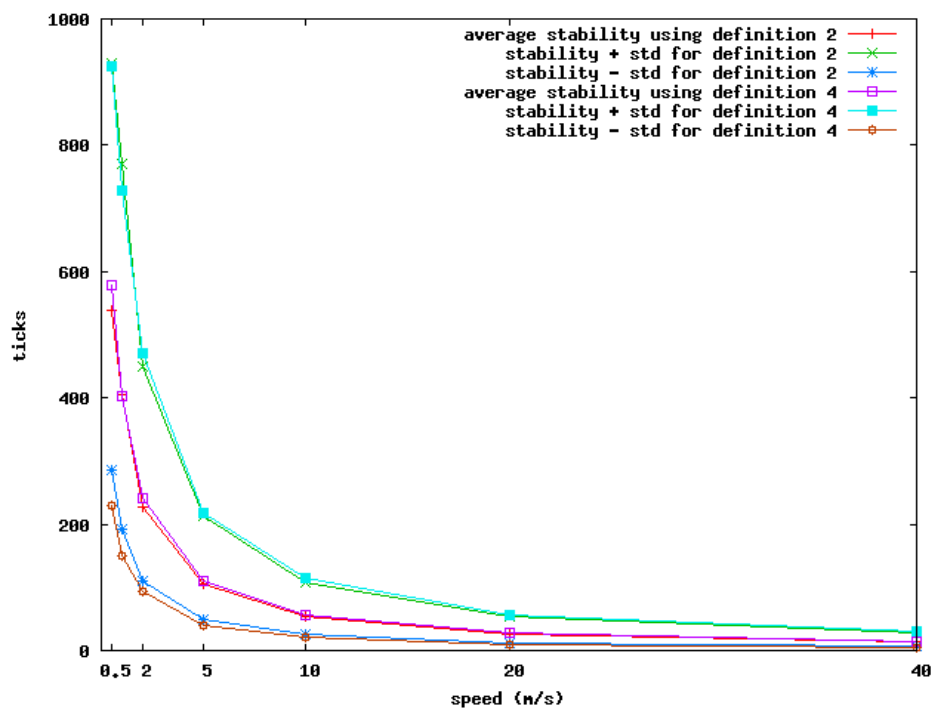
Καθώς οι υπερκόμβοι εμφανίζονται στο υπόλοιπο του δικτύου ως απλοί κόμβοι (δηλαδή αποκρύπτουν την δομή τους στο εσωτερικό τους), μπορούν να αντιμετωπιστούν από την MSA ως απλοί κόμβοι και κατά συνέπεια να συνδεθούν με μια τιμή σταθερότητας και μια κλάση κινητικότητας. Για να υποστηρίξουμε τον σχηματισμό υπερκόμβων πρέπει να τροποποιήσουμε ελαφρώς τον ορισμό της σταθερότητας κόμβου (δείτε ορισμό 2), έτσι ώστε να εξασφαλίζει μια ελάχιστη τιμή σταθερότητας για τον δεύτερο σταθερότερο γείτονα (εφόσον οι δύο σταθερότεροι γείτονες σε συνδυασμό με τον κόμβο θα σχηματίσουν έναν υπερκόμβο, όπως θα φανεί στην συνέχεια). Συγκεκριμένα:

Ορισμός 4 (Σταθερ. Υπερκόμβου) Εάν με $\uparrow nbs_u^{in}$ συμβολίσουμε την συλλογή όλων των συσχετίσεων των εισερχόμενων συνδέσμων του υπερκόμβου, ταξινομημένες με αύξουσα σειρά και εάν $|\uparrow nbs_u^{in}|$ συμβολίζει τον πληθάριθμο της $\uparrow nbs_u^{in}$ και με $\uparrow nbs_u^{in}(i)$ την i -στη τιμή στην ταξινομημένη συλλογή, τότε ορίζουμε την σταθερότητα ενός υπερκόμβου ως

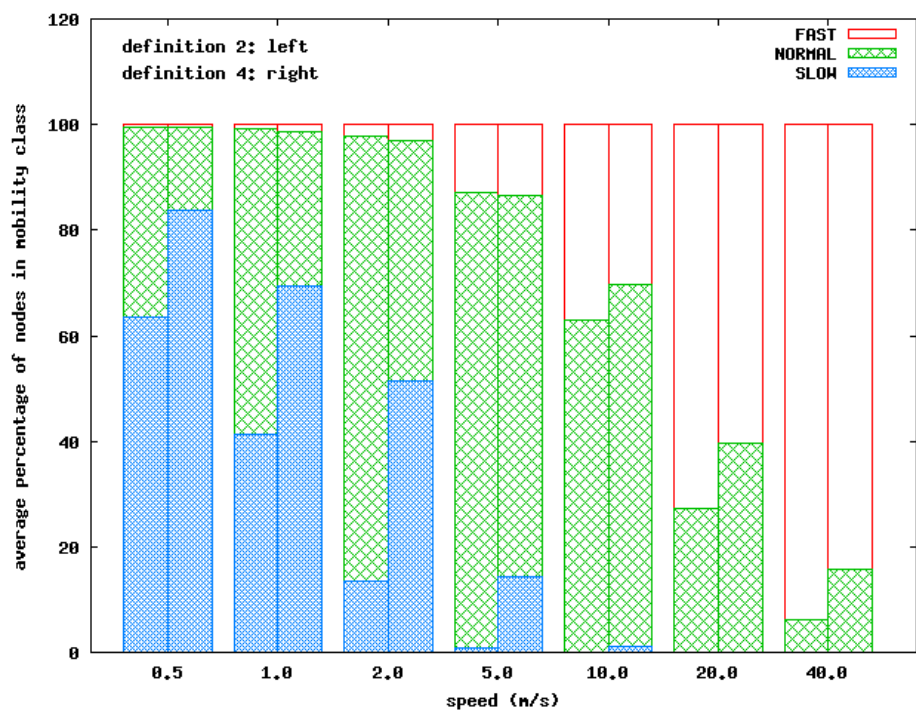
$$Stab = w_h \cdot \uparrow nbs_u^{in} \left(|\uparrow nbs_u^{in}| - 1 \right) + w_n \cdot \frac{\sum_{k=1}^{|\uparrow nbs_u^{in}| - 2} \uparrow nbs_u^{in}(k)}{|\uparrow nbs_u^{in}| - 2},$$

όπου $w_h + w_n = 1$.

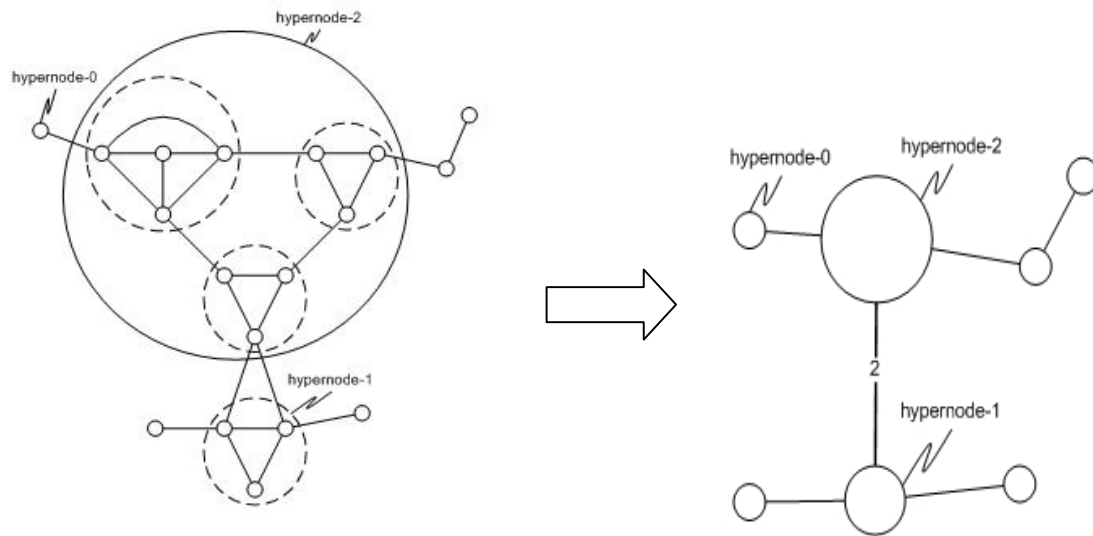
Τα δύο βάρη w_h και w_n είναι παράμετροι του πρωτοκόλλου και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της συνεισφοράς κάθε παράγοντα στην συνολική τιμή της σταθερότητας του υπερκόμβου (δηλαδή του συνολικού μεγέθους της γειτονιάς και της σταθερότητας των συνδέσμων). Σε ορισμένες περιπτώσεις, μικρές γειτονιές αποτελούμενες από σταθερούς συνδέσμους μπορεί να είναι περισσότερο κατάλληλες για αλγόριθμους που βασίζονται στην δημιουργία και συντήρηση δρομολογίων από ότι μεγάλες γειτονιές που παρουσιάζουν συχνές τοπολογικές αλλαγές. Μια συγκριτική παρουσίαση του νέου ορισμού της σταθερότητας και της νέας κατάταξης των κόμβων σε κλάσεις κινητικότητας φαίνεται στην Εικόνα 42 και στην Εικόνα 43 αντίστοιχα.



Εικόνα 42. Σύγκριση μέσης σταθερότητας με βάση τον ορισμό 2 και τον ορισμό 4.



Εικόνα 43. Σύγκριση κατάταξης κόμβων σε κλάσεις κινητικότητας με βάση τον ορισμό 2 και τον ορισμό 4.



Εικόνα 44. Ένα παράδειγμα ιεραρχίας υπερκόμβων και η αφαιρετική τοπολογία του, όπως γίνεται αντιληπτή από έναν εξωτερικό παρατηρητή.

Όπως είδαμε στην ενότητα 3.1, με βάση την τιμή της σταθερότητάς του, κάθε κόμβος κατατάσσεται σε μία κλάση κινητικότητας. Στην περίπτωση μας οι κλάσεις κινητικότητας είναι τρεις και συγκεκριμένα: αργός, φυσιολογικός και γρήγορος. Κάθε κόμβος που χαρακτηρίζεται ως αργός ή φυσιολογικός μπορεί να συμμετάσχει στην δημιουργία ομάδων. Αυτές οι ομάδες ονομάζονται υπερκόμβοι (hypernodes) και η κύρια ιδιότητά τους είναι ότι κρύβουν στο εσωτερικό τους όλες τις τοπολογικές και πληροφορίες δρομολόγησης που τους αφορούν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε υπερκόμβος να γίνεται αντιληπτός από τους γείτονές του ως ένας απλός κόμβος. Οι υπερκόμβοι οργανώνονται σε ιεραρχίες (hierarchies), έτσι ώστε κάθε κόμβος να ανήκει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο (level) σε μια ιεραρχία υπερκόμβων (Εικόνα 44). Ακολουθώντας, παρουσιάζουμε έναν αναδρομικό ορισμό ενός υπερκόμβου, ο οποίος ανήκει στο επίπεδο i , όπου $0 \leq i \leq MaxClusterNum$ και $MaxClusterNum$ είναι το μέγιστο βάθος σε μια ιεραρχία υπερκόμβων.

Ορισμός 5 (Υπερκόμβος- i) Ορίζουμε σαν υπερκόμβο- i έναν υπερκόμβο επιπέδου i , ο οποίος αποτελείται από τρεις ή περισσότερους υπερκόμβους- $(i-1)$, καθένας από τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει με όλους τους άλλους. Επίσης, ορίζουμε σαν υπερκόμβο-0 κάθε απλό κόμβο.

Από τον παραπάνω ορισμό γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι κάθε υπερκόμβος μπορεί να ανήκει σε έναν ή περισσότερους υπερκόμβους διαφόρων επιπέδων, αλλά μόνο σε έναν

υπερκόμβο σε κάθε επίπεδο. Αποκαλούμε κάθε υπερκόμβο που ανήκει σε κάποιον άλλο υπερκόμβο σαν μέλος (*member*) του συγκεκριμένου υπερκόμβου. Κάθε υπερκόμβος που δεν είναι μέλος κάποιου άλλου υπερκόμβου, αποκαλείται *ανώτερος υπερκόμβος* (*upper hypernode*).

Μιας και κάθε ανώτερος υπερκόμβος θεωρείται σαν ένας μοναδικός κόμβος από τους γείτονές του, η επέκταση του ορισμού της συσχέτισης των συνδέσμων και της σταθερότητας του ανώτερου υπερκόμβου (δείτε ενότητα 3.1) είναι άμεση. Συγκεκριμένα, αν ορίσουμε ως εισερχόμενους συνδέσμους του *υπερκόμβου- i* τους εισερχόμενους συνδέσμους όλων των κόμβων του, οι οποίοι δεν έχουν σαν άλλο άκρο τους κάποιον κόμβο που ανήκει στον *υπερκόμβο- i* , τότε η συσχέτιση των συνδέσμων και η σταθερότητα του *υπερκόμβου- i* υπολογίζεται με βάση τους γνωστούς τύπους (δείτε ορισμούς 1 και 4). Επιπρόσθετα, η σταθερότητα κάθε *υπερκόμβου- $(i-1)$* , ο οποίος είναι μέλος του *υπερκόμβου- i* τροποποιείται ώστε να υπολογίζεται μόνο από τους *εσωτερικούς συνδέσμους του* (*internal links*), δηλαδή τους συνδέσμους που διατηρεί με άλλους *υπερκόμβους- $(i-1)$* που είναι μέλη του *υπερκόμβου- i* .

Εκτός από την τιμή της σταθερότητας του, κάθε *υπερκόμβος- $(i-1)$* συνδέεται και με δύο ακόμα μετρικές. Η πρώτη ονομάζεται εντροπία (entropy) και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πιθανότητας καταστροφής του, ενώ η δεύτερη ονομάζεται συμβαλλόμενη εντροπία (contributed entropy) και όπως υπονοεί το όνομά της υποδηλώνει την συμβολή του *υπερκόμβου- $(i-1)$* στην εντροπία του *υπερκόμβου- i* στον οποίο ανήκει (φυσικά μόνον εφόσον κάτι τέτοιο ισχύει). Περισσότερο συγκεκριμένα:

Ορισμός 6 (Συμβαλ. Εντροπία) Ορίζουμε ως συμβαλλόμενη εντροπία ενός υπερκόμβου- i , ο οποίος είναι μέλος ενός υπερκόμβου- $(i+1)$ την τιμή $C = a_1 \cdot (-Stab) + a_2 \cdot Ent$, όπου *Stab* είναι η σταθερότητά του, *Ent* είναι η εντροπία του, την οποία θα ορίσουμε ακολούθως, και $a_1 + a_2 = 1$.

Ορισμός 7 (Εντροπία Υπερκόμβου) Ορίζουμε ως εντροπία ενός υπερκόμβου- i την μέση τιμή των συμβαλλόμενων εντροπιών των υπερκόμβων- $(i-1)$ που είναι μέλη του. Επιπλέον, ορίζουμε ότι η εντροπία ενός υπερκόμβου-0 είναι 0.

Ένας υπερκόμβος- i H καταστρέφεται όταν απομένει με λιγότερα από τρία μέλη. Ένας υπερκόμβος- $(i-1)$ M , ο οποίος είναι μέλος του H , απομακρύνεται από τον H είτε όταν καταστρέφεται είτε όταν κάποιος από τους συνδέσμους που τον συνδέει με κάποιο άλλο μέλος του H σπάσει. Η συμβαλλόμενη εντροπία του M περιγράφει την πιθανότητα απομάκρυνσής του, εφόσον λαμβάνει υπόψη της την πιθανότητα καταστροφής του μέσω της εντροπίας, καθώς και την πιθανότητα καταστροφής κάποιου από τους εσωτερικούς

συνδέσμους του (με άλλα μέλη του H) μέσω της σταθερότητάς του. Η εντροπία του H περιγράφει την μέση πιθανότητα απομάκρυνσης κάποιου από τους *υπερκόμβους* $-(i-1)$ που είναι μέλη του και μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι λαμβάνει υπόψη του την ύπαρξη πλεονασμού τόσο σε *υπερκόμβους* $-(i-1)$ όσο και σε συνδέσμους που τους συνδέουν.

Παρόλο που όλα τα μέλη ενός υπερκόμβου θεωρούνται ίσα και έχουν την ίδια λειτουργικότητα (functionality), ορίζουμε ένα μέλος ως *εκπρόσωπο* (*representative*) του υπερκόμβου. Ο εκπρόσωπος ενός υπερκόμβου καθορίζει την διευθυνσιοδότησή του και αναλαμβάνει κάποια πρόσθετα καθήκοντα που απαιτούνται από κάποια πρωτόκολλα του αλγορίθμου ομαδοποίησης.

Ορισμός 8 (Εκπρόσ. Υπερκόμβου) Ορίζουμε ως εκπρόσωπο ενός υπερκόμβου- i τον εκπρόσωπο του υπερκόμβου- $(i-1)$ του με την ελάχιστη συμβαλλόμενη εντροπία κατά τον χρόνο της εκλογής του. Σε περιπτώσεις ισοπαλίας επιλέγουμε τυχαία έναν εκπρόσωπο (π.χ. αυτόν με την μικρότερη διεύθυνση). Ως εκπρόσωπος ενός υπερκόμβου-0 θεωρείται ο μοναδικός του κόμβος.

Είναι γενικά επιθυμητό ο εκπρόσωπος ενός υπερκόμβου να μην αλλάζει συχνά, καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε (περιορισμένη) αύξηση του κόστους δρομολόγησης, εξαιτίας της ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου για την εκλογή του νέου εκπροσώπου. Έτσι, με τον παραπάνω ορισμό προσπαθούμε να επιλέξουμε ως εκπρόσωπο τον κόμβο που φαίνεται να έχει την μικρότερη πιθανότητα απομάκρυνσης από τον *υπερκόμβο*- i .

Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος διαθέτει μια μοναδική διεύθυνση που τον διακρίνει μονοσήμαντα στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα μια IP ή MAC διεύθυνση. Στην συνέχεια ορίζουμε ως διεύθυνση του *υπερκόμβου*- i μια διεύθυνση της μορφής $x:i$, όπου x είναι η διεύθυνση του εκπροσώπου του *υπερκόμβου*- i . Επιπλέον, χαρακτηρίζουμε κάθε εισερχόμενο σύνδεσμο από έναν *υπερκόμβο*- j σε έναν *υπερκόμβο*- i με ένα *επίπεδο* (*level*), ίσο με $k = \min\{i, j\}$. Αν το επίπεδο ενός υπερκόμβου δεν είναι γνωστό, τότε θεωρείται ίσο με 0. Ένας υπερκόμβος μπορεί να ξεχωρίσει (διευθυνσιοδοτήσει) κάθε εισερχόμενο σύνδεσμό του μέσω της διεύθυνσης του *υπερκόμβου*- k στο άλλο άκρο του. Ένας εισερχόμενος σύνδεσμος επιπέδου k θεωρείται *σταθερός* (*stable*) εάν έχει τιμή συσχέτισης μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου που χρησιμοποιείται για την κατάταξη ενός *υπερκόμβου*- k ως αργού (δηλαδή T_{slow}). Όλοι οι σταθεροί εισερχόμενοι σύνδεσμοι σε έναν *υπερκόμβο*- i από έναν *υπερκόμβο*- j σχηματίζουν έναν *εικονικό εισερχόμενο σύνδεσμο* (*virtual ingoing link*), ο οποίος έχει τιμή συσχέτισης ίση με το άθροισμα των συσχετίσεων των συνδέσμων από τους οποίους αποτελείται.

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης μέσω ομαδοποίησης που προτείνουμε μπορεί να αντιμετωπιστεί ως δύο ανεξάρτητα κομμάτια (modules). Το πρώτο κομμάτι, το οποίο ονομάζουμε *πρωτόκολλο Ομαδοποίησης με Βάση την Συσχέτιση* (*Associativity Based*

Clustering – ABC), αναλαμβάνει τον υπολογισμό των απαιτούμενων μετρικών (επεκτείνοντας την υπηρεσία κατάταξης κινητικότητας –MCS– και την υπηρεσία επιλογής στρατηγικής –SSS– του MSA framework), καθώς και την δημιουργία και συντήρηση των υπερκόμβων. Το δεύτερο κομμάτι ασχολείται με την δρομολόγηση μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου (επεκτείνοντας αντίστοιχα την SSS και την υπηρεσία δρομολόγησης –RS– της MSA). Επίσης, ως μέρος του δεύτερου κομματιού εισάγουμε την έννοια της *αξιοπιστίας μιας διαδρομής (route's reliability)* και την χρήση της ως κριτήριο επιλογής δρομολογίων για τους κατ' απαίτηση αλγορίθμους.

5.2. ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

Το ABC πρωτόκολλο αποτελείται από έναν αριθμό συνεργαζομένων υποπρωτοκόλλων (subprotocols), τα οποία θα εισάγουμε και θα περιγράψουμε στην παρούσα ενότητα. Όλα τα υποπρωτόκολλα που θα ορίσουμε στην συνέχεια εκτελούνται περιοδικά για όλους τους υπερκόμβους, είτε αυτοί αποτελούν μέλη άλλων υπερκόμβων είτε όχι. Τα πρωτόκολλα αυτά εκτελούνται κατανεμημένα και ασύγχρονα από κάθε κόμβο του υπερκόμβου και χρησιμοποιούν έναν αριθμό δομών δεδομένων (data structures) τις οποίες θα ορίσουμε στην επόμενη παράγραφο.

Καταρχήν, κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα, ο οποίος ονομάζεται *Hypernodes* και ο οποίος καταγράφει τοπολογικές πληροφορίες για την δομή όλων των υπερκόμβων, στους οποίους ο κόμβος είναι μέλος. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος διατηρεί μια εγγραφή (record) στον *Hypernodes* του για κάθε άλλο κόμβο που περιέχεται στον ανώτερο υπερκόμβο του. Η βασική πληροφορία κάθε τέτοιας εγγραφής είναι η διεύθυνση του υψηλότερου επιπέδου υπερκόμβου στον οποίο και οι δύο κόμβοι είναι μέλη. Επιπρόσθετα, ο εκπρόσωπος κάθε *υπερκόμβου- i* διατηρεί στον *Hypernodes* του τις συμβαλλόμενες εντροπίες όλων των *υπερκόμβων- $(i-1)$* του. Επίσης, κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα που ονομάζεται *Neighbors*, στον οποίο καταχωρεί τους εισερχόμενους συνδέσμους του από κάθε γειτονικό υπερκόμβο μαζί με τις συσχετίσεις τους, καθώς και έναν πίνακα *HyperNeighbors*, στον οποίο συγκεντρώνει πληροφορίες για όλους τους εικονικούς εισερχόμενους συνδέσμους των υπερκόμβων στους οποίους είναι μέλος. Λεπτομερέστερα, κάθε εγγραφή στον *HyperNeighbors* περιλαμβάνει μια λίστα με όλους τους (φυσικούς) συνδέσμους από έναν *υπερκόμβο- i* , καθώς και το άθροισμα των συσχετίσεών τους. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα διάφορα υποπρωτόκολλα του ABC πρωτοκόλλου.

5.2.1 Υποπρωτόκολλο 1: Υπολογισμός Της Συσχέτισης Των Συνδέσμων Υπερκόμβου

Εάν είναι διαθέσιμος ένας μηχανισμός αναγνώρισης (*beaconing*) ή ένας τέτοιος μηχανισμός μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση του κατ' απαίτηση πρωτοκόλλου, το Υποπρωτόκολλο 1 υπολογίζει τις συσχετίσεις των εισερχόμενων συνδέσμων και των εικονικών εισερχόμενων συνδέσμων και διατηρεί τους πίνακες *Neighbors* και *HyperNeighbors* ενημερωμένους.

Κάθε φορά που ανιχνεύεται ένας καινούργιος σύνδεσμος από ένα κόμβο, δημιουργείται μια νέα καταχώρηση για αυτόν στον πίνακα *Neighbors*. Κάθε επακόλουθη λήψη ενός αναγνωριστικού μηνύματος (*beacon*) από αυτό τον σύνδεσμο οδηγεί στην αύξηση της συσχέτισής του κατά ένα. Εάν το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών αναγνωριστικών μηνυμάτων ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, ο σύνδεσμος θεωρείται κατεστραμμένος και η καταχώρηση γι' αυτόν στον *Neighbors* απομακρύνεται. Όταν ένας σύνδεσμος γίνει σταθερός (*stable*) ένα *LinkQuery* (*LQ*) μήνυμα εκπέμπεται κατά μήκος του. Το μήνυμα *LQ* καταγράφει τις διευθύνσεις όλων των υπερκόμβων στους οποίους ο αποστολέας του είναι μέλος. Όταν ο κόμβος στο άλλο άκρο του συνδέσμου παραλάβει το μήνυμα *LQ* ενημερώνει τον πίνακα *Neighbors* του και απαντά με ένα νέο *LQ* μήνυμα (με την προϋπόθεση ότι δεν έχει μεταδώσει ήδη ένα). Ο κύριος λόγος ύπαρξης των *LQ* μηνυμάτων είναι η ανταλλαγή πληροφοριών για τα επίπεδα και την δομή γειτονικών υπερκόμβων (μέρος ή και ολόκληρη η λειτουργικότητά τους θα μπορούσε να αντικατασταθεί από τον μηχανισμό αναγνώρισης).

Ακολουθώς, εφόσον μετά την ανταλλαγή των *LQ* μηνυμάτων ο σύνδεσμος, έστω επιπέδου k , εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται ως σταθερός, ο κόμβος εκπέμπει ένα μήνυμα *LinkStatus* (*LS*) σε ολόκληρο τον ανώτερο υπερκόμβο του, εάν αυτός είναι επιπέδου k , ή στον υπερκόμβο- $(k+1)$ στον οποίο είναι μέλος διαφορετικά. Κάθε μήνυμα *LS* περιέχει την διεύθυνση του υπερκόμβου- k , που μόλις ανακαλύφθηκε, καθώς και την τιμή της συσχέτισης του εισερχόμενου συνδέσμου του, όπως την υπολογίζει ο κόμβος που εκπέμπει το *LS* μήνυμα. Ένα μήνυμα τύπου *LS* εκπέμπεται και κάθε φορά που ένας σταθερός σύνδεσμος καταστρέφεται. Η μόνη διαφορά αυτού του μηνύματος είναι ότι έχει αρνητική τιμή για την συσχέτιση (η οποία αφορά την στιγμή ακριβώς πριν την καταστροφή του συνδέσμου). Την πρώτη φορά που ένας κόμβος παραλαμβάνει ένα *LS* μήνυμα, και αφού το επανεκπέμψει, ενημερώνει τον πίνακα *HyperNeighbors* του, αποφασίζοντας από το πρόσημο της συσχέτισης εάν πρόκειται για προσθήκη ή αφαίρεση κάποιου σταθερού συνδέσμου. Συγκεκριμένα, εάν ο *HyperNeighbors* έχει ήδη μια καταχώρηση για τον υπερκόμβο που περιέχεται στο μήνυμα *LS*, τότε αυξάνει την τιμή της συσχέτισης του εικονικού εισερχόμενου συνδέσμου από τον υπερκόμβο κατά την υποδεικνυόμενη τιμή και προσθέτει το νέο σύνδεσμο στην λίστα των συνδέσμων. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει καταχώρηση για τον συγκεκριμένο υπερκόμβο, τότε δημιουργείται μια νέα.

Επιπλέον, κάθε εκπρόσωπος ενός υπερκόμβου περιοδικά αυξάνει τις τιμές των συσχετίσεων που περιέχονται στον *HyperNeighbors* του. Αυτό συμβαίνει επειδή πρέπει να διατηρούμε τις συσχετίσεις των εικονικών συνδέσμων (προσεγγιστικά) ενήμερες, ώστε να έχουμε μια σχετικά ακριβή προσέγγιση της σταθερότητας. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι εάν δε λάβουμε ένα μήνυμα τύπου *LS* τίποτα σημαντικό δεν έχει συμβεί. Η περίοδος αυτών των ενημερώσεων μπορεί να επιλεγεί είτε ως το διάστημα μεταξύ της εκπομπής δύο αναγνωριστικών μηνυμάτων ή εναλλακτικά ως ο χρόνος που απαιτείται για την λήψη ενός αναγνωριστικού μηνύματος από κάθε γείτονα του εκπρόσωπου. Η δεύτερη επιλογή εμφανίζεται ορθότερη καθώς εξασφαλίζει ότι ο εκπρόσωπος εξακολουθεί να διατηρεί συνδέσμους με όλα τα μέλη του ανώτερου υπερκόμβου του και κατά συνέπεια ενδεχόμενα μηνύματα τύπου *LS* θα μπορούσαν να παραδοθούν. Το μέγεθος των αυξήσεων των συσχετίσεων των εικονικών συνδέσμων εξαρτάται από τον αριθμό των φυσικών συνδέσμων. Με άλλα λόγια, εάν μια εγγραφή υποδηλώνει ότι ένας εικονικός σύνδεσμος αποτελείται από m φυσικούς συνδέσμους, τότε η συσχέτιση αυτού του εικονικού συνδέσμου θα αυξάνεται κατά m ticks σε κάθε περιοδική ενημέρωση.

5.2.2 Υποπρωτόκολλο 2: Υπολογισμός Σταθερότητας & Κατάταξη Υπερκόμβου Σε Κλάση Κινητικότητας

Δεδομένου ενός ενημερωμένου πίνακα *HyperNeighbors*, το Υποπρωτόκολλο 2 υπολογίζει την σταθερότητα ενός υπερκόμβου και τον κατατάσσει σε μια κλάση κινητικότητας.

Δεδομένου του πίνακα *HyperNeighbors*, ο υπολογισμός της τιμής της σταθερότητας (μέσω του ορισμού 4) είναι άμεσος. Επιπλέον με βάση την τιμή της σταθερότητας του υπερκόμβου και την χρήση των κατάλληλων κατωφλίων, η κατάταξη του κόμβου σε μια κλάση κινητικότητας (με την χρήση του ορισμού 3) είναι τετριμμένη. Η λειτουργικότητα του Υποπρωτοκόλλου 2 μπορεί να αντικατασταθεί (ή και να αντικαταστήσει) από τις MCS και SSS του MSA framework (εφόσον αυτό χρησιμοποιείται).

5.2.3 Υποπρωτόκολλο 3: Σχηματισμός Υπερκόμβου

Αυτό το υποπρωτόκολλο ενεργοποιείται, κάθε φορά που η κλάση κινητικότητας του υπερκόμβου- i ($0 \leq i \leq \text{MaxClusterNum}$), όπως υπολογίζεται από το Υποπρωτόκολλο 2, το επιτρέπει και χειρίζεται την συμμετοχή κάθε κόμβου, ο οποίος έχει σαν ανώτερο υπερκόμβο τον υπερκόμβο- i , στον σχηματισμό ενός υπερκόμβου- $(i+1)$. Το Υποπρωτόκολλο 3 τερματίζει όταν είτε η κλάση κινητικότητας του υπερκόμβου- i αλλάζει είτε όταν ο υπερκόμβος- i καταστρέφεται είτε, τέλος, όταν επιτυγχάνεται ο σχηματισμός ενός

υπερκόμβου-($i+1$). Στην τελευταία περίπτωση οι πίνακες *Hypernodes* των κόμβων ενημερώνονται με τις τοπολογικές πληροφορίες που αφορούν τον νεοσχηματισμένο υπερκόμβο-($i+1$).

Αυτό το πρωτόκολλο αρχικοποιείται από τον εκπρόσωπο του υπερκόμβου- i , κάθε φορά που το Υποπρωτόκολλο 2 αποφασίζει ότι ο υπερκόμβος είναι αργός και με την προϋπόθεση ότι $i < MaxClusterNum$. Η διαδικασία σχηματισμού του υπερκόμβου- i μπορεί να διασπαστεί σε τρεις λογικές φάσεις. Κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης όλοι οι κόμβοι της γειτονιάς ανταλλάσσουν μηνύματα με πληροφορίες για την κατάστασή τους, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον σχηματισμό του νέου υπερκόμβου-($i+1$). Η δεύτερη φάση ξεκινά όταν ο εκπρόσωπος ενός διακεκριμένου υπερκόμβου- i , ο οποίος αποκαλείται *ηγέτης (leader)*, συγκεντρώσει έναν αριθμό τέτοιων μηνυμάτων. Ο ηγέτης εκλέγεται κατά την διάρκεια της δεύτερης φάσης από τους εκπροσώπους των υπερκόμβων που συμμετέχουν σε αυτή με την βοήθεια των μηνυμάτων που έχουν ανταλλαχθεί κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης (οι λεπτομέρειες της διαδικασίας θα αναφερθούν κατά την διάρκεια της συζήτησης για την αντίστοιχη φάση). Η ευθύνη του ηγέτη είναι να αποφασίσει τον καλύτερο υπερκόμβο-($i+1$), με βάση την εντροπία, ανάμεσα σε όλους αυτούς που είναι δυνατό να σχηματιστούν στην γειτονιά του. Κατά την διάρκεια της δεύτερης φάσης ο ηγέτης αποφασίζει την δομή του υπερκόμβου-($i+1$) βασισμένος στις πληροφορίες που έχει συγκεντρώσει κατά την πρώτη φάση. Μετά την απόφασή του ξεκινά η τρίτη φάση κατά την οποία ενημερώνονται οι πίνακες *Hypernodes* όλων των κόμβων του νέου υπερκόμβου-($i+1$). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι λογικές φάσεις ορίζονται μόνο για την καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου σχηματισμού. Στην πραγματικότητα, οι φάσεις αλληλεπικαλύπτονται και η αρχικοποίηση καμιάς δεν εξαρτάται από τον τερματισμό κάποιας άλλης (καθώς όπως αναφέραμε όλα τα υποπρωτόκολλα είναι εντελώς ασύγχρονα). Επιπρόσθετα, το Υποπρωτόκολλο 3 μπορεί να εκτελείται ταυτόχρονα για πολλές επικαλυπτόμενες γειτονιές του δικτύου (δηλαδή ένας υπερκόμβος- i μπορεί να συμμετέχει σε περισσότερα από ένα στιγμιότυπα του Υποπρωτοκόλλου 3, αλλά για καθεμιά από αυτές μόνο ένας ηγέτης εκλέγεται και κάθε υπερκόμβος- i θεωρεί τον εαυτό του μέρος μόνο μιας συγκεκριμένης γειτονιάς).

Το Υποπρωτόκολλο 3 χρησιμοποιεί δύο είδη μηνυμάτων. Ο πρώτος τύπος μηνυμάτων αποκαλείται *HypernodeStatus (HS)* και χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης για την ανταλλαγή των πληροφοριών που είναι απαραίτητες στον ηγέτη για την επιλογή της τοπολογίας του νέου υπερκόμβου-($i+1$). Αυτή η κατηγορία μηνυμάτων εκπέμπεται από τους εκπροσώπους των αργών υπερκόμβων- i και περιέχει την διεύθυνση του υπερκόμβου- i που τα εκπέμπει, την τιμή της συμβαλλόμενης εντροπίας του και τις διευθύνσεις όλων των εικονικών εισερχόμενων συνδέσμων του. Η δεύτερη κατηγορία μηνυμάτων ονομάζεται *HypernodeConfirmation (HC)* και χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια της τρίτης φάσης για την επιβεβαίωση της δημιουργίας του νέου υπερκόμβου. Κάθε *HC* μήνυμα περιέχει την διεύθυνση του αποστολέα του (ο οποίος θα είναι ο

εκπρόσωπος ενός *υπερκόμβου- i*), τις διευθύνσεις των *υπερκόμβων- i* που θα είναι μέλη του νέου *υπερκόμβου- $(i+1)$* , την εντροπία του *υπερκόμβου- $(i+1)$* (όπως υπολογίζεται από τον ηγέτη) και, τέλος, τις διευθύνσεις όλων των *υπερκόμβων-0* (δηλαδή των απλών κόμβων) που περιέχονται στον *υπερκόμβο- i* του αποστολέα.

Πρώτη Φάση

Κάθε φορά που το Υποπρωτόκολλο 3 ενεργοποιείται, ο εκπρόσωπος κάθε *υπερκόμβου- i* εκπέμπει ένα *HS* μήνυμα. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα *HS* μήνυμα, το οποίο προέρχεται από κάποιον από του υπερκόμβους στους οποίους είναι μέλος, το επανεκπέμπει άμεσα. Εάν το *HS* μήνυμα προέρχεται από έναν υπερκόμβο, του οποίου ο κόμβος δεν είναι μέλος, αρχικά ελέγχει εάν ανήκει σε κάποιον από τους γειτονικούς υπερκόμβους που καταγράφονται σε αυτό και εφόσον ανήκει τότε το προωθεί στον εκπρόσωπο του αντίστοιχου υπερκόμβου (δηλαδή στον εκπρόσωπο του υπερκόμβου με το ίδιο επίπεδο).

Δεύτερη Φάση

Η δεύτερη φάση του αλγορίθμου εκτελείται μόνο από τους εκπροσώπους των *υπερκόμβων- i* , οι οποίοι έχουν λάβει *HS* μηνύματα κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης. Μετά την λήψη ενός *HS* μηνύματος, κάθε εκπρόσωπος ελέγχει τα δεδομένα που περιέχονται στο μήνυμα για να αποφασίσει εάν θα πρέπει να θεωρήσει τον εαυτό του ως ηγέτη της γειτονιάς που περιγράφεται σε αυτό. Ο ηγέτης έχει το καθήκον να αποφασίσει την τοπολογική δομή του νέου *υπερκόμβου- $(i+1)$* βασιζόμενος στην εντροπία του. Έτσι, ως ηγέτης πρέπει να επιλεγεί ο εκπρόσωπος του *υπερκόμβου- i* , ο οποίος έχει την καλύτερη εικόνα της περιοχής του δικτύου όπου θα δημιουργηθεί ο νέος *υπερκόμβος- $(i+1)$* . Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι ο ηγέτης πρέπει να επιλεγεί με βάση τον αριθμό σταθερών συνδέσμων που διατηρεί με άλλους *υπερκόμβους- i* , ή με άλλα λόγια, με βάση το μέγεθος της σταθερής του γειτονιάς. Επομένως, κάθε φορά που παραλαμβάνεται ένα μήνυμα *HS*, ο εκπρόσωπος μετράει τον αριθμό των *υπερκόμβων- i* που περιέχονται σε αυτό και εφόσον ο αριθμός τους είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των σταθερών συνδέσμων που διατηρεί με άλλους *υπερκόμβους- i* (παρέχεται από τον πίνακα *HyperNeighbors* του) αποκλείει τον εαυτό του από ηγέτη της γειτονιάς που περιγράφεται σε αυτό. Για το σπάσιμο των περιπτώσεων ισοπαλίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εντροπία (ο *υπερκόμβος- i* με την μεγαλύτερη εντροπία χάνει, αφού είναι πιθανότερο να καταστραφεί) και σε περίπτωση που η ισοπαλία συνεχίζεται, επιλέγεται ο ηγέτης με τυχαίο τρόπο (π.χ. ο υπερκόμβος με την μικρότερη διεύθυνση). Σαν συνέπεια της απόφασης ότι ο εκπρόσωπος δεν είναι ηγέτης μιας γειτονιάς, το *HS* μήνυμα και όλα τα ακόλουθα *HS*

μηνύματα από υπερκόμβους της γειτονιάς απορρίπτονται για όλη την διάρκεια της δευτέρας φάσης. Πρέπει να παρατηρηθεί εδώ ότι εάν ένας εκπρόσωπος ανήκει σε δύο (ή περισσότερες) διακεκριμένες γειτονιές, μπορεί να είναι ηγέτης μόνο της μίας (εφόσον συνεχίζει να παραλαμβάνει μηνύματα *HS* από υπερκόμβους-*i* που δεν περιέχονται στην γειτονιά του ηγέτη της άλλης).

Κάθε αντιπρόσωπος διατηρεί ένα σύνολο, το οποίο αποκαλείται *HypernodeSelection*, με όλους τους πιθανούς υπερκόμβους- $(i+1)$ που μπορούν να σχηματιστούν, συνδεδεμένους με τις εντροπίες τους, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση των συμβαλλόμενων εντροπιών (ορισμοί 6 και 7) που έχουν συγκεντρωθεί κατά την πρώτη φάση. Αρχικά, το μόνο στοιχείο του *HypernodeSelection* συνόλου είναι αυτό που περιέχει τον υπερκόμβο-*i* του εκπροσώπου. Κάθε φορά που παραλαμβάνεται ένα *HS* μήνυμα, με αποστολέα έναν υπερκόμβο-*i* X , όλα τα στοιχεία του *HypernodeSelection* συνόλου ελέγχονται για να διαπιστωθεί εάν όλοι οι υπερκόμβοι-*i* τους είναι γείτονες με τον X . Για να επιτευχθεί αυτό, κάθε εκπρόσωπος πρέπει να διατηρεί ένα προσωρινό αντίγραφο των μηνυμάτων *HS* που έχει παραλάβει. Ο εκπρόσωπος προσθέτει τον X σε κάθε στοιχείο του *HypernodeSelection* συνόλου, με το οποίο εντοπίζει ότι ο X είναι γειτονικός με όλους τους υπερκόμβους-*i* του, και η εντροπία του στοιχείου επανυπολογίζεται. Ένα νέο στοιχείο αποτελούμενο μόνο από τον αποστολέα του *HS* μηνύματος προστίθεται, επίσης, στο *HypernodeSelection* σύνολο. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ, ότι μπορούμε να περιορίσουμε τον αριθμό των μελών του νεοσχηματιζόμενου υπερκόμβου- $(i+1)$ σε $MaxHyperElem_{(i+1)}$ με τον να μην επιτρέπουμε το μέγεθος των στοιχείων του *HypernodeSelection* συνόλου να ξεπερνά αυτή την τιμή. Έτσι, επιλέγοντας προσεκτικά τις τιμές $MaxHyperElem_i$, $0 \leq i \leq MaxClusterNum$, μπορούμε να θέσουμε άνω όρια στον αριθμό των κόμβων που θα περιέχει κάποιος υπερκόμβος. Για παράδειγμα, εάν θέσουμε $MaxClusterNum = 2$, $MaxHyperElem_1 = 5$ και $MaxHyperElem_2 = 3$, τότε ένας υπερκόμβος-1 θα περιέχει το πολύ 5 κόμβους και ένας υπερκόμβος-2 το πολύ 15 κόμβους.

Όταν το χρονικό διάστημα από την τελευταία λήψη ενός *HS* μηνύματος ξεπεράσει ένα κατώφλι, έστω *HSTTL*, ο εκπρόσωπος αποφασίζει ως τον νέο υπερκόμβο- $(i+1)$ το στοιχείο του *HypernodeSelection* συνόλου με την μικρότερη εντροπία και το μεγαλύτερο μήκος, ανάμεσα σε όλα τα στοιχεία με μήκος τουλάχιστον 2. Σε περίπτωση που δεν βρεθεί κάποιο κατάλληλο στοιχείο, ο αλγόριθμος μεταβαίνει ξανά στην πρώτη φάση. Επιπλέον, ο εκπρόσωπος ελέγχει εάν κατά το ίδιο χρονικό διάστημα έχει λάβει κάποιο *HC* μήνυμα (από κάποιον ηγέτη γειτονιάς στην οποία ο εκπρόσωπος ανήκει αλλά δεν είναι ηγέτης) και, εφόσον κάτι τέτοιο ισχύει, εάν ο υπερκόμβος- $(i+1)$ που αποφάσισε έχει μικρότερη εντροπία από αυτόν που περιγράφεται στο *HC* μήνυμα. Εάν ο υπερκόμβος- $(i+1)$ του *HC* μηνύματος είναι καλύτερος, τότε αντικαθιστά αυτόν που αποφάσισε ο εκπρόσωπος, ο οποίος, επιπλέον, παύει να θεωρεί τον εαυτό του ηγέτη.

Τρίτη Φάση

Το αρχικό μέρος της τρίτης φάσης είναι διαφορετικό για κάθε κόμβο ανάλογα με το εάν είναι ηγέτης, εκπρόσωπος ή απλός κόμβος ενός *υπερκόμβου- i* που συμμετέχει στον σχηματισμό του *υπερκόμβου- $(i+1)$* . Ένας ηγέτης εισέρχεται στην τρίτη φάση κάθε φορά που λαμβάνει μια απόφαση για την τοπολογία του *υπερκόμβου- $(i+1)$* , ως αποτέλεσμα της εκτέλεσης της δεύτερης φάσης. Η μόνη «ειδική» αρμοδιότητα του ηγέτη είναι να κατασκευάσει και να εκπέμψει ένα *HC* μήνυμα, ενώ συνεχίζει το υπόλοιπο της τρίτης φάσης ως ένα απλός κόμβος. Κάθε άλλος κόμβος εισέρχεται στην τρίτη φάση όταν παραλάβει ένα μήνυμα *HC*, το οποίο περιλαμβάνει τον ανώτερο υπερκόμβο του στους *υπερκόμβους- i* που προτείνεται να σχηματίσουν το νέο *υπερκόμβο- $(i+1)$* .

Κάθε φορά που κάποιος κόμβος παραλαμβάνει ένα νέο μήνυμα *HC*, το αποθηκεύει στην προσωρινή του μνήμη (ο αριθμός των μηνυμάτων *HC* που μπορεί να λάβει ένας κόμβος φράσσεται από τον αριθμό των γειτόνων του) και κατόπιν το επανεκπέμπει. Σε περίπτωση που ο κόμβος είναι εκπρόσωπος ενός από τους *υπερκόμβους- i* , ενεργοποιεί ένα χρονόμετρο, το οποίο λήγει μετά από χρόνο *HCTTL*. Εάν μετά την λήξη του χρονομέτρου, περισσότερα από ένα *HC* μηνύματα, καθένα περιγράφοντας ένα διαφορετικό *υπερκόμβο- $(i+1)$* , έχουν ληφθεί, ο εκπρόσωπος αποφασίζει τον καλύτερο *υπερκόμβο- $(i+1)$* και με τη σειρά του κατασκευάζει και εκπέμπει ένα *HC* μήνυμα. Κατόπιν συνεχίζει την τρίτη φάση ως ένας απλός κόμβος. Όταν ένας απλός κόμβος λάβει ένα *HC* μήνυμα από τον εκπρόσωπο του *υπερκόμβου- i* του, απομακρύνει όλα τα *HC* μηνύματα που δεν περιγράφουν τον ίδιο *υπερκόμβο- $(i+1)$* με αυτό από την προσωρινή μνήμη του. Εάν ο κόμβος δεν έχει λάβει *HC* μηνύματα από όλους τους *υπερκόμβους- i* που περιέχονται στο *HC* μήνυμα που έλαβε από τον εκπρόσωπο του υπερκόμβου του, τότε θέτει ένα χρονόμετρο με χρόνο λήξης *HCTTL*. Διαφορετικά, εάν όλα τα *HC* μηνύματα έχουν ληφθεί πριν την ενεργοποίηση ή πριν την λήξη του χρονομέτρου, ο πίνακας *Hypernodes* του κόμβου ενημερώνεται με την τοπολογία του νέου *υπερκόμβου- $(i+1)$* . Όταν το χρονόμετρο λήξει και με την προϋπόθεση ότι έχουν ληφθεί τουλάχιστον τρία μηνύματα *HC* που περιγράφουν τον ίδιο *υπερκόμβο- $(i+1)$* , ο πίνακας *Hypernodes* του κόμβου ενημερώνεται με την δομή του *υπερκόμβου- $(i+1)$* που ορίζεται από τους αποστολείς αυτών των *HC* μηνυμάτων. Σε περίπτωση που δεν συγκεντρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός *HC* μηνυμάτων, η τρίτη φάση τερματίζεται (αυτό σημαίνει ότι όλα τα προσωρινά αποθηκευμένα *HC* μηνύματα απορρίπτονται) και ο αλγόριθμος μεταπίπτει ξανά στην πρώτη φάση. Τέλος, σε κάθε περίπτωση, μετά την ενημέρωση του πίνακα *Hypernodes* ενεργοποιούνται όλα τα απαραίτητα πρωτόκολλα για την συντήρηση του νέου υπερκόμβου και το Υποπρωτόκολλο 3 τερματίζεται.

5.2.4 Υποπρωτόκολλο 4: Συντήρηση Υπερκόμβου

Αυτό το υποπρωτόκολλο είναι υπεύθυνο για την συντήρηση του υπερκόμβου- i . Με τον όρο συντήρηση εννοούμε τις ενέργειες που είναι απαραίτητες για την προσθήκη κάποιου υπερκόμβου- $(i-1)$ ή την απομάκρυνση κάποιου μέλους του εξαιτίας κάποιας καταστροφής συνδέσμου, καθώς και τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες για την διατήρηση της συνέπειας όλων των δομών δεδομένων που χρησιμοποιούνται.

Ο μηχανισμός που απαιτείται για την συντήρηση του υπερκόμβου- i μπορεί να διακριθεί σε δύο λογικά μέρη. Το πρώτο από αυτά αφορά την προσθήκη ενός νέου υπερκόμβου- j , $j < i$, στον υπερκόμβο- i , ενώ το δεύτερο αφορά τις ενέργειες που απαιτούνται όταν ένας εσωτερικός σύνδεσμος του υπερκόμβου- i καταστρέφεται.

Προσθήκη υπερκόμβου- j στον υπερκόμβο- i

Κάθε φορά που ένας κόμβος, μέλος του υπερκόμβου- $(j+1)$ Y και με ανώτερο υπερκόμβο τον υπερκόμβο- i U , παραλαμβάνει ένα μήνυμα HS για τον σχηματισμό ενός υπερκόμβου- $(j+1)$ με αποστολέα έναν υπερκόμβο- j X (ο οποίος βρίσκεται στην πρώτη φάση του Υποπρωτοκόλλου 3), το προωθεί στον εκπρόσωπο του Y . Ο εκπρόσωπος ελέγχει εάν όλοι οι υπερκόμβοι- j του περιέχονται στο HS μήνυμα και, επιπρόσθετα, ότι δεν έχει ήδη $MaxHyperElem_j$ υπερκόμβους- j . Σε περίπτωση που και οι δύο αυτές συνθήκες ισχύουν, τότε ο εκπρόσωπος δημιουργεί και στέλνει ένα *HypernodeInvitation* (HI) μήνυμα στον X . Το μήνυμα HI περιέχει την διεύθυνση του Y , την εντροπία του και την τοπολογία του U (δηλαδή τις διευθύνσεις όλων των κόμβων που περιέχονται στον U και πληροφορίες για την ιεραρχική οργάνωσή του), όπως αυτή περιέχεται στον πίνακα *Hypernodes* του. Μόλις ένας κόμβος που ανήκει στον X παραλάβει το HI μήνυμα, αποθηκεύει προσωρινά ένα αντίγραφο του και στην συνέχεια το επανεκπέμπει. Ο εκπρόσωπος του X ενεργοποιεί, επιπρόσθετα, ένα χρονόμετρο με χρόνο λήξης $HITTL$ και σταματά την εκτέλεση του Υποπρωτοκόλλου 3. Αφού το χρονόμετρο λήξει, ο εκπρόσωπος ελέγχει εάν έχει λάβει κάποιο άλλο HI μήνυμα. Σε περίπτωση που έχει, επιλέγει το καλύτερο (με βάση την εντροπία του υπερκόμβου- $(j+1)$) και εκπέμπει ένα μήνυμα τύπου *HypernodeAddition* (HA), το οποίο περιέχει την διεύθυνση του U , την διεύθυνση του Y , την τοπολογία του X , καθώς και την συμβαλλόμενη εντροπία του. Κάθε κόμβος που ανήκει στον X , όταν παραλάβει το HA μήνυμα από τον εκπρόσωπο του X εξάγει τις τοπολογικές πληροφορίες που περιέχονται στο αντίστοιχο μήνυμα HI (το οποίο έχει αποθηκεύσει προσωρινά) και ενημερώνει τους πίνακες *Hypernodes*, *HyperNeighbors* και *Neighbors*, έτσι ώστε ο X να εμφανίζεται ως μέλος του Y . Ακολούθως, ο κόμβος αγνοεί όλα τα επόμενα HI μηνύματα (μέχρι ο εκπρόσωπός του U

να ξαναστείλει ένα HS μήνυμα) και επανεκπέμπει το HA μήνυμα. Μια αντίστοιχη διαδικασία εκτελεί, επίσης, και κάθε κόμβος του U .

Καταστροφή εσωτερικού συνδέσμου του υπερκόμβου- i

Όταν ο εκπρόσωπος ενός υπερκόμβου- $(i-1)$ X , ο οποίος ανήκει στον υπερκόμβο- i Z , εντοπίζει ότι κάποιος από τους εικονικούς εισερχόμενους συνδέσμους του με κάποιον άλλο υπερκόμβο- $(i-1)$ Y καταστράφηκε (κάτι το οποίο γίνεται αντιληπτό από τον μηδενισμό του αριθμού των φυσικών συνδέσμων στον πίνακα *HyperNeighbors* λόγω της λήψης ενός LS μηνύματος), ενημερώνει τον εκπρόσωπο του Z στέλνοντας του ένα μήνυμα *HypernodeDisconnection* (HD). Αυτό το μήνυμα περιέχει την διεύθυνση του υπερκόμβου- $(i-1)$, τις διευθύνσεις των γειτονικών υπερκόμβων- $(i-1)$ που ανήκουν στον Z , καθώς και την συμβαλλόμενη εντροπία του. Όταν ο εκπρόσωπος του Z παραλάβει το HD μήνυμα, αποφασίζει ποιόν από τους δύο υπερκόμβους, τον X ή τον Y , θα απομακρύνει, βασιζόμενος στις εκτιμήσεις για την συμβαλλόμενη εντροπία που περιείχαν τα HD μηνύματα. Στην συνέχεια κατασκευάζει και εκπέμπει ένα μήνυμα *HypernodeRemoval* (HR), του οποίου το μόνο περιεχόμενο είναι η διεύθυνση του υπερκόμβου- $(i-1)$ που θα απομακρυνθεί. Στην ειδική περίπτωση που ο εκπρόσωπος του Z ανήκει σε κάποιον από τους δύο υποψήφιους προς απομάκρυνση υπερκόμβους- $(i-1)$, έστω τον X , τότε ο Y θα επιλεγεί προς απομάκρυνση, ακόμα και αν έχει μικρότερη συμβαλλόμενη εντροπία από τον X (λόγω τοπολογικών αλλαγών που συνέβησαν μετά την εκλογή του εκπροσώπου). Κάθε κόμβος, που ανήκει στον ανώτερο υπερκόμβο του Z , ο οποίος παραλαμβάνει το μήνυμα HR , αρχικά απομακρύνει τις πληροφορίες που αφορούν τον Y από τον πίνακα *Hypernodes* του και στην συνέχεια το επανεκπέμπει. Επιπλέον, εάν ο κόμβος ανήκει στον υπερκόμβο- $(i-1)$ που απομακρύνθηκε, τότε αφαιρεί από τον πίνακα *Hypernodes* του και κάθε πληροφορία που αφορά υπερκόμβους στους οποίους ο Y είναι μέλος. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος που δεν ανήκε στον Y ελέγχει εάν ο υπερκόμβος- $(i-1)$ στον οποίο ανήκει έχει λιγότερα από τρία μέλη και σε περίπτωση που κάτι τέτοιο ισχύει απομακρύνει από τον *Hypernodes* του τις πληροφορίες για αυτόν και επαναλαμβάνει την διαδικασία για τον υπερκόμβο- $(i+1)$.

5.2.5 Υποπρωτόκολλο 5: Υπολογισμός Εντροπίας Υπερκόμβου

Αυτό το υποπρωτόκολλο εκτελείται κάθε φορά που συμβαίνει μια σημαντική τοπολογική αλλαγή στον ανώτερο υπερκόμβο και χρησιμοποιείται για τον επανυπολογισμό των συμβαλλόμενων εντροπιών και των εντροπιών όλων των μελών του.

Αυτό το υποπρωτόκολλο εκτελείται από τον εκπρόσωπο κάθε υπερκόμβου κάθε φορά που ο πίνακας *Hypernodes* του μεταβάλλεται εξαιτίας της προσθήκης ή της διαγραφής κάποιου υπερκόμβου. Κάθε εκπρόσωπος ενός *υπερκόμβου-0* (δηλαδή κάθε κόμβος) υπολογίζει τη νέα συμβαλλόμενη εντροπία του και την στέλνει στον εκπρόσωπο του *υπερκόμβου-1* του, χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα *HypernodeEntropy (HE)*. Τα περιεχόμενα ενός *HE* μηνύματος είναι η διεύθυνση του αποστολέα του και η συμβαλλόμενη εντροπία του. Ο εκπρόσωπος κάθε *υπερκόμβου-1* συλλέγει τις συμβαλλόμενες εντροπίες όλων των *υπερκόμβων-0*, τις αποθηκεύει στον πίνακα *Hypernodes* του και με την χρήση του υπολογίζει την εντροπία του υπερκόμβου του (με βάση τον ορισμό 7). Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας την υπολογισμένη τιμή της εντροπίας, υπολογίζει την συμβαλλόμενη εντροπία του *υπερκόμβου-1* του και την στέλνει στον εκπρόσωπο του *υπερκόμβου-2* στον οποίο είναι μέλος (εφόσον κάτι τέτοιο ισχύει). Γενικότερα, ο εκπρόσωπος κάθε *υπερκόμβου- i* , $i > 0$, περιμένει μέχρι να λάβει ένα *HE* μήνυμα από τον εκπρόσωπο κάθε *υπερκόμβου- $(i-1)$* του. Στην συνέχεια υπολογίζει την εντροπία και την συμβαλλόμενη εντροπία του υπερκόμβου του και κατόπιν, εφόσον ανήκει σε έναν *υπερκόμβο- $(i+1)$* , κατασκευάζει και αποστέλλει ένα *HE* μήνυμα στον εκπρόσωπο του τελευταίου. Σε περίπτωση που ο εκπρόσωπος του *υπερκόμβου- i* δεν λάβει ένα μήνυμα *HE* για κάποιον *υπερκόμβο- $(i-1)$* , τότε υποθέτει ότι κάποιος μέλος του συγκεκριμένου υπερκόμβου δεν έλαβε το πλέον πρόσφατο μήνυμα που αφορούσε την προσθήκη ή την διαγραφή κάποιου κόμβου και κατά συνέπεια του ξαναστέλνει το τελευταίο *HR* ή *HA* μήνυμα. Επίσης, σε περίπτωση που ο εκπρόσωπος ενός *υπερκόμβου- $(i+1)$* έχει απομακρυνθεί από τον πίνακα *Hypernodes* κάποιου κόμβου, τότε το μήνυμα *HE* αποστέλλεται στον εκπρόσωπο του *υπερκόμβου- i* με την μικρότερη διεύθυνση, ο οποίος προσωρινά (και μέχρι την εκλογή νέου εκπροσώπου) αντικαθιστά τον εκπρόσωπο του *υπερκόμβου- $(i+1)$* .

Τέλος, όπως και στις περιπτώσεις της συσχέτισης των εικονικών συνδέσμων και της σταθερότητας ενός υπερκόμβου, η τιμή και της εντροπίας του θα πρέπει περιοδικά να ενημερώνεται. Λεπτομερέστερα, εάν ένας υπερκόμβος έχει k κόμβους, τότε η τιμή της εντροπίας του μειώνεται κατά k ticks (εφόσον η τιμή της συμβαλλόμενης εντροπίας κάθε κόμβου αυξάνεται τουλάχιστον κατά 1) σε κάθε ενημέρωση. Η περίοδος της ενημέρωσης θα πρέπει να επιλεγεί ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για την ενημέρωση της σταθερότητας του υπερκόμβου.

5.2.6 Υποπρωτόκολλο 6: Εκλογή Εκπροσώπου Υπερκόμβου

Αυτό το υποπρωτόκολλο εκλέγει τον εκπρόσωπο ενός υπερκόμβου- i και ενημερώνει όλους τους κόμβους του σχετικά.

Αυτό το υποπρωτόκολλο χρησιμοποιείται για την εκλογή του εκπροσώπου ενός υπερκόμβου- i αμέσως μετά τον σχηματισμό του ή την καταστροφή του υπερκόμβου- $(i-1)$ που περιείχε τον προηγούμενο εκπρόσωπό του. Τα μηνύματα που χρησιμοποιεί ονομάζονται *Representative Election (RE)* μηνύματα και τα περιεχόμενα τους είναι οι διευθύνσεις όλων των υπερκόμβων- $(i-1)$ του υπερκόμβου- i σε συνδυασμό με τις συμβαλλόμενες εντροπίες τους. Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση του σχηματισμού ενός νέου υπερκόμβου, το *RE* μήνυμα εκπέμπεται αρχικά από τον ηγέτη, ο οποίος χρησιμοποιεί τις συμβαλλόμενες εντροπίες που συγκέντρωσε μέσω των *HS* μηνυμάτων κατά την πρώτη φάση του αλγορίθμου σχηματισμού. Στην δεύτερη περίπτωση το *RE* μήνυμα εκπέμπεται από τον εκπρόσωπο του υπερκόμβου- $(i-1)$ με την μικρότερη διεύθυνση. Σύμφωνα με το Υποπρωτόκολλο 5, αυτός ο εκπρόσωπος θα συλλέξει τις συμβαλλόμενες εντροπίες όλων των υπερκόμβων- $(i-1)$ που είναι μέλη του υπερκόμβου- i . Κάθε κόμβος, που ανήκει στον υπερκόμβο- i επιλέγει σαν εκπρόσωπο του, τον εκπρόσωπο του υπερκόμβου- $(i-1)$ με την μικρότερη εντροπία (ή την μικρότερη διεύθυνση σε περιπτώσεις ισοπαλίας), όπως αυτή περιγράφεται στο *RE* μήνυμα. Επιπρόσθετα, όταν ένας κόμβος αποφασίσει ότι είναι ο εκπρόσωπος του υπερκόμβου- i , εξάγει τις τιμές των συμβαλλόμενων εντροπιών από το μήνυμα *RE* και τις αποθηκεύει στον πίνακα *Hypernodes* του.

5.3. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ

Εφόσον, όπως είδαμε, οι υπερκόμβοι μπορούν να αντιμετωπιστούν από το υπόλοιπο δίκτυο ως απλοί κόμβοι και χαρακτηρίζονται από μια κλάση κινητικότητας, μπορούμε να επεκτείνουμε διαφανώς την προσέγγιση της MSA για να τους συμπεριλάβει. Κάθε υπερκόμβος εκπροσωπείται στο υπόλοιπο δίκτυο από τους *συνοριακούς κόμβους* του (*border nodes*), δηλαδή όλους τους κόμβους του, οι οποίοι είναι μέλη του υπερκόμβου και οι οποίοι διατηρούν ταυτόχρονα συνδέσμους με υπερκόμβους που δεν είναι μέλη του. Εξαιτίας της φύσης των υπερκόμβων, τόσο η δρομολόγηση όσο και οι εκπομπές στο εσωτερικό τους μπορούν να πραγματοποιηθούν αρκετά αποδοτικά με την χρήση των πινάκων *Hypernodes* και *HyperNeighbors* που διατηρούν. Ακολούθως θα παρουσιάσουμε σύντομα τις απαιτούμενες επεκτάσεις στην MSA, αποφεύγοντας να μπούμε σε λεπτομέρειες, οι οποίες αν και σημαντικές για την υλοποίηση της προσέγγισής μας, θα καταστήσουν την συζήτηση περισσότερο δύσκολη στην κατανόηση.

5.3.1 Εκπομπές Εντός Του Υπερκόμβου

Χάρη στην ειδική δομή κάθε υπερκόμβου, οι εκπομπές στο εσωτερικό του μπορούν να υλοποιηθούν αρκετά αποδοτικά. Κάθε εκπομπή πραγματοποιείται ως εξής: κάθε κόμβος ενός *υπερκόμβου- i* που λαμβάνει ένα πακέτο με προορισμό αυτόν, αρχικά ελέγχει εάν το πακέτο μεταδόθηκε από έναν κόμβο που περιέχεται στον ίδιο *υπερκόμβο-1* με αυτόν. Εάν η απάντηση είναι αρνητική, τότε το πακέτο αναμεταδίδεται άμεσα. Σε διαφορετική περίπτωση ελέγχει τον πίνακα *HyperNeighbors* του για συνδέσμους με άλλους υπερκόμβους, οι οποίοι είναι μέλη του *υπερκόμβου- i* του, αλλά όχι του *υπερκόμβου-1* του. Εάν έχει ένα τέτοιο σύνδεσμο και, επιπλέον, είτε είναι ο μοναδικός κόμβος με τέτοιο σύνδεσμο είτε είναι ο κόμβος με την μικρότερη διεύθυνση, ελέγχει εάν το πακέτο έχει ταξιδέψει για λιγότερα από $2^i - 1$ άλματα μέσα στον *υπερκόμβο- i* . Σε περίπτωση που όλες αυτές οι συνθήκες είναι αληθείς τότε ο κόμβος επανεκπέμπει το μήνυμα. Το φράγμα στον αριθμό των αλμάτων που επιτρέπεται να ταξιδέψει το πακέτο εντός του *υπερκόμβου- i* , χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των άχρηστων μεταδόσεων, εφόσον κανένα πακέτο δεν χρειάζεται να ταξιδέψει απόσταση μεγαλύτερη της διαμέτρου του υπερκόμβου. Η διάμετρος του *υπερκόμβου- i* υπολογίζεται από τον αναδρομικό τύπο $T(i) = 2T(i-1) + 1$, $T(1) = 1$, ο οποίος έχει λύση $2^i - 1$, καθώς η διάμετρος του *υπερκόμβου- i* ισούται με το μέγιστο δυνατό άθροισμα των διαμέτρων οποιονδήποτε δύο *υπερκόμβων- $(i-1)$* του συν ένα σύνδεσμο που τους συνδέει.

Κάθε πακέτο που εμφανίζεται να έχει σαν προορισμό έναν *υπερκόμβο- i* εκπέμπεται σε ολόκληρο τον *υπερκόμβο- i* με το πολύ $\Theta(2m^{i-1})$ εκπομπές, αντί για $\Theta(m^i)$ εκπομπές που θα απαιτούνταν από έναν απλό αλγόριθμο πλημμύρας, όπου m είναι ο αριθμός των μελών κάθε υπερκόμβου, ο οποίος χάριν ευκολίας θεωρείται σταθερός (δηλαδή ο *υπερκόμβος- i* αποτελείται από ακριβώς m *υπερκόμβους- $(i-1)$* , κάθε *υπερκόμβος- $(i-1)$* έχει ακριβώς m *υπερκόμβους- $(i-2)$* κτλ.). Η εκπομπή ενός μηνύματος σε κάθε *υπερκόμβο-1* απαιτεί ακριβώς μία μετάδοση. Σύμφωνα με την υπόθεση μας κάθε *υπερκόμβος-2* έχει ακριβώς m *υπερκόμβους-1*. Επομένως, για να διαδοθεί ένα πακέτο σε ολόκληρο τον *υπερκόμβο-2*, θα απαιτηθούν το πολύ μια μετάδοση για την διάδοση του στον πρώτο *υπερκόμβο-1*, $m-1$ μεταδόσεις για να φτάσει στους υπόλοιπους $m-1$ *υπερκόμβους-1*, καθώς και $m-1$ μεταδόσεις για να διαδοθεί σε αυτούς. Άρα συνολικά θα απαιτηθούν $2m-1$ μεταδόσεις. Αντίστοιχα, για να διαδοθεί το πακέτο σε έναν *υπερκόμβο-3*, θα χρειαστούν $m-1$ μεταδόσεις για να φτάσει το πακέτο στους υπόλοιπους *υπερκόμβους-2*, συν $2m-1$ μεταδόσεις για να διαδοθεί το πακέτο σε καθέναν από αυτούς. Κατά συνέπεια για την εκπομπή ενός πακέτου σε έναν *υπερκόμβο-3* απαιτούνται το πολύ $(2m-1) + (m-1) + (m-1)(2m-1) = m(2m-1) + m-1$ μεταδόσεις. Συνεχίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο αριθμός των μεταδόσεων που απαιτούνται για την εκπομπή ενός πακέτου σε έναν *υπερκόμβο- i* δίνεται

από τον αναδρομικό τύπο $T(i) = mT(i-1) + m - 1$, $T(1) = 1$. Ο αναδρομικός αυτός τύπος έχει λύση $T(i) = 2m^{i-1} - 1$, η οποία είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από τον αριθμό των μεταδόσεων που θα απαιτούσε ένας απλός αλγόριθμος πλημμύρας, δηλαδή $\Theta(n)$ μεταδόσεις, όπου $n = m^i$ είναι ο αριθμός των κόμβων στον υπερκόμβο- i .

5.3.2 Δρομολόγηση Εντός Του Υπερκόμβου

Κάθε αργός κόμβος (υπερκόμβος-0) πρέπει είτε να ανήκει σε κάποιον υπερκόμβο- i , $i > 0$, είτε να έχει σταθερούς συνδέσμους με δύο ακόμα αργούς υπερκόμβους (με την προϋπόθεση ότι έχουμε επιλέξει κατάλληλα τα βάρη στον ορισμό 4). Αυτό υπονοεί ότι για κάθε προορισμό που βρίσκεται στον ίδιο ανώτερο υπερκόμβο με την πηγή ή ανήκει σε έναν υπερκόμβο που διατηρεί έναν τουλάχιστον σταθερό σύνδεσμο με τον ανώτερο υπερκόμβο της, οι τοπολογικές πληροφορίες που περιέχονται στους πίνακες *Hypernodes* και *HyperNeighbors* της μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα, η πηγή και κάθε ενδιάμεσος κόμβος στο δρομολόγιο μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον πίνακα *Hypernodes* τους για να εντοπίσουν τον πρώτο (χαμηλότερου επιπέδου) κοινό υπερκόμβο που έχουν με τον προορισμό. Ακολούθως, μπορεί να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες που περιέχονται στον πίνακα *HyperNeighbors* του για να επιλέξει το επόμενο άλμα προς τον προορισμό. Σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα από ένα τέτοια άλματα, η επιλογή του επόμενου μπορεί να βασίζεται σε αρκετά κριτήρια, όπως για παράδειγμα το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, την τιμή της συσχέτισης του συνδέσμου και άλλα. Επίσης, είναι δυνατή η χρήση κάποιας μορφής βέλτιστης δρομολόγησης (optimal routing), δηλαδή εξισορρόπησης του φορτίου μεταξύ όλων των συνδέσμων. Επιπλέον, εξαιτίας της ειδικής δομής των υπερκόμβων, είναι πιθανή ακόμα και η χρήση κάποιας μορφής δρομολόγησης εκτροπής, χωρίς σημαντική μείωση των επιδόσεων. Εκτός όλων των παραπάνω, με μικρές τροποποιήσεις των μηνυμάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο ομαδοποίησης (π.χ. μηνύματα LS), μπορούμε να έχουμε κάποια μορφή πρωτοκόλλου οδηγούμενου από πίνακες, χωρίς επιπλέον κόστος, το οποίο να βασίζεται είτε σε διανύσματα αποστάσεων είτε σε καταστάσεις συνδέσμων. Η τελευταία περίπτωση μπορεί να ιδωθεί ως υποπερίπτωση της MSA, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, με το να αποτρέψουμε τον σχηματισμό υπερκόμβων (θέτοντας $MaxHyperElem_i = 1$ και $MaxClusterNum = 0$).

5.3.3 Η Αξιοπιστία Ως Ένα Κριτήριο Επιλογής Δρομολογίων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια σημαντική ιδιότητα κάθε υπερκόμβου είναι ο πλεονασμός που διαθέτει σε δρομολόγια μεταξύ οποιονδήποτε δύο κόμβων του, λόγω της ύπαρξης δακτυλίων (rings). Αυτό σημαίνει ότι είναι πιθανό, ακόμα και στην περίπτωση που καταστραφεί ένας αριθμός συνδέσμων του ανώτερου υπερκόμβου του, να

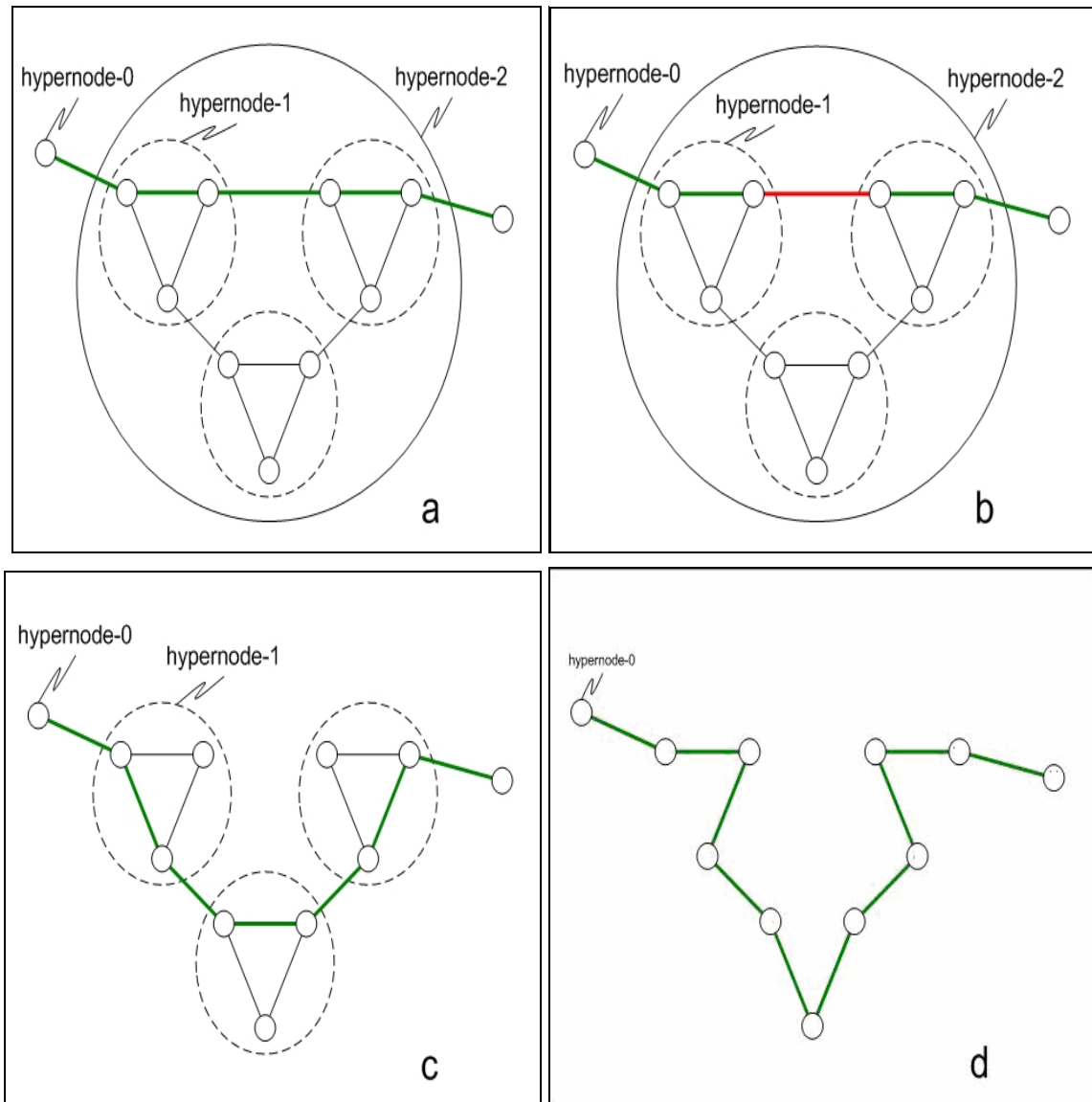
εξακολουθήσει να υπάρχει μια διαδρομή ανάμεσα σε οποιαδήποτε δύο μέλη του. Έτσι, δρομολόγια που περιλαμβάνουν κάποιον κατεστραμμένο σύνδεσμο, μπορούν να τον αντικαταστήσουν μέσω ενός πιθανότερα μεγαλύτερου μονοπατιού (Εικόνα 45). Αυτή η διαδικασία είναι διαφανής (transparent) τόσο για την πηγή όσο και για τον προορισμό και βασίζεται στην χρήση πινάκων για την δρομολόγηση στο εσωτερικό του υπερκόμβου. Αυτή η διαδικασία αυτόματης επιδιόρθωσης κατεστραμμένων διαδρομών μπορεί όχι μόνο να μειώσει τον αριθμό των πακέτων που χάνονται (dropped packets) και την μέση παρατηρούμενη καθυστέρηση, αλλά και να περιορίσει το κόστος δρομολόγησης (routing overhead) μειώνοντας τον αριθμό των ανακαλύψεων δρομολογίων που πραγματοποιούνται από το κατ' απαίτηση πρωτόκολλο (με την προϋπόθεση ότι το μέγεθος του δικτύου είναι αρκούντως μεγάλο).

Επιπλέον, υπερκόμβοι με μικρές τιμές εντροπίας υποδηλώνουν περιοχές του δικτύου, όπου συμβαίνει περιορισμένος αριθμός τοπολογικών αλλαγών. Άρα, ίσως να είναι επιθυμητό, ιδίως σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων ή επικοινωνιών πραγματικού χρόνου (real-time communications), οι διαδρομές να επιλέγονται με βάση την αξιοπιστία τους (reliability). Η αξιοπιστία είναι μια μετρική που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της πιθανότητας καταστροφής ενός δρομολογίου και βασίζεται στις εντροπίες των υπερκόμβων, τους οποίους το δρομολόγιο διατρέπει. Συγκεκριμένα:

Ορισμός 9 (Αξιοπιστία) Ορίζουμε ως αξιοπιστία μιας διαδρομής τον (αριθμητικό) μέσο όρο των εντροπιών των υπερκόμβων που διατρέπει.

Για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας μιας διαδρομής, αρκεί να τροποποιήσουμε τα πακέτα απάντησης (π.χ. RREP του AODV), τα οποία χρησιμοποιούνται από τον μηχανισμό ανακάλυψης δρομολογίων του κατ' απαίτηση πρωτοκόλλου, έτσι ώστε να καταγράφουν τις πληροφορίες για την εντροπία των υπερκόμβων των υπό-ανακάλυψη δρομολογίων.

Το επιπλέον κόστος δρομολόγησης (σε αριθμό αλμάτων) για την αυτόματη επισκευή ενός δρομολογίου στο εσωτερικό ενός υπερκόμβου- i μπορεί να φραχθεί από την διάμετρο του, δηλαδή από το $2^i - 1$. Κατά συνέπεια, η πηγή ενός πακέτου μπορεί να αποφασίσει ένα μέγιστο επίπεδο υπερκόμβων, πάνω από το οποίο θα επιτρέπεται η αυτόματη επιδιόρθωση δρομολογίων μόνο εφόσον ανακαλυφθεί ένα καινούργιο (καλύτερο) δρομολόγιο. Έτσι, για παράδειγμα, ένας αποστολέας μπορεί να αποφασίσει ότι η αυτόματη επιδιόρθωση δρομολογίων στο εσωτερικό ενός υπερκόμβου-2 είναι αποδεκτή (εφόσον κοστίζει το πολύ δύο επιπλέον μεταδόσεις), ενώ σε περίπτωση υπερκόμβων υψηλότερου επιπέδου, η αυτόματη επιδιόρθωση χρησιμοποιείται μόνο για πακέτα που έχουν ξεκινήσει να μεταδίδονται.



Εικόνα 45. Παράδειγμα αυτόματης επιδιόρθωσης δρομολογίου. a) Το αρχικό δρομολόγιο. b) Ένας σύνδεσμος του δρομολογίου καταστράφηκε. c) Το δρομολόγιο επιδιορθώθηκε διαφανώς μέσω της αντικατάστασης του κατεστραμμένου συνδέσμου από ένα μονοπάτι που διέρχεται από έναν καινούργιο υπερκόμβο-1. d) Ακραίο παράδειγμα συνέχισης της επικοινωνίας μεταξύ πηγής και προορισμού, ακόμα και μετά την καταστροφή τριών συνδέσμων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σε αυτή την εργασία μελετήσαμε το πρόβλημα της δρομολόγησης μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού στα κινητά ασύρματα αδόμητα δίκτυα. Έτσι, μετά από μια σύντομη παρουσίαση των χαρακτηριστικών των αδόμητων δικτύων και του προβλήματος της δρομολόγησης σε αυτά, προτείναμε ένα υβριδικό framework, το MSA, το οποίο προσπαθεί να προσαρμόσει την χρησιμοποιούμενη τεχνική δρομολόγησης στην κινητικότητα των κόμβων του δικτύου. Το MSA αντί να παρέχει μια μοναδική στρατηγική δρομολόγησης, χρησιμοποιεί μια δεξαμενή (pool) συμπληρωματικών πρωτοκόλλων καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για μια ειδική κατηγορία δικτύων. Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου γίνεται με την βοήθεια μιας μετρική με όνομα σταθερότητα, την οποία ορίσαμε και με βάση την οποία πετύχαμε την κατηγοριοποίηση των κόμβων σε κλάσεις κινητικότητας σύμφωνα με τους ρυθμούς και τα πρότυπα κίνησής τους. Ένας βασικός σχεδιαστικός στόχος που επιτεύχθηκε είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης των υπαρχόντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για αδόμητα δίκτυα στο MSA, χωρίς την ανάγκη πραγματοποίησης σημαντικών αλλαγών. Για την αξιολόγηση του σχεδιασμού μας, υλοποιήσαμε την MSA στον δικτυακό προσομοιωτή ns-2 και συγκρίναμε τις επιδόσεις της σε σχέση με τα πρωτόκολλα DSDV, AODV και RUNNERS, τα οποία ενσωματώνει. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαπιστώθηκε ότι η προσέγγιση που προτείνουμε μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου.

Σαν μελλοντική εργασία σκοπεύουμε να χαλαρώσουμε την απαίτηση για εύκολη ενσωμάτωση των υπαρχόντων πρωτοκόλλων στο MSA. Πιστεύουμε ότι αν επιτρέψουμε την πραγματοποίηση κάποιων τροποποιήσεων στους πράκτορες λογισμικού που υλοποιούν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, θα πετύχουμε σημαντικά καλύτερες επιδόσεις. Για παράδειγμα, θα ήταν ευεργετικό για όλα τα πρωτόκολλα αν επιτρεπόταν η χρήση ενός κοινού αποθηκευτικού χώρου (buffer) για την αποθήκευση των πακέτων ή αν επιτρέπαμε την χρήση κοινών πινάκων δρομολόγησης. Θα μπορούσαμε, επίσης, να συνδυάσουμε μερικές από τις υποκείμενες λειτουργίες των διαφόρων πρωτοκόλλων για το κοινό όφελος όλων. Για παράδειγμα κίνηση που δημιουργείται από όλα τα πρωτόκολλα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από το AODV ως μηνύματα *HELLO* (μειώνοντας έτσι το κόστος δρομολόγησης) και τα δρομολόγια που ανακαλύπτει ο AODV θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τον DSDV. Κάτι ακόμα που θα θέλαμε να ερευνήσουμε είναι η τροποποίηση του ορισμού της σταθερότητας, ώστε να λαμβάνει υπόψη της και άλλες παραμέτρους πέρα από την κινητικότητα των κόμβων του δικτύου, όπως για παράδειγμα την διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων, την γεωγραφική τους θέση, καθώς και τυχών απαιτήσεις για συγκεκριμένη QoS.

Επιπρόσθετα, κατά την διάρκεια της πειραματικής αξιολόγησης διαπιστώθηκε ότι η τιμή της σταθερότητας των κόμβων παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις με την πρόοδο του χρόνου, αναγκάζοντας το πρωτόκολλο να αλλάξει την κατάταξη των κόμβων ακόμα και όταν τα πρότυπα κίνησης δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Αυτό οδηγεί σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις μεταξύ των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων. Αντιλαμβανόμαστε ότι αυτή η συμπεριφορά πιθανόν να οφείλεται στις επιλογές των παραμέτρων προσομοίωσης που

έγιναν (μικρό μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης, μικρή πυκνότητα δικτύου, Random Waypoint μοντέλο κίνησης), καθώς και στην επιλογή των παραμέτρων w_1 και w_2 . Παρόλα αυτά, πιστεύουμε ότι το πρόβλημα αυτό θα είναι εμφανές και υπό πραγματικές δικτυακές συνθήκες, όπου η κατάλληλη επιλογή των w_1 και w_2 θα είναι αρκετά δύσκολη. Για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό πιστεύουμε ότι πρέπει να ερευνηθούν κάποιες τροποποιήσεις του framework. Συγκεκριμένα, προτείνουμε την χρήση ενός διαστήματος σταθεροποίησης (δηλαδή μιας μικρής καθυστέρησης) πριν την οριστικοποίηση οποιασδήποτε αλλαγής στην κατάταξη ενός κόμβου, ώστε να αποφύγουμε τυχών ταλαντώσεις στην τιμή της σταθερότητάς του. Κατά την διάρκεια αυτού του διαστήματος σταθεροποίησης το framework θα εξακολουθεί να χρησιμοποιεί το προηγούμενο πρωτόκολλο μέχρι το διάστημα σταθεροποίησης να παρέλθει και η αλλαγή να οριστικοποιηθεί. Μια εναλλακτική λύση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν η χρήση και των δύο πρωτοκόλλων παράλληλα, δηλαδή χρήση τόσο του πρωτοκόλλου που αντιστοιχεί στη νέα κατάταξη του κόμβου όσο και του πρωτοκόλλου που αντιστοιχεί στην προηγούμενη κατάταξη, μέχρι την λήξη του διαστήματος σταθεροποίησης. Μια ακόμα τροποποίηση που αξίζει να μελετηθεί είναι η δυνατότητα αλλαγής του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου για πακέτα που ήδη μεταδίδονται, δηλαδή ένα πρωτόκολλο που ξεκίνησε να μεταδίδεται μέσω του AODV να συνεχίσει την πορεία του προς τον προορισμό μέσω του DSDV.

Μια ακόμα συνεισφορά της εργασίας αυτής είναι το πρωτόκολλο ABC, το οποίο προσπαθεί να πετύχει αποτελεσματικότερη δρομολόγηση για τους στατικούς κόμβους οργανώνοντας τους αναδρομικά σε ιεραρχίες υπερκόμβων. Οι υπερκόμβοι επιτρέπουν την χρήση διαφόρων τεχνικών για την δρομολόγηση στο εσωτερικό τους, παρέχουν όλα τα πλεονεκτήματα της ιεραρχικής οργάνωσης και, επιπλέον, μια μορφή ανοχής σε σφάλματα (fault tolerance), αφού επιτρέπουν την διαφανή επιδιόρθωση διαδρομών στο εσωτερικό τους. Η πρώτη προτεραιότητα για το ABC είναι η πειραματική αξιολόγηση του, τόσο για την αποκάλυψη τυχών σχεδιαστικών λαθών (κυρίως εξαιτίας της αναδρομικής του φύσης) όσο και για την αξιολόγηση της απόδοσης του. Επίσης, εφόσον οι πειραματική αξιολόγηση του ABC επιβεβαιώσει την ορθότητα του σχεδιασμού του και την γενικότερη αποτελεσματικότητά του, σκοπεύουμε να δοκιμάσουμε να το ενσωματώσουμε στο MSA για την αντιμετώπιση των «αργών» κόμβων.

Τέλος, στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκε και μελετήθηκε στον ns-2 το πρωτόκολλο RUNNERS, το οποίο είχε υλοποιηθεί μόνο σε έναν αφαιρετικό προσομοιωτή (ad hocSim). Για την υλοποίηση του ήταν αναγκαίος ο ριζικός επανασχεδιασμός κάποιων χαρακτηριστικών του πρωτοκόλλου τα οποία αποδείχτηκε ότι το έκαναν ακατάλληλο για χρήση στο ρεαλιστικό περιβάλλον του ns-2. Παρά την σημαντική βελτίωση του σχεδιασμού του RUNNERS θεωρούμε ότι το πρωτόκολλο πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω και ειδικότερα σε συνθήκες υψηλότερης κίνησης και πυκνότητας του δικτύου, ώστε να καταστεί δυνατή πρόσθετη βελτίωσή του.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [2] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [3] R. Bellur, F. L. Templin, *Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)*, IETF, RFC 3684, 2004.
- [4] S. Basagni, M. Contri, S. Giordano and I. Stojmenovic, eds., *Mobile Ad Hoc Networking*, Willey-Interscience, 2004.
- [5] C. Bettstetter, *Mobility modeling in wireless networks: categorization, smooth movement, and border effects*, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 5 (2001), pp. 55-66.
- [6] D. Blasi, V. Cacace, L. Casone and A. Losacco, *Availability Clustering: a spine-based clustering scheme to exploit nodes heterogeneity in ad hoc networks*, 2nd Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, 2003.
- [7] A. Boukerche, J. Linus and A. Saurabha, *A Performance Study of Distance Source Routing Based Protocols for Mobile and Wireless ad Hoc Networks*, 8th International Conference on Parallel and Distributed Computing (EUROPAR 2002), Springer-Verlag, 2002, pp. 957-964.
- [8] C. Busch, S. Surapaneni and S. Tirthapura, *Analysis of link reversal routing algorithms for mobile ad hoc networks*, Proceedings of the fifteenth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures, ACM Press, San Diego, California, USA, 2003, pp. 210-219.
- [9] T. Camp, J. Boleng and V. Davies, *A survey of mobility models for ad hoc network research*, ACM-Baltzer Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC), 2 (2002), pp. 483-502.
- [10] D. Cavin, Y. Sasson and A. Schiper, *On the accuracy of MANET simulators*, Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing (POMC), ACM Press, 2002, pp. 38-43.
- [11] I. Chatzigiannakis, *Design and analysis of distributed algorithms for basic communication in ad-hoc mobile networks*, PhD Thesis, Computer Engineering & Informatics Department, University of Patras, 2003.
- [12] I. Chatzigiannakis, E. Kaltsa and S. E. Nikolettseas, *On the effect of user mobility and density on the performance of protocols for ad-hoc mobile networks*, ACM-

- Baltzer Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC), 4 (2004), pp. 609-621.
- [13] I. Chatzigiannakis, P. Kokkinos and C. Zaroliagis, *Synthesizing Routing Protocols for Ad-hoc Mobile Networks*, 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS), 2004, pp. 634-637.
- [14] I. Chatzigiannakis, S. Nikoletseas, N. Paspallis, P. Spirakis and C. Zaroliagis, *An Experimental Study of Basic Communication Protocols in Ad-hoc Mobile Networks*, 5th International Workshop on Algorithmic Engineering (WAE), Springer-Verlag, 2001, pp. 159-171.
- [15] I. Chatzigiannakis, S. Nikoletseas and P. Spirakis, *Analysis and Experimental Evaluation of an Innovative and Efficient Routing Protocol for Ad-hoc Mobile Networks*, 4th International Workshop on Algorithmic Engineering (WAE), Springer-Verlag, 2001, pp. 99-110.
- [16] I. Chatzigiannakis, S. Nikoletseas and P. Spirakis, *Distributed communication algorithms for ad hoc mobile networks*, Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC), 63 (2003), pp. 58-74.
- [17] C. Chiang, H. Wu, W. Liu and M. Gerla, *Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel*, 5th IEEE Singapore International Conference on Networks, 1997, pp. 197-211.
- [18] M. L. D.M. Blough, Giovanni Resta and Paolo Santi, *On the symmetric range assignment problem in wireless ad hoc networks*, IFIP Conference on Theoretical Computer Science, 2002, pp. 71-82.
- [19] E. W. Dijkstra, *A note on two problems in connexion with graphs*, Numerische Mathematik (1959), pp. 269-271.
- [20] L. R. Ford and D. R. Fulkerson, *Flows in networks*, Princeton U. Press, 1962.
- [21] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson and J. Vlissides, *Design Patterns: Abstraction and Reuse of Object-Oriented Design*, Lecture Notes in Computer Science, 707 (1993), pp. 406.
- [22] J. J. Garcia-Luna-Aceves and M. Spohn, *Source tree routing in wireless networks*, 7th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 1999, pp. 273-282.
- [23] M. Gerla and J. T.-C. Tsai, *Multiclustet, mobile, multimedia radio network*, ACM-Baltzer Journal of Wireless Networks, 1 (1995), pp. 255-265.

- [24] P. Gupta and P. Kumar, *The capacity of wireless networks*, IEEE Transactions on Information Theory, 46 (2000), pp. 388-404.
- [25] Z. Haas and M. Pearlman, *The zone routing protocol (ZRP)*, IETF, Internet Draft, draft-zone-routing-protocol-02.txt, 1999.
- [26] K. P. Hatzis, G. P. Pentaris, P. G. Spirakis, V. T. Tampakas and R. B. Tan, *Fundamental control algorithms in mobile networks*, *Proceedings of the eleventh annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures (SPAA)*, ACM Press, 1999, pp. 251-260.
- [27] M. Ilyas, ed., *The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks*, CRC Press, 2003.
- [28] N. B. J. Heidemann, J. Elson, C. Intanagonwiwat, K. chan Lan, Y. Xu, W. Ye, D. Estrin, and R. Govindan, *Effects of detail in wireless network simulation*, *SCS Multiconference on Distributed Simulation*, USC/Information Sciences Institute, Society for Computer Simulation, 2001, pp. 3-11.
- [29] M. Jiang, J. Li and Y. Tay, *Cluster based routing protocol (CBRP) functional specification*, IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-cbrp-spec-00.txt, 1998.
- [30] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek and M. Degermark, *Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks*, *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM)*, ACM Press, 1999, pp. 195-206.
- [31] D. B. Johnson, D. A. Maltz and Y.-C. Hu, *The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR)*, IETF, Internet draf, draft-ietf-manet-dsr-10.txt, 2004.
- [32] S. Kurkowski, T. Camp and M. Colagrosso, *MANET simulation studies: the incredibles*, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 9 (2005), pp. 50-61.
- [33] S. Kurkowski, T. Camp and M. Colagrosso, *MANET simulation studies: the incredibles.*, 2005.
- [34] J. Li, C. Blake, D. S. J. D. Couto, H. I. Lee and R. Morris, *Capacity of Ad Hoc wireless networks*, *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM)*, ACM Press, 2001, pp. 61-69.
- [35] N. Lynch, *Distributed Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1996.
- [36] M. K. Marina and S. R. Das, *Routing performance in the presence of unidirectional links in multihop wireless networks*, *3rd ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking (MobiHoc)*, 2002, pp. 12-23.

- [37] P. Mohapatra and S. V. Krishnamurthy, eds., *Ad Hoc Networks: technologies and protocols*, Springer, 2005.
- [38] M. Pearlman and Z. Haas, *Determining the optimal configuration for the zone routing protocol*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17 (2003), pp. 1395-1414.
- [39] C. Perkins, ed., *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, 2001.
- [40] C. E. Perkins and P. Bhagwat, *Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers*, Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications (SIGCOMM), ACM Press, 1994, pp. 234-244.
- [41] C. E. Perkins and E. M. Royer, *Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, 2nd IEEE Annual Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA), 1999, pp. 90-100.
- [42] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice-Hall, 2002.
- [43] J. J. G.-L.-A. S. Murthy, *A routing protocol for packet radio networks*, ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 1995, pp. 86-95.
- [44] M. Takai, J. Martin and R. Bagrodia, eds., *Effects of wireless physical layer modeling in mobile ad hoc networks*, ACM Press, 2001.
- [45] C. Toh, *Wireless ATM and Ad-hoc Networks: Protocols and Architectures*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [46] Y. C. Tseng, S.-Y. Ni and Y.-S. Chen, *The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network*, 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 1999, pp. 151-162.
- [47] J. Yoon, M. Liu and B. Noble, *Random waypoint considered harmful*, 22nd Annual IEEE International Conference on Computer Communications and Networking (INFOCOM), 2003, pp. 1312-1321.