**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΕΠΠΕΔΩΝ ΣΕ
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ Π. ΧΡΗΣΤΟΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ
&
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 200
ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2008**

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η παρούσα διατριβή με θέμα:

«Σχεδίαση και ανάπτυξη επικοινωνιακής αρχιτεκτονικής συνδυασμένων επιπέδων σε κατανεμημένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με απαιτήσεις απόκρισης πραγματικού χρόνου»

του Χρήστου Αντωνόπουλου, διπλωματούχου του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Η/Υ του Πανεπιστημίου Πατρών, παρουσιάστηκε δημοσίως στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών στις 20 Ιουνίου 2008 και εξετάστηκε και εγκρίθηκε από την ακόλουθη Εξεταστική Επιτροπή:

Σταύρος Κουμπιάς	Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Παπαδόπουλος	Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής
Γρηγόριος Καλύβας	Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής
Γεώργιος Αλεξίου	Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών
Δημήτριος Σερπάνος	Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών
Αντώνιος Τζέζ	Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών
Χρήστος Μπούρας	Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Πάτρα 20/6/2008

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Καθηγητής Σταύρος Α. Κουμπιάς

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

Καθηγητής Μηχ. Α. Σαφάκας

Στον πατέρα μου Παναγιώτη και στο αδελφό μου Γρηγόρη
για την ηθική συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου δείξανε.

Στη μνήμη της μητέρας μου Βασιλικής.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κατά την περίοδο Μάρτιος 2002 – Μάρτιος 2008. Η τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή που ορίστηκε, με την υπ' αριθμό 01-26/09/2004 συνεδρίαση της Γενικής Συνέλευσης με Ειδική Σύνοψη του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, αποτελείται από τους κ. Σταύρο Κουμπιά Καθηγητή (Επιβλέπων), κ. Γεώργιο Παπαδόπουλο Καθηγητή (Μέλος) και κ. Γρηγόριο Καλύβα, Επίκουρο Καθηγητή (Μέλος). Η διατριβή αυτή, αποτελεί μέρος της γενικότερης ερευνητικής δραστηριότητας του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Εφαρμογών, στην περιοχή των Κατανεμημένων Αυτό-οργανούμενων Ασύρματων Δικτύων με Απαιτήσεις Λειτουργίας Πραγματικού Χρόνου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή για την υποστήριξη και συμπαράσταση της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Σταύρο Κουμπιά, Διευθυντή του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Εφαρμογών, επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής, για την εμπιστοσύνη, αμέριστη συμπαράσταση και συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε, από την πρώτη στιγμή ως μεταπτυχιακό φοιτητή μέχρι και το πέρας εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Η καθοδήγηση και οι παρεμβάσεις του σε κρίσιμα σημεία της διατριβής, μου έδωσαν την ευκαιρία να ασχοληθώ με μια ιδιαίτερα ενεργή και ταχέως αναπτυσσόμενη ερευνητική περιοχή και να οδηγηθώ στην εξαγωγή χρήσιμων και αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων στον εν λόγω ερευνητικό χώρο. Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντική ήταν η δυνατότητα που μου έδωσε να απασχοληθώ σε ερευνητικά προγράμματα IST/ICT της Ευρωπαϊκής Ένωσης* και Εθνικά**, σε συναφή περιοχή με το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής, γεγονός που μου έδωσε πολύτιμες επειρίες, γνώσεις και ερεθίσματα.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαδόπουλο τ. Διευθυντή του Εργαστηρίου, για την εμπιστοσύνη, υποστήριξη και ηθική συμπαράσταση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής καθώς και για τις ιδιαίτερα χρήσιμες υποδείξεις, παρατηρήσεις και συμβουλές του σε σημαντικά σημεία της εργασίας. Τέλος οι ευκαιρίες που μου έδωσε για ενασχόληση σε ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα* ήταν καταλυτικής σημασίας για την εξέλιξη και πορεία της διατριβής.

Ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γρηγόριο Καλύβα για το ενδιαφέρον, και υποστήριξη που μου έδειξε, καθώς επίσης και για τις σημαντικές συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους και συναδέλφους που ήταν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα για την υποστήριξη, ενθάρρυνση και βοήθειά τους μέχρι και τη συγγραφή του κειμένου αυτού.

Χρήστος Π. Αντωνόπουλος
Πάτρα, Μάρτιος 2008

* IST project LOCCATEC (LOW Cost CATstrophic Event Capturing, IST-2000-29401)

IST project uSWN (Solving Major Problems in MicroSensorial Wireless Networks, IST-2006-034642)

** ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ: Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στα Πανεπιστήμια (ΕΕΟΠ) - Μελέτη, σχεδίαση και ανάπτυξη ολοκληρωμένων κατακευκτωμένων συστημάτων πραγματικού χρόνου αποτελούμενων από ετερογενή δίκτυα επικοινωνίας υβριδικής φύσης (ενσύρματα και ασύρματα)

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κατά την περίοδο Μάρτιος 2002 – Μάρτιος 2008. Η διατριβή αυτή, αποτελεί μέρος της γενικότερης ερευνητικής δραστηριότητας του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Εφαρμογών στην Περιοχή των Κατανεμημένων Αυτό-οργανώμενων Ασύρματων Δικτύων με Απαιτήσεις Λειτουργίας Πραγματικού Χρόνου.

Το αντικείμενο της διατριβής αυτής είναι η μελέτη της διαστρωματικής (cross-layer) προσέγγισης ανάπτυξης ασύρματων δικτύων κατανεμημένης λειτουργίας με απαιτήσεις επικοινωνίας πραγματικού χρόνου και περιορισμένους διαθέσιμους πόρους. Επιπλέον βασικό στόχο αποτελεί και η σχεδίαση, πρόταση αντίστοιχης αρχιτεκτονικής η οποία στοχεύει στη βέλτιστη διαχείριση διαθεσίμων δικτυακών πόρων σε καταστάσεις συμφόρησης του δικτύου και κατά συνέπεια στην βελτίωση της απόδοσης αυτού. Τόσο μέσα από μελέτες στα πλαίσια της διατριβής αναδεικνύεται η σημασία του φαινομένου συμφόρησης ως κύριος παράγοντας σπατάλης δικτυακών πόρων καθώς και οδήγησης του δικτύου σε κατάσταση κορεσμού με αρνητική επίπτωση σε όλες τις παραμέτρους απόδοσης του δικτύου. Στόχος, λοιπόν, της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι η αποφυγή του φαινομένου συμφόρησης έτσι ώστε το δίκτυο να οδηγείται δυναμικά σε ένα σταθερό σημείο απόδοσης (όσο αυτό είναι δυνατό) το οποίο θα επιτρέπει στο δίκτυο να αποδίδει όσο το δυνατόν καλύτερα αποφεύγοντας τη ίδια στιγμή άσκοπη σπατάλη πόρων. Βασική παράμετρος στη σχεδίαση αποτελεί η συμβατότητα τόσο ως προς σημαντικό εύρος διαθέσιμων πρωτοκόλλων σε διάφορα επίπεδο όσο ως προς τη δυνατότητα συνύπαρξης κόμβων που ενσωματώνουν την προτεινόμενη αρχιτεκτονική με κόμβους χωρίς αυτήν.

Σε επίπεδο χρήστη τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς χαρακτηρίζονται από το μεγάλο εύρος εφαρμογών που καλούνται να υποστηρίξουν. Ήχος, εικόνα, video, best-effort κίνησης (π.χ. internet) και ανταλλαγή πάσης φύσεως δεδομένων συνοδεύονται από όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις τόσο σε επίπεδο απόδοσης δικτύου αλλά πλέον και διαχείρισης διαθεσίμων πόρων. Από την άλλη όμως από την πλευρά του υλικού οι διαθέσιμοι πόροι όλο και περιορίζονται. Συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές χειρός είναι απαραίτητο να συνοδεύονται από δυνατότητες ασύρματης δικτύων για να είναι ανταγωνιστικές. Το χαρακτηριστικό των περιορισμένων πόρων είναι ακόμα πιο έντονο στα δίκτυα αισθητήρων. Με επεξεργαστική δύναμη λίγων MHz, μνήμη λίγων Kbyte και ελάχιστη διαθέσιμη ενέργεια καλούνται να υποστηρίξουν απαιτητικές εφαρμογές όπως tracking και monitoring για πολύ μεγάλα διαστήματα. Είναι σαφές ότι κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει παρά με βέλτιστη διαχείριση πόρων και ελαχιστοποίηση της σπατάλης αυτών.

Στην προσπάθεια ικανοποίησης των απαιτήσεων αυτών γίνεται συνεχώς και περισσότερο αποδεκτό ότι η κλασσική ανά OSI/ISO επίπεδο ανάπτυξη αποτελεί

τροχοπέδη. Ο κύριος λόγος είναι ότι με βάση τη προσέγγιση αυτή χάνεται σημαντική πληροφορία σχετική με την αλληλεπίδραση /αλληλεξάρτηση που υπάρχει μεταξύ της λειτουργίας των διαφόρων επιπέδων. Αντίθετα η cross-layer προσέγγιση εστιάζει στο εντοπισμό των αλληλεπιδράσεων μεταξύ επιπέδων του δικτυακού σωρού και εκμετάλλευση αυτών. Επιπλέον με αυτό τον τρόπο η εστίαση γίνεται στην απόδοση ολόκληρου του δικτύου, το οποίο είναι και το σημαντικό τελικά για τον χρήστη, και όχι στη απόδοση μόνο ενός απομονωμένου επιπέδου το οποίο πολλές φορές οδηγεί σε παραπλανητικά συμπεράσματα. Εντούτοις, και η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν είναι χωρίς κινδύνους και δυσκολίες. Έτσι λοιπόν, η χωρίς προσοχή σχεδίαση μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση της ανά OSI/ISO διαστρωμάτωσης το οποίο σημαίνει κατάργηση της ανοικτότητας που αυτή εξασφαλίζει. Επιπλέον, είναι γενικά αποδεκτό ότι όταν στοχεύουμε σε μελέτη μεσαίας και μεγάλης κλίμακας ασύρματων δικτύων σε επίπεδο συστήματος η οδός της αναλυτικής μελέτης είναι ιδιαίτερα δύσκολη και πιθανόν χωρίς ιδιαίτερα οφέλη. Το χαρακτηριστικό αυτό ενισχύεται ακόμα περισσότερο στην περίπτωση της cross-layer ανάπτυξης στην οποία η πολυπλοκότητα και οι πιθανοί παράμετροι αυξάνονται σημαντικά.

Η αρχιτεκτονική που σχεδιάστηκε στα πλαίσια της διατριβής ακολουθεί τη προσέγγιση ανάπτυξης ενός πλαισίου το οποίο να είναι απόλυτα συμβατό με το ήδη υπάρχον δικτυακό σωρό. Η λειτουργική συμπεριφορά αναλύθηκε εκτενώς όπως κάθε παράμετρος και λειτουργική κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υλοποιήθηκε στα πλαίσια ενός ιδιαίτερα διαδεδομένου και ευρέως χρησιμοποιούμενου εξομοίωση δικτύων επιπέδου συστήματος (NS2). Χρησιμοποιώντας το εργαλείο αυτό και μετά από μεγάλο αριθμό πειραμάτων καταδεικνύεται ότι όντως η προσέγγιση κατάφερε να ελέγξει τη συμπεριφορά του δικτύου αποφεύγοντας τα φαινόμενα συμφόρησης. Αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς ήταν ότι από τη μια για απαιτητικές επικοινωνίες συνθήκες η καθυστέρηση διατηρήθηκε σε επίπεδο χωρίς συμφόρησης καθώς μειώθηκαν οι απώλειες πακέτων και οι ουρές πακέτων σε κάθε κόμβο δεν γέμιζαν. Επίσης σημαντική ήταν η εξοικονόμηση σε κατανάλωση ενέργειας οφειλόμενη σε επικοινωνιακές λειτουργίες. Τέλος σημαντικά ήταν και τα οφέλη σε μείωση χαμένων πακέτων καθώς όπως είναι εύκολα κατανοητό κάθε επικοινωνιακό φορτίο πάνω από το όριο συμφόρησης κατά μεγάλο ποσοστό χάνεται σε συγκρούσεις και υπερχειλίση ουρών πακέτων. Εντούτοις, πιθανό κόστος παρατηρήθηκε από τη χρήση της αρχιτεκτονικής σε επίπεδο μείωσης του μετρούμενου throughput και σε μερικές περιπτώσεις οδήγηση του δικτύου σε πιο ασταθή συμπεριφορά.

Όπως αναφέρθηκε για την ανάπτυξη και αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής αλλά και γενικότερα διεξαγωγή ερευνητικής δουλειάς στα πλαίσια της διατριβής βασιστήκαμε στον επιπέδου συστήματος εξομοιωτή δικτύων διακριτών γεγονότων NS2. Για το λόγω αυτό ανάπτυξη χρειάστηκε στην γλώσσα προγραμματισμού C/C++ και στις γλώσσες script TCL και AWK.

ABSTRACT

This dissertation has been carried in the Applied Electronics Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Patras, during the period March 2002- March 2008. It is part of a wide research activity in the field of Distributed, Ad-Hoc Wireless Network under Real-time constraints.

The objective of this dissertation is to study cross-layer approach for designing and developing wireless Ad-Hoc networks under real-time constraints and strict limitations of available resources. In this context the main goal is to propose and design a respective framework architecture focusing on optimum resource management in congestion scenarios and therefore increase network performance. Both through research undertaken in this dissertation as well by other relative research efforts congestion development in a network rises as the main factor leading to resource waste and performance degradation. Thus the proposed design aims in congestion avoidance by dynamically leading the network to a steady functional state (as that is possible) allowing the network to operate as optimally as possible with minimization of resource waste. Main concern in this effort has been comparability support, concerning both the assumed protocols used in various layer and coexistence of architecture compliant and not compliant nodes.

At user level contemporary next generation wireless network are characterized by the wide variety of application they are called to support. Audio, image, video, background traffic and all kind of data exchange are accompanied by ever increasing demands concerning both network performance and optimum resource management. On the other hand at hardware level the limitations of available resources are also continuously increasing. Wireless interfaces are nowadays mandatory to all devices such as wireless phones and PDAs in order to be competitive. The feature of strict resources is even more emphasized in the case of sensor networks. Nodes incorporating CPU of few MHz, RAM of few Kbytes and moderate available energy supply must support demanding applications such as monitoring and tracking for extensive timer periods. It is, therefore, easily understood that meeting these demands are only possible through optimal resource management and minimization of resource waste.

Nowadays it is accepted that the well known OSI/ISO layered approach of network stack constitutes a main bottleneck in designing next generation wireless networks. The main reason is that through this approach a lot of information regarding layer interaction and inter-dependencies is not considered. Even more, in this way the performance evaluation is focused solely on a specific layer and not considering the effect on the system level network, leading to misleading conclusions. However, cross-layer approach is not without dangers and challenges. Indeed an importance concern is not to invalidate the layered structure of the OSI/ISO model to such a degree the openness and compatibility is provided it is also invalidated. Furthermore,

it complicates the already complex process of analytical study. As it is generally accepted when focusing on system level analysis of a medium to large scale network topology analytical study is extremely difficult and probably with no significant contribution. This effort complexity is significantly increased when considering cross-layer approach since the parameters and degree of freedom are increased.

The architecture designed in the context of this dissertation follows the framework approach so as to be as compatible as possible with the already existing network stack. Algorithms involved in this framework and functional analysis of the framework is presented in detail along with all important parameters influencing the framework performance. The propose architecture is implemented in the context of a well know and widely used system level network simulator (NS2). Evaluation was conducted by undertaking an extensive number of simulations varying all critical network parameters, indicating that proposed architecture manages to avoid congestion development in most of the cases considered. A main result of this behavior is that network was successfully control and mean delay measured was retained in levels measured in cases without congestion since collisions were significantly reduces and packet queues not filled up. Additionally significant was the reduction on energy consumption attributed to communicational duties. Finally, of important benefits were indicated concerning the data loss, which is easily understood if considered that almost all excessive traffic loads to the traffic leading to congestion result to packet collisions, packet losses and queue overflow. However, as indicated in various cases, and depending upon specific network parameter choices, a cost is paid in the form of reduced mean throughput and in some cases of unstable network performance.

As indicated earlier the development and evaluation of the proposed architecture as well as all related to the dissertation research was undertaken based on the discrete event based, system level network simulator NS2. For this reason development was required using the C/C++ programming language and the script languages TCL and AWK.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
Περιεχόμενα	13
1. Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα	16
1.1. Εισαγωγή	16
1.1.1. Δίκτυα κινητών επικοινωνιών (Cellular)	16
1.1.2. Ασύρματα δίκτυα ευρείας ή μητροπολιτικής περιοχής (WAN/MANs) ..	17
1.1.3. Τοπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless Local Area Networks)	18
1.1.4. Προσωπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless Personal Area Networks)	18
1.1.5. Αυτό-οργανώμενα Ασύρματα δίκτυα (wireless autonomous networks) .	19
1.2. Αντικείμενο – Οργάνωση Διατριβής	21
2. Κεφάλαιο 2: Ανάλυση των Ad-Hoc ασύρματων δικτύων	24
2.1. Εισαγωγή	24
2.2. Εφαρμογές ασύρματων Ad-Hoc δικτύων	25
2.3. Βασικές παράμετροι ανάπτυξης ασύρματων Ad-Hoc δικτύων	28
2.3.1. Κατανάλωση Ενέργειας	29
2.3.2. Σθεναρή κατανεμημένη λειτουργία	30
2.3.3. Αποδοτική διαχείριση πόρων	30
2.3.4. Διαστρωματική αλληλεπίδραση (Cross-layer interaction)	30
2.3.5. Διαφοροποίηση ποιότητας παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS)	31
2.3.6. Ασφάλεια	31
2.4. Βασικές δικτυακές παράμετροι προς εκτίμηση της απόδοσης αυτών	32
2.4.1. Δικτυακό περιβάλλον αξιολόγησης	32
2.4.1.1. Μέγεθος δικτύου	32
2.4.1.2. Τοπολογία	33
2.4.1.3. Κινητικότητα κόμβων	33
2.4.1.4. Χαρακτηριστικά εισερχόμενης κίνησης	34
2.4.1.5. Πλήθος ροών δεδομένων (data flows)	35
2.4.1.6. Τοπολογία των ροών δεδομένων (data flows)	35
2.4.2. Κριτήρια αξιολόγησης της απόδοσης ad-hoc δικτύων	35
2.4.2.1. Καθυστέρηση (Delay)	36
2.4.2.2. Κατανάλωση ενέργειας (Power Consumption)	37
2.4.2.3. Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας (Power Consumption	
Distribution)	37
2.4.2.4. Ποσοστό χαμένων πακέτων (Packet loss ratio)	38
2.4.2.5. Ρυθμός Μετάδοσης (Throughput)	38
2.4.2.6. Ποιότητα Υπηρεσιών	39
2.5. Εργαλεία/Περιβάλλοντα/Πλατφόρμες ανάπτυξης ad-hoc δικτύων	39
2.5.1. Εξομοιωτές ασύρματων ad-hoc δικτύων	40
2.5.1.1. Network Simulator 2 (NS2)	40
2.5.1.2. OPNET	43

2.5.2.	Πλατφόρμες ανάπτυξης ασύρματων ad-hoc δικτύων	43
2.5.2.1.	Berkley MOTES	43
2.5.2.2.	tMoteSky	43
2.5.2.3.	ScatterWeb	44
2.6.	Ανακεφαλαίωση	44
3.	Κεφάλαιο 3: Η Δικτυακή Δομή των Ασύρματων Ad-Hoc Δικτύων	46
3.1.	Εισαγωγή	46
3.2.	Η επιλογή του πρωτοκόλλου IP στο επίπεδο δικτύου	47
3.3.	Η επιλογή του UDP σαν πρωτόκολλο μεταφοράς	47
3.4.	Το επίπεδο προσπέλασης μέσου για ασύρματα ad-hoc δίκτυα	49
3.4.1.	IEEE 802.11 protocol family	51
3.4.2.	802.15.4	57
3.4.3.	Συγκριτική μελέτη των πρωτοκόλων IEEE 802.15.4 και 802.11b εστιασμένη στην κατανεμημένη λειτουργία των Ad-Hoc δικτύων	58
3.5.	Το επίπεδο δρομολόγησης	62
3.5.1.	Κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης	63
3.5.1.1.	Proactive δρομολόγηση	63
3.5.1.2.	Reactive δρομολόγηση	64
3.5.1.3.	Υβριδικά πρωτόκολλα	64
3.5.2.	Ανάλυση βασικών αλγορίθμων δρομολόγησης	64
3.5.2.1.	DSR – Dynamic Source Routing	64
3.5.2.2.	AODV – Ad-hoc On-Demand Distance Vector Algorithm	67
3.6.	Ανακεφαλαίωση	68
4.	Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση της cross-layer προσέγγισης	69
4.1.	Εισαγωγή	69
4.2.	Οφέλη από την cross-layer προσέγγιση	70
4.2.1.	Βελτιστοποίηση σε συγκεκριμένο τομέα μπορεί να επιτευχθεί σε πολλαπλά επίπεδα.	70
4.2.2.	Η βελτιστοποίηση σε συγκεκριμένο τομέα από ένα συγκεκριμένο επίπεδο μπορεί να χρειάζεται τη συνεργασία άλλων επιπέδων για να αναδειχθεί..	70
4.2.3.	Ορθογωνιότητα μεταξύ βελτιστοποιήσεων	71
4.2.4.	Σε πολλές περιπτώσεις δεν χρειάζονται όλα τα επίπεδα του OSI/ISO μοντέλου.	72
4.3.	Μέθοδοι εφαρμογής της cross-layer προσέγγισης	73
4.4.	Προκλήσεις-Κίνδυνοι από την cross-layer σχεδίαση	76
4.4.1.	Διατήρηση της τμηματοποίησης	77
4.4.2.	Δυσκολία σχεδίασης	77
4.4.3.	Δυσκολία αναλυτικής μελέτης	78
4.5.	Μελέτη cross-layer χαρακτηριστικών ad-hoc ασύρματων δικτύων	78
4.5.1.	Μετρήσεις καθυστέρησης και επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων.	82
4.5.2.	Μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας και κατανομής καθυστερήσεων.	84
4.5.3.	Η επίδραση της κατανάλωσης ενέργειας στην συμπεριφορά του δικτύου.	87
4.6.	Παραδείγματα cross-layer αρχιτεκτονικών σε σχέση με την προτεινόμενη	90
4.6.1.	INSIGNIA [50]	90

4.6.2.	iMAQ [51]	93
4.6.3.	GRACE-1 [52]	95
4.6.4.	Cross-layer σχεδίαση βασισμένη σε on/off προγραμματισμό των κόμβων [99]	97
4.6.5.	Cross-layer σχεδίαση χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες [100]	98
4.7.	Ανακεφαλαίωση.....	100
5.	Κεφάλαιο 5: Αντιμετώπιση προβλήματος συμφόρησης καναλιού μέσω της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής	101
5.1.	Το Πρόβλημα του Ελέγχου Συμφόρησης (Congestion Control)	101
5.2.	Μελέτη του προβλήματος συμφόρησης σε πραγματική πλατφόρμα ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων	105
5.3.	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική	115
5.3.1.	Γενική περιγραφή - προδιαγραφές	115
5.3.2.	Λειτουργική – θεωρητική ανάλυση	119
5.3.3.	Θέση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στο ISO/OSI μοντέλο, σύνδεση – εξάρτηση με τα υπόλοιπα επίπεδα	123
5.3.4.	Αλγόριθμος διαχείρισης ρυθμού μετάδοσης	126
5.3.5.	Παράμετροι διαμόρφωσης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής	128
5.4.	Μελέτη πάνω στην απόρριψη πακέτων στα ad-hoc ασύρματα δίκτυα.....	129
5.4.1.	Επίδραση του ρυθμού μετάδοσης.....	132
5.4.2.	Επίδραση της συμφόρησης (congestion)	134
5.4.3.	Επίδραση πρωτοκόλλου δρομολόγησης	136
5.5.	Ανακεφαλαίωση.....	139
6.	Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής	141
6.1.	Εισαγωγή	141
6.2.	Παραμετροποίηση εξομοιώσεων	143
6.2.1.	Σταθερές Παράμετροι	143
6.2.2.	Μεταβαλλόμενες Παράμετροι	145
6.2.3.	Παράμετροι Αρχιτεκτονικής.....	147
6.2.4.	Μετρούμενα Μεγέθη	148
6.3.	Αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το AODV πρωτόκολλο δρομολόγησης.....	150
6.4.	Αποτελέσματα σε τοπολογίες με μη στατικούς κόμβους.	169
6.5.	Αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης σε στατική τοπολογία πλέγματος.....	176
6.6.	Ανακεφαλαίωση.....	184
7.	Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές Προεκτάσεις	186
7.1.	Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	186
7.2.	Μελλοντικές Κατευθύνσεις.	191
8.	Αναφορές	193

1. Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα

1.1.Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία τα δίκτυα επικοινωνιών αναμφίβολα έχουν παρουσιάσει μια αλματώδη εξέλιξη αλλά και ευρεία διάδοση στην καθημερινή μας ζωή, τόσο την επαγγελματική αλλά, πλέον, και τη προσωπική. Κινητήριοι μοχλός της πορείας αυτής αποτελεί η εντυπωσιακή διεύρυνση του διαδικτύου (INTERNET) σε μεγάλο μέρος του πληθυσμού παγκοσμίως μέσω των πολλών τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν πάνω του όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail), WEB, FTP και οι οποίες συνεχώς διευρύνονται με τη προσθήκη νέων π.χ. e-commerce, e-banking, e-gaming, VoIP κ.α. Ενώ όμως ο κύριος τρόπος πρόσβασης σε επικοινωνιακά δίκτυα εξακολουθεί να είναι το καλώδιο (χαλκός ή οπτική ίνα) τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική αύξηση του αριθμού χρηστών που απαιτεί εύκολη, ομοιόμορφη ακόμα και εν κινήσει πρόσβαση σε επικοινωνιακά δίκτυα ανεξάρτητα του τόπου (επαγγελματικός χώρος, σπίτι ή οπουδήποτε αλλού) και της κατάστασης (ακίνητος ή κινούμενος) στην οποία βρίσκεται. Η συνεχώς αυξανόμενη αυτή απαίτηση έχει δώσει ισχυρή ώθηση στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων εν γένει. Η πρώτη περίοδος ανάπτυξης ασύρματων δικτύων βασίστηκε στην προσέγγιση της ύπαρξης σαφώς καθορισμένης δικτυακής υποδομής πάνω στην οποία αναπτυσσόταν το ασύρματο δίκτυο. Η προσέγγιση αυτή προωθήθηκε πολύ με αποτέλεσμα σήμερα όλα τα υπάρχοντα, υλοποιημένα ασύρματα δίκτυα να βασίζονται σε αυτήν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι:

1.1.1. Δίκτυα κινητών επικοινωνιών (Cellular)

Αποτελεί ένα από τα πλέον γνωστά και ευρέως διαδεδομένα είδη ασύρματης επικοινωνίας στο κόσμο. Ξεκίνησε με προδιαγραφές μετάδοσης φωνής και δεδομένων με πολύ μικρές απαιτήσεις (γραφτά μηνύματα) για να φτάσει σήμερα με τη κινητή τηλεφωνία 4^{ης} γενιάς να υποστηρίζει media streaming όπως μετάδοση

τηλεοπτικών προγραμμάτων, video κλήσης κ.α. με συσκευές σχετικά μικρού μεγέθους, η λειτουργία των οποίων βασίζεται σε μπαταρία. Επίσης είναι γνωστά σαν κυψελιδικά συστήματα καθώς ο χώρος χωρίζεται σε κυψέλες Σχήμα 1- 1.

Σχήμα 1- 1. Κυψελιδικό δίκτυο

1.1.2. Ασύρματα δίκτυα ευρείας ή μητροπολιτικής περιοχής (WAN/MANs)

Πρόκειται για ασύρματα δίκτυα τα οποία αναπτύσσονται και παρέχουν κάλυψη σε περιοχές με ακτίνα αρκετών χιλιομέτρων. Με υψηλές ταχύτητες για τα δεδομένα ασύρματων δικτύων κύριο σκοπό έχουν να “παίξουν” το ρόλο δικτύων κορμού στις «άκρες» του οποίου θα υλοποιούνται ασύρματα δίκτυα μικρότερης εμβέλειας. Δεν έχουν τύχει ιδιαίτερης ανάπτυξης αν και αυτό προβλέπεται να αλλάξει στο άμεσο μέλλον ειδικά με την ανάπτυξη εξειδικευμένων πρωτοκόλλων με στόχευση στη περιοχή αυτή όπως το IEEE 802.16. Σχήμα 1- 2

Σχήμα 1- 2. Μητροπολιτικό δίκτυο

1.1.3. Τοπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless Local Area Networks)

Μετά τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελεί το πιο διαδεδομένο είδος ασύρματων δικτύων. Με περιοχές κάλυψης με ακτίνα λίγες εκατοντάδες μέτρα και ιδιαίτερα μεγάλο εύρος διαθέσιμων ταχυτήτων (από 2 έως 54 Mbps έστω και θεωρητικά) μπορούν να καλύψουν ένα πολύ μεγάλο μέρος εφαρμογών που μπορεί να απαιτήσει ένας χρήστης ασύρματων δικτύων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την πολύ εύκολη εγκατάσταση και διαχείριση αυτών τα καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλή. Για το λόγο αυτό πλέον μπορούμε να τα συναντήσουμε παντού, σε οικιακά ιδιωτικά δίκτυα, σε επαγγελματικούς χώρους (συνήθως ιδιωτικούς) αλλά και σε δημόσιους χώρους (αεροδρόμια, πλατείες, καταστήματα) όπου είναι τα γνωστά WiFi hot spots. Βασικός παράγοντας της διάδοσης αυτών είναι ο καθορισμός κοινά αποδεκτών προτύπων τα οποία δίνουν τη δυνατότητα απρόσκοπτης συνεργασίας εξοπλισμού προερχόμενου από διαφορετικούς κατασκευαστές. Τα τοπικά ασύρματα δίκτυα είναι συνήθως κεντριοποιημένης δομής, δηλαδή υπάρχει κάποιος σταθμός βάσης (base station ή access point – AP) ο οποίος αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει όλες τις επικοινωνίες μεταξύ των κόμβων και να διαχειριστεί το δίκτυο. Σχήμα 1- 3

1.1.4. Προσωπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless Personal Area Networks)

Ασύρματα δίκτυα παρόμοιας λογικής με τα LAN με περιορισμένη εμβέλεια (~10 μέτρα). Κύριος σκοπός τους η διασύνδεση διαφόρων συσκευών στην ακτίνα αυτή (printers, mouse, keyboard, handsfree κ.α.) με μικρές απαιτήσεις εύρους ζώνης (~1 Mbps). Γνωστά παραδείγματα τέτοιων δικτύων αποτελούν το Bluetooth και το 802.15.4. Άξια αναφοράς είναι μια νέα και ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία η οποία υπόσχεται μεγάλες ταχύτητες σε ανάλογες αποστάσεις με το όνομα UWB – Ultra Wide Band. Σχήμα 1- 4

Σχήμα 1- 3. Ασύρματο τοπικό δίκτυο

Σχήμα 1- 4. Ασύρματο προσωπικό δίκτυο

1.1.5. Αυτό-οργανώμενα Ασύρματα δίκτυα (wireless autonomous networks)

Παρά ταύτα τα τελευταία χρόνια έντονο ενδιαφέρον και δραστηριότητα (τόσο ερευνητικό αλλά και εμπορικό) έχει εστιαστεί σε μια άλλη προσέγγιση σχεδιασμού και υλοποίησης ασύρματων δικτύων. Το κύριο σημείο διαφοροποίησης από την παραπάνω είναι η απομάκρυνση έως και η παντελής έλλειψη σαφούς, προϋπάρχουσας δικτυακής υποδομής. Στην διεθνή βιβλιογραφία τα δίκτυα που ακολουθούν τη προσέγγιση αυτή είναι γνωστά ως Wireless Mobile Ad Hoc Networks. Τα δίκτυα αυτά, όπως θα φανεί και κατά την παρουσίαση και ανάλυσή

τους ανοίγουν νέους δρόμους και εφαρμογές στην ασύρματη επικοινωνία προσφέροντας ιδιαίτερα ελκυστικά χαρακτηριστικά. Παράλληλα όμως εισάγουν νέα δύσκολα στην επίλυση προβλήματα η αποτελεσματική αντιμετώπιση των οποίων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εξέλιξη και διάδοσή τους. Τα παραπάνω δεδομένα είναι οι λόγοι που ο χώρος των ad-hoc wireless δικτύων είναι από τις πιο ενεργές ερευνητικές περιοχές τα τελευταία χρόνια και δικαιολογούν γιατί η παρούσα διατριβή βασίστηκε στη περιοχή αυτή.

Παραδείγματα δικτύων που ακολουθούν τη προσέγγιση αυτή είναι:

- Κινητά ad-hoc δίκτυα (MANETs)

Τα δίκτυα αυτά είναι αντίστοιχης εμβέλειας με τα WLAN και προσφέρουν αντίστοιχη απόδοση. Δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου σταθμού βάσης, access point ή οποιασδήποτε άλλης ρυθμιστικής οντότητας για την εγκατάσταση και λειτουργία του δικτύου. Κάθε κόμβος δύναται να παίξει το ρόλο του δρομολογητή πακέτων. Οι αλγόριθμοι είναι πλήρως καταναμεημένοι ενώ το περιβάλλον και η τοπολογία του δικτύου είναι εξαιρετικά δυναμικά. Οι πρώτες εφαρμογές που χρησιμοποίησαν τέτοιου είδους δίκτυα ήταν στρατιωτικές. Εντούτοις τα τελευταία χρόνια και πολιτικές εφαρμογές κάνουν έντονη τη παρουσία τους για τέτοια δίκτυα, γεγονός ιδιαίτερα αισιόδοξο για την διάδοση/εξέλιξη των δικτύων αυτών. Άξιο αναφοράς και ενδεικτικό της σημασίας των δικτύων αυτών είναι ότι το IEEE 802.11 πρωτόκολλο πάνω στο οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη των WLAN υποστηρίζει ad-hoc τρόπο λειτουργίας. Σχήμα 1- 5

Σχήμα 1- 5. Ασύρματο Ad-Hoc δίκτυο

- Δίκτυα αισθητήρων (**Sensor Networks**)

Αποτελούν την πιο πολλά υποσχόμενη περιοχή και εφαρμογή των ad-hoc δικτύων. Κύρια χαρακτηριστικά είναι το μεγάλο έως πολύ μεγάλο πλήθος υποστηριζόμενων κόμβων, το μικρό μέγεθος των κόμβων, οι εξαιρετικά μικροί διαθέσιμοι πόροι (ενέργεια, επεξεργαστική ισχύς, μνήμη) αλλά και η σχετικά μικρή αναμενόμενη κινητικότητα των κόμβων. Το πλήθος πιθανών σεναρίων εφαρμογής των δικτύων αυτών είναι ιδιαίτερα μεγάλο αν και σχεδόν πάντα έχει το κοινό χαρακτηριστικό της συγκέντρωσης πληροφοριών σε ένα κεντρικό σημείο του δικτύου. Σχήμα 1- 6

Σχήμα 1- 6. Δίκτυο αισθητήρων

1.2. Αντικείμενο – Οργάνωση Διατριβής

Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν το παρόν και σίγουρα το μέλλον της διαδικτύωσης υπό οποιαδήποτε μορφή. Τόσο ερευνητικά όσο και εμπορικά αλλά και βιομηχανικά, στο άμεσο μέλλον κυρίως, προσφέρουν σημαντικότερα πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να αγνοηθούν ή να αντιμετωπιστούν από τα ενσύρματα δίκτυα. Παράλληλα όλα τα παραδοσιακά πλεονεκτήματα των ενσύρματων δικτύων καταρρίπτονται το ένα μετά το άλλο. Το παρεχόμενο εύρος καναλιού πλέον είναι επαρκές για τις περισσότερες δυνατές εφαρμογές. Η δυνατότητα ικανοποίησης επικοινωνιών με χρονικούς περιορισμούς εξελίσσεται συνεχώς και έχει φτάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα επίσης για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η σημαντική διαφοροποίηση στον

τομέα αυτό έχει να κάνει με την επικοινωνία αυστηρού και ελαστικού πραγματικού χρόνου. Επικοινωνία αυστηρού πραγματικού χρόνου έχουμε όταν υπάρχει εγγύηση ότι κανένα πακέτο δεν πρόκειται να ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή καθυστέρησης μετάδοσης ενώ στον ελαστικό πραγματικό χρόνο γίνεται ανεκτό να ξεπεραστεί η τιμή αυτή από ένα συγκεκριμένο ποσοστό πακέτων. Στην πρώτη κατηγορία, η οποία συνήθως χαρακτηρίζει βιομηχανικές εφαρμογές, είναι γεγονός ότι τα ασύρματα δίκτυα λόγω των δυναμικών χαρακτηριστικών λειτουργίας δεν μπορούν να ανταποκριθούν το ίδιο αποτελεσματικά με τα ενσύρματα. Στην δεύτερη όμως που χαρακτηρίζει τη συντριπτική πλειοψηφία των καθημερινών εφαρμογών τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά. Επιπλέον δυνατότητες που μερικά χρόνια πριν δεν είχαν κανένα ενδιαφέρον για ασύρματα δίκτυα όπως ποιότητα υπηρεσίας αποτελούν πλέον θέματα κλειδιά στην έρευνα και το εμπόριο.

Στα πλαίσια των ασύρματων δικτύων μια άλλη υποκατηγορία φαίνεται ότι συγκεντρώνει έντονο ενδιαφέρον. Αυτή είναι η κατηγορία των ad-hoc δικτύων. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους όπως δυνατότητα αυτό-οργάνωσης, αυτόνομης λειτουργίας, εύκολης εγκατάστασης ακόμα και σε αντίξοα περιβάλλοντα κ.α. όπως αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο τους δίνουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υπόλοιπων ασύρματων δικτύων.

Παράλληλα, όμως, με την ευρεία διάδοση τους και την ανάπτυξη που έχουν συναντήσει καθίσταται σαφές ότι οι κλασσικές μέθοδοι σχεδίασης και ανάπτυξης δικτύων υιοθετημένες από τα αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα δεν επαρκούν πλέον για να αναδειχθούν οι πραγματικές δυνατότητες των ασύρματων δικτύων. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτών, και ιδιαιτέρως των ad-hoc, καθώς και οι δυναμική συμπεριφορά τους αναδεικνύουν σαν σημαντικό βήμα την ανάπτυξη και χρησιμοποίηση νέων τεχνικών σχεδίασης κατάλληλων αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων. Μια τέτοια τεχνική και ίσως η πιο πολλά υποσχόμενη είναι η cross-layer προσέγγιση. Η τεχνική αυτή επεκτείνει την αντίληψη του OSI/ISO μοντέλου που θέλει το δικτυακό σωρό αυστηρά τεμαχισμένο σε επίπεδα λαμβάνοντας υπ' όψη την αναπόφευκτη αλληλεπίδραση και εξάρτηση. Αξιολόγηση και μελέτη της τεχνικής αυτής παρουσιάζεται στα πλαίσια της διατριβής.

Με βάση λοιπόν την τεχνική αυτή προτείνεται μια αρχιτεκτονική που σκοπό έχει την αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου συμφόρησης στα πλαίσια ενός ad-hoc δικτύου. Παράλληλα σκοπός είναι να αποτελέσει τη βάση και για άλλες σχεδιάσεις που θα αποσκοπούν στη λύση εξίσου σημαντικών και απαιτητικών προβλημάτων

όπως εξισορρόπηση επικοινωνιακού φορτίου (load balancing) και ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Η σχεδίαση αυτή υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα ευρέως διαδεδομένο εξομοιωτικό περιβάλλον στο οποίο και γίνεται εκτενής αξιολόγηση αυτής.

Η διάρθρωση της διατριβής έχει ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται πλήρης και σφαιρική παρουσίαση και μελέτη του χώρου των ad-hoc δικτύων.

Εμβαθύνοντας στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς όλα τα κρίσιμα επίπεδα του OSI/ISO μοντέλου στα πλαίσια των ad-hoc δικτύων μαζί με σχετικές συγκρίσεις τεχνολογιών που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας και περιλαμβάνονται στις συνεισφορές της διατριβής .

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνική ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Αναλύονται όλες οι πλευρές αυτής και τεκμηριώνεται η αξία αυτής καθώς και τα πιθανά οφέλη της καθώς και πιθανές δυσκολίες. Στις συνεισφορές του κεφαλαίου εκτός από την αναλυτική παρουσίαση της cross-layer προσέγγισης περιλαμβάνεται και εκτενής μελέτη με στόχο την ανάδειξη αλληλεξαρτήσεων μεταξύ επιπέδων και γενικότερα δικτυακών παραμέτρων τα αποτελέσματα της οποίας επηρέασαν σημαντικά την εξέλιξη της διατριβής.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, η οποία αποτελεί και την κύρια συνεισφορά της διατριβής.. Στα πλαίσια της παρουσίασης αυτής αναλύονται οι βασικές αρχές και τα χαρακτηριστικά της σχεδίασης. Επίσης γίνεται μια λειτουργική-θεωρητική ανάλυση και αξιολόγησης της αρχιτεκτονικής. Τέλος το πρόβλημα ανάπτυξης συνθηκών συμφόρησης επίσης περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό καθώς είναι και το αντικείμενο της σχεδίασης.

Η βασική αξιολόγηση γίνεται μέσω του μοντέλου που ανεπτύχθη στα πλαίσια γνωστού εξομοιωτικού περιβάλλοντος και στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα – συμπεράσματα.

Τέλος στο 7^ο κεφάλαιο αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας που έγινε στα πλαίσια της διατριβής και προτείνονται ενδιαφέρουσες ερευνητικές προεκτάσεις της διατριβής.

2. Κεφάλαιο 2: Ανάλυση των Ad-Hoc ασύρματων δικτύων.

2.1.Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει μια σε βάθος ανάλυση των ασύρματων ad-hoc δικτύων. Βασικός στόχος είναι να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές πλευρές και προσεγγίσεις που αφορούν την έρευνα και ανάπτυξη των δικτύων αυτών. Η ανάλυση αυτή προέκυψε κυρίως από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής πολλά ήταν τα ερωτήματα που εμφανίστηκαν και οι περιοχές που ενέκυψαν και απαιτήσαν μελέτη και έρευνα γύρω από την ευρύτερη περιοχή των ασύρματων ad-hoc δικτύων.

Έτσι, λοιπόν, από τα πιο κρίσιμα ερωτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Ποιο είναι το πεδίο εφαρμογών στο οποίο μπορούν τα δίκτυα αυτά να συνεισφέρουν. Τι εφαρμογές υπάρχουν σήμερα αλλά και τι διαφαίνεται για το μέλλον τόσο στον ερευνητικό όσο και στον εμπορικό τομέα.
- Ποιες είναι οι βασικές παράμετροι και απαιτήσεις μιας επιτυχημένης αρχιτεκτονικής ενός τέτοιου δικτύου.
- Ποια κατεύθυνση θα έπρεπε να ακολουθήσει η διατριβή και με ποιους τομείς να ασχοληθεί πρωτίστως.
- Ποιες είναι οι βασικές παράμετροι των δικτύων με βάση τις οποίες θα εκτιμάται η απόδοση αυτών.
- Ποια θα έπρεπε να είναι τα μεγέθη αξιολόγησης της απόδοσης. Σίγουρα θα κληρονομηθούν αρκετά από τα κλασικά ασύρματα δίκτυα αλλά είναι αρκετά;
- Ποια τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτυακού περιβάλλοντος αξιολόγησης.
- Και φυσικά, τι περιβάλλοντα/πλατφόρμες υπάρχουν για ανάπτυξη αλγορίθμων και αρχιτεκτονικών για τέτοιου είδους δίκτυα.

Η αντιμετώπιση των ερωτημάτων αυτών έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην πορεία και εξέλιξη της διατριβής και παράλληλα οδήγησε σε μία, πιστεύουμε, βαθιά κατανόηση των θεμάτων που διέπουν τον χώρο των δικτύων αυτών.

2.2.Εφαρμογές ασύρματων Ad-Hoc δικτύων

Παραδοσιακά οι στρατιωτικές εφαρμογές αποτέλεσαν κύρια κινητήριο δύναμη στην εξέλιξη των ad-hoc δικτύων. Ο σύγχρονος στρατιώτης κατάλληλα εξοπλισμένος αποτελεί κόμβο ενός τεράστιου δικτύου ικανού να καλύψει, να δεχθεί εντολές και να στείλει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Επεκτείνοντας, η ύπαρξη των δικτύων αυτών δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης κινητών και ευέλικτων στρατηγείων σε κοντινή αλλά ασφαλή απόσταση τα οποία με πραγματικού χρόνου ενημέρωση θα μπορούν να τροποποιούν το σχέδιο μάχης και να ανατροφοδοτούν τους στρατιώτες με τα νέα δεδομένα. [1] .

Αλλα και το μελλοντικό πεδίο μαχών θα αποτελέσει πρόσφορο έδαφος για ευέλικτα, αυτό-οργανώμενα δίκτυα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αυτόνομοι κόμβοι όπως τα μη επανδρωμένα οχήματα εδάφους (Unmanned Ground Vehicles - UGVs) και τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (Unmanned Airborne Vehicles-UAVs). Παραδείγματα τέτοιων προσπαθειών αποτελούν τα οχήματα Predator και Global Hawk [4] τα οποία αναπτύσσονται στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και γρήγορα εντάσσονται σε επιχειρήσεις παρακολούθησης και αναγνώρισης.

Εντούτοις, όπως έχει αναγνωριστεί από πολλές πλευρές, προκειμένου η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων πραγματικά να απογειωθεί πρέπει να στοχεύει σε εμπορικές εφαρμογές που απασχολούν περισσότερη μάζα ανθρώπων με απώτερο σκοπό να προσελκύσει περισσότερο ερευνητικό δυναμικό παράλληλα με περισσότερη χρηματοδότηση. Από τις πρώτες εφαρμογές που εντάσσονται στην κατηγορία αυτή είναι η διαχείριση έκτακτων καταστάσεων λόγω φυσικών καταστροφών οφειλόμενων σε γεγονότα όπως φωτιά, σεισμοί, πλημμύρες, εκρήξεις κ.α. Στα πλαίσια αυτά βασίστηκε και ένα ερευνητικό, αναπτυξιακό πρόγραμμα χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση με το όνομα Loccatec η εμπλοκή μου στο οποίο αποτέλεσε βασικό ερέθισμα για την πορεία της διατριβής στο χώρο αυτό [5]. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή σκοπός ήταν να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία MANET με σκοπό την παροχή βοήθειας σε ομάδες διάσωσης που καταφτάνουν σε περιοχή όπου έχει υπάρξει κατεδάφιση κτιρίου. Στο Σχήμα 2- 1 φαίνεται η επικοινωνιακή δομή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος LOCCATEC.

Σχήμα 2- 1. Υλοποιημένη επικοινωνιακή δομή στα πλαίσια του προγράμματος LOCCATEC

Επίσης σημαντικό ερέθισμα αποτέλεσε και η επαφή μου με το Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα RFIELD BUS – IST – 1999 στόχος του οποίου ήταν η σχεδίαση και ανάπτυξη υψηλής απόδοσης ασυρμάτων δικτύων πεδίου βασισμένα στο EN50170 Profibus Standard. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού ορίστηκε η αρχιτεκτονική συστήματος για την υποστήριξη ασύρματης διασύνδεσης και κινητικότητας δικτυακών κόμβων σε ασύρματο περιβάλλον. Επιπλέον μελετήθηκαν και προτάθηκαν αλλαγές στο πρωτόκολλο με σκοπό την υποστήριξη συνδυασμού κίνησης αυστηρού και ελαστικού πραγματικού χρόνου [97], Σχήμα 1- 7.

Μια ακόμα περιοχή που έχει πολλά να επωφεληθεί από τα δίκτυα αυτά είναι αυτή της αγροτικής καλλιέργειας. Μια πολύ ενδιαφέρουσα τέτοια προσπάθεια δίδεται στην εργασία [6] όπου παρουσιάζεται η εφαρμογή τέτοιων δικτύων σε θερμοκήπιο ντομάτας.

Σχήμα 1- 7. Η αρχιτεκτονική δικτύου στην οποία στοχεύει το ερευνητικό πρόγραμμα RFIELD BUS

Μια ακόμα πολλά υποσχόμενη εφαρμογή είναι η ευκαιριακή, όπως ονομάζεται, ανάπτυξη δικτύων. Επαγγελματικοί χώροι ή χώροι πανεπιστημίου όπου η δυνατότητα γρήγορης ασύρματης δικτύωσης όλων των παρευρισκομένων πραγματικά θα έδινε άλλη διάσταση στην συνεργασία που θα μπορούσε να επιτευχθεί [1].

Σχήμα 1- 8. Κόμβοι δικτύου αισθητήρων με ένα μέρος των πιθανών χρηστών του.

Η άλλη μεγάλη κατηγορία εφαρμογών των δικτύων αυτών που αν και αναπτυσσόμενη ακόμα αναμένεται να δώσει αποφασιστική ώθηση είναι τα δίκτυα αισθητήρων (ad-hoc wireless sensor networks Σχήμα 1- 8). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων που τα διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα ad-hoc ασύρματα δίκτυα είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός των υποστηριζόμενων κόμβων, οι πολύ αυστηροί περιορισμοί στους διαθέσιμους πόρους των κόμβων (μνήμη, επεξεργαστής, διαθέσιμη ενέργεια κ.α.) καθώς και ο σαφής προσανατολισμός των εφαρμογών σε σενάρια λήψης μετρήσεων και αποστολή αυτών προς κάποια κεντρικά σημεία συλλογής παρά επεξεργασία και ενεργοποίηση από τους ίδιους τους κόμβους. Για του λόγου το αληθές θα παραθέσουμε μερικά από τα κυριότερα ευρωπαϊκά προγράμματα που χρηματοδοτούν την έρευνα αυτή καθώς και κάποιες από τις κυριότερες πλατφόρμες στη ανάπτυξη των οποίων η συμμετοχή μεγάλων ονομάτων του χώρου των υπολογιστών και των δικτύων αποτελούν βασικά εχέγγυα για το μέλλον.

- Το πρόγραμμα uSWN στο οποίο συμμετέχει και ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Εφαρμογών κύριος στόχος του οποίου είναι η έρευνα και υλοποίηση γενερικών και επαναχρησιμοποιούμενων λύσεων στη περιοχή των δικτύων αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα εστιάζοντας σε κοινές εφαρμογές όπως επίβλεψη χώρων, παρακολούθηση στόχων κ.α. [7]

- Το πρόγραμμα BISON (Biology-Inspired techniques for Self-Organization in dynamic Networks, IST-2001-38923) κύριο σκοπό έχει τη μελέτη εφαρμογής ιδεών προερχόμενων από τα πολύπλοκα προσαρμοζόμενα συστήματα (CAS – Complex Adaptive Systems) για τη δυνατότητα δημιουργίας σθεναρών, αυτοοργανώμενων πληροφοριακών συστημάτων σε δυναμικά περιβάλλοντα [8].
- Το πρόγραμμα WiSeNts (Wireless Sensor Networks) προσπαθεί να ορίσει και να συνενώσει τρεις φαινομενικά διαφορετικούς επιστημονικούς χώρους οι οποίοι όμως μοιράζονται όπως επισημαίνει κοινά σημεία με αποτέλεσμα η σύνδεση αυτών σε ένα κοινό σύστημα να είναι πολύ δελεαστική. Στους χώρους αυτούς συμπεριλαμβάνεται και η χρήση των ενσωματωμένων συστημάτων σαν συστήματα ελέγχου φυσικών διεργασιών καθώς επίσης και η συνεχώς αναπτυσσόμενη ιδέα των ενοποιημένων επικοινωνιακών δομών κα τέλος η ανάπτυξη ασύρματων δικτύων αισθητήρων [9].
- Το πρόγραμμα Eyes (Energy Efficient Sensor Networks) από την άλλη επικεντρώνεται στη μελέτη ενεργειακής απόδοσης κυρίως, αλγορίθμων κατανεμημένης επεξεργασίας δεδομένων και συνεργασίας των κόμβων, λαμβάνοντας υπόψη θέματα ασύρματης επικοινωνίας και κινητικότητας [10].

Η λίστα μπορεί να συνεχιστεί με πολλές και αξιόλογες ερευνητικές προσπάθειες. Αλλά αυτό που έχει σημασία είναι να γίνει σαφές από τα παραπάνω ότι η τεχνολογία των ασύρματων ad-hoc δικτύων έχει να προσφέρει σημαντικά οφέλη σε μια μεγάλη πληθώρα εφαρμογών τόσο σε εμπορικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.

2.3. Βασικές παράμετροι ανάπτυξης ασύρματων Ad-Hoc δικτύων.

Στο κομμάτι αυτό θα παρουσιάσουμε και θα αναλύσουμε μερικά από τα βασικότερα σημεία και παραμέτρους που θα πρέπει να απασχολήσουν οποιαδήποτε σχεδίαση και που θα πρέπει να είναι συνεχώς υπόψη του αντίστοιχου σχεδιαστή/ερευνητή. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο μιας σχεδίασης για τα δίκτυα αυτά καθώς καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο ανάπτυξης και τη στόχευση της αρχιτεκτονικής, αλλά και οι ίδιοι αλλάζουν και προσαρμόζονται κατά τη διάρκεια της

σχεδίασης και υλοποίησης. Η περιοχή των ασύρματων ad-hoc δικτύων είναι ιδιαίτερα ευρεία συμπεριλαμβάνοντας πολλούς επιμέρους ερευνητικούς τομείς. Αποτέλεσμα αυτού είναι το πλήθος των πιθανών παραμέτρων να είναι ιδιαίτερα μεγάλο και σε τέτοιο βαθμό όπου καμία σχεδίαση να μη δύναται να συμπεριλάβει εξ ολοκλήρου. Έτσι και η παρούσα διατριβή βασίστηκε σε ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες μαζί και με κάποιες επιπλέον πολύ σημαντικές θα παρουσιαστούν εδώ.

2.3.1. Κατανάλωση Ενέργειας

Είναι ίσως ο σημαντικότερος πόρος αλλά και περιορισμός την ίδια στιγμή για έναν κόμβο τέτοιου δικτύου. Ο περιορισμός αυτός προέρχεται από το γεγονός ότι κόμβοι ενός τέτοιου δικτύου τροφοδοτούνται από ηλεκτρικούς συσσωρευτές ή άλλους περιορισμένης χωρητικότητας ενεργειακούς πόρους η αντικατάσταση των οποίων ανάλογα και με την εφαρμογή μπορεί να είναι από πολύ δύσκολη έως αδύνατη. Μια άλλη πολύ σημαντική προσέγγιση της παραμέτρου αυτής είναι η επίδραση που έχει στην απόδοση και λειτουργία του δικτύου. Αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς η απενεργοποίηση ενός ή πολύ περισσότερο πολλών κόμβων λόγω ενεργειακής εξάντλησης είναι σαφές ότι αλλάζει την τοπολογία και τις επικοινωνιακές συνθήκες του δικτύου με τρόπο τέτοιο που να επηρεάζονται όλα τα μέτρα αξιολόγησης της απόδοσης του δικτύου.

Σε τυπικά ασύρματα δίκτυα υπάρχουν πολλαπλές ταυτόχρονες ροές δεδομένων οι οποίες εν γένει διασταυρώνονται και έτσι αλληλεπιδρούν η μια στην άλλη. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι να υπάρχουν κάποιοι κόμβοι οι οποίοι επιφορτίζονται με πολύ μεγαλύτερο φορτίο δρομολόγησης από τους υπόλοιπους. Η ενεργειακή εξάντληση ενός και ακόμα περισσότερο πολλών τέτοιων κόμβων έχει ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες στη διάρκεια ζωής του δικτύου. Η εξάντληση αυτή οδηγεί το δίκτυο σε μερική και τελικά σε ολική κατάρτιση. Μερική κατάρτιση έχουμε όταν το δίκτυο χωρίζεται σε τμήματα η επικοινωνία μεταξύ των οποίων μπορεί να γίνει μέσω πολύ λίγων κόμβων το οποίο οδηγεί σε απαράδεκτη απόδοση. Ολική κατάρτιση έχουμε όταν δεν υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των τμημάτων αυτών οπότε και το δίκτυο νεκρώνεται.

2.3.2. Σθεναρή κατανεμημένη λειτουργία.

Η απουσία κεντρικού ελέγχου και προϋπάρχουσας δικτυακής υποδομής καθιστά κρίσιμης σημασίας τη σχεδίαση και υλοποίηση αλγορίθμων οι οποίοι θα εκτελούνται σε κάθε κόμβο τοπικά θα εξασφαλίζουν την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του δικτύου μέσω της συνεργασίας των ισότιμων κόμβων. Το έργο αυτό είναι ιδιαίτερα απαιτητικό καθώς αφορά ένα πλήθος διαφορετικών αλγορίθμων (προσπέλασης , δρομολόγησης, ελέγχου μετάδοσης, διαχείρισης δικτύου κ.α.) οι οποίοι εκτελούνται ταυτόχρονα και σε ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος κόμβων.

2.3.3. Αποδοτική διαχείριση πόρων

Η συνεχής εξέλιξη των ad-hoc δικτύων οδηγεί σε όλο και αυξημένες απαιτήσεις από τους χρήστες. Έτσι λοιπόν σημερινές ή αυριανές εφαρμογές καλούνται να ανταποκριθούν σε όλο και περισσότερους ρόλους καλύπτοντας όλο και μεγαλύτερο φάσμα εφαρμογών και απαιτήσεων βασιζόμενοι σε πλατφόρμες με βασικό χαρακτηριστικό τους ιδιαίτερα περιορισμένους διαθέσιμους πόρους. Πέρα από την διαθέσιμη ενέργεια στους βασικούς διαθέσιμους πόρους ανήκουν η επεξεργαστική ισχύς, η διαθέσιμη μνήμη καθώς και τα ιδιαίτερα απλά και χαμηλών δυνατοτήτων λειτουργικά συστήματα.

Στους δικτυακούς πόρους που επίσης είναι κρίσιμης σημασίας κατατάσσονται οι περιορισμοί στο εύρος ζώνης και τη χωρητικότητα του δικτύου. Η διεκπεραιωτική ικανότητα που μπορεί να επιτευχθεί σε ασύρματες επικοινωνίες, είναι συνήθως αρκετά μικρότερη από το εύρος ζώνης του ασύρματου μέσου μετάδοσης λόγω της επίδρασης φαινομένων όπως η πολλαπλή πρόσβαση στο μέσο, ο θόρυβος, οι περιπτώσεις παρεμβολής κλπ. Ως συνέπεια της χαμηλής ως μέτριας χωρητικότητας του μέσου ή συμφόρηση στο δίκτυο θεωρείται ως φυσιολογική κατάσταση αντί για εξαίρεση, π.χ. το άθροισμα των απαιτήσεων των εφαρμογών πιθανότατα θα πλησιάζει ή θα υπερβαίνει την χωρητικότητα του δικτύου.

2.3.4. Διαστρωματική αλληλεπίδραση (Cross-layer interaction)

Αποτελεί τη σχεδιαστική προσέγγιση που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια και ίσως μονόδρομο για πραγματική βελτιστοποίηση στα δίκτυα που μας ενδιαφέρουν. Επίσης αποτελεί τη βάση, την κύρια σχεδιαστική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Ο όρος cross-layer interaction είναι πολύ δημοφιλής και χρησιμοποιείται σε πολλούς ερευνητικούς τομείς με πολλές και διαφορετικές

σημασίες. Στον χώρο των ασύρματων ad-hoc δικτύων είναι ο καλύτερος τρόπος να εκφραστεί το γεγονός ότι είναι πρακτικά αδύνατον να σχεδιαστεί μια καθολική δικτυακή δομή (network stack) η οποία θα λειτουργεί αποδοτικά σε κάθε περίπτωση και εφαρμογή χωρίς να λαμβάνει υπόψη της την αλληλεπίδραση και την αλληλεξάρτηση που υπάρχει μεταξύ των επιπέδων του δικτυακού σωρού (network stack).

2.3.5. Διαφοροποίηση ποιότητας παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS)

Αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα στοιχεία στα ad-hoc δίκτυα το οποίο κερδίζει συνεχώς έδαφος και πλέον αποτελεί βασική παράμετρο κάθε επιτυχημένης σχεδιαστικής προσπάθειας στα δίκτυα αυτά. Είναι απόρροια της τεχνολογικής εξέλιξης των δικτύων αλλά κυρίως της αλλαγής πορείας προς πιο εμπορικές εφαρμογές. Το δεύτερο στοιχείο έχει οδηγήσει στην κατακόρυφη αύξηση του πλήθους των εφαρμογών και ρόλων που καλούνται να παίξουν οι σύγχρονοι κόμβοι. Όλες αυτές οι εφαρμογές έρχονται με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις σε θέματα όπως διαμεταγωγή πακέτων, ποσοστό χαμένων πακέτων, ανεκτής καθυστέρησης, ανεκτής απόκλισης καθυστέρησης (jitter) κ.α. Είναι λοιπόν σαφές ότι για να χειριστεί ένας κόμβος όλες τις διαφορετικές εφαρμογές θα πρέπει να μπορεί να τις αντιμετωπίσει εξατομικευμένα και η διάθεση πόρων να γίνεται με διαφορετικό τρόπο πάντα σε σχέση με τους διαθέσιμους πόρους και την κατάσταση του καναλιού. Η δυνατότητα διαφοροποιημένης αντιμετώπισης των κινήσεων σε ένα τέτοιο δίκτυο υπάγονται κάτω από τον τίτλο “Ποιότητας Υπηρεσίας”. Επιπλέον η σχεδιαστική αυτή παράμετρος αφορά σχεδόν όλα τα επίπεδα της δικτυακής δομής έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί πλήρως.

2.3.6. Ασφάλεια

Αποτελεί μια από τις πιο παλιές και κλασσικές απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων. Εν αντιθέσει με τη φύση του ενσύρματου μέσου (χαλκός ή οπτική ίνα) το οποίο αποτελεί μια πρώτη και πολύ σημαντική ασπίδα σε εξωτερικές παρεμβολές και επιβουλές (ακούσιες ή εκούσιες) το ασύρματο μέσο δεν παρέχει καμία τέτοιου είδους προστασία. Το θέμα της ασφάλειας χωρίζεται συνήθως σε τρεις υποκατηγορίες.

Έτσι λοιπόν η πρώτη κατηγορία είναι οι **παρεμβολές**, οι οποίες καθιστούν το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης μη καταληπτό και κατάλληλα αντίμετρα έχουν αναπτυχθεί

όπως οι τεχνικές μετάδοσης DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ή FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) [11].

Η δεύτερη κατηγορία είναι η δυνατότητα **υποκλοπής** των δεδομένων. Από τη στιγμή που δεν μπορεί να εμποδιστεί η λήψη ενός σήματος είναι κρίσιμης σημασίας να εξασφαλίσουμε ότι ο υποκλοπέας δεν μπορεί να «καταλάβει» τα δεδομένα. Τέλος βασικός κρίκος στην αλυσίδα της ασφάλειας είναι η εξασφάλιση της **ακεραιότητας** των δεδομένων και της **πιστοποίησης** ενός χρήστη. Και τα δύο αυτά θέματα αντιμετωπίζονται μέσα από αλγόριθμους ψηφιακών υπογραφών, κρυπτογράφησης και χρήση ιδιαίτερα ισχυρών hash αλγορίθμων [12]-[15].

Στα πλαίσια του προγράμματος IST-LOCCATEC έγινε μια σχετική μελέτη και σχεδίαση αλγορίθμου πιστοποίησης και εξασφάλισης ακεραιότητας δεδομένων με τη χρήση ψηφιακών υπογραφών [2], [16].

2.4.Βασικές δικτυακές παράμετροι προς εκτίμηση της απόδοσης αυτών.

2.4.1. Δικτυακό περιβάλλον αξιολόγησης.

Σε κάθε μελέτη ή σχεδίαση που σχετίζεται με τα ad-hoc δίκτυα είναι πολύ σημαντικό να εντοπίζονται και να καθορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτυακού περιβάλλοντος. Στόχος του υποκεφαλαίου αυτού είναι να παραθέσει μερικά από τα πιο κοινά και σημαντικά χαρακτηριστικά που συναντώνται στα μοντέλα των εν λόγω δικτύων.

2.4.1.1. Μέγεθος δικτύου

Το μέγεθος του δικτύου εκφράζεται από τον αριθμό των κόμβων και από την περιοχή που στοχεύει να καλύψει. Και οι δύο αυτές παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί και επηρεάζουν καθοριστικά την απόδοση και την εν γένει λειτουργία του δικτύου. Λόγω της απαίτησης για αυτοοργάνωση και κατανεμημένη εκτέλεση αλγορίθμων είναι σαφές ότι όσο περισσότεροι είναι οι κόμβοι που πρέπει να συνεργαστούν τόσο πιο σθεναρό πρέπει να είναι το σύστημα και τόσο πιο απαιτητική είναι η σχεδίαση αυτού. Επίσης η ικανοποίηση των διαφόρων απαιτήσεων γίνεται πολύ πιο δύσκολη. Για παράδειγμα όταν πρέπει το MAC πρωτόκολλο να διαιτητεύσει την πρόσβαση στο

ασύρματο μέσο χρειάζεται διαφορετική στρατηγική αν πρέπει να συντονιστούν 10, 100 ή 1000 κόμβοι. Επίσης η δυσκολία εύρεσης αποδοτικής διαδρομής είναι πολύ μεγαλύτερη, όπως και η πιθανότητα επιτυχίας μιας επίθεσης προς το δίκτυο. Από την άλλη μεριά όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή που πρέπει να καλυφθεί τόσο δυσκολότερη γίνεται η πρόβλεψη διαφόρων συνθηκών όπως ο τρόπος εξασθένισης του σήματος, συνθήκες λαθών εκφραζόμενες σε μοντέλα B.E.R. και P.E.R., συνεχής ύπαρξη δυ-κατευθυντήριων συνδέσεων, εμφάνιση κατάτμησης κτλ.

2.4.1.2. Τοπολογία

Οι πιθανές τοπολογίες που λαμβάνονται υπόψη επίσης καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τον τρόπο λειτουργία του δικτύου. Η τυχαία τοπολογία συνήθως επιλέγεται για να αντιπροσωπεύσει με το καλύτερο τρόπο τη πραγματικότητα. Το είδος αυτό όμως εισάγει πολλούς αστάθμητους παράγοντες που έχουν να κάνουν με τη συνδεσιμότητα αποστολέα, παραλήπτη, πυκνότητα κόμβων ανά περιοχή κ.α. Η μελέτη δε της λειτουργίας ενός δικτύου σε τέτοιες τοπολογίες απαιτεί χρήση στατιστικών μεθόδων ώστε να αποκλειστεί το στατιστικό λάθος που συνήθως υπεισέρχεται. Από την άλλη, συνήθως, κατά την μελέτη ή ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου επιλέγεται η τοπολογία πλέγματος. Η τοπολογία αυτή αν και εκφράζει λίγες ρεαλιστικές περιπτώσεις εφαρμογής έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι καθιστά τη συμπεριφορά του δικτύου πιο προβλέψιμη κυρίως σε επίπεδο base-band διευκολύνοντας έτσι τη μελέτη και ανάπτυξη του δικτυακού σωρού.

2.4.1.3. Κινητικότητα κόμβων

Πολύ σημαντική δικτυακή παράμετρος, η οποία συνδέεται στενά με την προηγούμενη, η ύπαρξη αλλά και τα χαρακτηριστικά της οποίας δύνανται να καταστήσουν κάθε αρχιτεκτονική ή προτεινόμενο αλγόριθμο ανεπαρκή. Το στατικό δίκτυο είναι χωρίς αμφιβολία η ευκολότερη σχεδιαστική περίπτωση. Η διαδικασία και ο ανταγωνισμός για τη πρόσβαση στο μέσο γίνεται πολύ πιο απλή υπόθεση και με πολύ ντερμινιστική απόδοση. Η σημασία του πρωτοκόλλου δρομολόγησης μειώνεται σημαντικά καθώς θεωρητικά αρκεί να βρεθούν οι διαδρομές στην έναρξη της λειτουργίας του δικτύου για την εξυπηρέτηση των κόμβων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Η ταχύτητα, όμως, αλλά και το μοντέλο κίνησης δυσχεραίνει τη

λειτουργία του δικτύου από πολλές απόψεις. Το κυριότερο πρόβλημα τίθεται στο επίπεδο δρομολόγησης όπου το αντίστοιχο πρωτόκολλο πρέπει να παρέχει την αποδοτικότερη και πιο ενημερωμένη διαδρομή. Δευτερευόντως σημαντικό πρόβλημα αντιμετωπίζει το MAC πρωτόκολλο διότι οι συνθήκες ανταγωνισμού αλλάζουν συνέχεια καθώς το πλήθος των κόμβων που διεκδικούν πρόσβαση αλλάζει συνεχώς και δυναμικά. Επίσης οι συνθήκες συνδεσιμότητας αλλάζουν συνεχώς καθιστώντας την ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου πρόβλεψης αυτών , ιδιαίτερα δύσκολη ειδικά σε επίπεδο συστήματος.

2.4.1.4. Χαρακτηριστικά εισερχόμενης κίνησης

Η ανάπτυξη όλο και μεγαλύτερης ποικιλίας εφαρμογών κάνει ιδιαίτερα σημαντικό το καθορισμό τόσο του αναμενόμενου ρυθμού της εισερχόμενης κίνησης όσο και της μορφή που αυτή παρουσιάζει αλλά και τις συνεπακόλουθες απαιτήσεις. Το διαθέσιμο εύρος του ασύρματου μέσου είναι εν γένει πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο των ενσύρματων. Επιπλέον λόγω διαφόρων συνθηκών (λάθη στο κανάλι, εξασθένηση σήματος, θέματα δρομολόγησης κτλ.) η πραγματική διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού μπορεί να είναι πολύ μικρότερη. Άρα λοιπόν ο ρυθμός μετάδοσης θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό πόσο θα δυσκολευτεί το δίκτυο να τον εξυπηρετήσει καθώς και τη πιθανότητα με τη οποία θα οδηγηθεί σε κορεσμό και αστάθεια. Το άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η μορφή της κίνησης. Η πιο εύκολα προβλεπόμενη περίπτωση είναι αυτή όπου η κίνηση εισάγεται με έναν συνεχή προκαθορισμένο ρυθμό. Άλλες όμως εφαρμογές έχουν καταγιγιστική κατανομή το οποίο σημαίνει ότι υπάρχουν χρονικά διαστήματα (συνήθως μικρής διάρκειας) όπου ο ρυθμός είναι ιδιαίτερα υψηλός και μεγάλες χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες η επιβάρυνση του δικτύου είναι μηδενική ή ιδιαίτερα χαμηλή. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι ανάμεσα στις δύο παραπάνω περιπτώσεις υπάρχουν αναρίθμητοι συνδυασμοί που ένα ad-hoc δίκτυο πρέπει να μπορεί να χειριστεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν άμεσες επιπτώσεις σε θέματα όπως η αποδοτική δρομολόγηση πακέτων, ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) κ.α.

2.4.1.5. Πλήθος ροών δεδομένων (data flows)

Από τα κυριότερα χαρακτηριστικά που επιβάλλουν οι σύγχρονες εφαρμογές των ad-hoc δικτύων είναι η υποστήριξη πολλαπλών, ταυτόχρονων ροών δεδομένων. Το πλήθος αυτών επηρεάζει δραστικά πολλές πλευρές της λειτουργίας ενός δικτύου. Το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης είναι αυτό που καλείται να αντιμετωπίσει της επιπτώσεις κατά κύριο λόγο. Αυτό γίνεται διότι αυξάνονται οι κόμβοι που επιθυμούν ταυτόχρονη πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης άρα χρειάζεται καλή διαιτησία ενώ αυξάνεται κατακόρυφα η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου ανταγωνισμού το οποίο αποτελεί από τα πιο κρίσιμα φαινόμενα καθώς μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο σε συμφόρηση, αστάθεια και κατάρρευση. Επιπλέον επηρεάζεται άμεσα η λειτουργία του πρωτοκόλλου δρομολόγησης καθώς από τη μια η εύρεση της αποδοτικότερης διαδρομής γίνεται ιδιαίτερα δύσκολη λόγω των ταυτοχρόνων διαδρομών και από την άλλη η επιπλέον κίνηση που επιβάλλει η ταυτόχρονη εκτέλεση του μηχανισμού εύρεσης διαδρομής από πολλούς κόμβους επιφορτίζει υπέρμετρα της λειτουργία του δικτύου.

2.4.1.6. Τοπολογία των ροών δεδομένων (data flows)

Ιδιαίτερη σημασία έχει η συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στις ταυτόχρονες ροές δεδομένων. Στις περιπτώσεις όπου ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των ροών δεδομένων είναι μικρός (λίγοι κόμβοι καλούνται να εξυπηρετήσουν πολλαπλές διαδρομές) η εξυπηρέτηση είναι πολύ πιο εύκολη και αποδοτική. Αντίθετα με τις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των κόμβων από τους οποίους «περνάνε» πολλές διαδρομές αυξάνει, το οποίο δυσχεραίνει το ρόλο τόσο του MAC όσο και του routing πρωτοκόλλου.

2.4.2. Κριτήρια αξιολόγησης της απόδοσης ad-hoc δικτύων.

Το πλήθος των μεθόδων και των μέτρων αξιολόγησης της απόδοσης των ασύρματων ad-hoc δικτύων είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι από τη μια κληρονόμησαν όλα τα μέτρα αξιολόγησης από τα κλασσικά ασύρματα δίκτυα ενώ από την άλλη τα καινοτόμα χαρακτηριστικά τους επέβαλλαν τη δημιουργία νέων. Επιπλέον η ευρύτητα αλλά και η ορθογωνιότητα των παραμέτρων των δικτύων αυτών

οδηγεί συνήθως την όποια ερευνητική πρόταση να επικεντρώνεται σε ένα υποσύνολο των ad-hoc δικτύων. Κάθε λοιπόν υπο-περιοχή των δικτύων αυτών συνοδεύεται και από τα εξειδικευμένα μέτρα απόδοσης. Είναι σαφές, για παράδειγμα, ότι με άλλον τρόπο θα αξιολογηθεί η απόδοση μια λύσης που στοχεύει στην ενίσχυση της συμπεριφοράς του δικτύου όσο αφορά την ποιότητα υπηρεσίας, με άλλον η αντίστοιχη λύση που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, με άλλον η αρχιτεκτονική η οποία στοχεύει στην ενίσχυση της ασφάλειας των δεδομένων και ούτο κάθε εξής.

Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε μερικά από τα μέτρα αξιολόγησης της απόδοσης δίνοντας ιδιαίτερο βάρος σε αυτά που μας απασχόλησαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

2.4.2.1. Καθυστέρηση (Delay)

Χωρίς αμφιβολία το πιο κλασσικό μέτρο απόδοσης κάθε δικτύου. Αφορά τον χρόνο που χρειάζεται ένα σύνολο δεδομένων για να φτάσει από τον αποστολέα στον παραλήπτη επιτυχώς. Η κρισιμότητα του μεγέθους αυτού έγκειται στο γεγονός ότι καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις χρονικές απαιτήσεις που μπορεί να έχει ο χρήστης από το δίκτυο και κατά συνέπεια ποιες εφαρμογές μπορούν να εξυπηρετηθούν και με τι άνεση. Σε όποιο επίπεδο και αν εφαρμοστεί εκτός από το επίπεδο εφαρμογής είναι σαφές ότι μας δίνει μια μυωπική μέτρηση της απόδοσης του δικτύου καθώς κάποια παράμετρος καθυστέρησης δεν λαμβάνεται υπ' όψιν. Κατά συνέπεια στη παρούσα διδακτορική διατριβή η καθυστέρηση μετριέται απ' άκρο σ' άκρο, δηλαδή από την εφαρμογή που στέλνει το πακέτο μέχρι την εφαρμογή παραλήπτη.

Ένας βασικός διαχωρισμός γίνεται είναι ανάμεσα σε μέση, ελάχιστη και μέγιστη καθυστέρηση. Οι σημαντικότερες κατηγορίες, και αυτές που θα χρησιμοποιηθούν κατά κύριο λόγο στη διατριβή είναι η μέγιστη και η μέση καθώς παίζουν καθοριστικό ρόλο στις δυνατότητες ικανοποίησης απαιτήσεων αυστηρού πραγματικού χρόνου (hard real-time constraints) και ελαστικού πραγματικού χρόνου (soft real-time constraints). Απαιτήσεις αυστηρού πραγματικού χρόνου παρουσιάζονται όταν υπάρχει μια μέγιστη τιμή καθυστέρησης πέρα της οποίας ένα πακέτο θεωρείται χαμένο ακόμα και αν ληφθεί αργότερα. Χρησιμοποιείται σε ιδιαίτερα κρίσιμες εφαρμογές, όπου διακυβεύονται ζημιές σε περιουσία ή και σε ανθρώπινο δυναμικό, και για το λόγο

αυτό συναντώνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Από την άλλη η έννοια ελαστικού πραγματικού χρόνου συναντάται σε λιγότερο κρίσιμες εφαρμογές και δικτυακά μεταφράζεται σε ένα όριο καθυστέρησης το οποίο είναι ανεκτό να υπερβεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό πακέτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μετάδοση φωνής όπου η υπέρβαση των ορίων καθυστέρησης από συγκεκριμένα ποσοστά δεδομένων δεν έχει σημαντική επίπτωση στην καταληπτότητα αυτής αλλά περισσότερα στην πιστότητα και ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Μετά από την παραπάνω σύντομη περιγραφή είναι σαφές ότι η μέγιστη παρατηρούμενη καθυστέρηση έχει άμεση σχέση με hard real-time δυνατότητες του συστήματος. Από την άλλη η μέση καθυστέρηση (σε συνδυασμό ίσως με την κατανομή καθυστέρησης) αποτελεί μια πολύ καλή ένδειξη για τις soft real-time δυνατότητες του συστήματος.

2.4.2.2. Κατανάλωση ενέργειας (Power Consumption)

Αποτελεί το κύριο μέτρο αξιολόγησης που εισήχθη από τα ad-hoc δίκτυα καθώς σε αυτού του είδους τα δίκτυα για πρώτη φορά δεν θεωρήθηκε δεδομένη η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας και ετέθη το ζήτημα της δυσκολίας αναπλήρωσης αυτής. Η σημασία αυτής έχει εκτενώς τονιστεί τόσο στην παρούσα διατριβή όσο και σε πολλές άλλες ερευνητικές και όχι μόνο εργασίες. Δεδομένου ότι το δίκτυο μας ενδιαφέρει από την επικοινωνιακή σκοπιά και μόνο, κύριες παράμετροι για τη μέτρηση αυτής αποτελούν οι ισχύς των καταστάσεων μετάδοσης, λήψης, και αδράνειας ενός κόμβου οι οποίες δίνονται σε Watts καθώς και τα αρχικά αποθέματα ενέργειας τα οποία δίδονται σε Joules. Έτσι λοιπόν μπορούμε να μετρήσουμε είτε την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την επικοινωνία είτε την ενέργεια που παραμένει σε ένα κόμβο κατά την λειτουργία του συστήματος.

Όπως στην καθυστέρηση ο βασικός διαχωρισμός είναι μεταξύ ελάχιστης, μέσης και μέγιστης με τις δύο τελευταίες να αποτελούν τις βασικότερες κατηγορίες.

2.4.2.3. Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας (Power Consumption Distribution)

Κατά τα πρώτα στάδια μελέτης των δικτύων αυτών, στα πλαίσια της διατριβής, εντοπίστηκε η χρησιμότητα και η ανάγκη γνώσης όχι μόνο των απόλυτων μετρήσεων κατανάλωσης ενέργειας αλλά και της κατανομής αυτών στο χώρο του δικτύου. Σαν

επέκταση της παραπάνω σκέψης προέκυψε το ενδιαφέρον να μπορούμε να έχουμε εποπτεία στην εξέλιξη της κατανάλωσης στο δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας αυτού. Μια τέτοια μελέτη αφορά στατικά δίκτυα και κυρίως τοπολογίας πλέγματος όπου οι συνθήκες μελέτης είναι σαφώς καθορισμένες και περιορισμένες. Οι προβληματισμοί αυτοί οδήγησαν στη χρήση των διαγραμμάτων κατανομής κατανάλωσης ενέργειας [17] στα οποία απεικονίζεται η κατανομή τόσο στο χώρο του πλέγματος αλλά και κατά τη διάρκεια εξέλιξης της εξομοίωσης.

2.4.2.4. Ποσοστό χαμένων πακέτων (Packet loss ratio)

Πέρα από την καθυστέρηση στη μετάδοση των πακέτων από τα βασικότερα προβλήματα στα ad-hoc δίκτυα αποτελούν και τα χαμένα πακέτα. Το πρόβλημα αν και υπαρκτό ακόμα και στα ενσύρματα δίκτυα είναι τάξης μεγέθους πιο κρίσιμο όταν αναφερόμαστε στα ασύρματα και ειδικά στα ad-hoc. Η κρισιμότητα στα ασύρματα δίκτυα οφείλεται στο ότι υπάρχουν πολλοί περισσότεροι λόγοι για να χαθεί ένα πακέτο και είναι πολύ πιο δύσκολα τα θέματα πρόβλεψης, εντοπισμού και αντιμετώπισης τέτοιων γεγονότων.

Πολλοί αλγόριθμοι και αρχιτεκτονικές έχουν επινοηθεί για να μειώσουν τις συνέπειες του γεγονότος αυτού. Στις προσπάθειες αυτές συγκαταλέγονται αλγόριθμοι επαναμετάδοσης, αυτόματης επαναμετάδοσης, πολλαπλής μετάδοσης του ίδιου πακέτου κτλ. Όλοι όμως στοχεύουν στην μείωση των συνεπειών και όχι στη μείωση της αιτίας που είναι τα γεγονότα απώλειας δεδομένων. Για τους παραπάνω λόγους είναι σημαντικό σε κάθε ερευνητική εργασία να λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό χαμένων πακέτων ως προς τα συνολικά πακέτα που προορίζονται για αποστολή.

2.4.2.5. Ρυθμός Μετάδοσης (Throughput).

Σαν διαμεταγωγή χαρακτηρίζεται το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων στην μονάδα μέτρησης χρόνου. Αποτελεί ένα από τα κλασσικά μεγέθη αξιολόγησης δικτύων τόσο ενσύρματων όσο και ασύρματων. Στη περίπτωση των ad-hoc δικτύων η σημασία του συγκεκριμένου μέτρου είναι υποβαθμισμένη, ειδικά σε σχέση με τη σημασία του στα ενσύρματα. Αυτό ισχύει διότι λόγω της φύσεως του μέσου αλλά και της έλλειψης κεντρικού ελέγχου εκ των προτέρων οι απαιτήσεις διαμεταγωγής των δικτύων αυτών είναι πολύ μικρότερες από αυτές των ασύρματων και πολύ

περισσότερο σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Έτσι λοιπόν οι εφαρμογές στις οποίες απευθύνονται δεν έχουν σαν πρώτιστο χαρακτηριστικό το υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Σαν μέτρο αξιολόγησης, λοιπόν, τις περισσότερες φορές στόχος είναι να επηρεαστεί αρνητικά κατά τα ελάχιστο δυνατό και αν σαν παρενέργεια υπάρχει θετική επίδραση ακόμα καλύτερα. Μια τέτοια προσέγγιση θα ακολουθηθεί και στην παρούσα διατριβή. Οπότε το συγκεκριμένο μέτρο είναι μάλλον δευτερεύουσας σημασίας.

2.4.2.6. Ποιότητα Υπηρεσιών

Η ικανοποίηση QoS χαρακτηριστικών αποτελεί όλο και πιο σημαντική απαίτηση των σύγχρονων ασύρματων δικτύων. Παρόλα αυτά δεν υπάρχει ξεχωριστό μέγεθος για την παράμετρο αυτή και συνήθως η αξιολόγηση γίνεται μέσω των άλλων προαναφερθέντων μέτρων. Η βασική αρχή είναι η θέση διαφορετικής κρισιμότητας ή προτεραιότητας κινήσεων και η παρακολούθηση ικανοποίησης των διαφορετικών αυτών προτεραιοτήτων μέσα από την λειτουργία των δικτύου. Η διαφοροποίηση μπορεί να γίνει με βάση διάφορα μεγέθη όπως η καθυστέρηση, η ποσότητα πληροφορίας που διακινείται, η κατανάλωση ενέργειας κ.α.

2.5.Εργαλεία/Περιβάλλοντα/Πλατφόρμες ανάπτυξης ad-hoc δικτύων

Όλα τα παραπάνω όμως επηρεάζονται και σε σημαντικό βαθμό καθορίζονται από τα εργαλεία που έχει ο μηχανικός/ερευνητής στα χέρια του έτσι ώστε να μπορεί να μελετήσει τα δίκτυα αυτά, να αναπτύξει τις ιδέες του και φυσικά να τις αξιολογήσει. Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες εργαλείων διαθέσιμες για τους σκοπούς αυτούς. Από τη μια υπάρχουν οι εξομοιωτές ασύρματων ad-hoc δικτύων και από την άλλη οι πλατφόρμες ανάπτυξης ad-hoc δικτύων. Μέχρι σήμερα το κυριότερο και μεγαλύτερο μέρος ανάπτυξης των δικτύων αυτών έχει βασιστεί στους εξομοιωτές ενώ και η δεύτερη κατηγορία αρχίζει να κερδίζει έδαφος χάρη στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων από αρκετές εταιρίες. Η παρούσα διατριβή βασίστηκε στη χρήση εξομοιωτών ενώ είναι εν εξελίξει δραστηριότητα η μετάβαση σε μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα. Στο υπόλοιπο του παρόντος υποκεφαλαίου θα παρουσιαστεί το περιβάλλον εξομοιώσεις στο οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και

συνοπτικά οι κυριότεροι εκπρόσωποι τόσο από τα εξομοιωτικά όσο και από τα εργαλεία ανάπτυξης.

2.5.1. Εξομοιωτές ασύρματων ad-hoc δικτύων

2.5.1.1. Network Simulator 2 (NS2)

Ο Network Simulator είναι ιδιαίτερα ισχυρός και ευρέως διαδεδομένος εξομοιωτής γεγονότων διακριτού χρόνου ο οποίος στοχεύει στην έρευνα δικτύων και πάνω στον οποίο βασίστηκε η παρούσα διατριβή. Στο πεδίο αυτό παρέχει υποστήριξη σε μεγάλη ποικιλία δικτύων υποστηρίζοντας TCP, routing και multicast πρωτόκολλα για ενσύρματα αλλά και ασύρματα (τοπικά, προσωπικά και δορυφορικά) δίκτυα. Μαζί με το OPNET αποτελούν ίσως τους εξομοιωτές με τη μεγαλύτερη ιστορία καθώς η ανάπτυξη του ξεκίνησε το 1989 σαν μέρος του REAL network simulator. Το 1995 ξεκίνησε η υποστήριξη του από το DARPA μέσω του VINT προγράμματος, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για τη μετέπειτα συνεχή ανάπτυξη και διάδοσή του. Σήμερα εξακολουθεί να υποστηρίζεται από το DARPA, UC Berkley, USC/ISI, Xerox Park και άλλα σημαντικά ονόματα στο χώρο των δικτύων ενώ έχει δεχθεί σημαντικές συνεισφορές από μεγάλες εταιρίες και προγράμματα του χώρου όπως η Sun Microsystem, το CMU Monarch πρόγραμμα κ.α. Αποτελεί έναν εξομοιωτή ανοικτού κώδικα και αρχιτεκτονικής διαθέσιμος χωρίς κανέναν περιορισμό, γεγονός που του δίνει μεγάλη ευελιξία και ώθηση. Τα χαρακτηριστικά του τον κάνουν να αποτελεί αν όχι τον de facto, σίγουρα έναν από τους δύο σημαντικότερους και πιο αξιόπιστους εξομοιωτές δικτύων. Αυτό καταδεικνύεται εύκολα από τις αναρίθμητες ερευνητικές εργασίες και τα πολλά ερευνητικά προγράμματα που έχουν βασιστεί πάνω του.

Ο εξομοιωτής είναι γραμμένος σε C++. Το γεγονός ότι βασίζεται σε μια από τις πιο γνωστές και δυνατές γλώσσες προγραμματισμού διευκολύνει την εξάπλωσή του και την ενασχόληση περισσότερου ερευνητικού δυναμικού με αυτόν. Παράλληλα ο ορισμός και η διαμόρφωση του δικτύου και του σεναρίου εξομοίωσης γίνεται με τη χρήση διεπαφής υλοποιημένης σε OTcl μίας πολύ ευέλικτης αλλά και δυνατής αντικειμενοστραφούς γλώσσας script που ανεπτύχθη από το MIT. Η χρήση των δύο αυτών γλωσσών (C++ και OTcl) συνδυάζει τη σταθερότητα που απαιτείται από έναν εξομοιωτή το οποίο σημαίνει ότι οι αλλαγές γίνονται με προσοχή, όχι πολύ συχνά και

φυσικά απαιτούν επαναμεταγλώττιση όλου του εξομοιωτή με την ευελιξία και την εύκολη και συχνή εναλλαγή παραμέτρων που απαιτείται στο καθορισμό των σεναρίων εξομοίωσης. Ένα ακόμα πολύ δυνατό χαρακτηριστικό είναι ότι το δέσιμο αυτό επιτρέπει το εύκολο πέρασμα παραμέτρων του εξομοιωτή σε παραμέτρους OTcl το οποίο αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο στην αυτοματοποίηση της εκτέλεσης μεγάλου αριθμού εξομοιώσεων.

Τόσο λόγω των πολλών χρόνων ανάπτυξης του NS2 όσο και της λογικής της συνεισφοράς υλοποιήσεων από την κοινότητα των χρηστών αυτή τη στιγμή υπάρχει ίσως η μεγαλύτερη γκάμα υλοποιημένων πρωτοκόλλων και εργαλείων βοηθητικών στην δικτυακή έρευνα. Τέτοια εργαλεία είναι γεννήτριες κίνησης, υποστήριξη κινητικότητας, γεννήτριες τοπολογιών, μοντέλα εξασθένισης σήματος και πολλά άλλα.

Η κοινότητα χρηστών του εξομοιωτή αυτού αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες και πιο δραστήριες κοινότητες το οποίο είναι δηλωτικό της μεγάλης εμπειρίας που υπάρχει και μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας νέος στο χώρο ερευνητής καθώς και των πολλών κειμένων εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης του εξομοιωτή. Τα δύο παραπάνω στοιχεία μπορούν να αποδειχθούν υπερπολύτιμα στην γρήγορη επίλυση προβλημάτων.

Πολύ σημαντική είναι η ύπαρξη ενσωματωμένου μοντέλου κατανάλωσης ενέργειας. Το χαρακτηριστικό αυτό λείπει από πολλούς αντίστοιχους εξομοιωτές ενώ είναι κρίσιμης σημασίας για τα σύγχρονα δίκτυα και ειδικά για τα ad-hoc που μελετάμε εδώ. Ειδικά η τελευταία έκδοση 2.29 έχει δώσει βάρος στο χαρακτηριστικό αυτό καθώς περιλαμβάνει σαν παραμέτρους τη κατανάλωση και το χρόνο μετάβασης από τη κατάσταση αδράνειας σε αυτή της εξοικονόμησης ενέργειας (sleeping).

Η Tcl/OTcl γλώσσα αποδεικνύεται ιδιαίτερα ισχυρή και επιτρέπει το σχεδιασμό πολύπλοκων σεναρίων εξομοίωσης συνδυάζοντας και άλλες γλώσσες script όπως η awk. Υπάρχουν δύο κύριες έξοδοι από μια εξομοίωση οι οποίες αποτελούν δύο trace αρχεία. Το ένα χρησιμοποιείται από το εργαλείο NAM (Network Animator) και παρέχει απεικόνιση της εξομοίωσης με πολύ χρήσιμες δυνατότητες παρακολούθησης αλλά και ανάλυσης. Λεπτομερής ανάλυση, όμως, γίνεται μέσω του δεύτερου αρχείου το οποίο περιέχει κάθε λεπτομέρεια της λειτουργίας του δικτύου σε συγκεκριμένο format. Πολλά εργαλεία έχουν αναπτυχθεί τα οποία δεχόμενα σαν είσοδο το αρχείο αυτό μπορούν να κάνουν κάποια στατιστική ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου. Εντούτοις υπάρχουν περιπτώσεις που δεν καλύπτονται από τα εργαλεία και τότε η

βέλτιστη λύση είναι η ανάπτυξη εξειδικευμένων προγραμμάτων script που διαβάζουν το αρχείο και εξάγουν τις επιθυμητές μετρήσεις. Αυτός ο δρόμος επιλέχτηκε και στην παρούσα διατριβή όπου αναπτύχθηκαν πολύπλοκα προγράμματα script χρησιμοποιώντας τη γλώσσα awk για να γίνουν οι κατάλληλες μετρήσεις.

Στα αρνητικά του εξομοιωτή αναφέρουμε τη δυσκολία που συναντάται στην κατανόηση του τρόπου υλοποίησης του εξομοιωτή και στην ανάπτυξη ενός καινούργιου κομματιού από τον αρχάριο χρήστη. Πράγματι έχει παρατηρηθεί ότι η δομή των φακέλων, ο χωρίς σχόλια κώδικας καθώς και η έλλειψη καθορισμένου format γραψίματος κώδικα απαιτούν ιδιαίτερη προσπάθεια και προσοχή από τον χρήστη. Επίσης εμφανής είναι και η έλλειψη υποστήριξης γραφικού περιβάλλοντος. Τόσο η διαμόρφωση των σεναρίων, η εκτέλεση αυτών αλλά και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται κατά βάση μέσω αρχείων κώδικα κάποιας μορφής.

Σε συνέχεια του προηγούμενου, η έλλειψη ολοκληρωμένου περιβάλλοντος αποσφαλμάτωσης σημαίνει ότι οι επιλογές στον τομέα αυτό εξαρτώνται άμεσα από το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η ανάπτυξη. Από την πρώτη εποχή η ανάπτυξη του NS2 με βάση τα UNIX συστήματα. Έτσι, λοιπόν, και στη παρούσα διατριβή η χρήση του εξομοιωτή και η ανάπτυξη της προτεινόμενης λύσης έγινε πάνω σε Linux συστήματα και συγκεκριμένα επιλέχτηκε η διανομή Suse 10.0. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον η αποσφαλμάτωση μπορεί να γίνει είτε από γραμμή εντολών χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του gcc compiler πράγμα ιδιαίτερα χρονοβόρο και επίπονο είτε κάνοντας port τον ns2 σε κάποιο ολοκληρωμένο εργαλείο ανάπτυξης. Στη διατριβή αυτή επιλέχτηκε ο δεύτερος δρόμος όπου χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον KDevelop. Από την έκδοση 2.1b9 και μετά ο NS2 δεν υποστηρίζεται για windows. Έτσι η χρήση από windows γίνεται μόνο μέσω Cygwin το οποίο αποτελεί ένα εξομοιωτή Linux για Windows, που όμως περιορίζει κατά πολύ τις δυνατότητες ανάπτυξης. Άξιο αναφοράς είναι ότι στα πλαίσια του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Εφαρμογών κατέστη δυνατή η μετάφραση του NS2 σε Windows XP μέσω του μεταγλωτιστή του περιβάλλοντος MicroSoft Visual Studio .NET [18],[19].

2.5.1.2. OPNET

Αποτελεί ένα ιδιαίτερα ισχυρό και ευρέως διαδεδομένο εμπορικό εξομοιωτικό εργαλείο το οποίο αναπτύσσεται και διατίθεται από την OPNET Technologies Inc. Παρέχει εκτεταμένη βιβλιοθήκη από δικτυακές συσκευές και πρωτόκολλα τόσο για ενσύρματα όσο και για ασύρματα δίκτυα. Παρέχει πολύ καλό γραφικό περιβάλλον για την ανάπτυξη των δικτυακών περιβαλλόντων των εξομοιώσεων συνοδευόμενο από γκάμα εργαλείων για την απεικόνιση αποτελεσμάτων αλλά και αποσφαλμάτωσης (debugging) των αναπτυσσόμενων μοντέλων καθώς και υποδειγματική τεκμηρίωση. Τα μεγάλα μειονεκτήματα του εν λόγω εργαλείου, εξ αιτίας των οποίων έχει χάσει έδαφος έναντι του NS2, είναι το γεγονός ότι η απόκτησή του αλλά και η διατήρησή του αποτελούν ιδιαίτερα ακριβές διαδικασίες. Επιπλέον οι ιδιαίτερα αυστηροί περιορισμοί χρήσης που επιβάλλονται από την εταιρία αποτελούν ισχυρούς ανασταλτικούς παράγοντες, ειδικά όταν υπάρχουν αξιόπιστες και ευρέως διαδεδομένες εναλλακτικές [20].

2.5.2. Πλατφόρμες ανάπτυξης ασύρματων ad-hoc δικτύων

2.5.2.1. Berkley MOTEs

Αποτελεί, σήμερα, την πιο ευρέως διαδεδομένη υλοποίηση [21] το οποίο καταδεικνύεται και από την ποικιλία μοντέλων που είναι τα : Mica2, Mica2dot και MicaZ [22]. Αποτελούν υλοποιήσεις τρίτης γενιάς παρέχοντας ιδιαίτερα μικρούς κόμβους με αυξημένες ικανότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας συνδεδεμένη συνήθως εξωτερικά με τους απαιτούμενους αισθητήρες. Ακολουθώντας τη λογική της εξωτερικής σύνδεσης μεγάλη ποικιλία αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως αισθητήρες φωτός, υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, επιτάχυνσης/σεισμικότητας, ήχου, μαγνητικών πεδίων κτλ. Κατά συνέπεια είναι κατάλληλοι για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών οι οποίες περιλαμβάνουν: φύλαξη χώρων, παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, υλοποίηση έξυπνων σπιτιών, παρακολούθηση κινητών στόχων κτλ.

2.5.2.2. tMoteSky

Το tMoteSky, επίσης γνωστό ως Telos revB [23], αποτελεί επίσης μια πλατφόρμα δικτύων αισθητήρων τελευταίας και επόμενης γενιάς επικεντρώνοντας στην πολύ χαμηλή κατανάλωση με παράλληλα υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Λειτουργεί στην παγκοσμίως δωρεάς διαθέσιμη περιοχή συχνοτήτων των 2.4GHz, ενσωματώνοντας το γνωστό PHY-MAC πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 και κατά συνέπεια παρέχει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 250Kbps το οποίο κρίνεται επαρκές για την πλειονότητα των εφαρμογών τέτοιων δικτύων. Σε επίπεδο υλικού χρησιμοποιεί έναν Texas Instrument μικροελεγκτή με κωδικό όνομα MSP430 και η ενσωματωμένη κεραία παρέχει καλύψεις της τάξης των 50m σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ενώ φτάνει τα 125m σε ελεύθερες περιοχές χωρίς κτήρια, ψηλά δέντρα και γενικότερα μεγάλα εμπόδια. Ενσωματώνει αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και φωτός ενώ και αυτή η πρόταση στοχεύει σε εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου/παρακολούθησης, έξυπνα κτήρια, παρακολούθηση κινούμενων στόχων κτλ.

2.5.2.3. ScatterWeb

Το ScatterWeb [24] αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση που επικεντρώνεται στην ύπαρξη ετερογενών κόμβων καθώς και στην ικανότητα διασύνδεσης με άλλα δίκτυα. Έτσι λοιπόν υπάρχουν οι απλοί κόμβοι οι οποίοι ονομάζονται embedded sensor board (ESB) αλλά και πιο ισχυροί που μπορούν και αναλαμβάνουν ρόλο server και ονομάζονται embedded web sever (EWS). Οι κόμβοι αυτοί παρέχουν και τις δυνατότητες διασύνδεσης καθώς μπορούν να δράσουν σαν gateways μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και άλλων δικτύων (Ethernet, GPRS, Internet κτλ.). Οι ESB κόμβοι ενσωματώνουν αισθητήρες φωτεινότητας, θορύβου, δόνησης, κίνησης (στα υπέρυθρα), μικρόφωνο/μεγάφωνο, καθώς και μετάδοση στην υπέρυθρη περιοχή συχνοτήτων. Περιοχές εφαρμογής είναι ανάλογες των υπολοίπων συναφών προτάσεων.

2.6. Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια λεπτομερής και ολοκληρωμένη παρουσίαση του χώρου των ad-hoc δικτύων που είναι ο χώρος στον οποίο κινείται και η διατριβή.

2.6 Ανακεφαλαίωση

Έτσι λοιπόν περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών τα οποία σαφώς τα ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα. Επίσης η σημασία και το ενδιαφέρον που παρουσιάζει ο χώρος γίνεται κατανοητός από τις εφαρμογές που βρίσκουν τα ad-hoc δίκτυα καθώς και από το μεγάλο πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων που στηρίζονται πάνω τους. Οι βασικές παράμετροι καθώς και τα μέτρα αξιολόγησης της λειτουργίας και απόδοσης των δικτύων αυτών είναι απαραίτητες γνώσεις για την πλήρη και σε βάθος κατανόηση του χώρου στο οποίο ανήκει η παρούσα διατριβή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον τέλος, παρουσιάζει ο χώρος των εργαλείων και περιβαλλόντων κατάλληλων για τη σχεδίαση, αξιολόγηση αλλά και ανάπτυξη τέτοιων δικτύων. Αποτελεί έναν πολύ ενεργό και με έντονη δραστηριότητα χώρο καθώς τα αντίστοιχα εργαλεία αυξάνουν σε αριθμό, ποιότητα και δυνατότητες με πολύ γρήγορο ρυθμό. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν τα εργαλεία αυτά είναι τα περιβάλλοντα εξομοίωσης κατάλληλα για ανάπτυξη και πρώτη αξιολόγηση νέων αλγορίθμων και αρχιτεκτονικών και από την άλλη υπάρχουν οι πλατφόρμες ανάπτυξης οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν τελικό μέρος αξιολόγησης και προτυποποίησης ενός δικτύου.

3. Κεφάλαιο 3: Η Δικτυακή Δομή των Ασύρματων Ad-Hoc Δικτύων

3.1.Εισαγωγή

Η παρούσα διατριβή έχει βασιστεί στην ιδέα της cross-layer προσέγγισης ανάπτυξης των ad-hoc ασύρματων δικτύων, μια προσέγγιση η οποία θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο. Είναι άξιο αναφοράς ότι στην προσέγγιση αυτή οδηγηθήκαμε, αξιολογώντας της ως την πιο πολλά υποσχόμενη ιδέα για τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων αυτών, μετά από αφιέρωση αρκετά μεγάλου χρονικού διαστήματος και έρευνας πάνω στο κλασικό πρότυπο OSI/ISO. Στο Σχήμα 3- 1 παρουσιάζεται το ιεραρχικό μοντέλο OSI, η αντιστοίχηση του με τα επικοινωνιακά επίπεδα της δικτυακής αρχιτεκτονικής καθώς και οι επικεφαλίδες που εισάγονται σε ένα πακέτο δεδομένων κατά την μετάδοση στο δίκτυο.

Σχήμα 3- 1. Το μοντέλο OSI σε αντίστοιχη με τα επικοινωνιακά επίπεδα και τις αντίστοιχες επικεφαλίδες πακέτων

Μέσα από την έρευνα αυτή κατέστη σαφές ότι οι πολλαπλές επιλογές σε κάθε επίπεδο έδιναν ένα ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος συνδυασμών για την τελική πιθανή δικτυακή δομή χωρίς όμως κάποιος να είναι αναμφισβήτητα, συνολικά και σε κάθε περίπτωση καλύτερος. Βασικό, λοιπόν, στοιχείο στη προσπάθειά μας ήταν εξ αρχής να ερευνηθούν τα περιθώρια βελτίωσης των δικτύων και προταθούν λύσεις πέρα από συγκεκριμένα πρωτόκολλα και από τα σαφή, αλλά την ίδια στιγμή περιοριστικά, όρια του μοντέλου. Αυτό δεν σημαίνει βέβαια ότι δεν υπάρχουν λύσεις και προτάσεις που

είναι πιο δημοφιλής και κραταιές ανά επίπεδο ή ότι βασικές δικτυακές επιλογές και θεωρήσεις είναι αναπόφευκτο να γίνουν.

Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, θα γίνει παρουσίαση του μεγάλου πλήθους επιλογών που υπάρχουν σε κρίσιμα επίπεδα όπως το MAC και το Routing, οι οποίες επιλογές διατηρήθηκαν και στην προτεινόμενη από τη διατριβή λύση καθώς και τα αποτελέσματα της έρευνας στα επίπεδα αυτά. Από την άλλη, όμως, θα παρουσιαστούν και επιλογές-θεωρήσεις που έγιναν σε θέματα όπως πρωτόκολλο δικτύου και ελέγχουν μεταφοράς, πάλι συνοδευμένες από τη έρευνα που οδήγησε σε αυτές.

Όπως θα αναφέρεται και κατά περίπτωση μέρος της ανά επίπεδο μελέτης, και τα αντίστοιχα αποτελέσματα, έγιναν στα πλαίσια ομαδικής ερευνητικής εργασίας στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Εφαρμογών.

3.2. Η επιλογή του πρωτοκόλλου IP στο επίπεδο δικτύου

Σήμερα η επιλογή του πρωτοκόλλου IP [25]-[28] στο επίπεδο δικτύου αποτελεί ουσιαστικά μονόδρομος σχεδόν στο σύνολο των επικοινωνιακών δικτύων. Το IP, χωρίς αμφιβολία, αποτέλεσε έναν από τους θεμέλιους λίθους στην ανάπτυξη και εξάπλωση του διαδικτύου. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η ευρεία εξάπλωσή του και ενσωμάτωσή του σε πολλές νέες δικτυακές τεχνολογίες εκ των οποίων τα ασύρματα και ειδικότερα τα ad-hoc δίκτυα αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα.

3.3. Η επιλογή του UDP σαν πρωτόκολλο μεταφοράς.

Μια ακόμα απαραίτητη απόφαση αφορά το πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων το οποίο θα χρησιμοποιηθεί πάνω από το IP. Οι δύο επιλογές που υπάρχουν εδώ προέρχονται από τα ενσύρματα δίκτυα και είναι τα γνωστά και ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα TCP [29],[30] και UDP [31].

Το TCP αποτελεί ένα πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων με σύνδεση (connection-oriented) το οποίο αποτέλεσε μαζί με το IP ακρογωνιαίο λίθο στην ανάπτυξη του Internet. Εντούτοις από την πρώτη περίοδο εμφάνισης των ασύρματων δικτύων έγινε

φανερό ότι η εφαρμογή του TCP στα δίκτυα αυτά είναι προβληματική. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στη ανάπτυξη πολλών νέων εκδόσεων [32]-[35] του TCP χωρίς, όμως, κάποιος να λάβει την καθολική υποστήριξη και αποδοχή.

Από την άλλη το UDP αποτελεί πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων χωρίς σύνδεση (connectionless oriented). Στα ενσύρματα δίκτυα αν και είχε πάντα ένα ποσοστό των εφαρμογών, συνήθως χαμηλής προτεραιότητας δεδομένα, σίγουρα ήταν πολύ μικρό σε σχέση με το TCP. Αποτελεί ένα πολύ απλό πρωτόκολλο με ιδιαίτερα χαλαρές απαιτήσεις τόσο υπολογιστικές όσο πόρων γενικότερα. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικά πλεονεκτήματα στα ασύρματα δίκτυα. Στο UDP εφαρμόζονται αλγόριθμοι CRC (Cyclic Redundancy Check) οι οποίοι εντοπίζουν λάθη στο πακέτο που ελήφθη. Αποτέλεσμα του εντοπισμού λαθών είναι απλώς η απόρριψη του πακέτου χωρίς καμία περαιτέρω ενέργεια.

Φυσικά όπως και στο TCP έτσι και στην περίπτωση του UDP αρκετές εκδόσεις έχουν εμφανιστεί υποσχόμενες βελτιωμένες επιδόσεις στα ασύρματα δίκτυα.

Συνοψίζοντας στην παρούσα διατριβή έγινε η επιλογή της χρήσης του UDP με βάση τα παρακάτω επιχειρήματα.

- Θεμελιώδη λειτουργικά χαρακτηριστικά εμποδίζουν την αποδοτική λειτουργία του TCP σε ασύρματα ad-hoc δίκτυα.
- Σημαντική επιβάρυνση επιφέρουν οι επικεφαλίδες του TCP οι οποίες συνοδεύουν τα πακέτα σε σχέση με το UDP.
- Οι μηχανισμοί βελτίωσης της απόδοσης του TCP συνοδεύονται με ισχυρή επιβάρυνση σε κρίσιμα θέματα όπως απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ, μνήμη, κατανάλωση.
- Η αμφισβητούμενη απόδοση των μηχανισμών αυτών ενισχύει τη προσέγγιση ότι ίσως είναι ευκολότερο να δημιουργηθεί ένα νέο πρωτόκολλο από το να βελτιωθεί το TCP.
- Οι ισχυροί αλγόριθμοι που συνοδεύουν το TCP όπως FEC και ARQ και τα θέματα συμβατότητας με τεχνολογίες ορισμένων ανώτερων επίπεδων όπως web-servers δεν κρίνονται κρίσιμα χαρακτηριστικά για ad-hoc δίκτυα.
- Αντίθετα πλεονέκτημα και ευκολίες που επιφέρει η χρήση του UDP και αναφέρθηκαν προηγουμένως κρίνονται σημαντικά χαρακτηριστικά για την ερευνητική περιοχή της διατριβής.

Σχετική μελέτη, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “Πυθαγόρας II”, επικεντρώθηκε σε ασύρματα ad-hoc δίκτυα μεταβάλλοντας κρίσιμες δικτυακές παραμέτρους και κατέδειξε ότι όντως σε πολλές περιπτώσεις η χρήση του UDP οδηγεί σε καλύτερη απόδοση του δικτύου έναντι του TCP [36].

3.4. Το επίπεδο προσπέλασης μέσου για ασύρματα ad-hoc δίκτυα

Το επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου (MAC όπως είναι ευρέως γνωστό) αποτελεί, μαζί με αυτό της δρομολόγησης, το πιο κρίσιμο σημείο για την απόδοση των ασύρματων ad-hoc δικτύων. Ο βασικός ρόλος των MAC πρωτοκόλλων είναι ο συντονισμός και έλεγχος πρόσβασης στο μέσο των ενεργών κόμβων του δικτύου. Η σημασία της βέλτιστης εκτέλεσης των λειτουργιών αυτών εντείνεται στα ασύρματα δίκτυα λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών αυτών. Πρωταρχικό στοιχείο είναι το περιορισμένο, σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα, εύρος καναλιού. Επιπλέον, ακόμα και αν το θεωρητικό εύρος είναι αρκετό για την εκάστοτε εφαρμογή παράγοντες όπως συγκρούσεις, εξασθένιση καναλιού, παρεμβολές, θόρυβος κ.α. μειώνουν σημαντικά το πραγματικό ωφέλιμο εύρος. Η τοπολογία του δικτύου και το γεγονός ότι αυτή μπορεί να αλλάξει τυχαία, απρόβλεπτα και με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς επίσης θέτει σοβαρά προβλήματα αξιοπιστίας απόδοσης και αδιάλειπτης λειτουργίας των αλγορίθμων αυτών. Ας μη ξεχνάμε δε ότι τα περισσότερα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής αναπτύσσονται προϋποθέτοντας δικατευθυντήριες συνδέσεις, κάτι που δεν ισχύει απαραίτητα σε πρακτικές εφαρμογές ad-hoc ασύρματων δικτύων. Άλλα θέματα που καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη εξειδικευμένων πρωτοκόλλων για τα εν λόγω δίκτυα είναι η κατανάλωση ενέργειας και ο ιδιαίτερα κρίσιμος ρόλος που αυτή κατέχει στην λειτουργία των κόμβων που βασίζουν τη λειτουργία τους σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές αλλά και η ασφάλεια των επικοινωνιών. Το τελευταίο δεν είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο και πολύπλευρο θέμα καθώς η ασφάλεια επικοινωνιών σε ασύρματα δίκτυα αφορά πολλά θέματα όπως:

- Αποφυγή παρεμβολών
- Αποφυγή υποκλοπών
- Εξασφάλιση ακεραιότητας δεδομένων
- Εξασφάλιση ταυτοποίησης των επικοινωνούντων πλευρών

Το MAC υποεπίπεδο είναι το κύριο κομμάτι του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων στο γνωστό OSI/ISO μοντέλο. Θεμελιώδες χαρακτηριστικό του είναι να περιέχει όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες που θα εξασφαλίσουν την επιτυχή μετάδοση δεδομένων μεταξύ δύο κόμβων. Έτσι λοιπόν ένα τέτοιο πρωτόκολλο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του λειτουργίες όπως διόρθωση λαθών οφειλόμενα στο φυσικό επίπεδο (όσο είναι αυτό δυνατό), δημιουργία των frames που περιέχουν τα δεδομένα, διευθυνσιοδότηση αυτών, έλεγχος λαθών της ροής δεδομένων. Φυσικά από τις βασικότερες λειτουργίες είναι η διευθέτηση συγκρούσεων αλλά και η εξασφάλιση της απαιτούμενης από την εφαρμογή ποιότητας επικοινωνίας.

Η ανάγκη για ανάπτυξη εξειδικευμένων και αποδοτικών πρωτοκόλλων ελέγχου προσπέλασης μέσου αναγνωρίστηκε από τα πρώτα βήματα των ασύρματων δικτύων. Εκείνη τη περίοδο έγινε σαφές ότι πρωτόκολλα αναπτυγμένα με κύριο γνώμονα τα ενσύρματα δίκτυα, όπως το CSMA, αλλά και παραλλαγές αυτών (π.χ. CSMA/CA) δεν απέδιδαν καλά σε ασύρματα δίκτυα. Οι κυριότεροι λόγοι ήταν ότι, εκτός του ότι δεν ελάμβαναν υπόψη τους νέα δεδομένα και συνθήκες που εισήγαγαν τα ασύρματα δίκτυα όπως αυτά αναφέρθηκαν προηγουμένως, επιπλέον προέκυψαν δύο νέα προβλήματα η αντιμετώπιση των οποίων αποδεικνύεται ακόμα και σήμερα ιδιαίτερα δύσκολη υπόθεση. Τα προβλήματα αυτά είναι το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου (hidden node problem) καθώς και το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου [3]. Η πηγή και των δύο αυτών προβλημάτων είναι κοινή και εντοπίζεται στο γεγονός ότι είναι σύνηθες τρεις κόμβοι να βρεθούν σε τέτοια θέση όπου ένας κόμβος να μπορεί να “ακούσει” τους άλλους δύο αλλά οι άλλοι δύο να μην μπορούν να “ακούσουν” ο ένας τον άλλον Σχήμα 3- 2.

Σχήμα 3- 2 Τυπική τοπολογία η οποία οδηγεί στα προβλήματα κρυμμένου και εκτεθειμένου κόμβου

Το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου εμφανίζεται όταν οι κόμβοι Α και Γ μη μπορώντας να αντιληφθούν ο ένας τον άλλον προσπαθούν να στείλουν ταυτόχρονα στον Β οπότε θα υπάρξει σύγκρουση στον κόμβο Β. Το δε πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου παρουσιάζεται όταν για παράδειγμα ο Β στείλει στον Α. Λόγω της επικοινωνίας αυτής εμποδίζεται ο Γ να εκτελέσει μετάδοση άσκοπα καθώς αποκλείεται να φτάσει η μετάδοσή του μέχρι τον Α αφού αυτός βρίσκεται εκτός της ακτίνας μετάδοσης του Γ.

Έτσι λοιπόν τα προβλήματα αυτά καλούνται να λύσουν τα σύγχρονα πρωτόκολλα που αναπτύχθηκαν με γνώμονα τα ad-hoc δίκτυα καθώς και τα νέα χαρακτηριστικά που αυτά εισάγουν. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα κυριότερα από αυτά τα πρωτόκολλα. Θα ξεκινήσουμε χρονολογικά παρουσιάζοντας μερικές πρώτες προσπάθειες οι οποίες έβαλαν τα θεμέλια για τις μετέπειτα ολοκληρωμένες λύσεις. Επίσης θα συμπεριληφθούν κάποιες προσπάθειες με εξειδικευμένη στόχευση. Τέλος δε, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην σχετικά νέα αλλά γρήγορα αναπτυσσόμενη περιοχή των MAC πρωτοκόλλων για δίκτυα αισθητήρων που αποτελούν μια από τις βασικότερες εφαρμογές των ασύρματων ad-hoc δικτύων.

3.4.1. IEEE 802.11 protocol family

Όπως κάθε standard της οικογένειας 802.x το 802.11 καλύπτει το φυσικό επίπεδο καθώς και το MAC. Χωρίς αμφιβολία αποτελεί το de facto standard για τα ασύρματα δίκτυα σήμερα. Έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον τόσο σε ερευνητικές όσο και σε

εμπορικές προσπάθειες σε σημείο που στο ευρύ κοινό το όνομά του να είναι συνώνυμο με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Είναι χαρακτηριστικό άλλωστε ότι τα περισσότερα ενεργά ασύρματα δίκτυα γύρω μας (ειδικά σε τοπικό επίπεδο) βασίζουν την λειτουργία του σε κάποια έκδοση του πρωτοκόλλου αυτού ενώ σχεδόν όλες οι νέες προτεινόμενες λύσεις συγκρίνονται με βάση και αναφορά το 802.11. Λόγω της ευρείας διάδοσής του και της εγκατεστημένης βάσης χρηστών ήταν φυσικό να περάσει και στα ad-hoc δίκτυα και να αποτελέσει και εκεί το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο παρά τις αποδεδειγμένες αδυναμίες του σε αρκετούς τομείς. Και στην διατριβή αυτή έπαιξε σημαντικό ρόλο καθώς και αξιολογήθηκε ανάμεσα σε άλλα πρωτόκολλα και αποτέλεσε το βασικό MAC πρωτόκολλο αξιολόγησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Βέβαια, όπως θα γίνει σαφές και σε επόμενο κεφάλαιο, η ανάπτυξη έγινε ανεξάρτητα του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου MAC πρωτοκόλλου.

Το 802.11 MAC πρωτόκολλο αποτελείται από έναν κοινό πυρήνα που μοιράζονται όλες οι εκδόσεις. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο ορίζει δύο τρόπους πρόσβασης στο μέσο. Ο πρώτος ονομάζεται Distributed Coordination Function (DCF) η ύπαρξή του είναι υποχρεωτική και χρησιμοποιείται κατά κόρον στα ad-hoc δίκτυα οπότε αποτελεί το κύριο ενδιαφέρον μας άρα και θα αναλυθεί διεξοδικά. Από την άλλη, ο δεύτερος τρόπος που ονομάζεται Point Coordination Function (PCF) είναι προαιρετικός (στα πλήρως αυτοοργανώμενα ad-hoc δίκτυα δεν χρησιμοποιείται, θεωρείται πολλές φορές επέκταση του DCF και η χρήση του προσανατολίζεται ή είναι απαραίτητη όταν υπάρχει απαίτηση για κάποιου είδους κεντρικό έλεγχο και άρα απαιτείται η ύπαρξη ενός κόμβου με ρόλο σταθμού βάσης ή access point). Οι δύο βασικές υπηρεσίες που παρέχει αυτός ο τρόπος εργασίας είναι:

1. Χωρίς ανταγωνισμό πρόσβαση στο μέσο μόνο από την πλευρά του κεντρικού σταθμού (AP). Μια τέτοια υπηρεσία είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις συνύπαρξης ενσύρματου και ασύρματου μέσου όπου ο AP έχει σαν αντικειμενικό στόχο την προώθηση προσωρινά αποθηκευμένων (buffered) πακέτων από το ενσύρματο προς το ασύρματο κομμάτι του δικτύου.
2. Σε πολλά σενάρια αυξάνονται οι περιπτώσεις όπου και οι ασύρματοι κόμβοι έχουν χρονικούς περιορισμούς στη μετάδοση πακέτων τους. Σε

τέτοιες περιπτώσεις προς ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών (και δεδομένου ότι δεν ικανοποιούνται από την DCF λειτουργία) χρησιμοποιείται η PCF για να υπάρχουν διαστήματα όπου και οι ασύρματοι κόμβοι μπορούν να έχουν πρόσβαση στο μέσο χωρίς ανταγωνισμό.

Η χρήση του 802.11 στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα βασίζεται σχεδόν πλήρως στην DCF λειτουργία. Η DCF βασίζεται σε ένα CSMA/CA σχήμα το οποίο πρακτικά είναι συνδυασμός του γνωστού CSMA με MACA λειτουργίες. Η βασική ακολουθία μετάδοσης δεδομένων περιλαμβάνει τις RTS-CTS-DATA-ACK υπολειτουργίες και φυσικά τα αντίστοιχα πακέτα. Η βασικά καινοτόμα προσθήκη αφορά έναν τρόπο εικονικής αντίληψης του καναλιού (virtual carrier sense). Η λειτουργία αυτή υλοποιείται μέσω του Network Allocation Vector (NAV) το οποίο υπάρχει και συντηρείται από κάθε κόμβο ξεχωριστά και περιέχει πληροφορίες για το χρόνο που αναμένεται το κανάλι να είναι κατειλημμένο λόγω άλλων επικοινωνιών που λαμβάνουν χώρα την ίδια στιγμή. Φυσικά το διάνυσμα αυτό ανανεώνεται συνεχώς μέσω πληροφοριών που εξάγει ο κόμβος παρακολουθώντας το μέσω μετάδοσης. Η μετάδοση των διαφόρων ειδών πακέτων συνοδεύεται από τέσσερα είδη χρονικών διαστημάτων μεταξύ της μετάδοσης αυτών τα οποία ονομάζονται inter frame spacing (IFS) και κατά αύξουσα σειρά είναι τα: Short IFS (SIFS) < Point Coordination Function IFS (PIFS) < DCF IFS (DIFS) < Extended IFS (EIFS). Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ότι ανάλογα με το πακέτο και τον τρόπο λειτουργίας ο κόμβος καλείται να περιμένει να αντιληφθεί για να ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το κανάλι αδρανές. Αν το κανάλι παραμένει αδρανές μετά το χρονικό διάστημα αναμονής ο κόμβος έχει δικαίωμα μετάδοσης στο μέσο. Αν όχι, ενεργοποιείται ο backoff timer ο οποίος καθορίζει το χρόνο που ο κόμβος πρέπει να περιμένει μέχρι την επόμενη στιγμή που θα έχει δικαίωμα να προσπελάσει το μέσο. Ο χρόνος “υποχώρησης” καθορίζεται τυχαία σε ένα διάστημα από 0 μέχρι CW-1 όπου CW είναι το λεγόμενο παράθυρο ανταγωνισμού. Το παράθυρο αυτό αποτελεί σημαντική παράμετρο στη λειτουργία του αλγορίθμου καθώς διπλασιάζεται σε κάθε αποτυχημένη προσπάθεια μετάδοσης. Ο timer μειώνεται σε κάθε πέρασμα DIFS χρόνου αδρανούς καναλιού μέχρι μηδενισμού ο οποίος σημαίνει και το δικαίωμα πρόσβασης στο κανάλι. Η επιτυχής μετάδοση πακέτου ενεργοποιεί εκ νέου τον

backoff timer θεωρώντας την ελάχιστη τιμή του παραθύρου ανταγωνισμού (CW). Το Σχήμα 3- 3 δείχνει τα διάφορα διαστήματα μεταξύ πακέτων καθώς και τη ανανέωση του NAV ενός γειτονικού κόμβου λόγω της λήψης των διαφόρων πακέτων.

Σχήμα 3- 3. IFS διαστήματα και λειτουργία του NAV

Από την άλλη η χωρίς ανταγωνισμό πρόσβαση στο μέσο εξασφαλίζεται από την PCF λειτουργία εκμεταλλευόμενη το διάστημα PIFS. Χρησιμοποιώντας το διάστημα αυτό ο κεντρικός κόμβος (AP) μπορεί να πάρει και να διατηρήσει τον έλεγχο του καναλιού. Η υποστήριξη χρονικά περιορισμένων επικοινωνιών (real time communications) βασίζεται σε ένα polling σχήμα το οποίο αποφεύγει τον ανταγωνισμό. Το ίδιο το 802.11 πρότυπο προτείνει έναν Round-Robin τρόπο εφαρμογής του polling. Βασικά χαρακτηριστικά είναι ότι όταν ένας κόμβος δεν έχει κάτι να μεταδώσει στέλνει ένα κενό (null) πακέτο ενώ αν προλάβουν να ικανοποιηθούν όλοι οι κόμβοι στη λίστα, την επόμενη φορά η διαδικασία θα συνεχιστεί από το σημείο που διεκόπη. Στο Σχήμα 3- 4. Τυπική περίοδος πρόσβασης χωρίς ανταγωνισμό. μια τυπική περίοδος χωρίς ανταγωνισμό απεικονίζεται σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα χρονικά διαστήματα καθώς και την περίοδο ανταγωνισμού (contention period), αλλά και μια χαμένη απάντηση.

Η ευρεία αποδοχή και χρήση του IEEE 802.11 ήρθε (και σε μεγάλο βαθμό παραμένει) με την έκδοση b [37]. Η λειτουργία σε φυσικό επίπεδο υποστηρίζει τρεις τεχνολογίες:

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

- Infrared (IR)

Η λειτουργία βασίστηκε στην ελεύθερη περιοχή συχνοτήτων στα 2.4GHz όπου, όπως είναι γνωστό δεν απαιτείται άδεια για την ανάπτυξη δικτύων για εμπορικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς (Industry, Scientific, Medical, ISM). Με αυτά τα δεδομένα η έκδοση b παρέχει εύρος καναλιού από 1 έως 11 Mbps.

Σχήμα 3- 4. Τυπική περίοδος πρόσβασης χωρίς ανταγωνισμό.

Χάρη στη γρήγορη εξάπλωση των ασυρμάτων δικτύων, όμως, το εύρος αυτό δεν ήταν επαρκές για τις νέες εφαρμογές που εμφανίζονταν. Έτσι λοιπόν αναπτύχθηκαν εκδόσεις ικανές να παρέχουν μέχρι 54Mbps. Συγκεκριμένα οι a και g. Η έκδοση 802.11a βασίστηκε στη χρήση της OFDM (Orthogonal Frequency Multiplexing Modulation) τεχνικής και παρέχει από 6 έως 54Mbps στην μπάντα των 5GHz, το οποίο όμως αποτελεί και το μεγαλύτερο πρόβλημα διάδοσης της έκδοσης αυτής καθώς η συγκεκριμένη μπάντα δεν είναι ελεύθερη το οποίο δημιουργεί μεγάλα προβλήματα στην ανάπτυξη δικτύων. Από την άλλη δεν μπορεί να υπάρξει καμία συνεργασία μεταξύ 802.11b το οποίο ήδη έχει μια πολύ μεγάλη εγκατεστημένη βάση χρηστών παγκοσμίως με την 802.11a. Έτσι λοιπόν αν και παρέχει, σημαντικά, μεγαλύτερες ταχύτητες η έκδοση a δεν έχει βρει, και μάλλον δεν θα βρει ποτέ, μεγάλη διάδοση και αποδοχή.

Αντίθετα η έκδοση g υπόσχεται (και σε ικανοποιητικό βαθμό παρέχει) ταχύτητες μέχρι 54Mbps με χρήση DSSS και OFDM τεχνικών στην ελεύθερη μπάντα των 2.4GHz. Με αυτό τον τρόπο καθιστά πολύ εύκολη και ανεμπόδιστη την ανάπτυξη

δικτύων από τον καθένα και εξίσου σημαντικό παρέχει συμβατότητα και δυνατότητα συνεργασίας με το 802.11b. Για τους λόγους αυτούς η g έκδοση έχει εξαπλωθεί ευρύτατα και χωρίς αμφιβολία αποτελεί το διάδοχο της b. Στον συνεχή αγώνα για παροχή όλο και μεγαλύτερων ταχυτήτων ασύρματης δικτύωσης άξια αναφοράς είναι η έκδοση n η οποία υπόσχεται στο μέλλον ταχύτητες μέχρι και 320Mbps, ταχύτητες οι οποίες αν υλοποιηθούν θα μπορούν να ικανοποιήσουν και τις πιο απαιτητικές εφαρμογές που τώρα είναι δυνατόν να αναπτυχθούν μόνο πάνω από ενσύρματα μέσα μετάδοσης [38].

Μια αναφορά στην οικογένεια 802.11 δεν μπορεί να είναι πλήρης αν δεν περιλαμβάνει και την έκδοση e. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης έκδοσης, το οποίο την ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες είναι το γεγονός ότι στοχεύει στην παροχή ιδιοτήτων ποιότητας υπηρεσιών. Η βασική καινοτομία της έκδοσης e είναι η παρουσίαση του HCF (Hybrid Coordination Function) τρόπου λειτουργίας ο οποίος πολυπλέκει τον ανταγωνιστικό τρόπο προσπέλασης στο μέσο με polling τεχνικές. Στο Σχήμα 3- 5 φαίνεται το πλαίσιο στο 802.11e στο οποίο καταδεικνύεται η ακολουθία της χωρίς ανταγωνισμό περιόδου και της καινούργια HCF περιόδου. Στα πλαίσια αυτής βλέπουμε την Enhanced DCF λειτουργία. Ο EDCF μηχανισμός προσθέτει την έννοια των προτεραιοτήτων στο απλό DCF υποστηρίζοντας διαφορετικές ομάδες κίνησης ονομαζόμενες access categories. Στο παρακάτω σχήμα με P και D καταδεικνύονται τα διαστήματα PIFS και DIFS αντίστοιχα ενώ τα B είναι τα beacon πλαίσια.

Σχήμα 3- 5. Βασική διαμόρφωση του πλαισίου στο 802.11e

Σε κάθε access category μπορεί να ανήκει ένας ή περισσότεροι χρήστες, ενώ κάθε τέτοια κατηγορία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ουράς και παραμέτρους παραθύρου. Επίσης μια ακόμα σημαντική διαφορά είναι ότι στον backoff αλγόριθμο το διάστημα DIFS αντικαθίσταται από το Arbitration IFS (AIFS) διάστημα. Παρά τις

όποιες βελτιώσεις μπορεί να εισάγει ο ECDF μηχανισμός για να υπάρξει αποδοτική προστασία κίνησης και εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας πρέπει ακόμα και στην contention-based περιοχή να υπάρχει κεντρικός έλεγχος και δυνατότητα polling-based μετάδοσης. Αυτό γίνεται στο HCF κομμάτι το οποίο ελέγχεται από τον Hybrid Coordinator (HC) ο οποίος συνήθως βρίσκεται στον AP σταθμό. Το νέο στοιχείο είναι ότι το HC μπορεί να εκκινήσει διαστήματα ελεγχόμενης πρόσβασης (Controlled Access Periods, CAPs, βλ. σχήμα 6) μέσα στο HCF διάστημα του πλαισίου. Ένα τέτοιο διάστημα μπορεί να εκκινήσει όταν το μέσο είναι αδρανές για διάστημα ίσο με PIFS και τελειώνει όταν το μέσο παραμένει αδρανές για διάστημα DIFS. Στην εργασία [39] δίνεται με λεπτομέρεια η υλοποίηση του 802.11e καθώς και αποτελέσματα εξομοιώσεων.

3.4.2. 802.15.4

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής το 802.15.4 μελετήθηκε σαν μια πιθανή και πολύ ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση απέναντι στο 802.11. Αν και σαφώς τα δύο αυτά πρωτόκολλα έχουν διαφορετική στόχευση και προσανατολισμό το 802.15.4 υπόσχεται χαρακτηριστικά ιδιαίτερος ελκυστικά για εφαρμογές ασύρματων αυτοοργανόμενων δικτύων. Σε φυσικό επίπεδο υποστηρίζει μεταξύ άλλων τη μπάντα των 2.4GHz η οποία δίνει πλεονεκτήματα στην εύκολη και γρήγορη ανάπτυξη δικτύων καθώς και στη συνεργασία μεταξύ δικτύων. Επιπλέον στη μπάντα αυτή υπόσχεται ταχύτητες ίσες με 250Kbps οι οποίες σαφώς υπολείπονται αυτών του 802.11 αλλά κρίνονται επαρκείς για αρκετές από τις εφαρμογές των MANET και δικτύων αισθητήρων. Σε επικοινωνιακό επίπεδο αν και η προσέγγιση είναι σαφώς προς τις τοπολογίες υποδομής καθώς ορίζονται οι έννοιες του κόμβου συντονιστή (coordinator) μας προσέλκυσε η υποστήριξη της δυνατότητας peer-to-peer επικοινωνίας μεταξύ κόμβων. Ο βασικότερος στόχος του 802.15.4 είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και η μέγιστη παράταση ζωής του κόμβου. Για την παροχή των χαρακτηριστικών αυτών εισήχθη η έννοια της Guaranteed time slot (GTS) μετάδοσης δεδομένων η οποία δεν υποστηρίζεται σε peer-to-peer επικοινωνίες. Επιπλέον, η εξοικονόμηση ενέργειας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη μετάδοση beacon πακέτων τα οποία υπάρχουν μόνο σε περιπτώσεις δικτύων υποδομής.

3.4.3. Συγκριτική μελέτη των πρωτοκόλων IEEE 802.15.4 και 802.11b εστιασμένη στην κατανεμημένη λειτουργία των Ad-Hoc δικτύων.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των 802.11b και 802.15.4, σε κοινές περιοχές λειτουργίες, δηλαδή υπό επικοινωνιακές παραμέτρους που και τα δύο υποστήριζαν, και κατέστη σαφές ότι σε σενάρια peer-to-peer επικοινωνίας (η οποία είναι και το αντικείμενο της διατριβής) το 802.15.4 δεν αποδίδει τα αναμενόμενα πλεονεκτήματα ενώ η απόδοσή του υστερεί σημαντικά σε σχέση με το 802.11 [40].

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της μελέτης βασικό σημείο είναι οι θεωρούμενες παράμετροι του δικτύου να είναι ίδιες και για να τα δύο πρωτόκολλα. Για να εξασφαλιστεί κάτι τέτοιο καταρχήν υποθέτουμε ίδιες συνθήκες επικοινωνίας των κόμβων και τοπολογία όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 3- 6. Όπως φαίνεται η τοπολογία αποτελείται από ένα πλέγμα 7x7 στο οποίο ο κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους πρώτους γείτονές του στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση. Δεύτερη βασική παράμετρος προς εξασφάλιση αντικειμενικής σύγκρισης είναι η ρύθμιση και των δύο πρωτοκόλλων σε λειτουργία μόνο peer-to-peer. Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι ιδιαίτερα σημαντική για το 802.15.4 το οποίο βασίζει τις επιπλέον λειτουργίες και πλεονεκτήματα κυρίως σε κεντριοποιημένο τρόπο λειτουργίας. Τέλος υποθέτουμε ότι η ισχύς πομπού και δέκτη είναι ίδια και στα δύο πρωτόκολλα. Κάτι τέτοιο μας επιτρέπει να συγκρίνουμε την κατανάλωση ενέργειας λόγω επικοινωνιακών λειτουργιών των πρωτοκόλλων αυτών, ενώ την ίδια στιγμή δεν είναι πολύ μακριά από πραγματικά συστήματα αν αναλογιστούμε τις δυνατότητες μεταβολής της επιθυμητής ισχύς μετάδοσης που μας παρέχουν σύγχρονες υλοποιήσεις.

Σχήμα 3- 6. Πλέγμα 7x7 και αντίστοιχη ακτίνα κάλυψης κάθε κόμβου

Οι δύο βασικές παράμετροι με βάση τις οποίες έγινε η σύγκριση, και χρήσιμα συμπεράσματα εξήχθησαν στα πλαίσια της διατριβής, είναι η επίδραση του ρυθμού δημιουργίας κίνησης, και η επίδραση ύπαρξης πολλαπλών ταυτόχρονων ροών δεδομένων. Μέτρα σύγκρισης της απόδοσης του δικτύου θεωρήθηκαν η μέση και μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης, η μέση κατανάλωση ενέργειας και η ποσότητα πληροφορίας που μπόρεσε να μεταδοθεί επιτυχώς. Οι υπόλοιπες παράμετροι εξομοίωσης έχουν ως εξής.

Πρωτόκολλο δρομολόγησης	AODV
Διάρκεια εξομοίωσης	200sec
Μέγεθος πακέτων δεδομένων	100 byte
Ουρά πακέτων	50 packets
Ρυθμός δημιουργίας κίνησης	8, 16, 80, 160, 800 Kbps
Αριθμός ταυτόχρονων ροών	1-3
Τρόπος λειτουργίας	Peer-to-Peer

Πίνακας 3- 1. Παράμετροι εξομοιώσεων για τη συγκριτική μελέτη των IEEE 802.11 & 802.15.4

Ενδεικτικές μετρήσεις που καταδεικνύουν την συγκριτική επίδραση του ρυθμού δημιουργίας κίνησης φαίνονται στα Σχήμα 3- 7, Σχήμα 3- 8, Σχήμα 3- 9.

Σχήμα 3- 7. Μετρήσεις καθυστέρησης ως προς το ρυθμό δημιουργίας κίνησης

Σχήμα 3- 8. Ικανότητα εξυπηρέτησης κίνησης σε μέσο φορτίο

Σχήμα 3- 9. Μετρήσεις μέσης κατανάλωσης με βάση το ρυθμό δημιουργίας κίνησης

Ξεκινώντας από τις μετρήσεις καθυστέρησης το βασικό σημείο που φαίνεται είναι ότι αν και το 802.11 έδωσε υψηλότερη μέγιστη καθυστέρηση, υπερτερεί σαφέστατα στις μετρήσεις μέσης καθυστερήσεις οι οποίες για τους σκοπούς τις διατριβής είναι υψηλότερης σημασίας καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δείκτες ικανοποίησης εφαρμογών με απαιτήσεις ελαστικού πραγματικού χρόνου.

Επίσης καλύτερη απόδοση παρατηρήθηκε από το 802.11 και ως προς την ποσότητα πληροφορίας η οποία επιτυχώς μεταδίδεται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3- 8 από την αρχή δημιουργίας κίνησης το 802.11 έδωσε υψηλότερο διαθέσιμο throughput το οποίο σταθεροποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της εξομοίωσης.

Πολύ ενδιαφέρουσες μετρήσεις κατεγράφησαν και ως προς τη μέση κατανάλωση ενέργειας. Το πολύ ενδιαφέρον σημείο εδώ είναι η πολύ απότομη αύξηση της κατανάλωσης που έδωσε το 802.15.4 μέχρι και τα 200Kbps δημιουργίας κίνησης σε

αντίθεση με την σαφώς πιο βαθμιαία αύξηση που έδωσε το 802.11 αναλογικά με την αύξηση του φορτίου κίνησης. Εντούτοις όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα το πάνω όριο του 802.15.4 είναι σαφώς πιο κάτω από το αντίστοιχο του 802.11 με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα σημείο στο ρυθμό δημιουργίας κίνησης μετά το οποίο το 15.4 πράγματι να δίνει καλύτερες μετρήσεις.

Εστιάζοντας στην επίδραση το πολλαπλών ταυτόχρονων ροών, επίσης λάβαμε πολύ χρήσιμες μετρήσεις όπως φαίνεται στα Σχήμα 3- 10, Σχήμα 3- 11, Σχήμα 3- 12.

Σχήμα 3- 10. Η επίδραση πολλαπλών ταυτόχρονων ροών στη μέση καθυστέρηση

Σχήμα 3- 11. Ικανότητα εξυπηρέτησης κίνησης για 3 ταυτόχρονες ροές δεδομένων

Σχήμα 3- 12. Επίδραση πολλαπλών ροών δεδομένων στις μετρήσεις μέσης κατανάλωσης

Όπως γίνεται φανερό από το Σχήμα 3- 10 ενώ μέχρι και με 2 ροές τα δύο πρωτόκολλα έδωσαν ίδιο επιπέδον καθυστερήσεις, στο σενάριο με τις 3 ροές το 802.15.4 δυσκολεύτηκε πολύ, οδηγώντας το δίκτυο σε σημαντικά αυξημένες καθυστερήσεις λόγω γεμάτων ουρών.

Η δυσκολία αυτή καθρεπτίζεται και στο επόμενο σχήμα που αφορά μόνο το σενάριο το 3 ταυτόχρονων ροών όπου όπως φαίνεται αν και θεωρούμε χαμηλό φορτίο κίνησης η διαφορά είναι ιδιαίτερα σημαντική υπέρ το 802.11.

Τέλος το πλεονέκτημα το 802.11 είναι επίσης σαφές στις μετρήσεις που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας λόγω επικοινωνιακών λειτουργιών των κόμβων καθώς από το σενάριο με 2 ροές κιόλας είναι πάνω από διπλάσια.

Συνοψίζοντας, μετά από επαρκή αριθμό εξομοιώσεων και αναλύοντας τις μετρήσεις ήταν σαφές ότι για τις επικοινωνιακές συνθήκες και τα δικτυακά χαρακτηριστικά στο οποία εστιάζει η διατριβή το 802.11 υπερτερεί και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως το βασικό MAC πρωτόκολλο. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι βασική παράμετρος της προσπάθειας που έγινε στη διατριβή αυτή είναι η εξασφάλιση συμβατότητας και με άλλα MAC πρωτόκολλα όπως το IEEE 802.15.4.

3.5. Το επίπεδο δρομολόγησης

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται σε ένα ad-hoc δίκτυο αποτελεί μαζί με το MAC πρωτόκολλο την κρίσιμότερη επιλογή σχετικά με την λειτουργία και

απόδοση αυτού. Η δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς και με κατανεμημένο τρόπο εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής από έναν κόμβο σε έναν άλλο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα απόδοσης του δικτύου και παράλληλα ένα από τα πιο απαιτητικά χαρακτηριστικά στα ad-hoc δίκτυα. Η δυναμική και απρόβλεπτη συμπεριφορά των κόμβων υπό την ύπαρξη κινητικότητας, αλλαγής χαρακτηριστικών κίνησης κ.α. με παράλληλη απαίτηση ικανοποίησης αυστηρών προδιαγραφών καθυστέρησης, κατανάλωσης ενέργειας κ.α. καθιστούν τη σχεδίαση του αντίστοιχου αλγόριθμου ένα από τα πιο δύσκολα σημεία στο δικτυακού σωρό ενός τέτοιου δικτύου. Επιπλέον οι νέες εφαρμογές που αναπτύσσονται στα πλαίσια των δικτύων αυτών εισάγουν νέα κριτήρια επιλογής της βέλτιστης διαδρομής τα οποία κάνουν τη διαδικασία εύρεσης της εκάστοτε βέλτιστης διαδρομής πραγματικά δύσκολη.

Το επίπεδο αυτό αποτέλεσε σημαντικό σημείο μελέτης στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ώστε να επιτευχθεί σε βάθος η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και απόκρισης των δικτύων αυτών. Στις [17], [41] οι οποίες έγιναν στα πλαίσια της διατριβής έγινε διεξοδική και ενδελεχής συγκριτική μελέτη μεταξύ διαφόρων δημοφιλών και ευρέως χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Στο παρόν μέρος θα παρουσιάσουμε με μια σχετική λεπτομέρεια τα πρωτόκολλα που έτυχαν μελέτης στα πλαίσια της διατριβής και θα αναφερθούν και κάποια επιπλέον πρωτόκολλα.

3.5.1. Κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Διάφοροι τρόποι υπάρχουν ταξινόμησης των εν λόγω πρωτοκόλλων. Ο πιο ευρέως αποδεκτός όμως, ο οποίος αφορά τα πλήρως κατανεμημένα και χωρίς κανέναν κεντρικό έλεγχο δίκτυα έχει ως εξής.

3.5.1.1. Proactive δρομολόγηση

Πρόκειται για αλγόριθμους όπου ο κάθε κόμβος διατηρεί πίνακες δρομολόγησης με διαδρομές προς όλους τους υπόλοιπους κόμβους που συνθέτουν το δίκτυο, ή τουλάχιστον το επόμενο hop προς κάθε μια από τις διαδρομές. Άρα υπάρχει πάντοτε ένα τουλάχιστον διαθέσιμο μονοπάτι προς όλους τους σταθμούς, χωρίς να απαιτείται έναρξη διαδικασίας εύρεσης διαδρομής. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της δυναμικής τοπολογίας του δικτύου και τις συχνές αλλαγές που υφίσταται, χρειάζεται

να αποστέλλονται περιοδικά πακέτα με πληροφορίες ανανέωσης και ενημέρωσης για τις διαδρομές και τους κόμβους που έχουν αλλάξει θέση. Κάτι τέτοιο επιβαρύνει το δίκτυο με επιπλέον πακέτα καθώς δημιουργεί μια πιθανή καθυστέρηση σε γρήγορες αλλαγές, ενώ υπάρχει η απαίτηση για την ενημέρωση ολόκληρου του δικτύου. Έπειτα τέτοιοι αλγόριθμοι συνήθως δεν μπορούν να επεκταθούν σε πολύ μεγάλες συναθροίσεις κόμβων ακριβώς εξαιτίας αυτού του περιοριστικού παράγοντα και των επιπτώσεων που προκαλεί στην πρόσθετη επικοινωνιακή επιβάρυνση (overhead). [42]

3.5.1.2. Reactive δρομολόγηση

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι αλγόριθμοι που ξεκινούν μια διαδικασία εύρεσης διαδρομής προς κάποιο κόμβο, μόνο όταν δεν υπάρχει ήδη κάποια διαθέσιμη. Έτσι χρησιμοποιείται πάντοτε η πιο πρόσφατη πληροφορία για την κατάσταση του δικτύου, αλλά και δεν επιβαρύνεται ο κόμβος με τη διατήρηση επιπλέον διαδρομών, που μερικές από αυτές ίσως να μην χρησιμοποιηθούν και ποτέ. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας ονομάζονται και On-Demand. [43], [44]

3.5.1.3. Υβριδικά πρωτόκολλα

Πρόκειται για πρωτόκολλα που συνδυάζουν τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων κατηγοριών ενώ συνήθως αντιμετωπίζουν το δίκτυο ως ιεραρχική δομή. Η πιο διαδεδομένη διαδικασία είναι να χρησιμοποιείται proactive δρομολόγηση για το εσωτερικό μιας υποομάδας, που συνήθως αποτελείται από περιορισμένο αριθμό κόμβων και reactive δρομολόγηση για την επικοινωνία μεταξύ των υποομάδων. [45]

3.5.2. Ανάλυση βασικών αλγορίθμων δρομολόγησης

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά αλγόριθμοι δρομολόγησης που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

3.5.2.1. DSR – Dynamic Source Routing

Το DSR είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για ad hoc δίκτυα το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική source routing ώστε να επικοινωνήσουν δύο κόμβοι μεταξύ τους. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική ο αποστολέας του πακέτου καθορίζει πλήρως την διαδρομή την οποία πρέπει να ακολουθήσει αυτό, ώστε να φτάσει επιτυχώς στον προορισμό του. Σε αντίθεση με τα pro-active πρωτόκολλα δεν απαιτούνται περιοδικές

μεταδόσεις των πινάκων δρομολόγησης του κάθε πίνακα, αλλά όταν ένας κόμβος χρειάζεται μια διαδρομή προς κάποιον άλλο τότε την καθορίζει με δυναμικό τρόπο, βάση της πληροφορίας που διαθέτει στην cache του, ή ξεκινώντας μια διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής.

Αυτό επιτρέπει στο πρόσθετο επικοινωνιακό κόστος (overhead) που εισάγεται στο δίκτυο να είναι σχεδόν μηδενικό για περιπτώσεις όπου οι κόμβοι που συμμετέχουν σε αυτό είναι σχεδόν ακίνητοι. Όταν οι κόμβοι αρχίζουν να κινούνται και η τοπολογία του δικτύου αλλάζει, τότε το overhead περιορίζεται μόνο μέχρι το σημείο εκείνο το οποίο εξυπηρετεί και διατηρεί τις ενεργές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων.

Όταν ένας σταθμός επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο σε κάποιον άλλο, τότε εισάγει στην επικεφαλίδα του πακέτου, ολόκληρη τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει (source route) το πακέτο, δηλαδή τα διαδοχικά hops από τον ένα ενδιαμέσο κόμβο στον άλλο, ώστε να φτάσει στον τελικό προορισμό του. Αν ο σταθμός δεν γνωρίζει κάποια διαδρομή προς τον παραλήπτη, τότε εκκινεί μια διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής στέλνοντας πακέτα "Route Request" σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται εντός της ασύρματης εμβέλειας του. Αυτοί οι κόμβοι αναμεταδίδουν αυτό το πακέτο μέχρι να βρεθεί ο παραλήπτης του και κάθε φορά προσθέτουν τον εαυτό τους, στη λίστα των σταθμών που το έχουν αναμεταδώσει, ώστε να το απορρίψουν σε περίπτωση που για κάποιο λόγο το λάβουν ξανά μέσω άλλης διαδρομής. Στα σχήματα Σχήμα 3- 13 και Σχήμα 3- 14 απεικονίζονται δύο βασικές αρχές της διαδικασίας εύρεσης διαδρομής στην περίπτωση του DSR. Στο Σχήμα 3- 13 φαίνεται η διάδοση ενός Route Request πακέτου και η διαδοχική συμπλήρωση της διαδρομής μέσω της οποίας διαδόθηκε ενώ το Σχήμα 3- 14 καταδεικνύει τη μια περίπτωση απόρριψης Route Request πακέτων προς περιορισμό του πλημμυρίσματος του δικτύου.

Σχήμα 3- 13. Διαδικασία διάδοσης Route Request πακέτων [2]

Όταν ο τελικός προορισμός λάβει το πακέτο Route Request τότε θα απαντήσει στον αποστολέα με ένα πακέτο Route Reply. Για να στείλει το πακέτο αυτό πίσω θα αναζητήσει μια διαδρομή προς τον αρχικό αποστολέα που υπάρχει διαθέσιμη στην cache του. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει μια τέτοια διαδρομή, τότε αναλαμβάνει να ξεκινήσει κι αυτός διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής με ένα πακέτο Route Request, στο οποίο όμως συμπεριλαμβάνει και το Route Reply πακέτο, ώστε αυτή η κατάσταση να μην επαναλαμβάνεται ατέρμονα. Ο τελικός προορισμός θα μπορούσε απλώς να αντιστρέψει τη διαδρομή που βρήκε στο πακέτο Route Request, όμως αυτό μπορεί να γίνει μόνο σε περίπτωση που είναι εξασφαλισμένο ότι όλες οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων είναι bi-directional, ή σε περίπτωση που το MAC πρωτόκολλο διαχειρίζεται μόνο τέτοιες συνδέσεις, όπως συμβαίνει με το πολύ γνωστό και διαδεδομένο IEEE 802.11.

Σχήμα 3- 14. Διαδικασία απόρριψης Route Request πακέτων [2]

Κάποια από τα μειονεκτήματα που εισάγει ο αλγόριθμος είναι το υψηλό υπολογιστικό κόστος σε κάθε σταθμό εξαιτίας των πολλών και ταυτόχρονων λειτουργιών που καλείται να επιτελέσει για όλες τις διαδικασίες που απαρτίζουν τον αλγόριθμο. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι ο DSR δεν είναι scalable, δηλαδή δεν είναι αποτελεσματικό να εφαρμοστεί σε πολύ μεγάλα δίκτυα, με πολλούς κόμβους που θέλουν να επικοινωνήσουν. Αυτό συμβαίνει γιατί χρησιμοποιεί την τεχνική

source routing επομένως μια διαδρομή αποτελείται από πολλά διαδοχικά hops και μπορεί να πάψει να είναι έγκυρη μέχρι το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του. Έπειτα αυξάνεται δραματικά και το υπολογιστικό κόστος καθώς ένας σταθμός επεξεργάζεται όλα τα πακέτα που λαμβάνει ώστε να ανακαλύψει διαδρομές και να ενημερώσει τους πίνακες δρομολόγησης του [43].

3.5.2.2. AODV – Ad-hoc On-Demand Distance Vector Algorithm

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης AODV, συνδυάζει χαρακτηριστικά από τα πρωτόκολλα DSR και DSDV και ανήκει στην κατηγορία των On-demand (ή reactive) ad-hoc πρωτοκόλλων. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι του δικτύου που δεν βρίσκονται πάνω σε ενεργές διαδρομές δεν διατηρούν πληροφορία δρομολόγησης αλλά ούτε και συμμετέχουν σε περιοδικές ανταλλαγές των πινάκων δρομολόγησης. Ένας κόμβος ανακαλύπτει και διατηρεί μια διαδρομή προς κάποιον άλλο μόνο όταν χρειαστεί να επικοινωνήσει μαζί του.

Όταν η τοπική συνδεσιμότητα του κινούμενου κόμβου είναι σημαντική, ο κάθε κόμβος μπορεί να πληροφορηθεί για την ύπαρξη γειτονικών κόμβων, δηλαδή εντός της εμβέλειας μετάδοσης του, με τη χρήση διαφόρων τεχνικών όπως η τοπική μετάδοση μηνυμάτων γνωστά ως “hello messages”. Οι πίνακες δρομολόγησης των κόμβων εντός της εμβέλειας μετάδοσης (ή γειτονιάς του κόμβου) είναι οργανωμένοι έτσι ώστε να βελτιστοποιούν το χρόνο απόκρισης σε τοπικές κινήσεις και να παρέχουν γρήγορη εδραίωση νέων διαδρομών. Ακόμα με τη χρήση των “hello messages” ο σταθμός μπορεί να διαπιστώσει με ποιους από τους γειτονικούς σταθμούς έχει bi-directional σύνδεση.

Σε αντίθεση με τον DSR ο AODV δεν χρησιμοποιεί τη source routing τεχνική για να μεταδώσει ένα πακέτο. Δηλαδή δεν απαιτεί την πλήρη γνώση της διαδρομής από τον αποστολέα μέχρι τον τελικό παραλήπτη. Αντίθετα διατηρεί σε κάθε ενδιαμέσο κόμβο της διαδρομής την απαραίτητη πληροφορία σχετικά με την επόμενη κατεύθυνση που πρέπει να λάβει το πακέτο ώστε να φτάσει στον προορισμό του. Αυτό γίνεται ώστε να υπάρχει η πιο πρόσφατη πληροφορία δρομολόγησης σε ένα δυναμικό περιβάλλον που αλλάζει γρήγορα εξαιτίας της ασύρματης φύσης τους αλλά και από το γεγονός ότι οι κόμβοι είναι κινούμενοι. Ακόμα σε δίκτυα με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων αυτή η τεχνική μειώνει το overhead από την μεταφορά όλης της διαδρομής με το πακέτο που μεταδίδεται.

Τέλος ο αλγόριθμος αποκρίνεται γρήγορα σε περιπτώσεις όπου κάποια σύνδεση έχει σπάσει και έχει τη δυνατότητα να βρει σε λίγο χρόνο μια εναλλακτική κατεύθυνση προς τον προορισμό που εξυπηρετούσε αν του χρειάζεται ακόμα [44].

3.6. Ανακεφαλαίωση

Σημαντικό κομμάτι της διατριβής αποτέλεσε η τριβή και εμπειρία που αποκτήθηκε σε όλο το εύρος της δικτυακής υποδομής ενός ασύρματου δικτύου αλλά και πιο συγκεκριμένα για ένα ad-hoc δίκτυο. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ενασχόλησης με τα κρίσιμότερα επίπεδα του δικτυακού σωρού (network stack). Το επίπεδα αυτά είναι:

Επίπεδο προσπέλασης μέσου. Ίσως αποτελεί το κρίσιμότερο επίπεδο που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του δικτύου. Στην πορεία την διατριβής υπήρξε ενασχόληση με διάφορες ασύρματες λύσεις όπως το 802.15.4, Bluetooth αν και ο κορμός βασίστηκε στο γνωστό IEEE 802.11 το οποίο αποτελεί και την de-facto επιλογή στα σημερινά ασύρματα δίκτυα. Η επιλογή αναλύεται λεπτομερώς στο σώμα του κεφαλαίου.

Επίπεδο δρομολόγησης. Ακρογωνιαίος λίθος στα πλήρως ad-hoc δίκτυα χωρίς δικτυακή υποδομή όπου κάθε ροή μπορεί να αποτελείται από σημαντικό αριθμό προωθήσεων. Σε τέτοια περιβάλλοντα η εύρεση αλλά και ενημέρωση των βέλτιστων διαδρομών αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο και σημαντικό έργο. Σε συνδυασμό με το ότι ο χαρακτηρισμός “βέλτιστος” από μόνος του δεν χαρακτηρίζει όλες τις περιπτώσεις καταλαβαίνουμε τη κρίσιμότητα του θέματος.

Επίπεδο μεταφοράς. Επίσης ένα πολύ σημαντικό επίπεδο το οποίο αν και αποδίδει σημαντικά οφέλη στα ενσύρματα δίκτυα ο ρόλος του στα ασύρματα είναι πολύ πιο νευραλγικός καθιστώντας την επιλογή του αντίστοιχου πρωτοκόλλου ιδιαίτερος σημαντική. Στο τομέα αυτό αξιολογήθηκαν οι δύο μεγάλες κατηγορίες πρωτοκόλλων (TCP vs UDP) τόσο σε πλήρως ασύρματα αλλά και σε ανάμεικτα δίκτυα. Η διατριβή στηρίχτηκε στο UDP πρωτόκολλο και η επιλογή τεκμηριώνεται επαρκώς.

Επίπεδο δικτύου. Εδώ οι συνθήκες είναι πολύ πιο ξεκάθαρες. Η διάδοση του IP πρωτοκόλλου και η ανάπτυξη αυτού το καθιστά σε de-facto standard στο επίπεδο αυτό.

4. Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση της cross-layer προσέγγισης.

4.1.Εισαγωγή

Τα ασύρματα (και όχι μόνο) δίκτυα βασίστηκαν από την εμφάνισή τους στο γνωστό OSI/ISO μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό βασίστηκε η αρχιτεκτονική δικτύων κατά επίπεδα η οποία έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διάδοση και ανάπτυξη των επικοινωνιακών συστημάτων γενικότερα αλλά και των ασύρματων δικτύων ειδικότερα, τουλάχιστον μέχρι σήμερα. Η μεγάλη επιτυχία και καινοτομία της αρχιτεκτονικής αυτής ήταν να προσφέρει τμηματικόποίηση και παράλληλα διαφάνεια στη μέχρι τότε “μονοκόμματα” δικτυακή δομή (network stack).

Χωρίζοντας το δικτυακό σωρό σε επίπεδα και αναθέτοντας ρόλους και υπηρεσίες σε κάθε ένα από αυτά εισήγαγε κρίσιμα για το μέλλον χαρακτηριστικά. Καταρχήν, και ίσως σημαντικότερο από όλα ήταν ότι δημιουργήθηκε η έννοια της “ανοικτής αρχιτεκτονικής”. Η έννοια αυτή καθιστούσε δυνατή τη συνεργασία υλοποιήσεων διαφορετικών κατασκευαστών αρκεί να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του κοινού αυτού μοντέλου αναφοράς, ανεξάρτητα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά με τα οποία υλοποιούνται τα επιμέρους επίπεδα από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Επιπλέον έγινε πιο εύκολη η εξέλιξη-βελτίωση των υλοποιήσεων καθώς πλέον ο εκάστοτε ερευνητής είχε τη δυνατότητα να επικεντρωθεί με ένα επίπεδο απομονωμένα χωρίς να πρέπει να ενδιαφέρεται για το υπόλοιπο δικτυακό σωρό γεγονός που διευκόλυνε πάρα πολύ την ανάπτυξη πρωτοκόλλων για συγκεκριμένα επίπεδα (π.χ. MAC, δρομολόγησης, δικτύου κτλ.)

Εντούτοις όσο ο χώρος των ασύρματων δικτύων εξελίσσεται γίνεται φανερό ότι η βελτιστοποίηση της απόδοσης εντός των επιπέδων δεν μπορεί να αποδώσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να υποστηρίξει την ανάπτυξη ασύρματων υπηρεσιών και δικτύων της επόμενης γενιάς. Λύσεις που εστιάζουν σε συγκεκριμένα επίπεδα αναπτύσσονται διαρκώς τα τελευταία χρόνια και έχουν όντως αποδώσει σημαντικά οφέλη στην απόδοση και σθεναρότητα των δικτύων. Είναι, λοιπόν, λογικό ότι πλέον κάθε επιπλέον αύξηση απόδοσης συνοδεύεται από σημαντική αύξηση πολυπλοκότητας του συστήματος η οποία υπερκαλύπτει τα όποια, πολλές φορές περιορισμένα οφέλη.

Παράλληλα όμως, οι απαιτήσεις αυξάνονται οδηγώντας σε αλλαγή της προσέγγισης ανάπτυξης λύσεων εν γένει, εκτός των πλαισίων του OSI/ISO μοντέλου.

Η επίτευξη της απαιτούμενης βελτίωσης της απόδοσης καθιστά αναγκαίο, στη σχεδίαση πρωτοκόλλων ή αρχιτεκτονικών, να μην αντιμετωπίζεται το κάθε επίπεδο ξεχωριστά αλλά σε συνδυασμό με άλλα προς επίτευξη κοινών σκοπών. Στην cross-layer λογική, λοιπόν, γίνεται προσπάθεια να ληφθούν υπ' όψιν ή ακόμα και να εκμεταλλευτούν αλληλεξαρτήσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών επιπέδων που μέχρι τώρα αγνοούντο. [46], [47]

4.2. Οφέλη από την cross-layer προσέγγιση

Πολλοί και κυρίως σημαντικοί λόγοι έχουν αποτελέσει κίνητρο για την προώθηση της cross-layer λογικής και μερικοί από αυτούς αναφέρονται στη συνέχεια.

4.2.1. Βελτιστοποίηση σε συγκεκριμένο τομέα μπορεί να επιτευχθεί σε πολλαπλά επίπεδα.

Πολλοί από του στόχους βελτιστοποίησης αφορούν και μπορούν να επιτευχθούν σε περισσότερα του ενός επίπεδα. Το γεγονός αυτό από μόνο το οδηγεί μονοσήμαντα στην cross-layer αντιμετώπιση του εκάστοτε προβλήματος. Για παράδειγμα γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου εξαρτάται και επηρεάζεται σε κάποιο βαθμό από όλα τα επίπεδα του δικτυακού σωρού. Ένα ακόμα παράδειγμα είναι η κατανάλωση ενέργειας. Πραγματικά βέλτιστη αντιμετώπιση του θέματος αυτού γίνεται μόνο αν ληφθεί υπ' όψιν ότι στην κατανάλωση συνεισφέρει τόσο το φυσικό μέσο με την ισχύ μετάδοσης-λήψης-αδράνειας, όσο και το MAC, όσο και το routing επίπεδο με την διαδρομή που επιλέγει.

4.2.2. Η βελτιστοποίηση σε συγκεκριμένο τομέα από ένα συγκεκριμένο επίπεδο μπορεί να χρειάζεται τη συνεργασία άλλων επιπέδων για να αναδειχθεί

Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αποτελεί ένα από τα κυριότερα κίνητρα επιλογής της cross-layer σχεδίασης έναντι της σχεδίασης μέσω επιπέδων. Η τελευταία οδηγεί σε μυωπική αντιμετώπιση ενός προβλήματος καθώς επιτρέπει να υπάρξουν περιπτώσεις όπου μια παράμετρος βελτιστοποιείται σε ένα επίπεδο αλλά η συμφόρηση ή με άλλα λόγια ο λόγος κακής απόδοσης (bottleneck) βρίσκεται σε άλλο επίπεδο. Έτσι λοιπόν, δεν έχει νόημα να υλοποιηθεί το ιδανικό πρωτόκολλο επιπέδου

MAC που παρέχει μηδενική καθυστέρηση στη πρόσβαση καναλιού όταν το bottleneck βρίσκεται στη κακή δρομολόγηση του πακέτου που, φυσικά, οφείλεται στο επίπεδο δρομολόγησης. Στην περίπτωση αυτή η επίδραση του βελτιωμένου MAC πρωτοκόλλου, όταν θα ενσωματωθεί στο δικτυακό σωρό, θα είναι είτε σημαντικά υποβαθμισμένη ή ακόμα και αμελητέα.

4.2.3. Ορθογωνιότητα μεταξύ βελτιστοποιήσεων

Αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα στην αντιμετώπιση χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων και επίσης έναν από τους σημαντικότερους τομείς αποτυχίας της σχεδίασης κατά επίπεδα. Είναι γεγονός ότι στα ασύρματα δίκτυα και ειδικά στα MANET – sensor υπάρχει σε πολλές περιπτώσεις ορθογωνιότητα μεταξύ των στόχων βελτιστοποίησης. Με άλλα λόγια μπορεί η βελτίωση ενός μέτρου απόδοσης να έχει αρνητικές συνέπειες σε ένα άλλο. Ακόμα περισσότερο δε όταν η ορθογωνιότητα αυτή υπάρχει και ανάμεσα σε διαφορετικά επίπεδα η κατά επίπεδα σχεδίαση αποτυγχάνει καθώς δεν μπορεί να το αντιληφθεί αντίθετα με την cross-layer προσέγγιση η οποία το λαμβάνει υπ' όψιν της. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να υπάρξει ένα είδους trade-off μεταξύ των “αντιμαχόμενων” στόχων βελτιστοποίησης ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός βελτιστοποίησης ανάλογα με το είδος του δικτύου καθώς και τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εκεί είναι που επεμβαίνει η cross-layer σχεδίαση καθώς αναλαμβάνει το έλεγχο αυτού του trade-off.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σχέση επιλογής δρομολόγησης ενός πακέτου μέσω του δρόμου με τον ελάχιστο αριθμό προωθήσεων (number of hops) με σκοπό την μείωση της καθυστέρησης με τη ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης (congestion) στο δίκτυο και τη συνεπακόλουθη αύξηση της καθυστέρησης. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η κύρια παράμετρος επιλογής δρομολόγησης όλων των γνωστών πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των προωθήσεων των πακέτων (minimum number of hops). Ένας από τους λόγους χρησιμοποίησης της παραμέτρου αυτής είναι η ελαχιστοποίηση καθυστέρησης μετάδοσης ενός πακέτου. Από την άλλη, όμως, είναι αποδεδειγμένο ότι όταν υπάρχουν πολλαπλές ροές δεδομένων και όλες επιλέγουν δρομολόγηση με το παραπάνω κριτήριο αυξάνεται κατά πολύ η πιθανότητα ανάπτυξης ανταγωνισμού καθώς πολλές θα περνάνε από κοινούς κόμβους (το νοητό κέντρο του δικτύου ή του cluster) ειδικά σε πυκνά δίκτυα.

Κάτι τέτοιο όμως είναι σαφές ότι οδηγεί σε δραματική αύξηση της αναμενόμενης καθυστέρησης των πακέτων.

Είναι σαφές λοιπόν ότι το ίδιο κριτήριο που βελτιώνει την απόδοση ενός επιπέδου όταν προσεγγιστεί σαν μέρος όλου του δικτυακού σωρού δεν θα αποδώσει τα αναμενόμενα και ίσως προκαλέσει μεγαλύτερη υποβάθμιση της απόδοσης παρά βελτίωση.

4.2.4. Σε πολλές περιπτώσεις δεν χρειάζονται όλα τα επίπεδα του OSI/ISO μοντέλου.

Το OSI/ISO μοντέλο δημιουργήθηκε κατά κύριο λόγο για τα ενσύρματα δίκτυα και με σκοπό να συμπεριλάβει όλες τις δυνατές υπηρεσίες και λειτουργίες αυτών. Οι συνθήκες, όμως, στα ασύρματα δίκτυα είναι αρκετά διαφορετικές καθώς πολλές από τις υπηρεσίες δεν υλοποιούνται για διάφορους λόγους. Ακόμα περισσότερο δε σε δίκτυα όπως τα MANET και αισθητήρων όπου κυριαρχούν χαρακτηριστικά όπως περιορισμένοι πόροι και συγκεκριμένες εφαρμογές ότι όποιο χαρακτηριστικό δεν χρησιμοποιείται όχι μόνο περισεύει αλλά αποτελεί και παράγοντα υποβάθμισης της απόδοσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι είναι κοινά αποδεκτό πως για ασύρματα δίκτυα τα επτά επίπεδα του αρχικού μοντέλου μειώνονται σε 5 και αυτά είναι το φυσικό, το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου, δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής. Σαν παράδειγμα της προσέγγισης εδώ αναφέρουμε την εφαρμογή multi-hop Local Positioning System (LPS) όπου η σχετική απόσταση μεταξύ οποιοδήποτε κόμβων μετριέται hop-by-hop μέτρηση απόστασης και επιπλέον πληροφορίες. Η εφαρμογή αυτή, λοιπόν, θεωρεί ότι τα επίπεδα δικτύου και μεταφοράς είναι περιττά. Η παραπάνω προσπάθεια δείχνει ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η υποστήριξη συγκεκριμένων εφαρμογών μπορεί να καθορίσει την ίδια τη δομή του δικτυακού σωρού όταν χρησιμοποιείται η cross-layer λογική.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ακόλουθος πίνακας στον οποίο απεικονίζονται οι προσεγγίσεις βελτιστοποίησης ανά επίπεδο και ανά περιοχή βελτιστοποίησης [96].

Επίπεδο	Ευκολία μεταβολής κλίμακας	Διάρκεια ζωής συστήματος	Ευελιξία λειτουργίας κόμβου
Εφαρμογής	Συγχώνευση-Συμπίεση δεδομένων,	Έλεγχος τρόπου λειτουργίας με power-aware κριτήρια	Ανίχνευση φορτίου, απόφαση τρόπου λειτουργίας
Μεταφοράς	Οριοθετημένη καθυστέρηση	QoS – power tradeoff	Έλεγχος μεταφοράς με βάση το φορτίο
Δικτύου	Ονομασία κόμβων, Αποτελεσματική δρομολόγηση, Αποτελεσματική εύρεση κόμβων	Power-aware δρομολόγηση, Μείωση επιπλέον φορτίου.	Δρομολόγηση με βάση το φορτίο, Απλοποιημένη εύρεση κόμβου, Κατανεμημένη αποθήκευση
MAC	Έλεγχος ανταγωνισμού, μείωση πιθανότητας συμφόρησης, Αποδοτική χρήση του καναλιού	Συγχρονισμένη απενεργοποίηση, Έλεγχος της ακτίνας μετάδοσης	Κατανομή καναλιού με βάση το φορτίο
Φυσικό	Ultra-Wide Band	Σχεδίαση χαμηλής κατανάλωσης, Ισχυρή μπαταρία	Δυνατότητα προσαρμογής εξωτερικών εργαλείων (GPS)

Πίνακας 4- 1. Περιοχές Βελτιστοποίησης.

4.3. Μέθοδοι εφαρμογής της cross-layer προσέγγισης

Ένα ακόμα κρίσιμο χαρακτηριστικό είναι το πώς εφαρμόζεται η cross-layer προσέγγιση. Από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτουν τρεις γενικοί τρόποι.

- Ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επιπέδων. Σε αυτή τη κατηγορία επίπεδα δέχονται, αξιολογούν και χρησιμοποιούν πληροφορίες προερχόμενες από άλλα επίπεδα προς βελτίωση της λειτουργίας τους. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η κατάτμηση του δικτυακού σωρού σε επίπεδα, πολλές φορές, αποκρύπτει χρήσιμα στοιχεία από επίπεδα που σε αντίθετη περίπτωση θα μπορούσαν να τα χρησιμοποιήσουν προς βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου.
- Ενσωμάτωση σε επίπεδα λειτουργιών και ρόλων άλλων επιπέδων. Με τη συνεχή εξέλιξη των τεχνολογιών δικτύων συγκεκριμένες λειτουργίες ισχυροποιούνται όταν αποδεικνύονται κρίσιμες άλλες εξασθενούν και άλλες αποδεικνύεται ότι θα ήταν πιο αποτελεσματικές σε άλλο επίπεδο. Σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρείται ισχυρή σύζευξη, γειτονικών συνήθως, επιπέδων και αλλαγή ρόλων και λειτουργιών.

- Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα πλαίσια (framework) και τα middleware. Αν και πρόκειται για δύο διαφορετικές προσεγγίσεις αναφέρονται εδώ μαζί καθώς μοιράζονται το κοινό στοιχείο της δημιουργίας νέων οντοτήτων μέσω των οποίων υλοποιείται η επιθυμητή σχεδίαση. Τα πλαίσια (framework) αποτελούν δομές που περικλείουν όλο το δικτυακό σωρό και μπορούν να αλληλεπιδρούν με όλα τα επίπεδα αυτού. Με τη λέξη “αλληλεπίδραση” εννοούμε τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών από το OSI μοντέλο, επεξεργασία αυτής σε modules του πλαισίου έξω από τα αυστηρά όρια του μοντέλου αλλά και δυνατότητα παροχής πληροφοριών στο μοντέλο όπως και επηρεασμό της λειτουργίας των επιπέδων. Φυσικά η λειτουργία γίνεται παράλληλα με αυτήν των επιπέδων. Από την άλλη με την έννοια middleware συνήθως αναφερόμαστε σε εμβόλιμα υπό-επίπεδα ανάμεσα σε συγκεκριμένα επίπεδα με σκοπό την ενίσχυση σύζευξης της λειτουργίας των δύο γειτονικών επιπέδων. Και σε αυτή τη περίπτωση η νέα οντότητα δύναται τόσο να ανταλλάσει πληροφορίες όσο και να επηρεάζει την ίδια τη λειτουργία των επιπέδων.

Στη παρούσα διατριβή επιλέχτηκε η τρίτη κατηγορία υλοποίησης της cross-layer προσέγγισης και μάλιστα η περίπτωση προσπάθειας βελτιστοποίησης μέσω της δημιουργίας ενός ευέλικτου και παραμετροποιήσιμου πλαισίου (framework). Κύριοι λόγοι για την επιλογή αυτή είναι οι εξής:

- Συμβατότητα: Στο χώρο των ad-hoc ασύρματων δικτύων σε πολλά επίπεδα συγκεκριμένα πρωτόκολλα και υλοποιήσεις προβάλλουν ως τα λεγόμενα de facto standards. Δηλαδή η αποδοχή και χρήση τους είναι τόσο ευρεία που καθιστούν δύσκολη την αμφισβήτησή τους από κάποια άλλη πρόταση. Σε αυτές τις συνθήκες είναι κρίσιμης σημασίας η όποια προσπάθεια βελτιστοποίησης της απόδοσης του δικτύου να εξασφαλίζει συμβατότητα με τα υπάρχοντα δημοφιλή πρωτόκολλα. Επιπλέον καθιστά πιο εύκολη και άμεση της σύγκριση της απόδοσης. Η επιλογή του πλαισίου από την άλλη αυξάνει το χρονικό διάστημα στο οποίο είναι επίκαιρη η υλοποίηση καθώς μέσω της συμβατότητας με τα παρόντα de facto standards αυξάνεται κατά πολύ η πιθανότητα συμβατότητας με τα μελλοντικά δημοφιλή πρωτόκολλα.

- Ελαχιστοποίηση του overhead πολυπλοκότητας: τα σύγχρονα πρωτόκολλα για να ικανοποιήσουν τις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις αποτελούν, πλέον, ιδιαίτερα πολύπλοκες σχεδιάσεις – υλοποιήσεις. Κάτι τέτοιο γίνεται σαφές εξετάζοντας τα επίσημα standards των πρωτοκόλλων ή τις υλοποιήσεις αυτών οι οποίες αποτελούνται από μεγάλο πλήθος πολύπλοκων αλγορίθμων. Έτσι λοιπόν οποιαδήποτε επέμβαση στο ίδιο το standard εκτός οτιδήποτε άλλου, είναι πολύ πιθανό να επιφορτίσει το δίκτυο με επιπλέον πολυπλοκότητα. Αντίθετα στη προσέγγιση του πλαισίου επειδή όλη η επεξεργασία γίνεται εκτός των επιπέδων του OSI μοντέλου είναι πιο εύκολος και αποτελεσματικός ο έλεγχος της επιπλέον εισαγόμενης πολυπλοκότητας.
- Ευελιξία: Βασικό πλεονέκτημα της δημιουργίας πλαισίου είναι να δίνει σημαντικές δυνατότητες ευελιξίας. Καταρχήν δεν περιορίζεται από το ίδιο το OSI μοντέλο καθώς το cross-layer μπορεί να υλοποιηθεί ανάμεσα σε οποιοδήποτε επίπεδο/α. Επιπλέον τα ίδια τα πρωτόκολλα που υλοποιούν συγκεκριμένα επίπεδα εισάγουν πολλούς και αυστηρούς περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν όταν τροποποιείται το εκάστοτε πρωτόκολλο.
- Συνεργασία με κόμβους που δεν ενσωματώνουν τη προτεινόμενη σχεδίαση: βασική απαίτηση σε δίκτυα τύπου MANET ή αισθητήρων είναι η υποστήριξη του χαρακτηριστικού της επεκτασιμότητας. Αυτή πρακτικά υπαγορεύει τη συνέχιση της εύρυθμης λειτουργίας του δικτύου στην περίπτωση της αύξησης του πλήθους των κόμβων. Στην περίπτωση της cross-layer προσέγγισης και σε σχέση με την επεκτασιμότητα το κυρίαρχο ερώτημα που τίθεται είναι: οι κόμβοι που ενσωματώνουν την cross-layer προσέγγιση μπορούν να συνεργαστούν με κόμβους που δεν την ενστερνίζονται. Και σε αυτό το τομέα η δημιουργία ενός πλαισίου αποδίδει καλύτερα καθώς είναι πολύ εύκολο να απομονωθούν οι επιπλέον cross-layer λειτουργίες.

Από τα παραπάνω εννοιολογικά είναι σαφές ότι μεταβαίνουμε από το κλασικό OSI/ISO μοντέλο σε ένα με τα 5 απαραίτητα επίπεδα για ασύρματα δίκτυα (Φυσικό, Data link, δικτύου, μεταφοράς, εφαρμογής) και από εκεί σε μια νέα δομή όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Όπως φαίνεται το πλαίσιο περικλείει όλο το δικτυακό σωρό, επικοινωνεί με όλα τα επίπεδα αυτού και σε κάθε περίπτωση πρέπει να εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες.

1. Συλλογή πληροφοριών από ένα ή περισσότερα επίπεδα
2. Επεξεργασία αυτών με ένα ή συνδυασμό αλγορίθμων και κριτηρίων
3. Εξαγωγή πληροφοριών ή εντολών προς ένα ή περισσότερα επίπεδα.

Σχήμα 4- 1. Γενική αναπαράσταση της cross-layer προσέγγισης μέσω δημιουργίας πλαισίου (framework).

4.4. Προκλήσεις-Κίνδυνοι από την cross-layer σχεδίαση

Στη μέχρι τώρα παρουσίαση αναφερθήκαμε στα θετικά σημεία της προσέγγισης. Εντούτοις, παρά την αναμφισβήτητη προοπτική της cross-layer σχεδίασης που προκύπτει από την μέχρι τώρα παρουσίαση αλλά και την σημαντική υπάρχουσα ερευνητική εργασία που θα παρουσιαστεί παρακάτω, υπάρχουν δύσκολα σημεία και λόγοι που επιβάλλουν την ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση αυτής. Κάποιους από αυτούς τους λόγους παρουσιάζουμε εδώ.

4.4.1. Διατήρηση της τμηματικοποίησης

Ένα από τα κρισιμότερα σημεία που χρήζουν προσοχής όταν εφαρμόζεται η συγκεκριμένη σχεδίαση είναι η πιθανότητα να καταστραφεί η τμηματικοποίηση που προσφέρει το OSI/ISO μοντέλο. Όπως έχει αναφερθεί η βασικότερη επέμβαση που έκανε το OSI μοντέλο στο δικτυακό σωρό είναι να το τμηματικοποιήσει, να το χωρίσει σε επίπεδα. Ο διαχωρισμός αυτός εκτός άλλων εγγυάται και σημαντική σταθερότητα. Η cross-layer σχεδίαση “χαλάει” και αναπροσαρμόζει αυτή τη αυστηρή κατηγοριοποίηση κατά επίπεδα. Έτσι λοιπόν μια τέτοια σχεδίαση που θα επεμβαίνει υπερβολικά στο μοντέλο ενδεχομένως να θέτει σε κίνδυνο τη σταθερότητα όλου του δικτυακού σωρού. Σε κάθε περίπτωση η εκάστοτε σχεδίαση πρέπει να λειτουργεί παράλληλα με το μοντέλο και όχι να προσπαθεί να το αντικαταστήσει. Κάτι τέτοιο απαιτεί πολύ καλή γνώση της αλληλεπίδρασης των επιπέδων έτσι ώστε η σχεδίαση να επεμβαίνει για να βελτιώνει τις ατέλειες της αλληλεπίδρασης αυτής χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τη σταθερότητα του δικτύου.

4.4.2. Δυσκολία σχεδίασης

Είναι αρκετοί οι λόγοι που καθιστούν τη σχεδίαση μιας cross-layer πρότασης ιδιαίτερα δύσκολη σε σχέση με μια πρόταση που στοχεύει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Ο κυριότερος λόγος είναι η απαίτηση σύζευξης λειτουργιών διαφόρων επιπέδων (πολλές φορές πάνω από 2) που εκ φύσεως καθιστά τη σχεδίαση προβληματική σε πολλές περιπτώσεις. Επιπλέον μια cross-layer αρχιτεκτονική μπορεί να επεμβαίνει σε παραπάνω του ενός επιπέδου ταυτόχρονα, οπότε η πρόβλεψη κάθε πιθανής επίδρασης είναι πολύ πιο πολύπλοκη σε σχέση με την επίδραση σε ένα και μόνο επίπεδο. Ένας ακόμα λόγος είναι η ορθογωνιότητα των παραμέτρων λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου η αντιμετώπιση της οποίας γίνεται ακόμα πιο δύσκολη όταν πρέπει λαμβάνονται υπ’ όψιν πολλά επίπεδα μαζί. Επίσης η περίπτωση δημιουργίας ενός καινούργιου πλαισίου μπορεί από τη μια να δίνει μεγάλη ελευθερία κινήσεων αλλά από την άλλη η ίδια αυτή ελευθερία κάνει πιο πολύπλοκη την βέλτιστη σχεδίαση.

4.4.3. Δυσκολία αναλυτικής μελέτης

Η εφαρμογή αναλυτικών μοντέλων σε ένα σύστημα βοηθάει ιδιαίτερα στην πλήρη κατανόηση των παραμέτρων και του τρόπου λειτουργίας του συστήματος αυτού. Με απλά λόγια κάνει δυνατή τη ανάλυση όχι μόνο του αν το σύστημα λειτουργεί σωστά αλλά και για το γιατί λειτουργεί σωστά. Και ακόμα πιο σημαντική είναι η συνεισφορά στο γιατί δεν λειτουργεί σωστά ένα σύστημα. Εντούτοις, η εφαρμογή και πολύ περισσότερο η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία ιδιαίτερα σε εκτεταμένα δίκτυα και σε επίπεδο συστήματος το οποίο αποτελεί το κύριο ενδιαφέρον της διατριβής [53], [92]. Τα πράγματα είναι ακόμα πιο δύσκολα όταν τέτοια μοντέλα πρέπει να περιγράψουν cross-layer σχεδίαση. Πράγματι, η μεγάλη ευελιξία και όλα τα ιδιαίτερα τα χαρακτηριστικά της cross-layer προσέγγισης, που έχουμε ήδη αναφέρει εν πολύς, καθιστούν την αποστολή περιγραφής τους σε επίπεδο συστήματος και για μεγάλης κλίμακας δίκτυα μέσω αναλυτικών μοντέλων ιδιαίτερα δύσκολη και πολλαπλά απαιτητικότερη από τη περιγραφή λύσεων προσανατολισμένων σε επίπεδα. Κατά συνέπεια πολύ συχνά μια τέτοια σχεδίαση απαιτεί ευρετική και διαισθητική προσέγγιση και ανάλυση. Κάτι τέτοιο πάντα συνεπικουρείται από υλοποίηση της προσέγγισης σε εξομοιωτικά περιβάλλοντα και εργαλεία καθώς και την βελτιστοποίηση αυτής μέσω διεξοδικών εξομοιώσεων και μελέτη αυτών. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται μερικές φορές και ως brute-force simulation/optimization.

4.5. Μελέτη cross-layer χαρακτηριστικών ad-hoc ασύρματων δικτύων.

Θέλοντας να μελετήσουμε την συσχέτιση και αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ διαφόρων επιπέδων και παραμέτρων των ad-hoc ασύρματων δικτύων στα πλαίσια της διατριβής έγινε μια εκτενής μελέτη της συμπεριφοράς και απόδοσης των δικτύων αυτών κάτω από διάφορες συνθήκες και μεταβάλλοντας μεγάλο πλήθος δικτυακών παραμέτρων. Από τη μελέτη αυτή εξήχθησαν πολλά χρήσιμα συμπεράσματα για τους τομείς εφαρμογής της cross-layer προσέγγισης καθώς και για τις υπάρχουσες συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών επιπέδων στα εν λόγω δίκτυα [17], [48]. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίζουμε ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την

έκδοση 2.26 του εξομοιωτή δικτύων network simulation 2 [49]. Κατά συνέπεια και όσο αφορά τα απόλυτα νούμερα των εξομοιώσεων ενδεχομένως να υπάρχουν αποκλίσεις από πιο σύγχρονες εκδόσεις του ίδιου εξομοιωτή. Ειδικά μπορούμε να αναφέρουμε το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR του οποίου η υλοποίηση είναι αρκετά διαφορετική σε επόμενες εκδόσεις. Εντούτοις η συσχέτιση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και η κατάδειξη της αλληλεπίδρασης που υφίσταται μεταξύ τους επαληθεύεται και οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Κύρια παράμετρος της εργασίας αυτής ήταν οι τοπολογικές συνθήκες του δικτύου. Το μεγαλύτερο μέρος της μελέτης βασίστηκε σε στατική τοπολογία πλέγματος. Η τοπολογία αυτή αν και όχι η πλέον χαρακτηριστική για πραγματικές υλοποιήσεις ad-hoc δικτύων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην μελέτη απόδοσης δικτύων καθώς εξαλείφει αβεβαιότητες που εισάγονται από τοπολογίες όπως τυχαίας κατανομής ή κινούμενων κόμβων. Βέβαια μια πλήρης μελέτη απαιτεί να ληφθούν υπ' όψιν και τέτοιες τοπολογίες και έτσι και έγινε και στην εν λόγω εργασία. Καθοριστικός παράγοντας, ειδικά στην τοπολογία πλέγματος είναι η ακτίνα μετάδοσης καθώς επηρεάζει άμεσα το πλήθος των κόμβων στους οποίους, κάποιος κόμβος, μπορεί να μεταδώσει χωρίς να χρειαστεί προώθηση από ενδιάμεσους κόμβους και κατά συνέπεια όλη η συμπεριφορά του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση υπήρχαν 49 κόμβοι και στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι τοπολογίες πλέγματος και τυχαίας κατανομής καθώς και η ακτίνα κάλυψης ενός κόμβου.

Σχήμα 4- 2. Τοπολογία πλέγματος και αντίστοιχη ακτίνα μετάδοσης

Σχήμα 4- 3. Τυχαία τοπολογία και αντίστοιχη ακτίνα μετάδοσης

Επίσης κρίσιμης σημασίας παράμετρος αποτέλεσε και το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Για το λόγω αυτό τα τέσσερα πιο γνωστά routing πρωτόκολλα συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη (DSR, AODV, TORA, DSDV) και πραγματικά αποδείχθηκε ότι η επιλογή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης επηρεάζει δραστικά την απόδοση/συμπεριφορά του δικτύου. Φυσικά ένα ασύρματο δίκτυο πρέπει να έχει την δυνατότητα να εξυπηρετεί πολλαπλές ταυτόχρονες ροές δεδομένων το οποίο όμως αποτελεί και μια από τις δυσκολότερες αποστολές του. Έτσι λοιπόν ανά πάσα στιγμή υπήρχαν δύο ενεργές ροές δεδομένων στο δίκτυο. Μάλιστα έγινε κατάλληλη επιλογή της θέσης αυτών στο δίκτυο έτσι ώστε στα σενάρια που δημιουργούνται να έχουμε κλιμακούμενη αλληλεπίδραση μεταξύ των ροών δεδομένων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4- 4. Επιπλέον η απόδοση ενός δικτύου κρίνεται και από το φορτίο που μπορεί να εξυπηρετήσει και για το λόγω αυτό ο ρυθμός μετάδοσης πακέτων μεταβαλλόταν ανάλογα με την εξομοίωση κυμαινόμενος μεταξύ 40 – 200 Kbps ανά ροή δεδομένων υποθέτοντας διαθέσιμος εύρος φυσικού καναλιού 2 Mbps και πακέτα των 512bytes. Επίσης σημαντική υπόθεση είναι η ύπαρξη ουράς 50 πακέτων σε κάθε κόμβο του δικτύου. Σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας θέλοντας να εστιάσουμε στη κατανάλωση που οφείλεται στην επικοινωνιακή λειτουργία των κόμβων χρησιμοποιήθηκε το παρεχόμενο από τον NS2 ενεργειακό μοντέλο. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό θέτοντας μια αρχική τιμή ενέργειας για κάθε κόμβο, την θεωρούμενη ισχύ πομπού/δέκτη και με βάση το μέγεθος του εκάστοτε πακέτου (data ή control) μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας που αντιστοιχεί στην επικοινωνία των σταθμών. Στα πλαίσια της μελέτης η ισχύς πομπού και δέκτη θεωρήθηκε ίδια, γεγονός που σε πολλά πραγματικά συστήματα δεν ισχύει αλλά μας δίνει άμεση αντιστοίχιση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω επικοινωνιακών

λειτουργιών. Τέλος η κάθε εξομοίωση διαρκεί 100 δευτερόλεπτα, χρόνος που κρίνεται επαρκής για να καταγραφούν τόσο τα μεταβατικά φαινόμενα όσο και η σταθερή λειτουργία του δικτύου.

Σχήμα 4- 4. Τοπολογίες ροών δεδομένων σε τοπολογία πλέγματος

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην κατανάλωση ενέργειας. Η σημασία της κατανάλωσης ενέργειας για τα δίκτυα που μελετάμε έχει ήδη αναλυθεί εκτενώς. Η βασική θεώρηση της εργασίας αυτής είναι ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι ταυτόχρονα μέτρο απόδοσης του δικτύου αλλά και κρίσιμη παράμετρος της ίδιας της απόδοσης. Έτσι λοιπόν η κατανάλωση ενέργειας καταμετράται ως κρίσιμο για την απόδοση του δικτύου μέγεθος και μάλιστα μέσα από ιδιαιτέρως χρήσιμα σχήματα τα οποία δείχνουν παράλληλα την εξέλιξη της κατανάλωσης κατά την διάρκεια της εξομοίωσης και την κατανομή αυτής στο χώρο του δικτύου. Από την άλλη η κατανάλωση και εν τέλει εξάντληση της ενέργειας σε κόμβους του δικτύου επηρεάζει άμεσα την ίδια την απόδοση του δικτύου. Σε κάθε ασύρματο ad-hoc δίκτυο υπάρχουν κόμβοι που φορτώνονται με πολύ περισσότερη επικοινωνιακή εργασία από τους υπόλοιπους. Τέτοιοι κόμβοι συνήθως έχουν το ρόλο του προωθητή (forwarder) πακέτων προς τον τελικό προορισμό τους καθώς αποτελούν πέρασμα μιας ή και περισσότερων ροών δεδομένων. Παράλληλα με αυτό ο κόμβος μπορεί να είναι

αρχικός αποστολέας ή τελικός παραλήπτης μιας ροής δεδομένων. Οι κόμβοι, λοιπόν, με περισσότερα επικοινωνιακά καθήκοντα είναι αναμενόμενο να εξαντλήσουν τα ενεργειακά τους αποθέματα πιο νωρίς από τους υπόλοιπους. Τότε όμως η διαδρομή παύει να υφίσταται ενόσω υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές οπότε και εγείρονται ερωτήματα όπως κατά πόσο θα βρεθεί νέα διαδρομή, πόσο γρήγορα θα γίνει η εύρεση. Ένα τέτοιο γεγονός θα έχει επιπτώσεις και σε άλλα μεγέθη όπως καθυστέρηση μετάδοσης, ενώ επιπλέον πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι η καινούργια διαδρομή θα αποτελείται κατά κανόνα από περισσότερα hops (προωθήσεις) και άρα θα επηρεάσει την συνολική καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων. Ένας ακόμα κίνδυνος που χαρακτηρίζει τα δίκτυα αυτά είναι αυτός της κατάτμησης. Πολλές φορές η κατανομή των κόμβων είναι τέτοια που όλο το δίκτυο χωρίζεται σε κομμάτια η σύνδεση των οποίων μπορεί να γίνει μέσω ενός ή δύο κόμβων. Είναι σαφές ότι η ενεργειακή εξάντληση των κόμβων αυτών θα σημάνει την κατάτμηση του δικτύου (network partition) και θα καταστήσει αδύνατη την επικοινωνία μεταξύ κόμβων των περιοχών στις οποίες χωρίζεται το δίκτυο και θα μειώσει δραματικά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις που καταδεικνύουν την σημαντική αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων που επιλέξαμε.

4.5.1. Μετρήσεις καθυστέρησης και επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων.

Τα γραφήματα που ακολουθούν σκοπό έχουν να δείξουν την επίδραση που έχουν στην καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων και στην διαμεταγωγή των πακέτων η τοπολογία των ροών δεδομένων σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Σχήμα 4- 5. Μέση καθυστέρηση ανά πρωτόκολλο δρομολόγησης και τοπολογία ροών

Σχήμα 4- 6. Μέγιστη καθυστέρηση ανά πρωτόκολλο δρομολόγησης και τοπολογία ροών

Σχήμα 4- 7. Αριθμός επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων ανά πρωτόκολλο δρομολόγησης και τοπολογία ροών

Για τις παραπάνω μετρήσεις θεωρούμε μια εισερχόμενη κίνηση ίση με 200Kbps από κάθε μία από τις δύο ροές δεδομένων. Κατά συνέπεια μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η εισερχόμενη κίνηση είναι μέτρια προς υψηλή (λαμβάνοντας υπόψη και τις απαραίτητες προωθήσεις των πακέτων) αλλά εντός της θεωρητικής χωρητικότητας των 2Mbps του καναλιού που θεωρούμε. Από τα ενδεικτικά αυτά γραφήματα είναι φανερό ότι ο συνδυασμός τοπολογίας και πρωτοκόλλου δρομολόγησης επηρεάζει καταλυτικά την απόδοση και η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού χρήζει ιδιαίτερης μελέτης και προσοχής. Η χρήση του DSR φαίνεται να οδηγεί σε ιδιαίτερα αυξημένες μετρήσεις καθυστέρησης τόσο μέγιστης όσο και μέσης το οποίο είναι ισχυρό μειονέκτημα όταν υπάρχουν αυστηρά χρονικές προθεσμίες που πρέπει να ικανοποιούνται. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στην συμπεριφορά του εν λόγω πρωτοκόλλου το οποίο πλημμυρίζει το δίκτυο με route request πακέτα κάθε φορά που πρέπει να βρεθεί κάποια διαδρομή και το οποίο γενικότερα είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε πόρους από τους κόμβους. Η μάλλον αρνητική εικόνα του DSR

ενισχύεται από τα σχετικά μικρά ποσοστά επιτυχώς μεταδιδόμενων πληροφοριακών πακέτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4- 7. Αντίθετα το AODV παρουσιάζει πολύ θετικά χαρακτηριστικά καθώς δίνει τις καλύτερες μετρήσεις στην μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό στις εφαρμογές με soft real-time απαιτήσεις. Αλλά και η μέγιστες καθυστερήσεις θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν πολλές περιπτώσεις εφαρμογών. Πολύ σημαντικό επίσης είναι ότι τα παραπάνω συνοδεύονται με τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων. Ιδιαίτερη περίπτωση είναι το TORA στο οποίο ναι μεν τα επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα έχουν πολύ μικρή καθυστέρηση αλλά από την άλλη είναι πολύ λίγα σε σχέση με όλα τα πακέτα που μεταδίδονται. Επίσης το TORA χαρακτηρίζεται από αστάθεια καθώς η διαδρομή χανόταν σε αρκετές περιπτώσεις.

Από την άλλη η ύπαρξη ή μη αλληλεπίδρασης μεταξύ των ροών δεδομένων επίσης επηρεάζει την απόδοση, ενώ ο βαθμός επηρεασμού εξαρτάται άμεσα από του πρωτόκολλο δρομολόγησης. Σε κάθε περίπτωση η ύπαρξη έντονης αλληλεπίδρασης μεταξύ των ροών δεδομένων μειώνει σημαντικά το ποσοστό των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων. Άξια αναφοράς είναι η επίδραση της τοπολογίας των flows όταν χρησιμοποιείται το DSDV. Όπως φαίνεται στο αντίστοιχο γράφημα η μείωση των πακέτων που φτάνουν στο προορισμό τους είναι ιδιαίτερα μεγάλη συνοδευμένη από έντονη καταπίεση του ενός εκ των δύο ροών που φτάνει στο σημείο η ροή αυτή σχεδόν να εξαλείφεται. Αντίστοιχες παρατηρήσεις, αν και σε μικρότερο βαθμό, μπορούν να γίνουν και από τις μετρήσεις καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων. Είναι λοιπόν σαφές ότι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόδοσης έρχεται σε άμεση σχέση με τη δυνατότητα επιλογής διαδρομών με την μικρότερη δυνατή αλληλοσυσχέτιση.

4.5.2. Μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας και κατανομής καθυστερήσεων.

Πάλι επικεντρώνοντας στις παραμέτρους τοπολογία – πρωτόκολλο δρομολόγησης παραθέτουμε δύο ακόμα ιδιαίτερα χρήσιμα γραφήματα. Το Σχήμα 4- 8 ειδικά που δείχνει την κατανάλωση ενέργειας, είναι μια συνεισφορά της εργασίας καθώς δεν το έχουμε συναντήσει σε κάποια άλλη σχετική εργασία και δίνει τη δυνατότητα εποπτείας της εξέλιξης της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξομοιούμενου δικτύου καθώς και την κατανομή της στο χώρο. Για να γίνει αυτό

μετράμε την ενέργεια που έχει κατανάλωση κάθε κόμβος του 7x7 πλέγματος κάθε 10 δευτερόλεπτα και έτσι σχηματίζεται μια εικόνα για την καταναλωθείσα ενέργεια εκείνη ακριβώς τη στιγμή. Τοποθετώντας τη μια εικόνα κάτω από την άλλη έχουμε μια στήλη όπως αυτές του Σχήμα 4- 8 στις οποίες η μετάβαση από το λευκό χρώμα προς το μαύρο δείχνει τη μετάβαση από την μηδενική κατανάλωση προς τη μέγιστη. Στο Σχήμα 4- 9 φαίνεται η κατανομή της καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων για DSR και AODV πρωτόκολλα δρομολόγησης το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για να εκτιμήσουμε την ικανότητα ικανοποίησης χρονικών περιορισμών, ειδικά σε soft real-time απαιτήσεις.

Σχήμα 4- 8. Εξέλιξη κατανάλωσης ενέργειας ανά πρωτόκολλο δρομολόγησης και τοπολογία ροών

Σχήμα 4- 9. Κατανομή καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων

Από το Σχήμα 4- 8 φαίνεται ότι και η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται με σύνθετο τρόπο από τον συνδυασμό παραμέτρων τοπολογία – πρωτόκολλο δρομολόγησης. Καταρχήν από την χρωματική απεικόνιση είναι σαφές ότι η χρήση του DSR πρωτοκόλλου οδηγεί σε σαφώς μεγαλύτερα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας το οποίο είναι ακόμα ένα σημαντικό μειονέκτημα στα MANET δίκτυα όπου οι κόμβοι λειτουργούν με κάποιας μορφής συσσωρευτή ενέργειας η ανανέωση της οποίας είναι είτε πολύ δύσκολη είτε ακόμα και αδύνατη. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι η υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας είναι έκδηλη από τα πρώτα κίβλας δευτερόλεπτα της εξομοίωσης. Συγκρίνοντας τα δύο αυτά πρωτόκολλα μεγάλη διαφοροποίηση παρατηρείται και στην κατανομή της κατανάλωσης στο χώρο. Πράγματι εξετάζοντας τα DSR σενάρια σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της εξομοίωσης όλο το εύρος του πλέγματος βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο κατανάλωσης, αντίθετα με τις AODV εξομοιώσεις όπου η διαβάθμιση της κατανάλωσης μέσα στο πλέγμα είναι σαφώς πιο ξεκάθαρη. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στις DSR περιπτώσεις ακόμα και κόμβοι ή μέρη του πλέγματος που δεν εμπλέκονται στην μεταφορά δεδομένων καταναλώνουν όσο και τα μέρη που συμμετέχουν ενεργά. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην τάση πλημμυρίσματος του δικτύου με routing πακέτα και χαρακτηρίζει το DSR ως ένα σπάταλο ενεργειακά πρωτόκολλο δρομολόγησης. Αντίθετα όταν χρησιμοποιείται το AODV η κατανάλωση είναι σαφέστατα πιο προοδευτική ανάλογα με το επικοινωνιακό φορτίο της κάθε περιοχής.

Τέλος ένα ακόμα πλεονέκτημα του AODV πρωτοκόλλου είναι και η κατανομή καθυστέρησης πακέτων. Είναι φανερό από το Σχήμα 4- 9 ότι η καθυστέρηση σχεδόν όλων των πακέτων εκτίνεται σε μια πολύ στενή περιοχή κοντά στο μηδέν. Αντίθετα η αντίστοιχη περιοχή για το DSR είναι πολύ ευρύτερη με σημαντικό αριθμό πακέτων να έχουν καθυστέρηση μέχρι και τα 30 sec. Έτσι λοιπόν η κατά πολύ πιο ομοιόμορφη κατανομή σημαίνει πολύ πιο ελέγξιμη και προβλέψιμη συμπεριφορά του δικτύου όταν χρησιμοποιείται το AODV το οποίο δίνει μεγάλο πλεονέκτημα στην υιοθέτηση του εν λόγω πρωτοκόλλου.

4.5.3. Η επίδραση της κατανάλωσης ενέργειας στην συμπεριφορά του δικτύου.

Όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας ο ρυθμός κατανάλωσης μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σημείο σε σημείο στο πλέγμα ή στο δίκτυο εν γένει. Κατά συνέπεια κάποιοι κόμβοι θα τεθούν εκτός λειτουργίας λόγω εξάντλησης ενέργειας πιο νωρίς από τους άλλους. Ένα από τα κύρια σημεία μελέτης της εργασίας αυτής είναι πως αντιδρά το δίκτυο σε τέτοιες καταστάσεις. Για να γίνει η μελέτη αυτή η ίδια εξομοίωση έγινε μια φορά με απεριόριστη ενέργεια και μια δεύτερη με κατάλληλα επίπεδα αρχικής ενέργειας σε κάθε κόμβο έτσι ώστε οι πιο φορτωμένοι επικοινωνιακά κόμβοι να αρχίζουν να βγαίνουν εκτός λειτουργίας στη μέση περίπου της εξομοίωσης. Ο σχολιασμός σχετικά με το θέμα θα γίνει μέσω γραφημάτων στα οποία κάθε σημείο αφορά ένα γεγονός λήψης πακέτου. Βασική παρατήρηση είναι ότι κάθε σχήμα αφορά μια συγκεκριμένη εξομοίωση, φυσικά ικανός αριθμός επαναλήψεων έχει γίνει για να επαληθευθεί η ορθότητα των συμπερασμάτων. Με αυτό τον τρόπο ο άξονας X μας δίνει τη χρονική στιγμή της εξομοίωσης στην οποία έγινε η λήψη του πακέτου ενώ ο άξονας Y μας πληροφορεί για την καθυστέρηση μετάδοσης του πακέτου. Φυσικά τα γραφήματα είναι επικεντρωμένα στο χρονικό διάστημα στο οποίο παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ της περίπτωσης όπου έχουμε απεριόριστη με την περίπτωση όπου έχουμε περιορισμένη ενέργεια. Επίσης η πυκνότητα των γραφικών παραστάσεων δίνει μια καλή εκτίμηση για το πλήθος των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων. Στα γραφήματα που ακολουθούν παραθέτουμε δύο περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται το DSR σε τοπολογία με σχετικά έντονη αλληλεπίδραση των flows.

Σχήμα 4-10. Καθυστέρηση ανά πακέτο με απεριόριστη και μη ενέργεια υπό συγκεκριμένη τοπολογία ροών 1

Σχήμα 4- 11. Καθυστέρηση ανά πακέτο με απεριόριστη και μη ενέργεια υπό συγκεκριμένη τοπολογία ροών 1

Όπως είναι φανερό από τα Σχήμα 4-10 και Σχήμα 4- 11 η ενεργειακή εξάντληση κρίσιμων κόμβων έχει άμεση και εμφανή επίδραση στη λειτουργία του δικτύου. Όλα τα πακέτα που λαμβάνονται μετά την εμφάνιση του φαινομένου εξάντλησης κόμβων παρουσιάζουν αυξημένη καθυστέρηση η οποία σε αρκετές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλή θέτοντας σε κίνδυνο την ικανοποίηση των απαιτούμενων χρονικών περιορισμών. Η αυξημένη αυτή καθυστέρηση εν μέρει αποδίδεται στο χρόνο εύρεσης νέα διαδρομής και εν μέρει στο ότι η νέα διαδρομή αποτελείται από περισσότερες προωθήσεις (number of hops). Επίσης από την πυκνότητα των σημείων προκύπτει το συμπέρασμα ότι όταν εξαντλείται η διαθέσιμη ενέργεια μειώνονται και τα πακέτα

που τελικά φτάνουν στον προορισμό τους. Στο Σχήμα 4- 12 παραθέτουμε αντίστοιχες μετρήσεις θεωρώντας το AODV ως πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Σχήμα 4- 12. Καθυστέρηση ανά πακέτο με απειρίοστη και μη ενέργεια υπό τη χρήση του AODV πρωτοκόλλου δρομολόγησης

Και στην περίπτωση του AODV είναι εμφανής καθώς παρατηρείται αύξηση της καθυστέρησης αλλά και μεμονωμένες περιπτώσεις όπου η αύξηση είναι πολύ σημαντική (spikes) γεγονός που υπό περιπτώσεις μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ευστάθεια του δικτύου. Τέλος άξιες αναφοράς είναι και οι περιπτώσεις κατά τις οποίες από τη στιγμή που χάθηκε η κύρια διαδρομή δεν βρέθηκε εναλλακτική για τη προώθηση των πακέτων οπότε το δίκτυο πρακτικά έπαψε να λειτουργεί. Τέτοιες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν κυρίως κατά τη χρήση των TORA και DSDV πρωτοκόλλων δρομολόγησης και για το λόγω αυτό ακολουθεί ένα παράδειγμα από κάθε περίπτωση.

Σχήμα 4- 13. Καθυστέρηση ανά πακέτο με απειρίοστη και μη ενέργεια υπό τη χρήση των DSDV και TORA πρωτοκόλλων

Το κυριότερο συμπέρασμα από τη μελέτη αυτή ήταν ότι αλληλεπίδραση πολλών παραμέτρων που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα σύμφωνα με το OSI μοντέλο είναι

ιδιαίτερα ισχυρή και επηρεάζει την απόδοση του δικτύου με ποικίλους τρόπους. Κατά συνέπεια η από κοινού μελέτη και αντιμετώπιση τους σίγουρα έχει να προσφέρει πολλά στην ανάπτυξη των ad-hoc ασύρματων δικτύων.

4.6. Παραδείγματα cross-layer αρχιτεκτονικών σε σχέση με την προτεινόμενη

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τρεις ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές βασισμένες στην cross-layer προσέγγιση. Σκοπός είναι να φανεί η βελτίωση της απόδοσης ενός ασύρματου δικτύου μέσω της προσέγγισης αυτής, η οποία δεν θα ήταν δυνατή μέσα από την προσέγγιση επιπέδων του OSI μοντέλου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον πιστεύουμε έχει η τρίτη εργασία που θα παρουσιαστεί η οποία χρησιμοποιεί το cross-layer σκεπτικό για να συνδυάσει και συντονίσει δικτυακές παραμέτρους όπως ποιότητα υπηρεσίας με μη δικτυακές όπως συχνότητα λειτουργίας CPU, volts λειτουργίας κ.α. διευρύνοντας ακόμα περισσότερο το πεδίο εφαρμογής της cross-layer προσέγγισης

4.6.1. INSIGNIA [50]

Ο πρωταρχικός σχεδιαστικός σκοπός της INSIGNIA QoS αρχιτεκτονικής είναι η υποστήριξη προσαρμοζόμενων υπηρεσιών που μπορούν να εξασφαλίζουν κάποιο βασικό επίπεδο ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS), όπως ένα ελάχιστο bandwidth, σε ροές φωνής και video πραγματικού χρόνου. Παράλληλα, όμως, παράσχουν και υψηλότερα επίπεδα (maximum bandwidth) υπηρεσιών όταν οι απαιτούμενοι πόροι είναι διαθέσιμοι. Βασικό στοιχείο είναι ότι η σχεδίαση είναι τέτοια ώστε οι ροές να προσαρμόζονται στα διαθέσιμα επίπεδα χωρίς σαφή ειδοποίηση μεταξύ αρχικού αποστολέα και τελικού παραλήπτη. Βασική θεώρηση στην εν λόγω αρχιτεκτονική ή απομάκρυνση των λειτουργιών ποιότητας υπηρεσίας από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Κάτι τέτοιο έγινε διότι οι σχεδιαστές του insignia, μελετώντας τα χρονικά διαστήματα στα οποία μια ροή δεδομένων εγκαθίσταται και δρομολογείται, θεώρησαν ότι τα MANET πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν πρέπει να φορτωθούν με την ενσωμάτωση του μοντέλου ποιότητας υπηρεσίας. Επιπλέον με τον τρόπο αυτό η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να συνεργαστεί με ένα πλήθος διαφορετικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Όπως αναφέραμε όλη η λειτουργικότητα της αρχιτεκτονικής επιτυγχάνεται χωρίς σαφή σύνδεση αποστολέα-παραλήπτη, κάτι τέτοιο είναι δυνατό με τη εκμετάλλευση των πακέτων πληροφορίας για τη μετάδοση πληροφορίας ελέγχου και ονομάζεται *in-band signaling*. Η αντίθετη προσέγγιση ονομάζεται *out-of-band signaling* και σύμφωνα με αυτήν η πληροφορία ελέγχου μεταδίδεται με ξεχωριστά πακέτα ελέγχου ή ακόμα μεταδίδεται και σε ξεχωριστά κανάλια από τα δεδομένα. Η επιλογή αυτή έγινε διότι, εν γένει, τα συστήματα που χρησιμοποιούν την *out-of-band signaling* προσέγγιση δε ανταποκρίνονται αρκετά γρήγορα σε αλλαγές στα χαρακτηριστικά του δικτύου (γεγονός ιδιαίτερα έντονο στα ad-hoc ασύρματα δίκτυα). Αντίθετα με την *in-band* προσέγγιση ένα σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί σε τοπολογικές αλλαγές μέσα σε μερικά συνεχόμενα IP πακέτα.

Στα κλασσικά δίκτυα η επιλογή και εκχώρηση του επιπέδου υπηρεσίας γίνεται στην αρχή της συνεδρίας αποστολέα-παραλήπτη και διαρκεί για όλη τη διάρκεια της συνεδρίας αυτής. Κάτι τέτοιο αναφέρεται σαν *hard state* και είναι εντελώς ακατάλληλο για δυναμικά δίκτυα όπως τα MANET. Εκεί χρησιμοποιείται η *soft state* θεώρηση σύμφωνα με την οποία η διάθεση του υψηλού ή χαμηλού επιπέδου QoS γίνεται ανά προώθηση (*per hop*). Δηλαδή ο κάθε ενδιάμεσος κόμβος αποφασίζει για κάθε ροή που περνάει αν μπορεί να της παράσχει το μέγιστο επίπεδο ποιότητας εξυπηρέτησης ή όχι.

Στη σχεδίαση του *insignia* για υλοποίηση του *in-band signaling* και της μετάδοσης πληροφορίας ελέγχου μέσω των πακέτων δεδομένων χρησιμοποιείται η IP επικεφαλίδα του πακέτου η οποία δομείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4- 14. Με τη χρήση των πεδίων αυτών υλοποιείται όλη η λειτουργικότητα της αρχιτεκτονικής.

Η συγκεκριμένη εργασία αποτέλεσε βασικό ερέθισμα για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο στην οποία στοιχεία και επιλογές της έχουν χρησιμοποιηθεί. Εντούτοις υπάρχει σαφής διαφοροποίηση σε αρκετά σημαντικά σημεία. Η INSIGNIA αρχιτεκτονική στοχεύει στην προσπάθεια εξασφάλισης η προτεινόμενη αρχιτεκτονική στοχεύει στην αντιμετώπιση του κρίσιμου προβλήματος της συμφόρησης και μέσα από την αντιμετώπιση αυτού να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου σε διάφορες προσεγγίσεις μεταξύ αυτών και της παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Επίσης θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να δοκιμαστεί η συμπεριφορά της INSIGNIA αρχιτεκτονικής σε συνθήκες υψηλού φορτίου και πολλαπλών ροών. Τέλος ένα σημείο αδυναμίας, πιστεύουμε, είναι ότι η λειτουργία

της αρχιτεκτονικής βασίζεται ιδιαίτερος στη αποστολή QoS αναφοράς από τον τελικό παραλήπτη στο αρχικό αποστολέα. Δεν λαμβάνεται, λοιπόν, υπόψη η περίπτωση των πακέτων που χάνονται σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο και δεν φτάνουν τελικά στο τελικό παραλήπτη, περίπτωση πολύ συχνή και χαρακτηριστική στα MANET δίκτυα και η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Επιπλέον στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική στόχος είναι μειώνοντας την πολυπλοκότητα, τις απαιτούμενες αλλαγές και χρησιμοποιώντας και το επίπεδο εφαρμογής να ενισχύσουμε την απόδοση του δικτύου.

Σχήμα 4- 14. Το IP option των πακέτων χρησιμοποιούμενο από το INSIGNIA

Στο Σχήμα 4- 15 από την άλλη παρουσιάζονται τα κομμάτια που απαρτίζουν την εν λόγω αρχιτεκτονική.

Σχήμα 4- 15. Απεικόνιση της INSIGNIA QoS δομής

4.6.2. iMAQ [51]

Μία ακόμα πολύ αξιόλογη ερευνητική προσπάθεια είναι η iMAQ αρχιτεκτονική η οποία σκοπό έχει να υποστηρίξει τη μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων πάνω από MANET δίκτυα. Στο Σχήμα 4- 16 φαίνεται ένα μοντέλο της δομής. Η δομή περιλαμβάνει το επίπεδο δικτύου και ένα ενδιάμεσο επίπεδο υπηρεσιών (middleware service layer). Τα δύο αυτά επίπεδα ανταλλάσσουν πληροφορίες και συνεργάζονται με σκοπό να παράσχουν εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε πολυμεσικά δεδομένα. Στο επίπεδο δικτύου πρωταγωνιστικό ρόλο έχει ένα QoS πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο βασίζεται σε τοπολογικές προβλέψεις. Το ενδιάμεσο επίπεδο επικοινωνεί με τα επίπεδα εφαρμογής και δικτύου με σκοπό τη μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης της ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου συνολικά. Επίσης το ενδιάμεσο επίπεδο χρησιμοποιεί τοπολογικές πληροφορίες από τα χαμηλότερα επίπεδα προσπαθώντας να προβλέψει τη μελλοντική συμπεριφορά του δικτύου και ειδικά το φαινόμενο κατάτμησης του δικτύου. Ειδικά για το τελευταίο και για καλύτερη πρόσβαση στα δεδομένα υποστηρίζεται λειτουργία αντιγραφή δεδομένων σε διαφορετικά κομμάτια του δικτύου όταν επίκειται κατάτμηση αυτού.

Σχήμα 4- 16. Το μοντέλο της iMAQ αρχιτεκτονικής

Είναι γνωστό ότι ένα από τα πιο απαιτητικά θέματα στα ad-hoc ασύρματα δίκτυα είναι το γεγονός ότι λόγω της απρόβλεπτης και πολλές φορές γρήγορης κινητικότητας των κόμβων η πληροφορία δρομολόγησης μπορεί να μην είναι έγκυρη όταν φτάσει στο κόμβο που πρέπει. Κάτι τέτοιο ισχύει ακόμα και σε on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως το DSR, η απόδοση των οποίων επηρεάζεται από κατάργηση συνδέσμων λόγω κινητικότητας. Στο iMAQ το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται με

την εισαγωγή κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης το οποίο προσπαθεί να προβλέψει μελλοντική θέση κόμβων με βάση τις ενημερώσεις του κόμβου που αφορούν τη θέση του και τους πόρους του. Κατά συνέπεια ένας κόμβος πρέπει να παράγει πακέτα ενημέρωση περιοδικά ή στη περίπτωση σημαντικής αλλαγής τοπολογικής ή διαθεσίμων πόρων. Με βάση τις προηγούμενες ενημερώσεις ο μηχανισμός πρόβλεψης θέσης (*location prediction mechanism*) θα προσπαθήσει να προβλέψει τον απαιτούμενο χρόνο για ένα πακέτο να φτάσει στο προορισμό του και συσχετίζοντας το χρόνο αυτό και τις ενημερώσεις του παραλήπτη θα κάνει μια εκτίμηση για τη θέση του παραλήπτη τη χρονική στιγμή λήψης του πακέτου. Όταν δημιουργείται μια διαδρομή μπορεί να γίνει επιλογή του καλύτερου επόμενου κόμβου με βάση τη πρόβλεψη για τη μελλοντική του θέση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ωσότου το πακέτο φτάσει τον παραλήπτη. Φυσικά αν κατά τη διάρκεια της σύνδεσης υπάρξει σημαντική τοπολογική αλλαγή γίνεται αναθεώρηση και διόρθωση της βέλτιστης διαδρομής. Παράλληλα το ενδιαμέσο επίπεδο δύναται να επαναδιαπραγματευτεί την παροχή ποιότητας υπηρεσίας με την εφαρμογή όταν οι διαθέσιμοι πόροι μειώνονται. Βασικό στοιχείο της λειτουργίας είναι η δυνατότητα αντιγραφής δεδομένων μεταξύ μερών του δικτύου όταν προβλέπεται κατάτμηση μεταξύ των μερών αυτών. Έτσι λοιπόν στο iMAQ ενσωματώνονται υπηρεσίες αναζήτησης και αντιγραφής δεδομένων. Σε κάθε κόμβο η υπηρεσία αναζήτησης δεδομένων διατηρεί πίνακα διαθεσιμότητας δεδομένων. Επίσης αντίστοιχα μηνύματα διαφήμισης των διαθέσιμων δεδομένων μεταδίδονται περιοδικά από κάθε κόμβο. Κατά συνέπεια με τη λήψη των πακέτων αυτών ενημερώνεται άμεσα και ο πίνακας διαθεσίμων δεδομένων. Όταν το πρωτόκολλο δρομολόγησης προβλέπει κατάτμηση τα μέρη του δικτύου επιλέγονται με έξυπνα κριτήρια και γίνεται η κατάλληλη αντιγραφή πριν την πραγματική κατάτμηση του δικτύου.

Η βασική διαφοροποίηση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής είναι ότι στην ουσία αφορά ένα QoS πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο προσπαθεί να προβλέψει τη θέση των κόμβων χρησιμοποιώντας υπηρεσίες διαφήμισης δεδομένων, εύρεσης και αντιγραφής δεδομένων. Αντίθετα η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μέσα από μια πιο γενερική προσέγγιση προσπαθεί να βελτιώσει βασικά δικτυακά χαρακτηριστικά όπως κατανάλωση ενέργειας, χαμένα πακέτα και καθυστέρηση μετάδοσης.

4.6.3. GRACE-1 [52]

Η συγκεκριμένη εργασία είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι, εκτός όλων των άλλων, δείχνει πως η cross-layer προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί εκτός των δικτυακών επιπέδων και να συμπεριλάβει στοιχεία ενός συστήματος όπως το λειτουργικό σύστημα και το hardware. Επίσης είναι άξιο λόγου ότι έχει υλοποιηθεί και σε πραγματική εμπορική πλατφόρμα. Η σχεδίαση της GRACE-1 αρχιτεκτονικής σαν πεδίο εφαρμογής έχει τα mobile multimedia systems έχει σκοπό την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας σε εφαρμογές κάτω από περιορισμούς επιβαλλόμενους από τη CPU και την κατανάλωση ενέργειας μέσω συντονισμού και συνεργασίας του hardware, του λειτουργικού συστήματος και το επιπέδου εφαρμογής. Ποιο συγκεκριμένα η GRACE-1 αρχιτεκτονική συντονίζει τρεις βασικές παραμέτρους ενός κόμβου, τη συχνότητα και τα volt λειτουργίας της CPU από τη πλευρά του hardware, προσαρμοζόμενο scheduler για απαιτήσεις ελαστικού πραγματικού χρόνου από τη πλευρά του λειτουργικού συστήματος και δυνατότητες προσαρμογής με βάση απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας από τη πλευρά των εφαρμογών. Με τον τρόπο αυτό επιζητάται η μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος ενώ ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας της εφαρμογής με τη διαθέσιμη ενέργεια.

Βασικό σημείο στην σχεδίαση της αρχιτεκτονικής είναι η ιεραρχική προσέγγιση στο συντονισμό των παραμέτρων. Συγκεκριμένα οι απαιτούμενες προσαρμογές χωρίζονται σε καθολικές (global) και τοπικές (local). Ο global συντονισμός ενεργοποιείται για να αποκριθεί σε μακροχρόνιες μεταβολές. Στην περίπτωση αυτή ένας κεντρικός συντονιστής συντονίζει όλα τα επίπεδα έτσι ώστε να επιλεγεί το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας και η ανάθεση των πόρων για κάθε εφαρμογή. Είναι κατανοητό λοιπόν ότι αφορά όχι συχνές αλλαγές και η λειτουργία του είναι πολύπλοκη. Αφού η καθολικές επιλογές έχουν γίνει όλες οι υπόλοιπες μικρο-αλλαγές και προσαρμογές γίνονται τοπικά με τοπικού αλγορίθμους προσαρμογής που είναι πολύ πιο γρήγοροι και απλοί.

Φυσικά χρησιμοποιείται διαφορετικό μοντέλο προσαρμογής για hardware, εφαρμογή και λειτουργικό σύστημα που αντιδρούν σε ένα πλήθος συνθηκών σε κάθε κόμβο του δικτύου.

Σχήμα 4- 17. Συνολική εικόνα της προσέγγισης της GRACE-1 αρχιτεκτονική.

Στο Σχήμα 4- 17 φαίνεται μια γενική εικόνα της GRACE-1 αρχιτεκτονικής. Αποτελείται από πέντε βασικά στοιχεία: τον coordinator, τον scheduling adaptor, τον battery monitor, τον CPU adaptor και έναν task adaptor για κάθε μια εφαρμογή. Ο coordinator είναι η καρδιά του όλου συστήματος καθώς καθορίζει το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, την ανάθεση της CPU και την συχνότητα λειτουργίας αυτής σύμφωνα με τις απαιτήσεις εφαρμογών και CPU καθώς και τη διαθέσιμη ενέργεια την οποία πληροφορείται από τον battery monitor. Για να είναι δυνατός ένας τέτοιος συντονισμός ο coordinator βρίσκεται στο λειτουργικό σύστημα και έχει πρόσβαση και γνώση όλων των λεπτομερειών του συστήματος. Από την άλλη ο task adaptor είναι υπεύθυνος για την προσαρμογή των task στα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας που έχει επιλέξει ο coordinator. Η ανάθεση της CPU γίνεται από τον scheduling adaptor. Η προσαρμογή που επιτυγχάνεται μέσω του scheduler μπορεί να δώσει τις εγγυήσεις απόδοσης ελαστικού πραγματικού χρόνου χρησιμοποιώντας μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας. Παράλληλα ο CPU adaptor μεταβάλλει τη συχνότητα λειτουργίας προς εξοικονόμηση ενέργειας. Η συχνότητα καθορίζεται είτε από τον coordinator βασιζόμενος στις συνολικές απαιτήσεις για CPU είτε από τον scheduler βασιζόμενος στην πραγματική χρήση της CPU.

Οι στόχοι της συγκεκριμένης εργασίας διαφοροποιούνται σημαντικά από τους αντίστοιχους της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής αλλά αποτελεί ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα για το πόσο ευρεία μπορεί να είναι μια cross-layer αρχιτεκτονική. Έτσι, λοιπόν, παρουσιάζεται ένα framework το οποίο συνδυάζει αλλαγές στα χαρακτηριστικά της CPU (προσαρμογή χαρακτηριστικών όπως

συχνότητα ρολογιού και τάσης), soft real time scheduling adaptation in the OS ώστε να ικανοποιήσει τις όποιες QoS απαιτήσεις έχει η εφαρμογή.

4.6.4. Cross-layer σχεδίαση βασισμένη σε on/off προγραμματισμό των κόμβων [99]

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα on/off cross-layer scheduling μεταξύ των επιπέδων MAC και Routing. Όπως είναι αναμενόμενο υπάρχει ισχυρό trade-off μεταξύ του χρόνου που ένας κόμβος μένει ανενεργός και της βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου καθώς όσο ο κόμβος παραμένει ανενεργός δεν αποτελεί μέρος του δικτύου και άρα δεν μπορεί να λάβει ή να προωθήσει πακέτα με αρνητικές συνέπειες τόσο στις μετρήσεις καθυστέρησης όσο και ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Η όλη διαδικασία αποτελείται από δύο φάσεις: κατά την πρώτη η οποία ονομάζεται setup and reconfiguration phase στόχος είναι η βελτίωση ρύθμιση του χρονοπρογραμματισμού που θα ακολουθηθεί κατά την δεύτερη και κυριότερη φάση που είναι η σταθερή κατάσταση. Όπως είναι αναμενόμενο η φάση αυτή λαμβάνει χώρα κατά την αρχικοποίηση ή σε περιπτώσεις αλλαγών του δικτύου και πρακτικά σε αυτήν δημιουργούνται οι πίνακες δρομολόγησης. Η δεύτερη “σταθερή” φάση αποτελεί το κύριο μέρος της λειτουργίας του δικτύου όπου γίνεται η μεταφορά δεδομένων.

Πέρα από την εξοικονόμηση θέλει να κρατήσει και τα real time χαρακτηριστικά του δικτύου. Σαν αρχιτεκτονική είναι αρκετά περιορισμένη καθώς απαιτεί έντονο συγχρονισμό, στατικό δίκτυο, ύπαρξη base station, και συγκεκριμένο είδος εφαρμογών (η κίνηση πρέπει να είναι περιοδική, με ίδια περίοδο για όλο το δίκτυο, σε κάθε περίοδο κάθε κόμβος παράγει το πολύ ένα πακέτο κτλ). Η προσέγγιση του on/off προγραμματισμού αποτελεί ίσως την πιο κλασσική προσέγγιση στη προσπάθεια βελτιστοποίησης της απόδοσης των ασύρματων ad-hoc δικτύων και αποδεικνύεται αποτελεσματική όταν μπορεί να εφαρμοστεί. Η εφαρμογή της, όμως, από την άλλη απαιτεί αυστηρές προϋποθέσεις και επιφέρει δυσκολίες (κυρίως συγχρονισμού). Για το λόγο και στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική ακολουθείται μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση αν και η παρούσα εργασία αναδεικνύει πολλά από τα στοιχεία της cross-layer σχεδίασης.

4.6.5. Cross-layer σχεδίαση χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες [100]

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει μια ιδιαίτερα διαφορετική προσέγγιση και κατά συνέπεια νέα στοιχεία γύρω από την επικοινωνία ασύρματων δικτύων και cross-layer σχεδίασης αναδεικνύονται. Η βασική ιδέα είναι η χρήση κατευθυντικών κεραιών αντίθετα με την συνηθισμένη περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται πανκατευθυντικές κεραίες. Κύριος στόχος είναι η βέλτιστη εκμετάλλευση του ασύρματου μέσου γύρω από τον κόμβο με προσδοκώμενα οφέλη την αύξηση των ταυτόχρονων επικοινωνιών. Οι συγγραφείς βασίζονται στο γεγονός ότι αν η κεραία μεταδίδει καλύπτοντας μια γωνία 60 μοιρών όλο το υπόλοιπο εύρος 300 μοιρών είναι ελεύθερο για να χρησιμοποιηθεί από άλλες επικοινωνίες. Είναι σαφές ότι μόνο με στενή συνεργασία των routing, mac και physical επιπέδων μπορεί η ιδέα αυτή να αποδώσει. Κατά συνέπεια παρουσιάζονται νέα πρωτόκολλα που μπορούν να εκμεταλλευτούν τις ιδιότητες των κεραιών αυτών.

Και αυτή η προσέγγιση όμως δεν λαμβάνει υπόψη της τους ιδιαίτερα περιορισμένους πόρους των σύγχρονων ad-hoc ασύρματων δικτύων καθώς. Επίσης η ενσωμάτωση κατευθυντικών κεραιών καθώς και η διαχείριση αυτών αυξάνει κατά πολύ την αναμενόμενη πολυπλοκότητα που θα πρέπει να δέχεται ο κόμβος. Επιπλέον ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη ανταπόκρισης της προσέγγισης αυτής σε συνθήκες υψηλού φορτίου καθώς και σε μέτρα απόδοσης όπως κατανάλωση ενέργειας και ικανοποίηση ποιότητας υπηρεσιών. Όπως θα γίνει σαφές και στο επόμενο κεφάλαιο η εργασία αυτή διαφοροποιείται σημαντικά από την προτεινόμενη αρχιτεκτονική τόσο στην προσέγγιση που ακολουθεί όσο και στα μέτρα απόδοσης που αναλύει.

Στον Πίνακα 4- 2 επιχειρείται μια ποιοτική αντιπαράθεση των εργασιών που ,συνολικά, παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική η οποία θα παρουσιαστεί και αναλυθεί με λεπτομέρεια στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Σχετικές ερευνητικές εργασίες.	Εμπλεκόμενα Επίπεδα	Χαρακτηριστικά επικοινωνίας πραγματικού χρόνου	Βελτίωση κατανάλωσης ενέργειας	Βελτίωση χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσιών	Μειονεκτήματα	Πλεονεκτήματα
On/off προγραμματισμός κόμβων	MAC Routing	-	+	-	Συγχρονισμού, Στατικό δίκτυο Κεντρικός σταθμός βάσης Συγκεκριμένες εφαρμογές	Καλή απόδοση
GREACE-1	CPU OS Application	-	+	+	Αφορά χαρακτηριστικά της CPU και OS παρά επικοινωνιακών χαρακτηριστικών.	Καταδεικνύει την ευρύτητα εφαρμογής της cross-layer προσέγγισης. Καλή απόδοση.
INSIGNIA	MAC Routing	-	-	+	Αφορά μόνο QoS. Δεν λαμβάνει υπόψη του την περίπτωση απώλειας πακέτου σε multi-hop επικοινωνία. Δεν μελετάται σε συνθήκες υψηλού φορτίου.	Ευέλικτη δομή Χαμηλό overhead
Χρήση κατευθυντικών κεραιών	MAC Routing Physical	+	-	-	Δύσκολη υλοποίηση. Πολυπλοκότητα Δεν υπάρχει μελέτη αντίδρασης σε καταστάσεις υψηλού φορτίου, πολλαπλών ροών κτλ.	Χρήση κατευθυντικών κεραιών. Καλή απόδοση όταν μπορεί να εφαρμοστεί
iMAQ	Routing Middleware	-	-	+	Δεν εστιάζει σε δικτυακά χαρακτηριστικά (υπηρεσίες data advertisement κτλ.). Εστιάζει σχεδόν αποκλειστικά σε θέματα QoS.	Λαμβάνει υπόψη τα χαμηλά επίπεδα πόρων των κόμβων. Ασχολείται με το θέματα πρόβλεψης κατάτμησης δικτύου το οποίο αποτελεί πολύ ενδιαφέρον ζήτημα.
Προτεινόμενη αρχιτεκτονική	Application Routing MAC	+	+	+	-	Ευελιξία, Χαμηλό overhead Εκτενής μελέτη καταδεικνύει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου. Υπαρξη περιθωρίων επέκτασης της αρχιτεκτονική.

Πίνακας 4- 2. Ποιοτική αντιπαράθεση προτεινόμενης αρχιτεκτονικής με σχετικές εργασίες

4.7. Ανακεφαλαίωση

Μια από τις σύγχρονες και παράλληλα πολλά υποσχόμενες τεχνικές ανάπτυξης και σχεδίασης αρχιτεκτονικών για ad-hoc δίκτυα είναι η cross-layer προσέγγιση. Η βασική ιδέα στηρίζεται στην επέκταση της απόλυτης διαστρωμάτωσης του δικτυακού σωρού σύμφωνα με το OSI/ISO μοντέλο. Κάθε στρώμα πλέον δεν αντιμετωπίζεται απομονωμένα αλλά σε σχέση και αλληλεξάρτηση με τα υπόλοιπα.

Καταρχήν στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σε βάθος παρουσίαση της τεχνικής αυτής. Η cross-layer προσέγγιση αλλάζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται ο δικτυακός σωρός και κατά συνέπεια η σφαιρική ανάλυσή της είναι ένα απαιτητικό ζήτημα με πολλές πλευρές. Έτσι λοιπόν παρουσιάζονται τα οφέλη που επιφέρει η τεχνική αυτή αλλά και η δυσκολίες εφαρμογής της. Οι τρόποι εφαρμογής της όπως παρουσιάζονται από σχετικές ερευνητικές εργασίες επίσης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σημασία. Παράμετροι και περιοχές των ad-hoc δικτύων που μπορούν να επωφεληθούν από την τεχνική αυτή επίσης παρουσιάζονται και αναλύονται. Στο τέλος δε του κεφαλαίου κάποιες ολοκληρωμένες και ιδιαίτερης αξίας αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούν την προσέγγιση αυτή αξιολογούνται.

Τέλος μεγάλο μέρος του κεφαλαίου αφιερώνεται στην έρευνα που διεξήχθη στα πλαίσια της διατριβής για την εκτίμηση της αξίας της συγκεκριμένης τεχνικής στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Επιπλέον έμφαση δόθηκε στον εντοπισμό συγκεκριμένων περιοχών στην συμπεριφορά των δικτύων αυτών όπου η αλληλεπίδραση των επιπέδων είναι έντονη, επηρεάζει αποφασιστικά την απόδοση του δικτύου και άρα η cross-layer προσέγγιση μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη. Και όντως όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα παράμετροι όπως MAC, routing πρωτόκολλα σε συνδυασμό με χαρακτηριστικά του επιπέδου εφαρμογής αλλά και στοιχεία ανάπτυξης του δικτύου όπως τοπολογία, θέση ροών δεδομένων, πυκνότητα και άλλα, επηρεάζουν έντονα την απόδοση σε μεγάλο εύρος μεγεθών όπως κατανάλωση ενέργειας, καθυστέρηση μετάδοσης και άλλα.

5. Κεφάλαιο 5: Αντιμετώπιση προβλήματος συμφόρησης καναλιού μέσω της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής

5.1. Το Πρόβλημα του Ελέγχου Συμφόρησης (Congestion Control)

Η ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης είναι από τα βασικότερα και από τα πιο θεμελιακά προβλήματα σε ένα δίκτυο σήμερα. Τούτο ισχύει διότι η ανάπτυξη συμφόρησης μπορεί να επηρεάσει δραματικά τη λειτουργία και απόδοση ενός δικτύου από όλες τις απόψεις. Από την άλλη, το πρόβλημα της ανάπτυξης συμφόρησης μπορεί να αποτελέσει την αιτία και απαρχή άλλων επίσης σημαντικών προβλημάτων, γι' αυτό και ο χαρακτηρισμός “θεμελιακό πρόβλημα”. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η αντιμετώπιση ή ακόμα και ο εντοπισμός ανάπτυξης συμφόρησης αποτελούν σύνθετα και ιδιαίτερα δύσκολα προβλήματα. Άλλωστε απόδειξη τόσο της σημαντικότητας όσο και της δυσκολίας του προβλήματος είναι το γεγονός ότι ενώ υπάρχει πολλά χρόνια σαν ερευνητική περιοχή, εντούτοις, αποτελεί μια από τις πιο ενεργές ερευνητικές περιοχές, ειδικά στα ad-hoc ασύρματα δίκτυα, όπως θα καταστεί σαφές και από τις αναφορές που θα παρουσιαστούν.

Συνθήκες συμφόρησης σε ένα δίκτυο αναπτύσσονται όταν η πληροφορία προς μετάδοση υπερβαίνει την χωρητικότητα του μέσου μετάδοσης σε ένα οποιοδήποτε σημείο του δικτύου αυτού. Στα κλασσικά ενσύρματα δίκτυα οι αρνητικές συνέπειες των συνθηκών αυτών εδώ και πολλά χρόνια αποτελούν αντικείμενο έρευνας. Κυρίως εντοπίζονται σε δύο κατηγορίες που είναι η αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης καθώς και η αύξηση των χαμένων πακέτων. Άλλωστε για τη διαχείριση των συνθηκών αυτών αναπτύχθηκε το γνωστό TCP πρωτόκολλο και αφιερώθηκε όλη η συναφής ερευνητική δραστηριότητα όπως παρουσιάστηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο [54]-[59]. Εντούτοις η ίδια η φύση του ενσύρματου φυσικού μέσου μετάδοσης διευκολύνει την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Το ενσύρματο μέσο ενεργεί σαν ασπίδα στο δίκτυο από πολλών ειδών παρεμβολές. Συνέπεια αυτού είναι τα ενσύρματα δίκτυα να παρουσιάζουν μια πολύ σταθερή και προβλέψιμη συμπεριφορά

τόσο όσο αφορά το προσφερόμενο bandwidth όσο και το πολύ μικρό έως αμελητέο bit error rate. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν καταρχήν σχετικά εύκολο τον εντοπισμό συνθηκών συμφόρησης μέσω των χαμένων πακέτων καθώς είναι σαφές ότι σχεδόν κατά αποκλειστικότητα οφείλονται στον υπερβολικό φόρτο κίνησης που δημιουργεί το πρόβλημα συμφόρησης. Αποτέλεσμα αυτού είναι να έχουν αρκετές και αρκετά ικανοποιητικές λύσεις για ενσύρματα δίκτυα οι οποίες συνήθως βασίζονται σε τεχνικές μεταβολής του ρυθμού σε end-to-end λογική (window μηχανισμοί) σε συνδυασμό με μηχανισμούς απόρριψης πακέτων στο επίπεδο δικτύου.

Ένα ακόμα σημαντικό σημείο είναι ότι οι περισσότερες λύσεις βασίζονται στην διαίσθηση του σχεδιαστή συνεπικουρούμενες από διεξοδική μελέτη μέσω εξομοιώσεων. Άξιες αναφοράς εργασίες που χρησιμοποιούν τον τρόπο αυτό ανάπτυξης είναι η [60] όπου παρουσιάζεται το Available Bit Rate (ABR) πρόβλημα καθώς και οι [61]-[63] στις οποίες παρουσιάζονται δημοφιλείς μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης (congestion control). Είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές καθώς και άλλες προτάσεις παρά το γεγονός ότι είναι επικεντρωμένες σε συγκεκριμένα προβλήματα και την σχετική απλή προσέγγιση αποδεικνύονται αποτελεσματικές και σε μεγάλο εύρος σεναρίων τόσο πραγματικών όσο και εξομοιούμενων. Εντούτοις, σε αρκετές περιπτώσεις, η αναλυτική – μαθηματική μελέτη έχει δείξει την κακή απόδοση που μπορούν να έχουν οι παραπάνω λύσεις. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι δίκτυα υψηλών ταχυτήτων ή τα ασύρματα δίκτυα. Πράγματι παρά τα πολλά χρόνια που το θέμα απασχολεί την επιστημονική κοινότητα η ανάπτυξη τυπικών – αναλυτικών μεθόδων για το έλεγχο της συμφόρησης στα δίκτυα υπολογιστών έχει αποδειχθεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο και απαιτητικό πρόβλημα αν όχι αδύνατο, ακόμα και για σχετικά απλές περιπτώσεις [53]. Η σπουδαιότητα της αναλυτικής προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι μας δίνει τη δυνατότητα πλήρους γνώσης των εσωτερικών μηχανισμών της μεθόδου ώστε να γίνεται κατανοητό το γιατί μια μέθοδος αποδίδει και γιατί όχι. Αρκετές ανάλογες προσπάθειες έχουν γίνει χρησιμοποιώντας βέλτιστο [65], γραμμικό [64], [66]-[69], predictive adaptive [70], [71], fuzzy και νευρωνικό [72]-[74] καθώς και μη γραμμικό [75]-[77] έλεγχο. Εντούτοις ο σχεδιασμός δικτυακών ελεγκτών συμφόρησης η λειτουργία των οποίων να μπορεί να παρουσιαστεί και τεκμηριωθεί αναλυτικά στην πράξη παραμένει ένα από τα πιο απαιτητικά προβλήματα των δικτύων.

Το απαιτητικό αυτό πρόβλημα είναι ακόμα πιο έντονο στα ασύρματα και ειδικά στα ad-hoc δίκτυα τα οποία είναι και το αντικείμενο της διατριβής αυτής. Ο κυριότερος λόγος είναι η φύση του ίδιου του ασύρματου μέσου μετάδοσης. Οι παρεμβολές που μπορούν να υπάρχουν σε έναν οποιοδήποτε χώρο είναι αδύνατον να προβλεφθούν σε ένα γενικό πλαίσιο και πολύ δύσκολο να παρεμποδιστούν και σε αυτές συμπεριλαμβάνονται τόσο οι ακούσιες (παράλληλη ύπαρξη πολλών δικτύων σε ένα χώρο) όσο εκούσιες (κακόβουλη μετάδοσης σήματος με σκοπό τη παύση λειτουργίας του δικτύου στόχου). Το παραπάνω γεγονός μαζί με άλλα γνωστά φαινόμενα ασύρματης μετάδοσης όπως απρόβλεπτη και ασύμμετρη εξασθένιση σήματος καθώς επίσης και το multipath propagation φαινόμενο δημιουργούν ένα πολύ δυναμικό όσο και ασταθές περιβάλλον που διευκολύνει την ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης αλλά παράλληλα δυσκολεύει τον εντοπισμό-αναγνώριση των σημείων όπου υπάρχει καθώς και την αντιμετώπισή του. Επιπλέον η βασική αρχή των ad hoc δικτύων είναι η μη ύπαρξη κάποιας δικτυακής υποδομής όπως access point ή σταθμοί βάσης και η γενικευμένη χρήση της λειτουργίας της προώθησης των πακέτων όταν ο τελικός παραλήπτης είναι εκτός της εμβέλειας του αποστολέα. Μάλιστα ο αριθμός των απαιτούμενων προωθήσεων ενός πακέτου μπορεί να είναι αρκετά υψηλός. Το γεγονός αυτό παράλληλα με το ότι ένας κόμβος δεν μπορεί να στέλνει και να λαμβάνει ταυτόχρονα μειώνει δραστικά το διαθέσιμο bandwidth και διευκολύνει την ανάπτυξη συμφόρησης. Από την άλλη δύο από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων, η δυνατότητα ελεύθερης κίνησης των κόμβων καθώς και η εύκολη είσοδος και έξοδος κόμβων από το δίκτυο αποτελούν την ίδια στιγμή δύο από τα κυριότερα προβλήματα στην αντιμετώπιση του φαινομένου συμφόρησης. Τούτο ισχύει διότι η απρόβλεπτη και διαρκώς μεταβαλλόμενη τοπολογία συντελεί στην απρόβλεπτη δημιουργία αλλά και παύση σημείων που παρουσίασης φαινομένου συμφόρησης καθιστώντας πολύ δύσκολο το σχεδιασμό μεθόδων που θα αντιμετωπίζουν την παράμετρο αυτή.

Παράλληλα πολύ πιο πολύπλευρες και έντονες είναι και οι επιπτώσεις του φαινομένου αυτού στα ασύρματα δίκτυα. Η ικανότητα διαμεταγωγής σε συνθήκες συμφόρησης όχι μόνο δεν κρατάνε μια σταθερή τιμή αλλά επιδεινώνονται δραματικά. Οι καθυστερήσεις μετάδοσης αυξάνονται κατά πολύ έχοντας σημαντικές συνέπειες στην ικανοποίηση μεταδόσεων με χρονικούς περιορισμούς (αυστηρού ή ελαστικού

πραγματικού χρόνου). Βασική απαίτηση στα ad hoc δίκτυα είναι η παράλληλη ύπαρξη πολλαπλών ροών δεδομένων (data flows). Σε συνθήκες συμφόρησης παρατηρείται έντονα άνιση κατανομή του bandwidth στις πολλαπλές αυτές ροές. Όντως πολλές φορές ροές έχουν τη τάση να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό του καναλιού ή ακόμα και όλο το διαθέσιμο εύρος του, καθιστώντας τις υπόλοιπες πρακτικά ανενεργές [78]. Καταλυτική επίδραση έχει και στην κατανάλωση ενέργειας, κρίσιμη παράμετρο τόσο για τα MANET και πολύ περισσότερο για τα δίκτυα αισθητήρων. Η λειτουργία των κόμβων τέτοιων δικτύων βασίζεται κατά πολύ ή και εξολοκλήρου σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το φαινόμενο συμφόρησης σημαίνει συνεχείς προσπάθειες κατάληψης του καναλιού, επαναμεταδόσεων, ενεργοποίηση του backoff αλγορίθμου κτλ. Όλα αυτά οδηγούν σε κατανάλωση ενέργειας για πληροφορία που δεν μεταδίδεται ή στην καλύτερη περίπτωση σε δυσανάλογη κατανάλωση σε σχέση με την μεταδιδόμενη πληροφορία. Προέκταση του προβλήματος αυτού είναι το φαινόμενο κατάτμησης του δικτύου (network partition). Σε μια τέτοια περίπτωση το δίκτυο χωρίζεται σε δύο και παραπάνω κομμάτια μεταξύ των οποίων δεν υπάρχει δρόμος επικοινωνίας. Στην κατάσταση αυτή η διάρκεια ζωής του δικτύου μειώνεται δραματικά καθώς ακόμα και αν δεν έχει εξαντληθεί η ενέργεια από όλους τους κόμβους το δίκτυο καθίσταται νεκρό καθώς δεν είναι δυνατή η επιθυμητή επικοινωνία [79].

Η κατάσταση περιπλέκεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι οι επιλύσεις προβλημάτων των ad hoc ασύρματων δικτύων είναι πολλές φορές ορθογώνιες μεταξύ τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αποτελεί η σχέση ανάμεσα στην ύπαρξη των RTS/CTS μεταδόσεων και της ανάπτυξης συμφόρησης όπως παρουσιάζεται στην [80]. Ως γνωστόν η μετάδοση των πακέτων RTS/CTS προστέθηκε στον απλό CSMA αλγόριθμο για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου (hidden node problem). Στην παραπάνω εργασία, όμως, παρουσιάζεται και αποδεικνύεται πως ο αλγόριθμος αυτός την ίδια στιγμή είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη συμφόρησης καθώς εμποδίζει επικοινωνίες που δεν χρειάζεται να εμποδιστούν καθώς δεν προκαλούν παρεμβολή σε άλλες ταυτόχρονες επικοινωνίες.

Και στα ασύρματα δίκτυα έχουν γίνει αρκετές και αξιόλογες εργασίες σχετικά με το θέμα ανάπτυξης συνθηκών συμφόρησης. Στην [81] γίνεται μια ενδιαφέρουσα

προσέγγιση για τη μέτρηση της συμφόρησης σε κόμβους ενός ad-hoc δικτύου και πως αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τοπικά. Στην [82] μελετώνται τρεις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου συμφόρησης. Η πρώτη βασίζεται σε hop-by-hop έλεγχο, η δεύτερη στοχεύει στην άδικη κατανομή του bandwidth κυρίως προς της ροές δεδομένων που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό hop, ενώ η τρίτη βασίζεται σε ένα MAC πρωτόκολλο με προτεραιότητες. Στην [83] επιχειρείται ο από κοινού έλεγχος της ισχύος μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο με τον έλεγχο συμφόρησης στο επίπεδο μεταφοράς για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Στο [84] χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι διαφοροποίησης συνθηκών συμφόρησης από απώλειες λόγω του ασύρματου μέσου στη μετάδοση δεδομένων video. Η [85] παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον καθώς μέσω της θεωρίας των αλυσίδων Markov παρουσιάζεται ένα μοντέλο του μέσου μετάδοσης, ένα μοντέλο για την επιθυμητή απόδοση του TCP καθώς και ένας προτεινόμενος αλγόριθμος για τη μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου μέσω ασύρματων δικτύων.

Στην επόμενο κομμάτι της διατριβής θα παρουσιάσουμε και θα αναλύσουμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Αποτελούμενη από ένα σύνολο συνεργαζόμενων αλγορίθμων και ένα πλαίσιο βασισμένο στην cross-layer λογική θα δείξουμε ότι είναι ευέλικτη, δεν επιβαρύνει το δίκτυο ενώ βελτιώνει την απόδοση του δικτύου από όλες τις ζητούμενες απόψεις σε σημαντικό βαθμό.

5.2. Μελέτη του προβλήματος συμφόρησης σε πραγματική πλατφόρμα ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων

Κύριος στόχος της μελέτης που παρουσιάζεται στο σημείο αυτό είναι η προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης της συγκεκριμένης πλατφόρμας σε συνθήκες συμφόρησης εστιάζοντας στο MAC πρωτόκολλο το οποίο παρέχει το οποίο βασίζεται στο B-MAC, ένα από τα κυρίαρχα σχετικά πρωτόκολλα στο χώρο των δικτύων αισθητήρων. Η εστίαση αυτή γίνεται καθώς το MAC επίπεδο αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την απόδοση και σταθερότητα του δικτύου διασφαλίζοντας δίκαιη κατανομή του μέσου μετάδοσης, ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων και της καθυστέρησης καθώς ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών από την εκάστοτε εφαρμογή.

Επιπλέον η μελέτη στοχεύσει στη δημιουργία συνθηκών συμφόρησης καναλιού καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις ελέγχονται πραγματικά οι δυνατότητες του εκάστοτε συστήματος.

Το B-MAC πάνω στο οποίο βασίζεται και το αντίστοιχο πρωτόκολλο που παρέχει η πλατφόρμα TmoteSky ακολουθεί την CSMA τεχνική προσπέλασης μέσου η οποία χαρακτηρίζεται από την κατανεμημένη λειτουργία της καθώς ο κάθε κόμβος αυτόνομα κρίνει κατά πόσο μπορεί να μεταδώσει ελέγχοντας αν το κανάλι είναι απασχολημένο και ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου ακολουθεί σαφώς καθορισμένους αλγορίθμους χωρίς την ανάγκη παρέμβαση κάποιου κεντρικού σημείου ελέγχου.

Η βασικές περιοχές στις οποίες εστίασε και βελτίωσε την απλή CSMA λειτουργία το B-MAC είναι η εξής.

- Λειτουργία χαμηλής ισχύος (Low power operation). Σύμφωνα με την δυνατότητα αυτή ένας κόμβος όταν δεν υπάρχει λόγος μπορεί να κλείνει τον πομποδέκτη με σκοπό να μειώσει σημαντικά την κατανάλωσή του. Η εκτίμηση όμως για το πότε μπορεί να εκτελεί τη λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμης σημασίας καθώς επηρεάζει άμεσα και καταλυτική την συμπεριφορά και απόδοση του δικτύου. Η παράμετρος που ελέγχει τη συγκεκριμένη λειτουργία ονομάζεται duty cycle και δηλώνει το ποσοστό του χρόνου που ο πομποδέκτης παραμένει ενεργός όταν υπάρχουν οι συνθήκες για εξοικονόμηση ενέργειας.
- Αποτελεσματική αποφυγή συγκρούσεων. Όπως είναι φυσικό αποτελεί ένα από τα κρισιμότερα μελήματα των CSMA πρωτοκόλλων. Το B-MAC προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το χαρακτηριστικό αυτό κυρίως με βελτιστοποίηση της ακρίβειας εκτίμησης κατάστασης καναλιού.
- Απλή υλοποίηση, μικρές απαιτήσεις από ποσότητα κώδικα και μέγεθος RAM. Καθώς το σημαντικότερο πρόβλημα στα δίκτυα αισθητήρων είναι οι πολύ λίγοι διαθέσιμοι πόροι έχει γίνει προσπάθεια απλοποίησης του B-MAC αφαιρώντας κάθε τι περιττό με χαρακτηριστικά παραδείγματα την δυνατότητα κατακερματισμού και αναδόμησης των πακέτων και τα πακέτα ελέγχου

RTS/CTS που συναντώνται στα αντίστοιχα CSMA πρωτόκολλα των ασύρματων τοπικών δικτύων.

- Υψηλές δυνατότητες επέκτασης σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό κόμβων.

Προσπαθώντας να εκτιμήσουμε την απόδοση του δικτύου με βάση το MAC πρωτόκολλο και απομονώνοντας όλες τις άλλες πιθανές παρεμβολές βασική ήταν και η επιλογή των τοπολογιών. Έτσι λοιπόν για να μη υπάρχουν επιδράσεις από τη απαίτηση δρομολόγησης των πακέτων μια βασική τοπολογία χρησιμοποιήθηκε η οποία από την μια βοηθούν στη συσχέτιση της απόδοσης του δικτύου με την απόδοση του MAC πρωτοκόλλου και από την άλλη είναι η καταλληλότερη τοπολογία για ανάπτυξη και μελέτη της επίδρασης συνθηκών συμφόρησης.

Στην τοπολογία αστέρα υπάρχει ένας κόμβος που λαμβάνει και πολλαπλοί κόμβοι που στέλνουν δεδομένα και βρίσκονται στην ακτίνα λήψης του παραλήπτη. Η στοιχειώδης αυτή τοπολογία απαντάται, κατά κύριο λόγο, σε σημεία συγκέντρωσης πληροφορίας (gathering points). Κάτω από αυτές τις συνθήκες εκτιμάται η δυνατότητα του πρωτοκόλλου να διαμοιράσει το κανάλι σε πολλαπλούς κόμβους, οι οποίοι ταυτόχρονα επιθυμούν να το καταλάβουν. Μια τυπική τοπολογία αστέρα που χρησιμοποιήθηκε στη μετρήσεις φαίνεται στο Σχήμα 5-1.

Σχήμα 5-1. Τοπολογία αστέρα

Μετρήσεις για τοπολογία αστέρα.

Οι βασικές παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη στις μετρήσεις αυτές έχουν ως εξής:

- Χρήση TmoteSky κόμβων

- Μια ή δύο ταυτόχρονες ροές δεδομένων
- Εύρος πακέτων δεδομένων από 12 έως 100 bytes
- Εύρος ρυθμού δημιουργία πακέτων από 2 έως ~57 Kbps.
- Εύρος duty cycle από 15% έως 100%

Σχήμα 5-2. Επιτυχώς μεταφερόμενα πακέτα για τοπολογία αστέρα και θεωρώντας μια ροή δεδομένων

Από το παραπάνω σχήμα μπορούν να εξαχθούν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά-απόδοση του δικτύου. Από τη μια είναι φανερό ότι υπάρχει ένα πάνω όριο στο ρυθμό δημιουργίας πακέτων το οποίο από το σχήμα μπορεί να εντοπιστεί περί τα 32Kbps πάνω από το οποίο η μείωση των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων γίνεται αισθητή ενώ όταν φτάσουμε στα 57Kbps η απώλειες είναι ιδιαίτερα σημαντικές ειδικά αν θεωρήσουμε εφαρμογές υψηλής κρισιμότητας. Είναι σημαντικό δε να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις αφορούν duty cycle (DC) 100% το οποίο είναι η ιδανικότερη περίπτωση καθώς ο κόμβος είναι μόνιμα ενεργός.

Ακόμα σημαντικότερα είναι τα συμπεράσματα όταν η ανάλυση γίνεται παραμετρικά του DC και όχι του ρυθμού μετάδοσης. Είναι φανερό ότι μείωση του DC οδηγεί σε γραμμική μείωση του ποσοστού επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων το οποίο είναι αξιοσημείωτο ότι για 15 % DC πέφτει σε ποσοστά της τάξης 8 – 20 % τα οποία είναι μη αποδεκτά για τις περισσότερες από τις σύγχρονες εφαρμογές. Μια εκτίμηση του χαμηλότερου DC το οποίο όμως γυρνάει ικανό ποσοστό επιτυχών μεταδόσεων είναι στην περιοχή 35 – 45% ώστε να έχουμε ένα ποσοστό επιτυχίας κοντά στο 50%.

Σχήμα 5-3. Μέση καθυστέρηση για μια ροή σε τοπολογία αστέρα

Το Σχήμα 5-3 καταδεικνύοντας τη μέση καθυστέρηση των πακέτων επίσης δίνει κρίσιμα αποτελέσματα. Καταρχήν για μια ακόμα φορά η επίδραση του DC προβάλλει ως η πιο σημαντική παράμετρος. Μείωση του DC οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αναμενόμενης καθυστέρησης γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο όταν η εφαρμογής εισάγει χρονικούς περιορισμούς. Επίσης πολύ ενδιαφέρον είναι ότι η επίδραση είναι ιδιαίτερα ισχυρή στους χαμηλούς ρυθμούς έναντι των υψηλών. Ο λόγος είναι ότι όταν εφαρμόζονται μικρή ρυθμοί δημιουργίας πακέτων δημιουργούνται μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ των μεταδόσεων. Στα διαστήματα αυτά το κανάλι είναι ανενεργό (idle) και κατά συνέπεια ο κόμβος μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης. Η επαναφορά στην ενεργή κατάσταση επιφέρει σημαντική καθυστέρηση και αυτό απεικονίζεται εμφανώς στο συγκεκριμένο γράφημα. Αντίθετα υψηλή ρυθμοί σημαίνει πολύ μικρότερα διαστήματα μεταξύ των μεταδόσεων και άρα λιγότερες περιπτώσεις όπου ο σταθμός μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης. Η αλληλεξάρτηση αυτή πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη όταν διαμορφώνεται ένα δίκτυο με συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Ένα από τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της πλατφόρμας TmoteSky είναι το μεγάλο μέγεθος πακέτων που υποστηρίζει το οποίο φτάνει τα 128bytes. Το στοιχείο αυτό προβάλλει το μέγεθος του πακέτου σε καίρια παράμετρο και άξιο μελέτης η

σχετική απόδοση του δικτύου για μικρά (12bytes), μεσαία (30 bytes) και για μεγάλα (100 bytes) πακέτα.

Σχήμα 5-4. Ποσοστό επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων για μια ροή σε τοπολογία αστέρα παραμετρικά με το μέγεθος του πακέτου.

Το Σχήμα 5-4 απεικονίζει χαρακτηριστικά πως το μέγεθος του πακέτου επηρεάζει την απόδοση του δικτύου το οποίο όπως αποδεικνύεται αποτελεί ακόμα μια κρίσιμη παράμετρο. Πέρα από την επίδραση του DC η οποία είναι ανάλογη των προηγούμενων σχημάτων η σημαντική παρατήρηση έγκειται στην καλύτερη απόδοση που έχουμε όσο μεγαλύτερο πακέτο θεωρούμε. Η εξήγηση βασίζεται στο ότι με μικρότερα πακέτα για πετύχουμε ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων πρέπει να δημιουργούνται πακέτα με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό και αυτό είναι το χαρακτηριστικό που οδηγεί το δίκτυο εκτός σταθερής συμπεριφοράς. Αυτό είναι εύκολο να το καταλάβουμε καθώς πρέπει να ο μηχανικός κατάληψης του μέσου, οποίος αποτελεί από τα ποια απαιτητικά κομμάτια στη λειτουργία του B-MAC, να εκτελείται πολύ πιο γρήγορα και μετά από κάποιο σημείο το υλικό δεν μπορεί να ανταπεξέλθει. Εντούτοις η πτώση δεν είναι γραμμική καθώς μειώνοντας το πακέτο από τα 100 στα 30 bytes η πτώση στα μετρούμενα ποσοστά είναι κατά πολύ μικρότερη (<10%) από την πτώση που παρατηρείται όταν το πακέτο μειώνεται από 30 στα 12 bytes όπου εκεί η απώλεια αγγίζει το 40%.

Όμως το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα μεγάλα πακέτα όσο αφορά τα επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα μετατρέπεται σε μειονέκτημα όσο αφορά τη μέση καθυστέρηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-5.

Σχήμα 5-5. Μέση καθυστέρηση για μία ροή σε τοπολογία αστέρα παραμετρικά του μεγέθους πακέτων.

Όπως είναι φανερό αυξημένο μέγεθος πακέτου οδηγεί σε κατάληψη του καναλιού για αντίστοιχα μεγαλύτερο χρόνο και αυτό απεικονίζεται ως αυξημένη αναμενόμενη μέση καθυστέρηση.

Καταδεικνύεται, λοιπόν, με σαφήνεια ότι η βέλτιστη διαμόρφωση ενός τέτοιου δικτύου απαιτεί να ληφθούν υπόψη πολλές και αντικρουόμενες παράμετροι.

Στα επόμενα γραφήματα αντιπαραβάλλονται μετρήσεις που αφορούν μια ροή δεδομένων με μετρήσεις που αφορούν δυο ταυτόχρονες ροές.

Σχήμα 5-6. Σύγκριση των επιτυχώς μεταδοθέντων πακέτων μιας και δυο ταυτόχρονων ροών σε τοπολογία αστέρα

Η βασική παρατήρηση αφορά το γεγονός ότι μέχρι και μέτρια φορτία (~32 Kbps) το δίκτυο ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά είτε θεωρώντας μια είτε δύο ταυτόχρονες ροές δεδομένων. Από στο σημείο αυτό, όμως, και πάνω η διαφοροποίηση μεταξύ μιας και δύο ροών γίνεται εμφανής και οι μετρήσεις καταδεικνύουν ότι σενάριο με μια ροή X Kbps παράγει μετρήσεις ανάλογες με σενάριο δύο ροών αλλά X/2 Kbps η κάθε μια. Ειδικά δε σε υψηλά φορτία παρατηρούμε πολύ κακή απόδοση καθώς το σενάριο με δύο ροές όπου κάθε μια παράγει φορτίο 57.4 Kbps ακόμα για 100% DC έχει ποσοστό επιτυχών μεταδόσεων μόλις 40%.

Σχήμα 5-7. Σύγκριση καθυστερήσεων μεταξύ μιας και δύο ροών σε τοπολογία αστέρα με παράμετρο το ρυθμό δημιουργίας πακέτων

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5-7 στο οποίο απεικονίζονται αντίστοιχες μετρήσεις που αφορούν τη μέση καθυστέρηση καταρχήν μέχρι και DC περίπου 50% μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι οι μεταβολές στην καθυστέρηση είναι μικρές ανεξάρτητα από το πλήθος των ροών ή το ρυθμό δημιουργίας πακέτων οι υψηλοί ρυθμοί δημιουργίας πακέτων έχουν το πλεονέκτημα. Για μακρότερα όμως duty cycles όπως και στο μια ροή έτσι και στις δύο υπάρχει σαφές πλεονέκτημα στους υψηλούς ρυθμούς δημιουργίας πακέτων καθώς τότε μικραίνει σημαντικά η πιθανότητα ο κόμβος (και κυρίως ο παραλήπτης) να μεταβεί σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης. Από την άλλη όμως αύξηση των ταυτόχρονων ροών σε συνδυασμό με σημαντική μείωση του DC οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αναμενόμενης μέσης καθυστέρησης.

Θεωρώντας ως κύρια παράμετρο ανάλυσης το μέγεθος των πακέτων επίσης καταλήγουμε σε πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα όπως φαίνεται αρχικά στο Σχήμα 5-8. Σαν πρώτη παρατήρηση για μια ακόμα φορά καταδεικνύεται το πλεονέκτημα των μεγάλου μεγέθους πακέτων καθώς δύο ροές από 30 byte πακέτα παρέχει απόδοση με μια ροή όπου υποθέτουμε 12 byte πακέτα. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται σημαντικά από το γεγονός ότι αυξάνοντας τις ταυτόχρονες ροές υποθέτοντας 12 byte πακέτα η απόδοση του δικτύου χειροτερεύει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από το σενάριο ανάλογης αύξησης των ροών αλλά με πακέτα 30 byte το κάθε ένα.

Τέλος ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται και από τις μετρήσεις καθυστέρησης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-9 καθώς και το γενικό συμπέρασμα ότι με DC κάτω από 40% η εμφάνιση συμφόρησης του μέσου είναι καταλυτική για την χειροτέρευση του δικτύου σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Σχήμα 5-8. Συγκριτική παρουσίαση του ποσοστού επιτυχών μεταδόσεων για ταυτόχρονες ροές δεδομένων με παράμετρο το μέγεθος πακέτων και τοπολογία αστέρα

Σχήμα 5-9. Συγκριτική παρουσίαση της μέσης καθυστέρησης πακέτων για ταυτόχρονες ροές δεδομένων με παράμετρο το μέγεθος πακέτων και τοπολογία αστέρα

Από τις παραπάνω μετρήσεις σε πραγματικό ad-hoc σύστημα ανάπτυξης καταδεικνύεται εμφανώς η σημαντική αρνητική επίδραση στην απόδοση του δικτύου της εμφάνισης συμφόρησης σε αυτό τόσο όσο αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης αλλά και τον αριθμό πακέτων που εν τέλει επιτυχώς λαμβάνονται από τον αποδέκτη αυτών. Όπως αποδεικνύεται από τα ίδια πειράματα η εμφάνιση του φαινομένου συμφόρησης εξαρτάται από μια εκτεταμένη σειρά παραμέτρων γεγονός που καταδεικνύει τόσο τη πολυπλοκότητα του προβλήματος όσο και τη σημασία ανάπτυξης τεχνικών και πρωτοκόλλων αντιμετώπισής του όπως και γίνεται στη παρούσα διατριβή.

5.3. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική

5.3.1. Γενική περιγραφή - προδιαγραφές

Αντικειμενικός σκοπός της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι ο εντοπισμός ανάπτυξης συνθηκών ανταγωνισμού στο δίκτυο και η αντιμετώπιση αυτών. Η ιδέα βασίζεται στη διαπίστωση ότι πάνω από κάποιο όριο εισαγωγής κίνησης το δίκτυο οδηγείται σε κατάσταση κορεσμού και σε δραματική πτώση της απόδοσης από κάθε πλευρά. Επιπλέον η επιμονή σε τέτοια υψηλά επίπεδα δημιουργίας κίνησης όχι μόνο διατηρούν την κακή απόδοσή του αλλά την επιδεινώνουν διαρκώς καθώς οδηγούν το δίκτυο όλο και περισσότερο σε κατάσταση κορεσμού.

Οι λόγοι για την κακή συμπεριφορά είναι πολλοί και κυρίως οφείλονται από κοινού στα MAC και routing επίπεδα.

Το de facto standard στο επίπεδο MAC για τα ad-hoc wireless networks (είτε MANET είτε αισθητήρων) είναι χωρίς αμφιβολία η οικογένεια πρωτοκόλλων 802.11 και πιο συγκεκριμένα το 802.11b. Αυτό καθίσταται σαφές τόσο από την ευρεία ερευνητική μελέτη στην οποία έχει χρησιμοποιηθεί αλλά και από τις πρακτικές εφαρμογές-υλοποιήσεις στις οποίες έχει ενσωματωθεί. Ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων αυτών, όμως, δεν έγινε με γνώμονα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ad-hoc δικτύων με αποτέλεσμα κάποιες παρενέργειες όταν χρησιμοποιούνται σε τέτοια δίκτυα. Έτσι λοιπόν η έλλειψη δυνατότητας ταυτόχρονης μετάδοσης και λήψης από έναν κόμβο μειώνει κατά πολύ την απόδοση σε περιπτώσεις multi-hop επικοινωνιών. Δεν υπάρχει ειδική μέριμνα σε σχέση με τη κατανάλωση ενέργειας και εξοικονόμησης αυτής, χαρακτηριστικό κρίσιμο για τα εν λόγω δίκτυα. Από την άλλη κλασσικά προβλήματα όπως τα hidden και exposed node problems έχουν αντιμετωπιστεί αλλά σίγουρα όχι εξαλειφθεί. Από την άλλη, όπως είδαμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, λόγω του ενδιαφέροντος που έχουν προσελκύσει τα ad-hoc wireless δίκτυα τα τελευταία χρόνια πολλές είναι οι ερευνητικές προτάσεις για MAC layer πρωτόκολλα σχεδιασμένα ειδικά για τέτοια δίκτυα. Τα περισσότερα όμως βρίσκονται σε καθαρά ερευνητικό επίπεδο και δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να απειλήσουν την κυριαρχία του 802.11b, τουλάχιστον όχι ακόμα [86]-[88].

Από την άλλη στο routing επίπεδο υπάρχουν επίσης μερικά ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα όπως τα AODV, DSR κ.α. Το κυριότερο κριτήριο επιλογής διαδρομής των πρωτοκόλλων αυτών είναι η διαδρομή με τα ελάχιστα hop. Εντούτοις η χρησιμοποίηση αποκλειστικά του κριτηρίου αυτού μπορεί σημαντικές παρενέργειες. Η κυριότερη είναι ότι δημιουργείται υπερβολικό επικοινωνιακό φορτίο σε συγκεκριμένες διαδρομές και κόμβους με αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονου ανταγωνισμού στις διαδρομές αυτές καθώς και εξάντληση των αποθεμάτων ενέργειας συγκεκριμένων κόμβων η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε φαινόμενα όπως κατάτμηση δικτύου κ.α. Ενώ την ίδια στιγμή υπάρχουν άλλοι κόμβοι και διαδρομές που δεν χρησιμοποιούνται καθόλου και οι οποίοι με ελάχιστο κόστος στον αριθμό των hops θα μπορούσαν να απόσυμφορίσουν μια κατάσταση υψηλού ανταγωνισμού. Και σε αυτόν τομέα υπάρχει έντονη δραστηριότητα σε ερευνητικό επίπεδο, όπως αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο χωρίς όμως να απειλείται η θέση των ήδη κραταιών πρωτοκόλλων [89]-[91].

Σε κάθε περίπτωση, πάντως, είναι σαφές ότι σε μια τέτοια κατάσταση δεν έχει κανένα νόημα τα διατηρούνται οι ρυθμοί κίνησης σε υψηλά επίπεδα. Αντίθετα η απόδοση του δικτύου έχει να επωφεληθεί, σε κάθε τομέα, από την, ελεγχόμενη, πτώση του ρυθμού αυτού, όπως έχει αποδειχθεί και από πρώτα αποτελέσματα έτσι ώστε να αποσυμφοριστεί η επικοινωνία και σε επόμενη φάση όταν και αν το επιτρέψουν οι συνθήκες και οι απαιτήσεις επικοινωνίας να υπάρξει και πάλι αύξηση. Σκοπός μας, λοιπόν, είναι η δημιουργία ενός πλαισίου το οποίο θα ελέγχει τον ρυθμό εισαγωγής κίνησης στο δίκτυο ανάλογα με τον ανταγωνισμό που αντιλαμβάνονται τόσο οι σταθμοί παραλήπτες αλλά και οι ενδιάμεσοι κόμβοι.

Οι βασικές αρχές σχεδίασης και υλοποίησης ενός τέτοιου πλαισίου είναι :

- Κατανεμημένη λειτουργία
- Δεν θα απαιτείται ο συγχρονισμός των κόμβων του δικτύου (ο συγχρονισμός των κόμβων σε ένα ad hoc δίκτυο είναι δύσκολο να υλοποιηθεί και προκαλεί σημαντική επιβάρυνση στο δίκτυο).
- Η υλοποίηση να βασίζεται σε απλούς αλγορίθμους οι οποίοι δεν θα επιβαρύνουν σημαντικά τη λειτουργία του κόμβου.

- Υλοποίηση ανεξάρτητη των εμπλεκόμενων επιπέδων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η χρηστικότητα του πλαισίου (framework) καθώς μπορεί να εφαρμοστεί στο ευρύτερο δυνατό σύνολο δικτύων.
- Δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στα εμπλεκόμενα επίπεδα. Έτσι διευκολύνεται πολύ η υιοθέτηση του πλαισίου σε ένα χώρο που υπάρχουν είδη de facto standards σε πολλά επίπεδα.
- Ευέλικτος σχεδιασμός ώστε να είναι δυνατή η συνύπαρξη κόμβων που ενσωματώνουν το προτεινόμενο πλαίσιο με κόμβους που δεν το ενσωματώνουν.
- Δυνατότητα παραμετροποίησης του πλαισίου.
- Δυνατότητα ικανοποίησης απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας.
- Πρώτιστο ενδιαφέρον στη βελτίωση της απόδοσης σε σχέση με τις δυνατότητες επικοινωνίας πραγματικού χρόνου (καθυστερήσεις) και κατανάλωσης ενέργειας, με παράλληλο ενδιαφέρον, όμως, στην επίδραση στην ικανότητα μετάδοσης πακέτων (throughput).
- Όσο το δυνατόν μικρότερη επικοινωνιακή επιβάρυνση του δικτύου.

Οδηγούμεστε, λοιπόν, στη δημιουργία ενός πλαισίου το οποίο θα ενσωματώνεται σε κάθε κόμβο ανεξάρτητα, και το οποίο έχει τα ακόλουθα καθήκοντα.

- Έλεγχος χαμένων πακέτων σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε να εκτιμάται το επίπεδο συμφόρησης ανά πάσα στιγμή.
- Καταγραφή και ενημέρωση σχετικά με το ποιες ροές δεδομένων περνάνε από τον εκάστοτε κόμβο.
- Όταν ο ανταγωνισμός ξεπεράσει κάποιο ανεκτό επίπεδο η δυνατότητα αποστολής ειδοποιητηρίου πακέτου για το γεγονός αυτό στους αρχικούς αποστολείς κάθε ροής δεδομένων που περνάει από τον κόμβο.
- Αναγνώριση ειδοποιητηρίων πακέτων για υπέρβαση του ορίου ανταγωνισμού (notification packet από εδώ και πέρα) σε κάποιο σημείο της διαδρομής των πακέτων και εκτέλεση κατάλληλου αλγορίθμου μείωσης του ρυθμού μετάδοσης.

- Δυνατότητα αύξησης του ρυθμού μετάδοσης όταν δεν υπάρχει λήψη notification πακέτου για περισσότερο από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Το πλαίσιο σε κάθε κόμβος μπορεί να γνωρίζει, από τα MAC πακέτα, ποιές ροές δεδομένων περνάνε μέσα από τον κόμβο αυτό. Επιπλέον κάθε κόμβος μπορεί να αντιλαμβάνεται πόσα πακέτα χάνονται στην γειτονία του και τη πληροφορία αυτή να τη χρησιμοποιεί το πλαίσιο για να κρίνει αν έχει ξεπεραστεί το όριο του ανεκτού ανταγωνισμού δεδομένου ότι τα χαμένα πακέτα ξεπέρασαν κάποιο όριο εντός ενός σαφώς καθορισμένου χρονικού διαστήματος. Το όριο αυτό των χαμένων πακέτων αποτελεί μια βασική παράμετρο διαμόρφωσης του πλαισίου και θα αναλυθεί παρακάτω. Η πληροφορία αυτή εξάγεται από το framework με παρακολούθηση του MAC επίπεδου και της πορείας της ουράς του κόμβου. Στο επίπεδο MAC γεγονότα που σηματοδοτούν χαμένο πακέτο μπορεί να είναι σύγκρουση πακέτου, μη παραλαβή αναμενόμενου πακέτου (CTS και ACK για παράδειγμα). Από τη άλλη κρίσιμη είναι η παρατήρηση της ουράς καθώς είναι σαφές ότι σε συνθήκες ανταγωνισμού μεγάλο ποσοστό των χαμένων πακέτων οφείλεται σε υπερχειλίση της ουράς.

Το είδος των πακέτων που παρακολουθεί το πλαίσιο είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος αυτού. Μέσα από πολλές εργασίες [78], [84], [92] επισημαίνεται ότι, αντίθετα από τα ενσύρματα, στα ασύρματα δίκτυα η σημασία της απώλειας ενός πακέτου και ο τρόπος αντιμετώπισης της απώλειας αυτής είναι διαφορετικός ανάλογα με το λόγο της απώλειας. Είναι χαρακτηριστικό ότι ένας από τους βασικότερους λόγους αποτυχίας της χρήσης του TCP πρωτόκολλου στα ασύρματα δίκτυα είναι το γεγονός ότι όλες τις απώλειες πακέτων της αντιλαμβάνονταν με τον ίδιο τρόπο με αποτέλεσμα να έχουμε άσκοπες μειώσεις του παραθύρου. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι το TCP πρωτόκολλο αναπτύχθηκε αποκλειστικά με βάση τα ενσύρματα δίκτυα. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής έγινε λεπτομερής μελέτη της σχέσης χαμένων πακέτων με παράμετρο το είδος των πακέτων [12] η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Κατά συνέπεια το πλαίσιο σε κάθε κόμβο που αντιλαμβάνεται ανταγωνισμό άνω κάποιου ορίου πρέπει να στέλνει αναφορά στους αποστολείς των flows που περνάνε από αυτόν για την κακή κατάσταση του καναλιού στην περιοχή του. Το πλαίσιο τώρα

ανάλογα με τις αναφορές που θα λαμβάνει (notification πακέτα) ή δεν θα λαμβάνει δίνει εντολή στο επίπεδο εφαρμογής ώστε να προσαρμοστεί κατάλληλα το injection rate. Παράλληλα όμως υπάρχει μέριμνα έτσι ώστε σε περίπτωση που δεν έχει υπάρξει notification πακέτο για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να υπάρχει δυνατότητα αύξησης του ρυθμού μετάδοσης. Οι κανόνες μείωσης ή αύξησης του ρυθμού μετάδοσης ενσωματώνονται στον Transmission Rate Adaptation Algorithm του πλαισίου ο οποίος αποτελεί ακόμα μια βαθμίδα διαμόρφωσης καθώς δίνει έναν σημαντικό βαθμό ελευθερίας στην υλοποίηση του πλαισίου και θα παρουσιαστεί παρακάτω.

5.3.2. Λειτουργική – θεωρητική ανάλυση

Για να παρουσιάσουμε τον τρόπο λειτουργίας θεωρούμε το δίκτυο του Σχήμα 5- 10.

Σχήμα 5- 10. Λειτουργική συμπεριφορά της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Στο παραπάνω δίκτυο υπάρχουν δύο ταυτόχρονες ροές δεδομένων. Η μία έχει διαδρομή S1-> I1 -> I2 -> I4 -> R1 ενώ η δεύτερη S2 -> I5 -> I2 -> I3 -> R2. Είναι φανερό ότι κάθε μια από τις δύο αυτές διαδρομές αποτελείται από 5 κόμβους και

μπορεί να αναπτυχθεί συνθήκες συμφόρησης σε κάθε έναν από αυτούς. Κατά συνέπεια ο αρχικός αποστολέας (S1 και S2 στο παράδειγμά μας) δεν μπορεί να έχει γνώση για το αν σε κάποιο σημείο της διαδρομής υπάρχουν συνθήκες έντονης συμφόρησης και σε ποιο κόμβο για να πάρει τα κατάλληλα μέτρα.

Σύμφωνα με τη λειτουργία της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής κάθε κόμβος καταρχήν καταγράφει ποια flows περνάνε από αυτόν. Άρα οι κόμβοι I3 και I5 θα έχουν καταχωρήσει ότι από αυτούς περνάει μόνο το S2->R2 ενώ οι I1 και I4 θα καταχωρήσουν ότι περνάει η ροή δεδομένων S1->R1. Αντίθετα στον κόμβο I2 θα υπάρχουν δύο καταχωρήσεις καθώς από αυτόν περνάνε και οι δύο ροές δεδομένων.

Σε δεύτερη φάση και σύμφωνα με τη πιο πάνω περιγραφή αν αναπτυχθούν συνθήκες συμφόρησης στους κόμβους I3 ή I5 θα σταλεί notification πακέτο από τον εκάστοτε κόμβο μόνο προς τον S2 ενώ στη περίπτωση όπου το όριο ξεπεραστεί στην γειτονία των I1 ή I4 notification πακέτο θα σταλεί στον S1. Στην περίπτωση όμως που το όριο ξεπεραστεί στον κόμβο I2 θα πρέπει να ειδοποιηθούν τόσο ο S1 όσο και ο S2. Τέλος είναι αυτονόητο ότι αν παρατηρηθεί συμφόρηση στους S1 ή S2 οι ίδιοι έχουν τη δυνατότητα να το αντιληφθούν και να εκτελέσουν τον Transmission Rate Adaptation Algorithm.

Πρέπει να τονιστεί ότι τα notification πακέτα αποστέλλονται σαν κανονικά πακέτα. Το γεγονός αυτό δίδει την δυνατότητα συνύπαρξης κόμβων με και χωρίς την προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Πράγματι σε αυτή τη περίπτωση υπάρχουν τα εξής ενδεχόμενα για τον κόμβο που δεν ενσωματώνει τις λειτουργίες της αρχιτεκτονικής.

1. Να είναι τελικός ή ενδιάμεσος παραλήπτης και να υπάρχουν συνθήκες συμφόρησης στη περιοχή του. Σε αυτή τη περίπτωση οι συνθήκες συμφόρησης δεν γίνονται αντιληπτές και φυσικά δεν θα αποστέλλεται notification πακέτο στον αρχικό αποστολέα. Κάτι τέτοιο στερεί τα οφέλη της ύπαρξης της αρχιτεκτονικής όσο αφορά την απόδοση, αλλά αυτό σε καμία περίπτωση δεν εμποδίζει την συνέχιση της λειτουργίας του δικτύου.
2. Να είναι τελικός παραλήπτης ή ενδιάμεσος και να μην υπάρχουν συνθήκες συμφόρησης στη περιοχή του. Σε αυτή τη περίπτωση και σε σχέση με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική το μόνο που μπορεί να χρειαστεί να κάνει είναι να αναμεταδώσει ένα notification πακέτο. Κάτι τέτοιο μπορεί να το

κάνει καθώς θα το αντιλαμβάνεται σαν ένα οποιοδήποτε πακέτο δεδομένων.

3. Να είναι αρχικός αποστολέας. Στη περίπτωση αυτή ο κόμβος μπορεί να καλεστεί είτε να προωθήσει (το οποίο είναι σαν τη περίπτωση 2) είτε να παραλάβει κάποιο notification πακέτο. Στην περίπτωση λοιπόν της παραλαβής το πακέτο θα φτάσει μέχρι το επίπεδο εφαρμογής, εκεί δεν θα γίνει κατανοητό και θα απορριφθεί. Φυσικά σε περίπτωση όπου στο εν λόγω κόμβο δημιουργηθούν συνθήκες συμφόρισης τότε οδηγούμαστε στην περίπτωση 1.

Είναι επίσης φανερό ότι η αποστολή των notification πακέτων είναι το μοναδικό επικοινωνιακό φορτίο (communicational overhead) που επιφέρει η χρήση της αρχιτεκτονικής. Είναι λοιπόν κρίσιμης σημασίας να εξεταστεί η επίδραση του φορτίου αυτού στην απόδοση του δικτύου. Ισχυριζόμαστε λοιπόν και θα αποδειχθεί και από την μελέτη που θα παρουσιαστεί παρακάτω ότι τα notification πακέτα δεν επιφορτίζουν σημαντικά το δίκτυο και σε κάθε περίπτωση η βελτίωση της απόδοσης λόγω, ακριβώς, της αποστολής των πακέτων αυτών (και της χρήσης της αρχιτεκτονικής κατ' επέκταση) υπερκαλύπτουν και πρακτικά εξαλείφουν το όποιο επιπλέον φορτίο.

Ο παραπάνω ισχυρισμός ισχύει θεωρητικά για τους ακόλουθους λόγους.

1. Το μέγεθος των notification πακέτων είναι πολύ μικρό και σίγουρα πολύ μικρότερο από το μέγεθος των πακέτων δεδομένων. Το ίδιο το μέγεθος αποτελεί σημαντική παράμετρο διαμόρφωσης (και άρα επιπλέον βαθμό ελευθερίας) στα χέρια αυτού που υλοποιεί το δίκτυο και εξαρτάται από την πληροφορία που θέλει να περάσει στον αρχικό αποστολέα. Σε κάθε περίπτωση είναι φανερό και κατανοητό ότι όσο μικρότερο είναι τόσο μικρότερες οι πιθανότητες να μην φτάσει στον προορισμό του για οποιονδήποτε λόγο.
2. Το φορτίο που εισάγει η αποστολή ενός notification πακέτου είναι ανάλογο με τον κόμβο αποστολής σε σχέση με τον παραλήπτη. Σε σχέση με το Σχήμα 5-11 για παράδειγμα και ενδεχόμενη αποστολή πακέτου που αφορά τη ροή δεδομένων S1 – R1. Είναι φανερό ότι το πακέτο μπορεί να αποσταλεί από τους κόμβους I1, I2, I4 ή R1. Το overhead, όμως, που θα

επιφέρει η αποστολή από τον I1 είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με την αποστολή από τον I2 κτλ. Αν θεωρήσουμε ισοκατανομή των αποστολών notification πακέτων μεταξύ των πιθανών κόμβων τότε συμπεραίνουμε ότι μεγάλο ποσοστό των αποστολών αυτών επιφέρουν πολύ μικρότερο φορτίο. Κάτι τέτοιο ισχύει καθώς μπορεί να αφορούν μετάδοση μικρού πακέτου σε απόσταση $x \text{ hop}$ αλλά να επηρεάζουν την αποστολή πολλαπλάσιων, σε μέγεθος, πακέτων, και σε πολλαπλάσια των $x \text{ hop}$ απόσταση.

3. Λόγω του ότι τα notification πακέτα μεταδίδονται σαν ανεξάρτητες ροές δεδομένων δεν δεσμεύονται να ακολουθήσουν την ίδια διαδρομή της ροής δεδομένων για την οποία θέλουν να ειδοποιήσουν. Αυτό είναι σημαντικό διότι μπορούν να αποφεύγουν τα σημεία στα οποία υπάρχει έντονη συμφόριση. Κάτι τέτοιο βέβαια έχει άμεση σχέση με το routing πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται.

Στα σχήματα Σχήμα 5- 12α και β φαίνονται οι απαραίτητες λειτουργίες σε μορφή διαγραμμάτων ροής. Στο Σχήμα 5- 12 τα αρχικά TRAA σημαίνουν Transmission Rate Adaptation Algorithm ο οποίος είναι ξεχωριστό κομμάτι της αρχιτεκτονικής και θα παρουσιαστεί ανεξάρτητα. Μια ακόμα βασική λειτουργία που αναφέρεται στο Σχήμα 5- 12β είναι ότι σε κάθε ενημέρωση της βάσης σχετικά με τις ροές δεδομένων που περνάνε από τον εκάστοτε κόμβο γίνεται και έλεγχος για μη ισχύουσες καταχωρήσεις στη βάση αυτή. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο καθώς σε ένα τόσο δυναμικό δίκτυο όπως τα MANET ή τα δίκτυα αισθητήρων μια ροή δεδομένων μπορεί να πάψει να υφίσταται ή να αλλάξει διαδρομή για πολλούς λόγους, απρόβλεπτα και με μεγάλη συχνότητα. Το προτεινόμενο πλαίσιο λαμβάνει υπ' όψιν του το ενδεχόμενο αυτό ελέγχοντας το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από την τελευταία φορά που ελήφθη πακέτο για κάθε μία από τις καταχωρημένες ροές δεδομένων. Αν το διάστημα αυτό ξεπεράσει κάποιο καθορισμένο όριο η καταχώρηση διαγράφεται θεωρώντας ότι η συγκεκριμένη ροή πακέτων σταμάτησε ή άλλαξε διαδρομή. Με τον τρόπο αυτό δεν αποστέλλονται άσκοπα notification πακέτα.

Σχήμα 5- 12. Flow-chart της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

5.3.3. Θέση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στο ISO/OSI μοντέλο, σύνδεση – εξάρτηση με τα υπόλοιπα επίπεδα.

Δύο από τα βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι η συμβατότητα με είδη υπάρχοντα πρωτόκολλα που αποτελούν de facto standards καθώς και η λειτουργία χωρίς επίδραση σε οποιοδήποτε επίπεδο. Είναι λοιπόν σημαντικό να δούμε τη θέση του πλαισίου (framework) σε σχέση με το ISO/OSI μοντέλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5- 13 που ακολουθεί.

Το βασικό χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής όπως φαίνεται στο Σχήμα 5- 13 είναι ότι όλα τα μέρη από τα οποία αποτελείται η αρχιτεκτονική αλληλεπιδρούν με κάποια από τα επίπεδα αλλά δεν τα επηρεάζουν-τροποποιούν την εσωτερική τους δομή και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα. Έτσι λοιπόν κεντρικό σημείο και ρόλο καταλαμβάνει η Congestion Estimation Unit. Η συγκεκριμένη μονάδα μέσω των MAC πακέτων καθώς και τον έλεγχο της ουράς καταρχήν εκτιμά κατά πόσο τα επίπεδα συμφόρησης που επικρατούν στην περιοχή έχουν ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια και κατά δεύτερον ενημερώνει τη βάση Transmitter Database (TD) με πληροφορίες σχετικά με το ποιες ροές δεδομένων περνάνε από τον κόμβο. Επιπλέον είναι επιφορτισμένη και με το ρόλο του να δίνει εντολή αποστολής notification πακέτων στους αρχικούς αποστολείς των ροών δεδομένων που είναι καταχωρημένες στην TD, αυτό γίνεται μέσω τη λειτουργίας Congestion Report Trigger όπως φαίνεται και στο σχήμα.

Σχήμα 5- 13. Η σχέση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σε σχέση με το ISO/OSI μοντέλο.

Η δεύτερη διακλάδωση αφορά τη λειτουργία Rate Adaptation Trigger μέσω της οποίας ενεργοποιείται ο TRAU ο οποίος βρίσκεται στην Transmission Rate Adaptation Unit, όταν παρατηρηθεί έντονη συμφόρηση στο μέσο. Τρεις λόγοι

μπορούν να οδηγήσουν την Congestion Estimation Unit να εκτελέσει τη λειτουργία Rate Adaptation Trigger. Ο πρώτος είναι η λήψη στο MAC επίπεδο notification πακέτου με προορισμό τον κόμβο στον οποίο βρισκόμαστε. Ο δεύτερος είναι η υπέρβαση των ορίων συμφόρησης ενώ παράλληλα ο κόμβος στον οποίο βρισκόμαστε είναι αρχικός αποστολέας κάποιας ροής δεδομένων. Ο δε τρίτος είναι η μη λήψη notification πακέτου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα οπότε, αν είναι δυνατόν, να υπάρξει αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σύμφωνα με τους κανόνες του TRAA.

Τέλος η Transmission Rate Adaptation Unit ενημερώνει και τροφοδοτεί την εφαρμογή με το καινούργιο ρυθμό μετάδοσης.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι σε κανένα σημείο της ανάλυσης της αρχιτεκτονικής δεν μιλήσαμε για συγκεκριμένα πρωτόκολλα. Τούτο είναι δυνατό διότι οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για παράδειγμα από το MAC επίπεδο δεν έχουν σχέση με λειτουργίες ή χαρακτηριστικά συγκεκριμένων πρωτοκόλλων. Από την άλλη ο ρυθμός μετάδοσης αποτελεί μια βασική και στοιχειώδη παράμετρο κάθε υλοποίησης του επιπέδου εφαρμογής. Για τη πληρότητα της παρουσίασης δίνουμε, στο Σχήμα 5- 14, και το διάγραμμα UML ενός κόμβου που ενσωματώνει τη προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

Σχήμα 5- 14. UML διάγραμμα κόμβου που ενσωματώνει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική

5.3.4. Αλγόριθμος διαχείρισης ρυθμού μετάδοσης

Μέχρι τώρα έχουμε εστιάσει κυρίως στους αλγορίθμους αναγνώρισης συμφόρησης και την αποστολή notification πακέτων. Ερχόμαστε τώρα στο κομμάτι της αρχιτεκτονικής το οποίο καλείται να χρησιμοποιήσει την πληροφορία της υπέρβασης των επιτρεπτών ορίων συμφόρησης και να δράσει προς εκτόνωση αυτής. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση το module αυτό τροποποιεί τον ρυθμό μετάδοσης και το τροφοδοτεί στο επίπεδο εφαρμογής σύμφωνα με έναν αλγόριθμο βασισμένο στην MIMD προσέγγιση. Οι MIMD (Multiplicative Increase Multiplicative Decrease) αποτελούν μια κατηγορία αλγορίθμων σύμφωνα με τους οποίους ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται ή μειώνεται, ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου, κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό. Στην εξίσωση (1) παρουσιάζεται η μαθηματική σχέση σύμφωνα με την οποία υλοποιείται ο MIMD αλγόριθμός στην συγκεκριμένη περίπτωση.

$$x(n+1) = \begin{cases} b_I x(n), & \text{no congestion notification} \\ b_D x(n), & \text{congestion notification} \\ x_{\max}, & \text{no congestion notification \& } b_I x(n) \geq x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Σαν congestion notification εννοούμε την λήψη notification πακέτου ή την αναγνώριση συνθηκών συμφόρησης στη γειτονία του κόμβου. Αντίθετα no congestion notification εννοούμε τη μη λήψη notification πακέτου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το οποίο αποτελεί κρίσιμη παράμετρο. Τέλος ο ρυθμός μετάδοσης παίρνει τη μέγιστη τιμή όταν δεν έχει ληφθεί notification πακέτο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και παράλληλα αύξηση του ρυθμού σύμφωνα με το συντελεστή b_I θα σήμαινε υπέρβαση της μέγιστης τιμής. Σαν μέγιστη τιμή του ρυθμού μετάδοσης θεωρούμε την αρχική τιμή του κατά την ενεργοποίηση της εφαρμογής. Ο ρυθμός μετάδοσης κατά την εκκίνηση, λοιπόν, είναι ο επιθυμητός μέγιστος ρυθμός της εκάστοτε εφαρμογής. Επιπλέον, όπως είναι σαφές, b_I, b_D αποτελούν τους συντελεστές αύξησης και μείωσης αντίστοιχα, είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και αποτελούν πολύ κρίσιμες παραμέτρους για την απόδοση της αρχιτεκτονικής.

Οι MIMD αποτελούν πολύ γνωστούς και ευρέως χρησιμοποιημένους αλγορίθμους (τόσο σε έρευνα όσο και σε υλοποίηση) στα ενσύρματα και τύπου internet δίκτυα. Ο τρόπος λειτουργίας τους όμως ταιριάζει στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική και όπως θα φανεί όντως αποδίδει στις περισσότερες των περιπτώσεων. Η [93] δίνει μια πολύ καλή παρουσίαση της ιδέας των αλγορίθμων αυτών οι οποίοι, όπως αναφέρει, προτείνονται ως αντικαταστάτες των αντίστοιχων AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease) αλγορίθμων για χρήση σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, όπως για παράδειγμα με τη μορφή του scalable TCP. Επιπλέον δίνεται μια διεξοδική και αναλυτική μελέτη της απόδοσης των MIMD αλγορίθμων, επικεντρωμένη στην δικαίωση που παρέχεται όταν δύο επικοινωνίες μοιράζονται τον ίδιο ενσύρματο link ορισμένης χωρητικότητας υπό διάφορες συνθήκες.

Μια ακόμα κρίσιμη προδιαγραφή που έπρεπε να καλύπτει η προτεινόμενη σχεδίαση είναι αυτή της δυνατότητας σχεδίασης και υλοποίησης πολιτικών ποιότητας υπηρεσίας. Τη δυνατότητα αυτή μας τη δίνει το γεγονός ότι στην πρόταση που παρουσιάζουμε ο κάθε κόμβος έχει τη δική του Transmission Rate Adaptation Unit η οποία ενεργεί ανεξάρτητα. Πράγματι, όπως φαίνεται από την παραπάνω ανάλυση ο κάθε κόμβος μπορεί να υιοθετήσει διαφορετική υλοποίηση του TRAA αλγορίθμου. Έτσι λοιπόν ένας κόμβος με κρίσιμα δεδομένα δύναται να χρησιμοποιήσει μικρότερο συντελεστή μείωσης του ρυθμού μετάδοσης (b_D), μεγαλύτερο συντελεστή αύξησης (b_I) είτε μικρότερο χρονικό διάστημα χωρίς notification πακέτο για αύξησης του ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με έναν κόμβο με μικρότερης προτεραιότητας πακέτα προς μετάδοση. Μια τέτοια απλή πολιτική είναι σαφές ότι θα δώσει το πλεονέκτημα στα κρίσιμα δεδομένα σε περίπτωση ανάπτυξης συμφόρησης σε κάποιο σημείο της διαδρομής τους. Εντούτοις, πρέπει η σχεδίαση να είναι προσεκτική, καθώς μια τέτοια, απλή, πολιτική μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα channel capturing effect. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ροή κρίσιμων δεδομένων θα καταλάβει όλο το διαθέσιμο εύρος του καναλιού αδικώντας υπέρμετρα οι χαμηλής προτεραιότητας ροές δεδομένων φτάνοντας σε σημείο να μη έχουν τη δυνατότητα να μεταδώσουν καθόλου. Το σημαντικό είναι ότι η modular δομή του πλαισίου παρέχει τη δυνατότητα διαφορετικής πολιτικής ποιότητας υπηρεσίας τόσο ανά κόμβο όσο και ανά ροή δεδομένων όταν πολλαπλές ροές δεδομένων εκκινούν από τον ίδιο κόμβο του δικτύου.

5.3.5. Παράμετροι διαμόρφωσης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Από τα βασικά χαρακτηριστικά του πλαισίου που παρουσιάζουμε (τόσο στο επίπεδο του σχεδιασμού όσο και της υλοποίησης) είναι η όσο γίνεται μεγαλύτερη δυνατότητα παραμετροποίησης. Στο κομμάτι αυτό λοιπόν θα παραθέσουμε συγκεντρωτικά τις κυριότερες παραμέτρους και πως αυτές επηρεάζουν τη λειτουργία του δικτύου που ενσωματώνει το πλαίσιο.

- Πλήθος χαμένων πακέτων που δηλώνουν υπέρβαση του ορίου συμφόρησης. Παράμετρος κλειδί καθώς από αυτήν εξαρτάται το πλήθος των notification πακέτων που θα αποστέλλονται και γενικότερα πόσο έντονη θα είναι η επέμβαση στην default λειτουργία του δικτύου.
- Χρονικό διάστημα χωρίς λήψη notification πακέτου. Επίσης κρίσιμη παράμετρος καθώς καθορίζει πόσο εύκολη και συχνή είναι η δυνατότητα αύξησης του ρυθμού μετάδοσης ενός κόμβου. Επίσης το γεγονός ότι το ποσοστό αύξησης είναι ίσο ή μικρότερο αυτού της μείωσης καθιστά τη παράμετρο αυτή ακόμα πιο κρίσιμη.
- Μέγεθος notification πακέτου. Ανάλογα με τη πληροφορία που θέλει να στείλει ο κόμβος στον οποίο αναπτύσσονται συνθήκες συμφόρησης στους εκκινητές των ροών εξαρτάται και το μέγεθος του notification πακέτου. Είναι σαφές ότι όσο μικρότερο τόσο επιπλέον φορτίο θα εισάγεται στο δίκτυο αλλά και τόσο μικρότερη η πιθανότητα απώλειας ενός τέτοιου πακέτου.
- Transmission Rate Adaptation Algorithm. Σημαντική σχεδιαστική απόφαση είναι το τι γίνεται από τη στιγμή που ένας αποστολέας δεδομένων λαμβάνει γνώση ότι σε κάποιο σημείο της ροής υπάρχει συμφόρησης. Πρέπει λοιπόν να επιλέξει το καταλληλότερο αλγόριθμο μεταβολής του ρυθμού μετάδοσης. Παραδείγματα είναι οι AIMD και οι MIMD (με τους δεύτερους να έχουν ισχυρό πλεονέκτημα στα ad-hoc δίκτυα). Επίσης Μέσα από την παράμετρο αυτή μπορούν να υλοποιηθούν σενάρια ποιότητας υπηρεσίας καθώς κάθε

κόμβος μπορεί να υιοθετεί άλλον αλγόριθμο ανάλογα με την προτεραιότητά του. Για να το θέσουμε απλά μπορεί ένας κόμβος μέγιστης κρισιμότητας να μην μειώνει καθόλου τον ρυθμό μετάδοσης ή απλά να το μειώνει με μικρότερο ρυθμό από κόμβο με μικρότερη προτεραιότητα ή ακόμα να έχει μεγαλύτερη ευχέρεια αύξησης του ρυθμού όταν και αν αυτό είναι δυνατόν.

- Το είδος των πακέτων που λαμβάνουν μέρος στον καθορισμό της συμφόρησης. Η ανάπτυξη ή όχι συμφόρησης στην περιοχή ενός κόμβου γίνεται μέσα από τα χαμένα πακέτα που αντιλαμβάνεται ο κόμβος αυτός. Όμως ένα κρίσιμο ερώτημα είναι ποια είδη πακέτων συμμετέχουν στην εκτίμηση αυτή. Είναι όλα τα είδη ισοδύναμα, ή μήπως η απώλεια πακέτων κάποιου είδους δίνει ακριβέστερη εκτίμηση από κάποια άλλα. Σε αυτή τη περίπτωση ο σχεδιαστής μπορεί να λαμβάνει υπόψη του κάποια είδη πακέτων και να αγνοεί κάποια άλλα στην εκτίμηση για ανάπτυξη συμφόρησης. Σχετικά με τα ερωτήματα αυτά έχει γίνει σχετική μελέτη που παρουσιάζεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

5.4. Μελέτη πάνω στην απόρριψη πακέτων στα ad-hoc ασύρματα δίκτυα.

Εγγενώς το κύριο πρόβλημα των ασύρματων δικτύων είναι τα χαμένα πακέτα. Ένα πακέτο μπορεί να χαθεί για διαφόρους λόγους (συγκρούσεις, απόρριψη από την ουρά, εξάντληση του Time To Live χρόνου κ.α) αλλά σε κάθε περίπτωση αυτό είναι το γεγονός που οδηγεί στη μείωση της απόδοσης του δικτύου είτε μέσω μείωσης της ικανότητας διαμεταγωγής του δικτύου είτε αύξησης της καθυστέρησης, κατανάλωσης κτλ. Παράλληλα όμως πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η επίπτωση από την απώλεια ενός πακέτου εξαρτάται από το είδος του πακέτου αλλά και ότι το κάθε είδος πακέτων δεν υπόκειται σε απώλειες με την ίδια συχνότητα.

Οι παραπάνω προβληματισμοί οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρέπει να γίνει μια μελέτη των χαμένων πακέτων ανά είδος πακέτου μεταβάλλοντας κρίσιμες παραμέτρους των ad-hoc ασύρματων δικτύων. Τα συμπεράσματα είναι πολύ χρήσιμα

εν γένει καθώς καταδεικνύουν ποια είναι τα σημαντικά γεγονότα απώλειας πακέτων και πια τα όχι πολύ σημαντικά, αλλά και ειδικά στην αρχιτεκτονική που παρουσιάζουμε στο κεφάλαιο αυτό καθώς θα καταδείξει ποιες απώλειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως ενδείξεις ανάπτυξης συμφόρησης και ποιες θα μπορούσαν να υποβαθμιστούν. Μια τέτοια μελέτη, ικανοποιητικά εκτενής, έγινε στα πλαίσια στην διδακτορικής διατριβής. Τα βασικά σημεία της εργασίας αυτής παρουσιάζονται εδώ. Τα είδη των πακέτων εξαρτώνται κατά βάση από το επίπεδο από το οποίο εκκινούν. Έτσι λοιπόν τα πακέτα που μελετήθηκαν ήταν αυτά των επιπέδων mac, routing και transport.

Στο mac επίπεδο το de facto standard είναι το γνωστό 802.11b. Κατά συνέπεια υπάρχουν 4 είδη πακέτων προερχόμενα από αυτό. Καταρχήν τα πακέτα ελέγχου RTS/CTS/ACK. Είναι μικρά σε μέγεθος πακέτα που σαν βασικό σκοπό έχουν τη δέσμευση του μέσου και την αντιμετώπιση, όσο είναι αυτό δυνατόν, φαινομένων όπως hidden και exposed node problem. Επίσης έτσι αποφεύγεται η σύγκρουση των πακέτων δεδομένων τα οποία αποτελούν το τέταρτο είδος πακέτων του επιπέδου και είναι φυσικά κρίσιμης σημασίας να έχουν όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες. Με απλά λόγια μπορεί να πει κανείς ότι τα υπόλοιπα πακέτα υπάρχουν ώστε να εξασφαλίζουν όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες πακέτων δεδομένων.

Για το επίπεδο δρομολόγησης θεωρούμε τα δύο πολύ γνωστά πρωτόκολλα DSR και AODV καθένα από τα οποία εισάγει τα δικά του πακέτα προς εύρεση των επιθυμητών διαδρομών. Απώλειες των πακέτων αυτών επίσης μπορεί να επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις καθώς σημαίνει καθυστέρηση εύρεσης διαδρομής, επιλογή μη βέλτιστης διαδρομής αλλά ακόμα και επανεκκίνηση της διαδικασίας εύρεσης διαδρομής που πολλές φορές είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία. Όλες αυτές οι περιπτώσεις οδηγούν σε αύξηση καθυστερήσεων, κατανάλωσης και γενικότερα υπέρμετρης αύξησης του φορτίου του δικτύου.

Τέλος και το επίπεδο μεταφοράς έχει το ρόλο του στα εισαγόμενα στο δίκτυο πακέτα. Το TCP για παράδειγμα που είναι το κλασσικό connection-oriented πρωτόκολλο μεταφοράς εισάγει πακέτα ελέγχου ACK προς επιβεβαίωση ορθής λήψης πακέτου από τον προορισμό. Αντίθετα το UDP ως connectionless-oriented δεν εισάγει επιπλέον πακέτα και δεν συνοδεύεται από αλγορίθμους ελέγχου κίνησης. Η απώλεια πακέτων ελέγχου στο επίπεδο αυτό μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αρνητικές

Κεφάλαιο 5: Αντιμετώπιση προβλήματος συμφόρησης καναλιού μέσω της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής

επιπτώσεις. Η απώλεια για παράδειγμα ενός ack TCP πακέτου οδηγεί στην λανθασμένη εντύπωση ότι το πακέτο δεδομένων δεν έφτασε σωστά στο προορισμό του με συνέπεια άσκοπη ενεργοποίηση του μηχανισμού παραθύρου του TCP πρωτοκόλλου. Αυτό μπορεί να σημαίνει μείωση του ρυθμού μετάδοσης ενώ δεν υπάρχει λόγος ή επανάληψη μετάδοσης επίσης χωρίς να υπάρχει λόγος.

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε η νεότερη έκδοση του ns2 2.28 θεωρώντας σαν τοπολογία ένα 7x7 πλέγμα κόμβων στο οποίο ο κάθε ένας επικοινωνεί απευθείας μόνο με τους πρώτους γειτονικούς κόμβους καθέτως και οριζοντίως. Η τοπολογία και οι βασικές παράμετροι των εξομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5- 15 και Πίνακας 5- 1 αντίστοιχα.

Σχήμα 5- 15. Χρησιμοποιούμενη τοπολογία στη μελέτη περί των απωλειών πακέτων

Network Simulator	ns2 (ver 2.28)
MAC layer protocol	802.11b
Network Bandwidth	2Mbps
Routing protocol	DSR, AODV
Transport layer	TCP, UDP
Simulation time	200sec
Packet error rate	2% Uniform
Propagation model	Two Ray Ground
Transmission range	250m
Antenna type	Omni directional
Packet Size	512 byte
Queue length	50 packets
Traffic generator	CBR
Transmission rate/flow	100, 400, 800 Kbps
Number of hops	> 3
Number of flows	1-4

Πίνακας 5- 1. Παράμετροι των εξομοιώσεων για τη μελέτη σχετικά με τις απώλειες πακέτων

Επιπλέον του Πίνακα 5- 1 πρέπει να αναφέρουμε δύο στοιχεία. Σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο κατανάλωσης που είναι ενσωματωμένο στον ns2 με τις default τιμές σχετικά με την ισχύ μετάδοσης, λήψης. Αυτό έγινε διότι δεν μας ενδιέφεραν τόσο τα απόλυτα νούμερα κατανάλωσης όσο η σχετική απόδοση του δικτύου σε αυτόν τον τομέα. Επίσης η κάθε γεννήτρια κίνησης δεν ήταν μόνιμα ενεργή, αλλά ξεκινάει και σταματάει τη μετάδοση με τυχαίο τρόπο. Η διάρκεια των χρονικών διαστημάτων μετάδοσης και παύσης επιλέγονται τυχαία μεταξύ 0 και 10 δευτερόλεπτα. Αυτό γίνεται καταρχήν διότι είναι μια πιο ρεαλιστική περίπτωση εφαρμογής στα δίκτυα αυτά, αλλά και προς αποφυγή το φαινομένου μια ροή δεδομένων να καταλαμβάνει όλο το εύρος του καναλιού και να καταπιέζει άλλες ροές σε πολύ χαμηλό ή ακόμα και σε μηδενικό ρυθμό μετάδοσης.

5.4.1. Επίδραση του ρυθμού μετάδοσης

Η πρώτη παράμετρος της οποίας η επίδραση μελετήθηκε πάνω στο πως χάνονται τα πακέτα σε ένα ad-hoc δίκτυο είναι ο ρυθμός μετάδοσης. Αυτό έγινε καθώς η παράμετρος αυτή αποτελεί μια από τις κύριες απειλές οποιουδήποτε δικτύου. Για τις εξομοιώσεις αυτές θεωρήσαμε δύο ροές δεδομένων με έντονη αλληλεπίδραση. Κατά συνέπεια και με βάση το Πίνακα 5- 1 η πραγματική εισερχόμενη κίνηση λαμβάνει τις τιμές 200, 800, 1200 Kbps. Επιπλέον ο αριθμός των απαιτούμενων προωθήσεων ήταν πάντα 3 ή 4. Στο Σχήμα 5- 16 παρατηρούμε μετρήσεις που αφορούν ένα TCP δίκτυο ενώ πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι το AODV.

Κεφάλαιο 5: Αντιμετώπιση προβλήματος συμφόρησης καναλιού μέσω της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής

Σχήμα 5- 16. Πλήθος χαμένων πακέτων σε ένα TCP δίκτυο με μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5- 16 σε ένα TCP δίκτυο η μετάβαση από χαμηλό σε μεσαίο και σε υψηλό φορτίο δεν έχει ισχυρή επίδραση στο πλήθος των χαμένων πακέτων ανά είδος. Η παρατήρηση αυτή αποδίδεται στο έλεγχο που ασκεί το πρωτόκολλο μεταφοράς στην συμπεριφορά του δικτύου. Κατά τα άλλα παρατηρούμε ότι το μέγιστο αριθμό απωλειών έχουν τα RTS το οποίο είναι λογικό, ακολουθούμενα όμως από τα routing πακέτα. Εκεί ίσως θα μπορούσε να υπάρξει βελτίωση με την εφαρμογή εξειδικευμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Σχήμα 5- 17. Πλήθος χαμένων πακέτων σε ένα UDP δίκτυο με μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης

Στο Σχήμα 5- 17 είναι φανερό ότι η επίδραση του αυξανόμενου ρυθμού μετάδοσης σε UDP δίκτυο είναι ριζικά διαφορετική από αυτήν σε TCP. Καταρχήν για χαμηλό

φορτίο οι απώλειες είναι εν γένει πολύ λίγες ενώ σε αυτές τη μερίδα του λέοντος έχουν τα RTS πακέτα (60%) ακολουθούμενα από τα data (26%) και τα πακέτα δρομολόγησης (12%). Κατά τη μετάβαση σε μεσαίο φορτίο έχουμε μια ιδιαίτερα υψηλή αύξηση χαμένων πακέτων και στις τρεις παραπάνω κατηγορίες. Ιδιαίτερα μεγάλη είναι η επίδραση στα πακέτα δεδομένων όπου και αριθμητική η αύξηση είναι χαρακτηριστική αλλά και ποσοστιαία πλέον οι απώλειες των data πακέτων αντιπροσωπεύουν το 50% όλων των απωλειών. Αριθμητικά μεγάλη είναι η αύξηση και των routing χαμένων πακέτων αν και ποσοστιαία πάλι αντιπροσωπεύουν ~12% όλων των απωλειών. Όσο αφορά τα πακέτα δεδομένων τα ίδια περίπου συμπεράσματα προκύπτουν και μεταβαίνοντας σε υψηλό φορτίο. Για μια ακόμη φορά η αριθμητική αύξηση είναι εμφανής αλλά αντικατοπτρίζεται και ποσοστιαία καθώς πλέον καταλαμβάνει το 60% των συνολικών απωλειών. Από την άλλη το ιδιαίτερα αξιόλογο σημείο είναι η σταθεροποίηση των απωλειών για τις άλλες κατηγορίες. Τόσο τα πακέτα δρομολόγησης όσο και τα RTS παρουσιάζουν το ίδιο περίπου αριθμό απωλειών το οποίο σημαίνει χαμηλότερα ποσοστιαία συνεισφορά στις συνολικές απώλειες. Είναι λοιπόν σαφές ότι στο connectionless-oriented δίκτυο ο αυξανόμενος ρυθμός έχει εμφανής και συνεχώς αυξανόμενη επίδραση στα χαμένα πακέτα ενώ στα routing-RTS η επίδραση επίσης είναι υπαρκτή αν και πιο ήπια.

5.4.2. Επίδραση της συμφόρησης (congestion)

Στη παράγραφο αυτή θέλουμε να εξετάσουμε πως αλλάζουν τα πλήθη των χαμένων πακέτων ανά είδος σε συνθήκες αυξανόμενης συμφόρησης. Η συμφόρηση κυρίως δημιουργείται από τις ταυτόχρονες ροές δεδομένων. Έτσι λοιπόν για να δημιουργήσουμε συνθήκες συμφόρησης εκτελέσαμε εξομοιώσεις με 1,5 αλλά ακόμα και 10 ταυτόχρονες ροές δεδομένων στο δίκτυο. Τα Σχήμα 5- 18, Σχήμα 5- 10 παρουσιάζουν τις μετρήσεις για TCP και UDP δίκτυα αντίστοιχα.

Σχήμα 5- 18. Επίδραση του πλήθους ροών δεδομένων σε TCP δίκτυο

Σχήμα 5- 19. Επίδραση του πλήθους ροών δεδομένων σε UDP δίκτυο

Η πρώτη ενδιαφέρουσα παρατήρηση από το Σχήμα 5- 18 είναι ότι το πλήθος των χαμένων πακέτων TCP είναι και στις τρεις περιπτώσεις τόσο αριθμητικά όσο και ποσοστιαία καθώς σε κάθε περίπτωση αντιπροσωπεύει γύρω στο 10% των συνολικών απωλειών. Είναι σαφές ότι η μετάβαση από το 1 ακόμα στα 10 flows μικρή επίδραση έχει στο πλήθος των χαμένων TCP πακέτων που δείχνει για μια ακόμη φορά το έλεγχο που ασκεί το πρωτόκολλο μεταφοράς. Τα πράγματα είναι πολύ διαφορετικά για τα RTS πακέτα. Εδώ παρατηρείται μια ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση των χαμένων RTS πακέτων κατά την μετάβαση από το 1 στα 5 flows και μια ακόμα αύξηση αν και μικρότερη κατά την μετάβαση στα 10 ταυτόχρονα flows. Είναι χαρακτηριστικό ότι στα 5 flows τα RTS αντιπροσωπεύουν το 60% όλων των απωλειών πακέτων ενώ στα 10 το 80%. Το άλλο είδος που εμφανώς επηρεάζεται από την ανάπτυξη συμφόρησης είναι τα πακέτα δρομολόγησης. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5- 18 υπάρχει μια σταθερή αύξηση του αριθμού των χαμένων AODV πακέτων καθώς αυξάνεται η συμφόρηση. Η επίδραση αυτή παρατηρείται και ποσοστιαία καθώς η απώλειες των

πακέτων δρομολόγησης από 7% (1 flow) αυξάνονται σε 24% (5 flows) για να φτάσουν να αντιπροσωπεύουν το 45% στις 10 ταυτόχρονες ροές δεδομένων.

Μια ανάλογη μελέτη στο Σχήμα 5- 19 αποκαλύπτει μια εντελώς διαφορετική συμπεριφορά ενός UDP δικτύου. Καταρχήν η επίδραση στα πακέτα δεδομένων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν σε ένα TCP δίκτυο. Κάτι ανάλογο ισχύει και στα RTS – AODV πακέτα. Μια άλλη σημαντική διαφορά ότι ενώ υπάρχει μια ιδιαίτερα υψηλή αύξηση των χαμένων πακέτων και τριών ειδών όταν κατάσταση υψηλής συμφόρησης εμφανίζεται (μετάβαση από 1 σε 5 flows) οι διαφοροποιήσεις κατά την μετάβαση σε 10 flows είναι πολύ πιο ήπιες. Η συμπεριφορά αυτή είναι ακόμα ένα αποτέλεσμα το ελέγχου που ασκεί το TCP εν αντιθέσει με το UDP.

Συμπερασματικά για ένα TCP δίκτυο, σαν ενδείξεις ανάπτυξης συμφόρησης μπορούμε να λάβουμε το πλήθος χαμένων πακέτων δρομολόγησης και RTS ενώ για ένα UDP τα πακέτα δεδομένων φαίνεται επίσης να είναι ασφαλής ένδειξη μαζί με τα άλλα δύο είδη.

5.4.3. Επίδραση πρωτόκολλου δρομολόγησης

Η σημασία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ad-hoc ασύρματα δίκτυα έχει επισημανθεί εμφατικά τόσο από την παρούσα διατριβή όσο και από πολλές εργασίες στο συναφή χώρο. Η ικανότητα ενός τέτοιου πρωτοκόλλου να δρομολογήσει πακέτο βέλτιστα σύμφωνα με διάφορα κριτήρια όπως αριθμό προωθήσεων, ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, ποιότητας υπηρεσίας κ.α σε μεγάλο βαθμό καθορίζει τη συμπεριφορά και απόδοση του δικτύου. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο, σε μια τέτοια μελέτη, να συμπεριληφθεί μια σύγκριση των απωλειών πακέτων μεταξύ δύο πολύ γνωστών και ευρέως διαδεδομένων πρωτοκόλλων όπως τα DSR και AODV. Βασικό σημείο που καθιστά πιο ουσιαστική την σύγκρισή τους είναι ότι και τα δύο ανήκουν στην proactive κατηγορία πρωτοκόλλων όπου συμπεριφέρονται ανάλογα στο ότι μια διαδρομή βρίσκεται την ώρα που ζητηθεί και όχι εκ των προτέρων, πράγμα που απαιτεί περιοδική μετάδοση πακέτων δρομολόγησης και εισαγωγή επιπλέον φορτίου στο δίκτυο γεγονός που καθιστά τα proactive πρωτόκολλα καταλληλότερα για τέτοιου είδους δίκτυα.

Θέλοντας να απομονώσουμε την επίδραση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης θεωρήσαμε τρία ταυτόχρονα flows, με κάθε ένα από αυτά να αποτελείται από 3-4

Κεφάλαιο 5: Αντιμετώπιση προβλήματος συμφόρησης καναλιού μέσω της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής

προωθήσεις, και να εισάγει κίνηση 100Kbps όπως αναφέρεται στις γενικές παραμέτρους της μελέτης. Στα Σχήμα 5- 20, Σχήμα 5- 21 φαίνεται η επίδραση των εν λόγω πρωτοκόλλων για TCP και UDP δίκτυα αντίστοιχα.

Σχήμα 5- 20. Επίδραση του routing πρωτοκόλλου σε TCP δίκτυο

Σχήμα 5- 21. Επίδραση του routing πρωτοκόλλου σε UDP δίκτυο

Η πρώτη παρατήρηση και στις δύο περιπτώσεις είναι ότι η χρήση του DSR οδηγεί σε αύξηση των απωλειών RTS πακέτων. Αυτό σημαίνει ότι γίνονται πολλές περισσότερες προσπάθειες αποστολής πακέτων που είναι κατά βάση δρομολόγησης το οποίο συμβαδίζει με τη τάση που έχει το DSR να πλημμυρίζει το δίκτυο με πακέτα δρομολόγησης. Είναι λοιπόν σαφές ότι το DSR είναι πολύ πιο επικοινωνιακά απαιτητικό σε σχέση με το AODV το οποίο έχει πολύ πιο ήπιες απαιτήσεις στο τομέα αυτό. Το παραπάνω συμπέρασμα ενισχύεται από την πολύ μικρή αύξηση των

απωλειών των TCP πακέτων το οποίο ενισχύει την υπόθεση ότι η μεγάλη αύξηση των RTS απωλειών οφείλεται σε μεγαλύτερη αίτηση προς αποστολή πακέτων δρομολόγησης και όχι δεδομένων. Από την άλλη παρατηρείται ότι το πλήθος των πραγματικά χαμένων πακέτων δρομολόγησης είναι μικρότερο στην περίπτωση του DSR αν και η μεταβολή αυτή, όπως και αυτή των tcp-ack είναι μάλλον ήπια. Η επίδραση της αύξησης των χαμένων πακέτων φαίνεται στις μετρήσεις καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων και στις μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Πίνακα 5- 2 σε TCP δίκτυο όταν χρησιμοποιείται DSR επιφέρει μια αύξηση στη μέση καθυστέρηση δικτύου ~85%. Επίσης η επίδραση της κατανάλωσης ενέργειας κυμαίνεται από 178% (ελάχιστη κατανάλωση), σε 22% (μέγιστη) και 58% (μέση κατανάλωση).

Από τη χρήση του UDP ως πρωτοκόλλου δρομολόγησης ανάλογα συγκριτικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από το πλήθος των χαμένων πακέτων ανά είδος. Από τον Πίνακα 5- 2 είναι και πάλι χαρακτηριστική η μείωση της απόδοσης του δικτύου όταν χρησιμοποιείται το DSR. Η μέση καθυστέρηση αυξάνεται κατά 122% ενώ η μέγιστη κατανάλωση είναι 4 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη του AODV. Οι μετρήσεις για ελάχιστη και μέση κατανάλωση είναι περίπου ίδιες.

Συμπερασματικά καταδεικνύεται ότι όντος μεταβάλλοντας τις παραμέτρους που επιλέξαμε επηρεάζεται άμεσα η κατανομή των γεγονότων απώλειας πακέτων ανά είδος πακέτου. Αυτό σε συνδυασμό με τη ιδιαίτερη επίδραση που έχει, η κάθε ανά είδος πακέτου απώλεια, στην απόδοση του δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για μελλοντικές σχεδιάσεις πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών. Είναι σαφές από την ανάλυση των αποτελεσμάτων ότι ανά περίπτωση τα RTS, routing, data και tcp-ack είναι τα πακέτα που καταλαμβάνουν τη κύρια μερίδα των απωλειών και έτσι ανάλογα με τα χαρακτηριστικά ενός δικτύου σε κάποια από αυτές τις κατηγορίες θα πρέπει να δώσει βάρος για να μειωθούν οι απώλειες και να αυξηθεί η απόδοση του δικτύου σαν σύνολο.

	Mean Network delay (sec)	Energy Consumption (J)		
		Min	Max	Mean
TCP/ AODV	0.262	7.1	50.7	28.4

Κεφάλαιο 5: Αντιμετώπιση προβλήματος συμφόρησης καναλιού μέσω της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής

TCP/ DSR	0.486	19.8	62.1	44.9
UDP/ AODV	0.467	13.6	13.6	31.3
UDP/ DSR	1.039	13.6	55.1	36.2

Πίνακας 5- 2. Μετρήσεις καθυστέρησης μετάδοσης και κατανάλωσης ενέργειας ανά πρωτόκολλο δρομολόγησης και μεταφοράς

5.5. Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται και αναλύεται λεπτομερώς μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική η οποία ακολουθώντας την cross-layer προσέγγιση σκοπό έχει να βοηθήσει στην αντιμετώπιση του προβλήματος συμφόρησης (congestion control) αλλά παράλληλα να αποτελέσει τη βάση για νέες προσεγγίσεις και προτάσεις.

Το πρόβλημα της αντιμετώπισης ανάπτυξης συνθηκών συμφόρησης αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη θέματα στα δίκτυα και πολύ περισσότερο στα ασύρματα. Γενεσιουργός αιτία είναι η ανάπτυξη κατάλληλων συνθηκών όπου το φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει το δίκτυο είναι μεγαλύτερο της πραγματικής δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων του καναλιού. Όπως αναφέραμε το πρόβλημα είναι γνωστό από ενσύρματα κιόλας δίκτυα και όπως αναλύεται στο κεφάλαιο μεγάλη ήταν η προσπάθεια που αφιερώθηκε για την αντιμετώπισή του. Η δυσκολία όμως αντιμετώπισής του εκτινάσσεται όταν το δίκτυο που εξετάζεται είναι ασύρματο. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι επιπλέον παράμετροι λειτουργίας που εισέρχονται σε ασύρματο δίκτυο κάνουν τη ίδια τη συμπεριφορά του πολύ πιο μη-ντετερμινιστική και κατά συνέπεια τη πρόβλεψη και πολύ περισσότερο την αντιμετώπισή συνθηκών συμφόρησης ιδιαίτερα δύσκολη αν όχι αδύνατη για κάθε περίπτωση.

Κατόπιν ακολουθεί η παρουσίαση και ανάλυση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Αρχικά γίνεται μια γενική περιγραφή με έμφαση στις αρχές σχεδίασης της αρχιτεκτονικής και τις παραμέτρους και χαρακτηριστικά που θέλαμε εξ αρχής να ικανοποιούνται. Κατ' αυτό τον τρόπο μεταξύ άλλων θέλαμε να μεγιστοποιήσουμε την ευελιξία, συμβατότητα αλλά και δυνατότητα επέκτασης της σχεδίασης μας. Ακολουθεί μια λεπτομερής θεωρητική ανάλυση και μελέτη της σχεδίασης. Έμφαση δίνεται στην περιγραφή όλων των τμημάτων από τα οποία αποτελείται η

αρχιτεκτονική καθώς και στην περιγραφή λειτουργίας αυτών αλλά και του συνόλου σε κάθε δυνατή περίπτωση. Μέσα από την ανάλυση αυτή προσπαθούμε να τεκμηριώσουμε θεωρητικά την πρότασή μας και τους λόγους για τους οποίους πιστεύουμε ότι μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη σε ένα ad-hoc δίκτυο. Σημαντικό είναι επίσης και το κομμάτι όπου παρουσιάζονται οι παράμετροι διαμόρφωσης λειτουργίας της αρχιτεκτονικής που σε μεγάλο βαθμό καθορίζουν και την απόδοση της σχεδίασης.

Σημαντικό μέρος του κεφαλαίου αφιερώνεται στη προσπάθεια μελέτης του γεγονότος γεγονός απώλειας πακέτων σε διάφορες συνθήκες. Η αρχική μας εκτίμηση, η οποία από την μελέτη αποδείχθηκε αληθής, ήταν ότι η απώλεια πακέτου είναι ένα πολυσύνθετο γεγονός που χρήζει ιδιαίτερης μελέτης. Η επίπτωση της απώλειας ενός πακέτου συνδέεται άμεσα με το είδος του πακέτου που χάνεται ενώ το πλήθος απωλειών ανά πακέτο αποτελεί επίσης σημαντική μέτρηση όπως αναλύεται στο κείμενο. Επιπτώσεις τόσο στην κατανάλωση ενέργειας όσο και στην καθυστέρηση μετάδοσης παρουσιάζονται καταδεικνύοντας τη σημασία της μελέτης των απωλειών πακέτων ειδικά στην αντιμετώπιση συνθηκών συμφόρησης.

6. Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

6.1.Εισαγωγή

Ιδιαίτερα μεγάλο, σημαντικό και με ιδιαίτερες δυσκολίες κομμάτι της παρούσας διατριβής ήταν η αξιολόγηση της προτεινόμενης cross-layer αρχιτεκτονικής.

Μια τέτοια προσπάθεια καταρχήν απαιτούσε την επιλογή κατάλληλου περιβάλλοντος στο οποίο, από την μία, θα μπορούσε να υλοποιηθεί η πρότασή μας και από την άλλη θα παρείχε την απαραίτητη αξιοπιστία όσον αφορά τις μετρήσεις που γινόντουσαν. Στην παρούσα εργασία, και σε πρώτη φάση, επιλέχτηκε ο εξομοιωτής δικτύων Network Simulator 2 (NS2) ο οποίος έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η επιλογή στηρίχτηκε στην ευρεία χρήση του από την συναφή επιστημονική κοινότητα (το οποίο αποτελεί την καλύτερη επιβεβαίωση αξιοπιστίας του), στην ύπαρξη πολλών βοηθητικών εργαλείων και μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για αυτόν καθώς και στην λογική του ανοικτού κώδικα στην οποία έχει αναπτυχθεί η οποία τον καθιστά διαθέσιμο χωρίς κανέναν περιορισμό σε όποιον ενδιαφέρεται. Από την άλλη τα βασικά μειονεκτήματα τα οποία θα μπορούσαν να αποτρέψουν την επιλογή του είναι:

- Η παντελής έλλειψη γραφικού περιβάλλοντος το οποίο σημαίνει ότι τα πάντα περιγράφονται με τη συγγραφή κώδικα και άρα οδηγείται κάποιος στην εκμάθηση δύο προγραμματιστικών γλωσσών (TCL, C/C++)
- Ο συχνά άναρχος κώδικας που συναντά κανείς, απόρροια της ανάπτυξης του εξομοιωτή μέσω της προσέγγισης του ανοικτού κώδικα
- Η ελλιπής τεκμηρίωση του κώδικα η οποία καθιστά χρονοβόρα την κατανόηση των μοντέλων του εξομοιωτή μέσα από τη χρήση του debugger.
- Το γεγονός ότι το κύριο αποτέλεσμα μιας εξομοίωσης είναι ένα trace αρχείο από το οποίο οι μετρήσεις εξάγονται με τη χρήση γλώσσας επεξεργασίας του αρχείου αυτού (στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιήσαμε την script γλώσσα awk). Αν και υπάρχουν και άλλοι τρόποι εξαγωγής μετρήσεων, εντολές TCL και μέσω εντολών εκτύπωσης σε καίρια σημεία μέσα στον κώδικα γενικά η

διαδικασία εξαγωγής μετρήσεων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί εύκολη ή αυτοματοποιημένη.

Τα παραπάνω βεβαία την ίδια ώρα αποτελούν και προκλήσεις η αντιμετώπιση των οποίων αποτελεί σημαντική εμπειρία, και έτσι θεωρήθηκε και από εμάς. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στόχος είναι το προτεινόμενο πλαίσιο (framework) να αναπτυχθεί και σε υπάρχουσα πλατφόρμα αυτό-οργανώμενων δικτύων για ακόμα πληρέστερη κατανόηση και τεκμηρίωση της λειτουργίας αυτού σε πραγματικά δίκτυα.

Κατόπιν ακολουθεί η αυτή καθαυτή υλοποίηση του πλαισίου η οποία είναι επίσης μια δύσκολη διαδικασία που απαιτεί προσεκτική ανάπτυξη του πλαισίου, συνεχή και ενδελεχή έλεγχο για κάθε στοιχείο που προστίθεται ή αλλάζει ώστε να εξασφαλιστεί η ακριβή υπακοή στους κανόνες και αλγορίθμους που ορίζει το θεωρητικό μοντέλο που υλοποιείται. Παράλληλα πρέπει να αντιμετωπιστούν τα συνεχώς εμφανιζόμενα προγραμματιστικά λάθη ή οι δυσκολίες λόγω του τρόπου ανάπτυξης του περιβάλλοντος. Η ανάπτυξη του προτεινόμενου πλαισίου απαίτησε την δημιουργία πολλών καινούργιων στοιχείων και τη χρήση/τροποποίηση άλλων υπαρχόντων. Επίσης αυτές οι προσθήκες και αλλαγές εκτίνονται σε πολλαπλά σημεία στον κώδικα (αρχεία, συναρτήσεις κτλ.).

Μετά τη υλοποίηση του πλαισίου ακολουθεί ο σχεδιασμός των απαιτούμενων μετρήσεων (είτε η υλοποίηση γίνεται σε εξομοιωτή είτε σε κάποια πλατφόρμα) . Η διαδικασία αυτή έχει σημασία καθώς καθορίζονται σημαντικές παράμετροι που αφορούν το δικτυακό σωρό. Μεταξύ αυτών εντοπίζονται και αυτές των οποίων η τιμή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καθώς και το εύρος των τιμών που παίρνουν. Οι παραπάνω επιλογές είναι ιδιαίτερα σημαντικές (και πολλές φορές απαιτούν αναπροσαρμογή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων) έτσι ώστε το εκάστοτε μοντέλο να αξιολογηθεί σε όσο το δυνατόν ευρύτερο φάσμα δικτυακών καταστάσεων και παραμέτρων. Με τον τρόπο αυτό θα εντοπιστούν με ακρίβεια τα πλεονεκτήματα αλλά παράλληλα και οι περιοχές όπου υστερεί μια πρόταση διότι πρέπει να έχουμε κατά νου ότι σε ένα τόσο δυναμικό χώρο όπως είναι τα ασύρματα αυτό-οργανώμενα δίκτυα, πραγματικά δεν υπάρχει πρόταση-λύση που να καλύπτει όλες τις περιπτώσεις και όλες τις καταστάσεις με το καλύτερο δυνατό τρόπο. Λεπτομερής καταγραφή των τιμών αυτών θα γίνει σε ακόλουθο υποκεφάλαιο στο παρόν κεφάλαιο.

Μια τελευταία φάση είναι η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Είναι μια φάση η οποία συχνά υποβαθμίζεται αλλά η οποία, ειδικά στις περιπτώσεις των μελετών μέσω εξομοίωσης, αποδεικνύεται χρονοβόρα αλλά και απαιτητική καθώς απαιτεί προσοχή, οργάνωση και συνεχείς ελέγχους για την αποφυγή λαθών. Η αναπόφευκτη απαίτηση από την οποία προέρχονται τα περισσότερα προβλήματα που αφορούν τη φάση αυτή είναι ο ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός εξομοιώσεων που απαιτούνται για την αξιόπιστη αξιολόγηση μια πρότασης. Η εκτέλεση του μεγάλου αυτού αριθμού εξομοιώσεων απαιτεί χρόνο, ενώ τα παραγόμενα αρχεία απαιτούν χώρο αλλά και επεξεργασία. Τέλος κάθε λάθος που παρεισφύει οδηγεί σε επανάληψη της διαδικασίας το οποίο πολλαπλασιάζει την απαιτούμενη προσπάθεια.

Το υπόλοιπο μέρος του κεφαλαίου αυτού θα αφιερωθεί στην παράθεση μέρους των μετρήσεων που έγιναν για την αξιολόγηση του πλαισίου που αναπτύχθηκε και στην εξαγωγή καίριων συμπερασμάτων. Είναι σαφές ότι και λόγω χώρου αλλά και λόγω σημασίας δεν θα παρουσιαστούν όλες οι μετρήσεις αλλά θα επικεντρωθούμε σε αυτές που θα καταδεικνύουν την είτε τη βελτίωση που επιφέρει η προτεινόμενη λύση είτε τις περιπτώσεις όπου περαιτέρω μελέτη απαιτείται και θα μπορούσε να επιφέρει περαιτέρω βελτίωση. Πριν την παράθεση των μετρήσεων θα γίνει λεπτομερής αναφορά όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις εξομοιώσεις και των τιμών που πήραν όσες μεταβάλλονταν. Στο ίδιο υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα μετρούμενα μεγέθη και η σημασία του καθενός στην μελέτη μας και τέλος θα αναφερθεί η διάρθρωση της παρουσίασης των μετρήσεων.

6.2. Παραμετροποίηση εξομοιώσεων

Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στην έκδοση 2.28 του NS2 αν και λόγω της διατήρησης της δομής του εξομοιωτή από έκδοση σε έκδοση η ενσωμάτωση του μοντέλου του πλαισίου σε επόμενη έκδοση δεν αναμένεται να απαιτεί ιδιαίτερη προσπάθεια.

6.2.1. Σταθερές Παράμετροι

Ξεκινώντας από τις σταθερές παραμέτρους του δικτύου σε κάθε περίπτωση θεωρήσαμε σαν πρωτόκολλο επιπέδου MAC το IEEE 802.11b με παρερχόμενο εύρος

καναλιού ίσο με 2Mbps. Η επιλογή της οικογένειας IEEE 802.11 έγινε λόγω της ευρείας διάδοσης και αποδοχής που έχει συναντήσει στην επιστημονική κοινότητα ενώ το εύρος των 2Mbps κρίνεται επαρκές και τυπικό για τις εφαρμογές των δικτύων αυτών. Κάθε κόμβος έχει μια ουρά 50 πακέτων. Η μετάδοση/λήψη γίνεται από πανκατευθυντικές κεραίες ενώ η μετάδοση σήματος ακολουθεί το μοντέλο TwoRayGround. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η απευθείας σύνδεση μεταξύ δύο κινητών κόμβων δεν θεωρείται ως ο μόνος δρόμος μετάδοσης. Έτσι λοιπόν το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπ' όψη του τόσο τον απευθείας δρόμο όσο και μια ανάκλαση από το έδαφος. Αυτό μας δίνει καλύτερη εκτίμηση του λαμβανόμενου σήματος ειδικά σε μεγάλες αποστάσεις όπως στις εξομοιώσεις που ακολουθούν όπου οι επικοινωνούντες κόμβοι βρίσκονται 200 μέτρα μακριά. Το ενδιαφέρον σημείο όσο αφορά την υλοποίηση του μοντέλου αυτού από τον εξομοιωτή είναι ότι, για μικρές αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη ακολουθεί το Free Space μοντέλο το οποίο αποδεικνύεται καταλληλότερο του TwoRayGround για τις τέτοιες αποστάσεις. Το Free Space μοντέλο λαμβάνει υπόψη του μόνο τον απευθείας δρόμο και όχι ανακλάσεις, το οποίο είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση για μικρές αποστάσεις όπου οι ανακλάσεις θεωρούνται αμελητέες λόγω της κυριαρχίας την απευθείας επικοινωνίας.

Κατ' αυτό τον τρόπο εξασφαλίζει κατά το δυνατόν καλύτερες εκτιμήσεις ισχύος λαμβανόμενου σήματος τόσο σε μακρινές όσο και κοντινές αποστάσεις. Όπως έχει αναφερθεί, και στη διατριβή αυτή, ένας από τους κυριότερους λόγους κακής απόδοσης των ασύρματων δικτύων είναι η ίδια η φύση του ασύρματου καναλιού που εισάγει λάθη στα πακέτα που μεταδίδονται. Στις εξομοιώσεις μας για το λόγο αυτό θεωρήσαμε ρυθμό εμφάνισης λανθασμένων πακέτων λόγω των ατελειών του καναλιού ίσο με 2% (packet error rate ίσο με 2%) με ομοιόμορφη κατανομή στο χρόνο χαρακτηριστικά τα οποία θεωρούνται τυπικά σε αντίστοιχες εργασίες. Τονίζουμε ότι αναφερόμαστε σε packet error rate και όχι σε bit error rate το οποίο συνήθως παρουσιάζει πιο καταγιγιστική μορφή και μπορούν να εξομοιωθούν καλύτερα με Poisson κατανομή. Σαν ενεργειακό μοντέλο θεωρήσαμε το μοντέλο που ενσωματώνεται στο ίδιο τον εξομοιωτή. Στην έκδοση 2.28 του NS2 το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις παραμέτρους, την αρχική διαθέσιμη ενέργεια του κόμβου, την ισχύ πομπού και δέκτη. Έτσι λοιπόν γνωρίζοντας την ισχύ λήψης και μετάδοσης σε συνδυασμό με το χρόνο που βρίσκεται κάθε κόμβος στις δύο αυτές καταστάσεις υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται λόγω των επικοινωνιακών καταστάσεων

του κόμβου. Για τις συγκεκριμένες εξομοιώσεις θεωρήσαμε τις εξ ορισμού τιμές ισχύων και αρκετή αρχική ενέργεια σε κάθε κόμβο ώστε να μη εξαντλείται ενεργειακά. Το μοντέλο αυτό αν και μπορεί να χαρακτηριστεί απλουστευμένο είναι επαρκές για το σκοπό μας καθώς μπορεί να δείξει συγκρητικά την διαφοροποίηση που θα επέλθει από την χρήση του προτεινόμενου μοντέλου στην καταναλισκόμενη ενέργεια που οφείλεται στα επικοινωνιακά καθήκοντα του εκάστοτε κόμβου το οποίο είναι πρώτιστο μέλημα της προσπάθειας. Όπως τεκμηριώθηκε και στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο θεωρήσαμε το UDP ως πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς ενώ στο επίπεδο εφαρμογής θεωρήσαμε γεννήτριες σταθερού ρυθμού παραγωγής πακέτων (Constant Bit Rate) η οποίες εισήγαγαν πακέτα των 512 byte καθ' όλη τη διάρκεια της εξομοίωσης η οποία ήταν 200sec. Επίσης σε κάθε περίπτωση η εμβέλεια μετάδοσης κάθε κόμβου ισούται με 250m.

6.2.2. Μεταβαλλόμενες Παράμετροι

Στις μεταβαλλόμενες παραμέτρους βασική θέση έχει το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Από τη σχετική μελέτη που έγινε στα πλαίσια της διατριβής [44] το AODV κρίθηκε σαν το πλέον κατάλληλο τόσο από άποψη απόδοση όσο και σταθερότητας σε μεταβαλλόμενες παραμέτρους. Δεδομένου όμως του γεγονότος ότι το DSR [43] είναι επίσης μια πολύ διαδεδομένη επιλογή, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση και με βάση τα εν λόγω πρωτόκολλα δρομολόγησης. Κρίσιμη παράμετρος για την απόδοση οποιουδήποτε ασύρματου δικτύου και πολύ περισσότερο των δικτύων που πραγματεύεται η εργασία αυτή είναι η τοπολογία των κόμβων. Στην συγκεκριμένη αξιολόγηση θεωρήσαμε δύο περιπτώσεις. Στην μία οι κόμβοι ήταν τοποθετημένοι στο τοπολογία πλέγματος (grid 7x7) και σε τέτοια απόσταση έτσι ώστε ο κάθε ένας να μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους κάθετους και οριζόντιους 1-hop γειτονικούς του κόμβους και όχι με τους διαγωνίως αντίστοιχους. Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε τέτοιου είδους μελέτες σε διαφόρων ειδών δίκτυα όπως τα μητροπολιτικά (IEEE 802.16 [94]) και αναφέρεται και ως τοπολογία Manhattan. Η τοπολογία αυτή είναι κατάλληλη για να αναδειχθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, αλλά μπορεί να θεωρηθεί μάλλον ιδανική και όχι ιδιαίτερα ρεαλιστική περίπτωση. Για το λόγο αυτό λάβαμε υπ' όψη και μια δεύτερη περίπτωση όπου οι 49 κόμβοι αρχικά τοποθετούνται τυχαία σε ένα χώρο 1600x1600 μέτρων και κατά την

διάρκεια της εξομοίωσης κινούνται τυχαία στο χώρο με ταχύτητα 10m/sec. Η μόνη μέριμνα που ελήφθη ήταν να μην υπάρξει ποτέ διακοπή ροής δεδομένων λόγω τοπολογικής μεταβολής. Κατ' αυτό τον τρόπο η σύγκριση είναι πραγματικά αντικειμενική. Και περνάμε στο επόμενο βασικότατο παράγοντα απόδοσης ενός MANET δικτύου που είναι οι ροές δεδομένων τόσο σε πλήθος όσο και σε θέση μέσα στο δίκτυο. Η διάκριση αυτή γίνεται σκόπιμα διότι, όπως θα φανεί και από τις μετρήσεις, και οι δύο αυτές παράμετροι παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης στο δίκτυο. Έτσι λοιπόν ο αριθμός των ενεργών ροών δεδομένων στις εξομοιώσεις αυτές μεταβάλλεται από 2 μέχρι 5. Ενώ από την άλλη έγιναν δύο σετ μετρήσεων, στο πρώτο οι ροές είχαν τέτοια θέση ώστε η μία να μη επηρεάζει την άλλη (δεν υπήρχαν κοινοί κόμβοι) ενώ στη δεύτερη, και πιο απαιτητική, περίπτωση, υπήρχαν κοινοί κόμβοι ώστε να αναπτύσσονται πιο εύκολα συνθήκες συμφόρησης σε διάφορα σημεία του δικτύου. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου υπάρχουν 5 ταυτόχρονες ροές στο δίκτυο πλέγματος είναι πολύ δύσκολο να πει κανείς ότι δεν επηρεάζονται η μια από την άλλη, όποια θέση και αν κατέχουν. Η παραπάνω διάκριση αφορά κυρίως την τοπολογία πλέγματος ενώ στην περίπτωση όπου υπήρχε κινητικότητα στους κόμβους αυξήθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων των εξομοιώσεων ώστε τα συμπεράσματα να είναι κατά το δυνατόν ακριβή και αντικειμενικά. Επιπλέον κάθε ροή αποτελείται από 3-4 αναμεταδόσεις το οποίο δυσχεραίνει περαιτέρω την λειτουργία του δικτύου. Όλες οι περιπτώσεις πλήθους και θέσης ροών στην τοπολογία πλέγματος φαίνονται στο Σχήμα 6- 1. Παράλληλα στο Σχήμα 6- 1 φαίνονται η απόσταση γειτονικών κόμβων καθώς και η ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου. Τέλος κρίσιμη παράμετρος αποτελεί και η κίνηση που εισάγεται στο δίκτυο από κάθε ροή. Έτσι λοιπόν ελήφθησαν 5 περιπτώσεις κατά τις οποίες η κίνηση που εισάγει η κάθε ροή μεταβάλλεται από 50Kbps έως 250Kbps. Αν αυτό συνδυαστεί με το πλήθος των ροών όπως περιγράφησαν τότε βλέπουμε ότι καλύπτονται όλες οι περιπτώσεις από χαλαρές συνθήκες κίνησης έως και ιδιαίτερα απαιτητικές όπου το δίκτυο σαφώς και έχει τάσεις οδήγησης προς τον κορεσμό.

Σχήμα 6- 1. Χρησιμοποιούμενες τοπολογίες ροών δεδομένων

6.2.3. Παράμετροι Αρχιτεκτονικής

Κύριο μέλημα κατά τη σχεδίαση της αρχιτεκτονικής ήταν να είναι σε μεγάλο βαθμό παραμετροποιήσιμο. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε μελλοντικές περιπτώσεις όπου διάφορες δικτυακές παράμετροι ή νέα πρωτόκολλα απαιτούν νέες τιμές για να αποδώσουν βέλτιστα. Ξεκινώντας, βασική παράμετρος και σταθερή σε όλες τις εξομοιώσεις ήταν το μέγεθος των πακέτων ειδοποίησης (notification packets) το οποίο ορίστηκε στα 10 byte. Το μέγεθος των 10 byte για πακέτα ειδοποίησης μπορεί να κριθεί μεγάλο, καθώς γενικά η πληροφορία που μεταφέρεται μέσα από αυτά συνήθως είναι μικρή. Εντούτοις με τον τρόπο αυτό το δίκτυο δοκιμάζεται σε πιο απαιτητικές καταστάσεις από ότι συνήθως θα βρίσκεται το οποίο καταδεικνύει ακόμα πιο έντονα τις όποιες βελτιώσεις επιτυγχάνονται στην απόδοση αυτού. Επίσης τα επιπλέον bytes καλύπτουν και περιπτώσεις μελλοντικών προεκτάσεων του πλαισίου στις οποίες πιθανά να απαιτείται η μεταφορά αξιολογής ποσότητας δεδομένων μέσα από τα πακέτα αυτά. Η άμεσα συνδεδεμένη παράμετρος είναι το πότε ή αλλιώς ποιο είναι το γεγονός το οποίο ενεργοποιεί τη διαδικασία αποστολής ενός notification πακέτου. Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση θεωρήσαμε ότι ένας κόμβος στέλνει notification πακέτα στους εκκινητές των ροών που περνάνε από αυτόν αν τα χαμένα πακέτα που αντιλαμβάνεται ο ίδιος ξεπεράσουν τα 10 το δευτερόλεπτο. Είναι δύσκολη η εκτίμηση του ορίου αυτού καθώς από τη μία πρέπει να υπάρχει όσο το δυνατόν πιο γρήγορη αντίδραση σε φαινόμενα συμφόρησης αλλά από την άλλη δεν πρέπει το δίκτυο να πλημμυρίζει με πακέτα ειδοποίησης. Επίσης δύσκολη παράμετρος είναι το πότε ένας κόμβος μπορεί να αυξήσει το ρυθμό

μετάδοσης (αν έχει περιθώρια). Στις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν θεωρήσαμε ότι μη λήψη notification πακέτου για 2sec δίνει το δικαίωμα σε αρχικό αποστολέα ροής να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσής του. Τέλος βασικές παράμετροι είναι ο ρυθμός μείωσης (σε περίπτωση λήψης notification πακέτων) και ο ρυθμός αύξησης (σε περίπτωση απουσίας notification πακέτων για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα) του ρυθμού δημιουργίας πακέτων από τις αντίστοιχες γεννήτριες. Θεωρούμε τόσο συμμετρικούς όσο και ασύμμετρους MIMD αλγορίθμους υπό την έννοια αν ο ρυθμός μείωσης είναι ίσος με αυτόν της αύξησης ή όχι. Στον Πίνακα 6- 1 φαίνονται όλες οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν καθώς και το αναγνωριστικό με το οποίο θα υποδεικνύονται στα γραφήματα που θα ακολουθήσουν.

Ασύμμετρος MIMD	
10_15	Αύξησης κατά 10% Μείωση κατά 15%
10_30	Αύξησης κατά 10% Μείωση κατά 30%
30_45	Αύξησης κατά 30% Μείωση κατά 45%
30_60	Αύξησης κατά 30% Μείωση κατά 60%
Συμμετρικός MIMD	
15_15	Αύξησης & Μείωση κατά 15%
30_30	Αύξησης & Μείωση κατά 30%
45_45	Αύξησης & Μείωση κατά 45%
60_60	Αύξησης & Μείωση κατά 60%

Πίνακας 6- 1. Περιπτώσεις MIMD αλγορίθμων

6.2.4. Μετρούμενα Μεγέθη

Βασικός στόχος και σκοπός της προτεινόμενης λύσης είναι να περιορίσει τα φαινόμενα συμφόρησης στο δίκτυο τα οποία σαν κύρια αποτελέσματα έχουν αυξημένη καθυστέρηση άρα και μειωμένη ικανότητα διαχείρισης κίνησης πραγματικού χρόνου, αυξημένα χαμένα πακέτα και συνεπακόλουθα υπερβολική κατανάλωση ενέργειας. Κατά συνέπεια τα μετρούμενα μεγέθη και στα οποία περιμένουμε να δούμε σημαντική βελτίωση είναι:

- Από άκρου σε άκρου καθυστέρηση μετάδοσης. Συγκεκριμένα θα επικεντρωθούμε στη μέση καθυστέρηση. Αυτό γίνεται διότι η μέση

καθυστέρηση είναι το μέγεθος που βέλτιστα καταδεικνύει τις ικανότητες διαχείρισης κίνησης ελαστικού πραγματικού χρόνου, το οποίο είναι το είδος κίνησης που ρεαλιστικά μπορούμε να περιμένουμε ότι μπορούν σήμερα να αντιμετωπίσουν τα MANET ή δίκτυα αισθητήρων εν αντιθέσει με τη κίνηση αυστηρού πραγματικού χρόνου. Επίσης για χάρη ευκολίας ασχολούμαστε με την καθυστέρηση του δικτύου σαν σύνολο και όχι για κάθε ροή ξεχωριστά. Μια τέτοια θεώρηση δεν δημιουργεί προβλήματα αξιοπιστίας καθώς όλες οι ροές αντιμετωπίζονται με το ίδιο τρόπο από άποψη χαρακτηριστικών και απαιτήσεων.

- Λόγος χαμένων πακέτων. Από τη στιγμή που δημιουργηθεί συμφόρηση σε ένα σημείο του δικτύου όποια προσπάθεια γίνει να μεταδοθεί πακέτο μέσω του σημείου αυτού θα οδηγήσει σε χαμένο πακέτο, για διαφόρους λόγους. Ο δείκτης λοιπόν χαμένων πακέτων προς συνολικά μεταδιδόμενων αποδεικνύεται πολύ χρήσιμος για να την κατάδειξη αποφυγής τέτοιων συνθηκών όταν χρησιμοποιείται το προτεινόμενο πλαίσιο.
- Κατανάλωση ενέργειας. Τόσο η μέγιστη αλλά πολύ περισσότερο η μέση κατανάλωση ενέργειας επίσης χρησιμοποιούνται σαν σημαντικοί δείκτες αποφυγής συνθηκών συμφόρησης. Το ενδιαφέρον σημείο για το συγκεκριμένο μέγεθος είναι ο τρόπος απεικόνισής του. Από την μία υπάρχει ο κλασσικός τρόπος αριθμητικά μετρώντας τις αντίστοιχες καταναλώσεις. Από την άλλη πολύ χρήσιμη μπορεί να αποδειχθεί η χωρική επισκόπηση της κατανάλωσης ενέργειας. Με το όρο χωρική εννοούμε την χρήση γραφημάτων επιφάνειας τα οποία με γλαφυρό τρόπο μπορούν να καταδείξουν την κατανομή των επιπέδων κατανάλωσης στο χώρο του δικτύου (ιδιαίτερα χρήσιμος στην τοπολογία πλέγματος).

Τέλος καταμετράται και η διαμεταγωγή ως η ικανότητα μεταφοράς πληροφορίας του δικτύου. Το συγκεκριμένο μέγεθος στην εν λόγω εργασία έχει το χαρακτηριστικό ότι δεν μας ενδιαφέρει τόσο να το αυξήσουμε αλλά να το επηρεάσουμε αρνητικά όσο το δυνατόν λιγότερο. Αυτό συμβαίνει διότι θεωρούμε ότι για να εμφανιστούν φαινόμενα συμφόρησης το δίκτυο έφτασε και ξεπέρασε την δυνατότητα μετακίνησης δεδομένων οπότε έχει φτάσει τη μέγιστη διαμεταγωγή. Κύριος σκοπός, λοιπόν, μέτρησης είναι να καταδειχθεί ότι η διαμεταγωγή δεν επηρεάζεται σημαντικά και ότι η οποία

απώλεια σε διαμεταγωγή υπερκαλύπτεται από τη βελτίωση που επιτυγχάνεται στα υπόλοιπα μεγέθη. Η μέτρηση γίνεται μέσα από αθροιστικές μπάρες όπου κάθε κομμάτι θα αντιστοιχεί σε μια ροή, έτσι ώστε μέσα από το ίδιο το γράφημα να είναι δυνατή η εποπτεία διατήρησης της δικαιοσύνης.

6.3. Αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το AODV πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Ξεκινάμε την παρουσίαση με τις περιπτώσεις όπου υπάρχουν λίγες ταυτόχρονες ροές στο δίκτυο και άρα οι συνθήκες κίνησης μπορούν να χαρακτηριστούν χαλαρές, Σχήμα 6- 2, Σχήμα 6- 3.

Σχήμα 6- 2. Μέση καθυστέρηση σε 2 αλληλεπιδρούσες ροές

Σχήμα 6- 3. Μέση καθυστέρηση σε 2 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Όπως είναι φανερό ακόμα και σε χαλαρές συνθήκες φορτίου η επίδραση του πλαισίου μπορεί να είναι καταλυτική όσο αφορά τις soft-real time επιδόσεις του δικτύου. Όταν δεν υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση Σχήμα 6- 3 το δίκτυο μπορεί και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις όπως είναι αναμενόμενο και έτσι το πλαίσιο δεν έχει λόγο να ενεργοποιηθεί. Έτσι δικαιολογούνται και οι σχεδόν πανομοιότυπες καθυστερήσεις. Δικαιολογημένη εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση των 250Kbps όπου το φορτίο σε συνδυασμό με τα πολλαπλά hop οδηγεί σε κάποια αύξηση την μέση καθυστέρηση παραμένοντας όμως σε επίπεδα κάτω του 1sec. Η καθυστέρηση που παρατηρούμε στην περίπτωση των 100Kbps κρίνεται μάλλον μικρή και μπορεί να αποδοθεί σε επίδραση στοχαστικών μοντέλων του εξομοιωτή όπως τη γεννήτρια λαθών. Πολύ πιο ενδιαφέροντα είναι τα αποτελέσματα για την περίπτωση της έντονης αλληλεπίδρασης των ροών. Ήδη από τα 100Kbps η αύξηση στη μέση καθυστέρηση είναι σημαντική και αυξάνεται γραμμικά για να σταθεροποιηθεί λίγο πάνω από τα 1,2sec όπου είναι φανερό ότι το δίκτυο φτάνει το σημείο κορεσμού του. Το σημαντικό, φυσικά, είναι ότι η παρουσία του πλαισίου καταφέρνει να κρατήσει τη καθυστέρηση σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα. Αν και τα απόλυτα νούμερα είναι σημαντικά το κυριότερο σημείο που πρέπει να εστιάσουμε είναι η συγκριτική αντιπαράθεση και το γεγονός ότι επιτυγχάνεται μείωση της καθυστέρησης από 80% έως 90%. Επίσης σημαντικό είναι το στοιχείο ότι με ενεργοποιημένη την αρχιτεκτονική η μέση καθυστέρηση παραμένει σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις φορτίου.

Προχωρώντας στα Σχήμα 6- 4, Σχήμα 6- 5 βλέπουμε την επίδραση της αρχιτεκτονικής στο ποσοστό χαμένων πακέτων.

Σχήμα 6- 4. Χαμένα πακέτα σε 2 αλληλεπιδρούσες ροές

Ανάλογα είναι τα συμπεράσματα και σε αυτό το μέγεθος. Το Σχήμα 6- 5 δείχνει ότι το δίκτυο μπορεί και εξυπηρετεί την εισερχόμενη κίνηση οπότε η αρχιτεκτονική δεν κάνει αισθητή τη παρουσία της. Αντίθετα η ανάπτυξη συμφόρησης στο Σχήμα 6- 4 οδηγεί σε μεγάλα ποσοστά τις απώλειες ακόμα και σε μεσαία φορτία. Είναι χαρακτηριστικό ότι το κλασσικό δίκτυο παρουσιάζει απώλειες άνω του 50% από τα 150Kbps ενώ φτάνει το 74% κοντά στο σημείο κορεσμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βοηθά σε ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό. Όπως φαίνεται κρατάει σταθερή την απώλεια πακέτων στη περιοχή του 5% σε κάθε περίπτωση το οποίο μπορεί να μεταφραστεί σε μείωση του ποσοστού απωλειών από 83% έως 93%. Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι δεν λαμβάνεται υπ' όψη η πιθανή κρισιμότητα των πακέτων που χάνονται και οι συνέπειες που αυτές οι απώλειες που μπορεί να έχουν σε ένα πραγματικό δίκτυο, το οποίο είναι μέγεθος που δεν μετριέται με σαφή τρόπο.

Σχήμα 6- 5. Χαμένα πακέτα σε 2 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Όπως έχει τονιστεί κατ' επανάληψη η ενέργεια αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό πόρο των δικτύων που μας απασχολούν και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσής της πρέπει να είναι μια συνεχής προσπάθεια. Τα Σχήμα 6- 6 και Σχήμα 6- 7 καταδεικνύουν ότι και σε αυτό τον τομέα η προτεινόμενη λύση έχει πολλά να συνεισφέρει.

Σχήμα 6- 6. Μέση κατανάλωση ενέργειας σε 2 αλληλεπιδρούσες ροές

Σε περίπτωση που η τοπολογία είναι ευνοϊκή στην ανάπτυξη φαινομένων συμφόρησης είναι φανερό ότι από μέτρια κιόλας φορτία κίνησης, μεγάλο ποσοστό της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας οφείλεται ακριβώς στην ύπαρξη του φορτίου αυτού και όχι στην μετάδοση χρήσιμης πληροφορίας. Είναι χαρακτηριστική η περίπτωση των 200Kbps ανά ροή όπου με αρκετά configuration η προτεινόμενη αρχιτεκτονική οδηγεί σε κατανάλωση της τάξης των 20Joule όταν την ίδια στιγμή το default δίκτυο παράγει καταναλώσεις των 45 Joule. Άρα, πάνω από τη μισή ενέργεια που καταναλώνεται για επικοινωνιακούς σκοπούς δεν οδηγεί σε πραγματική μετάδοση πληροφορίας αλλά πρακτικά καταναλίσκεται στην προσπάθεια αντιμετώπισης καταστάσεων συμφόρησης. Είναι εύκολα κατανοητό, λοιπόν, ότι οι συνέπειες μια τέτοιας υπερβολικής κατανάλωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην διάρκεια ζωής του δικτύου, το χρονικό διάστημα χωρίς παρουσίαση φαινομένων κατάρτισης κτλ. Το ίδιο σκεπτικό από την άλλη καταδεικνύει πόσο σημαντική είναι η μείωση της κατανάλωσης που επιτυγχάνεται χάρη στο προτεινόμενο πλαίσιο. Εντούτοις οι μετρήσεις είναι αρκετά διαφορετικές όταν οι ροές είναι σχετικά ανεξάρτητες όπως φαίνεται στο Σχήμα 6- 7.

Σχήμα 6- 7. Μέση καταναλισκόμενη ενέργεια σε 2 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Η συγκεκριμένη είναι μια από τις περιπτώσεις όπου πιθανά το πλαίσιο να μη βελτιώνει την απόδοση του δικτύου όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει για χαμηλά φορτία (50 και 100Kbps) όπου το δίκτυο έχει τους πόρους να διαχειριστεί την εισερχόμενη κίνηση και άρα η κατανάλωση που επιφέρουν το, έστω και λίγα, πακέτα ειδοποίησης εμφανίζεται σαν επιπρόσθετη κατανάλωση. Η αποστολή πακέτων ειδοποίησης οφείλεται στο ότι λόγω και της γεννήτριας λαθών εμφανίζονται χρονικές στιγμές όπου τα χαμένα πακέτα ξεπερνούν στιγμιαία το όριο και ενεργοποιείται η μετάδοση αντίστοιχου πακέτου ειδοποίησης. Η εξισορρόπηση έρχεται γρήγορα, στα 150Kbps πέρα των οποίων η κατανάλωση που επιφέρουν τα πακέτα ειδοποίησης υπερκαλύπτεται από την αντιμετώπιση φαινομένων συμφόρησης και συνολικά παρατηρείται σημαντική βελτίωση στην μέση καταναλισκόμενη ενέργεια. Στη περίπτωση της καταναλισκόμενης ενέργειας ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατανομή της κατανάλωσης στο χώρο του δικτύου. Ενδεικτικά και μόνο το Σχήμα 6-8 δείχνει συγκριτικά τα επίπεδα καταναλισκόμενης ενέργειας στην τοπολογία πλέγματος όταν το δίκτυο χρησιμοποιεί την προτεινόμενη αρχιτεκτονική σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση 30_60 (το οποία δεν έχει και μεγάλη σημασία καθώς η βελτίωση είναι σημαντική σε κάθε περίπτωση) και όταν δεν τη χρησιμοποιεί.

Σχήμα 6- 8. Κατανομή κατανάλωσης σε τοπολογία πλέγματος

Λαμβάνοντας υπ' όψη, όπως δείχνει και η κλίμακα, ότι περνώντας από τη λευκή περιοχή προς τη μαύρη περνάμε από μηδενική κατανάλωση στη μέγιστη, η βελτίωση που μπορεί να παράσχει η πρότασή μας είναι φανερή σε όλο το εύρος του δικτύου. Αξίζει να επισημάνουμε από τη μία το εύρος της λευκής περιοχής στο βελτιωμένο δίκτυο όταν στο default δεν υπάρχει ούτε ένας κόμβος σε αυτό το επίπεδο κατανάλωσης ενώ από την άλλη το εύρος της περιοχής με τη μέγιστη παρατηρούμενη κατανάλωση στο απλό δίκτυο όταν στο βελτιωμένο δεν υπάρχει κόμβος που να έχει φτάσει το προτελευταίο επίπεδο (40-50) ποσό μάλλον το μέγιστο.

Φυσικά το ερώτημα είναι αυτή βελτίωση τι κόστος έχει στο ρυθμό μετάδοσης που πετυχαίνει το δίκτυο. Εδώ είναι άλλωστε και το σημείο όπου θα φανεί η επίδραση της διαμόρφωσης του πλαισίου και σημασία της κατάλληλης επιλογής στον τομέα αυτόν. Είναι χαρακτηριστικό ότι μέχρι τώρα δεν έχουμε αναφερθεί ξεχωριστά στις διάφορες διαμορφώσεις του πλαισίου καθώς οι διαφοροποιήσεις μεταξύ τους είναι σχετικά μικρές, ειδικά σε σχέση με το κλασικό δίκτυο. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι η παράμετρος της διαμόρφωσης του πλαισίου δεν είναι σημαντική. Μια τέτοια βιαστική υπόθεση καταρρίπτεται όταν πάμε να εξετάσουμε την ικανότητα διαμεταγωγής του βελτιωμένου δικτύου. Λόγω μεγάλου πλήθους μετρήσεων ενδεικτικές μετρήσεις παρουσιάζονται.

Σχήμα 6- 9. Επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης θεωρώντας μεσαία φορτία κίνησης

Σχήμα 6- 10. Επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης θεωρώντας υψηλά φορτία κίνησης

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6- 9 μέχρι σε και μεσαία φορτία η επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνεται είναι ιδιαίτερα μικρή ανεξαρτήτως διαμόρφωσης του πλαισίου και μάλλον αμελητέα αν αναλογιστούμε τα οφέλη που έχουν επιτευχθεί στους υπόλοιπους τομείς. Τα ανάλογα συμπεράσματα δεν είναι τόσο εύκολα σε υψηλά φορτία. Σε αυτή τη περίπτωση (Σχήμα 6- 10) η επίδραση της επιλεγμένης διαμόρφωσης είναι σημαντική καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό τη μείωση που υπεισέρχεται στη ποσότητα δεδομένων που μπορεί το δίκτυο να μεταφέρει υπό τις συνθήκες της εξομοίωσης. Έτσι λοιπόν για διαμορφώσεις 10_15 και 15_15 η μείωση είναι μικρή καθώς είναι περίπου 40Kbps στα 372 (~11%). Αντίθετα οι διαμορφώσεις 30_60 και 60_60 παρουσιάζουν τις χειρότερες επιδόσεις όπου η μείωση είναι κοντά στο 30% το οποίο για πολλές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθεί πολύ υψηλό τίμημα. Όταν θεωρούμε τοπολογίες όπου οι ροές αλληλεπιδρούν προφανώς οι συνθήκες είναι πιο δύσκολες όπως και η προσπάθεια ελαχιστοποίησης της μείωσης του

παρατηρούμενου ρυθμού μετάδοσης. Εντούτοις όπως θα φανεί και στο επόμενο σχήμα που αφορά μάλιστα το μέγιστο εισερχόμενο φορτίο υπάρχουν διαμορφώσεις που κρατούν τη αντίστοιχη μείωση πολύ χαμηλά. Ειδικά δε αν αναλογιστούμε τις βελτιώσεις που παρατηρούνται σε τομείς όπως καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας όταν οι ροές ευνοούν την ανάπτυξη συμφόρησης η μείωση που επιφέρουν διαμορφώσεις όπως 10_15 και 15_15 είναι απόλυτα αποδεκτές για πλήθος εφαρμογών. Έτσι λοιπόν στο Σχήμα 6- 11 και για τις παραπάνω διαμορφώσεις η μείωση παραμένει στα επίπεδα του 11% παρά την αλληλεπίδραση των ροών. Από την άλλη πρέπει να τονίσουμε ότι ορισμένες διαμορφώσεις όταν οι ροές αλληλεπιδρούν οδηγούν σε σημαντική χειροτέρευση της δικαιοσύνης του δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στο Σχήμα 6- 11 είναι η διαμόρφωση 30_30. Παρατηρώντας την αναλογία του μπλε τμήματος της μπάρας σε σχέση με το κόκκινο και συγκρίνοντάς τα με το default δίκτυο είναι φανερό ότι μια από τις δύο ροές ευνοείται υπέρμετρα σε σχέση με την άλλη.

Σχήμα 6- 11. Επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης θεωρώντας υψηλά φορτία κίνησης και αλληλεπιδρούσες ροές

Αν και η ευεργετική επίδραση φαίνεται ακόμα στις παραπάνω περιπτώσεις όπου υπάρχουν μόνο δύο ταυτόχρονες ροές δεδομένων, χωρίς αμφιβολία η παρούσα αρχιτεκτονική σκοπό έχει να μετριάσει τις επιπτώσεις πραγματικής υπερφόρτωσης του δικτύου. Τέτοιες συνθήκες σε ένα δίκτυο πλέγματος 49 κόμβων πραγματικά παρουσιάζονται όταν έχουμε 4 και 5 παράλληλες ροές δεδομένων και οι αντίστοιχες μετρήσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Στο Σχήμα 6- 12 φαίνεται η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου σε κατάλληλη τοπολογία όπου η θέση των ροών σε αυξημένη συμφόριση σε διάφορα σημεία του δικτύου. Συγκρίνοντας το Σχήμα 6- 12 με το αντίστοιχο των 2 ταυτόχρονων ροών το πρώτο στοιχείο που παρατηρεί κανείς είναι η αναμενόμενη σημαντική αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων του κλασσικού δικτύου. Εντούτοις το σημείο το οποίο πρέπει να τονίσουμε και το οποίο καταδεικνύει τη σημαντική βελτίωση που μπορεί να προσφέρει η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μας είναι το γεγονός ότι αντίθετα με το κλασσικό δίκτυο το δίκτυο που ενσωματώνει το προτεινόμενο πλαίσιο διατήρησε τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης στα ίδια επίπεδα με την καθυστέρηση υπό 2 ταυτόχρονες ροές, δηλαδή γύρω στο 0.1 sec, για όλες σχεδόν τις διαμορφώσεις.

Σχήμα 6- 12. Μέση καθυστέρηση υπό 4 αλληλεπιδρούσες ροές

Καταρχήν είναι χαρακτηριστικό ότι πλέον η βελτίωση είναι φανερή από τα 50Kbps. Πέραν αυτού όμως διαλέγοντας κατάλληλη διαμόρφωση το πλαίσιο μπορεί να μας παράσχει μια μείωση της μέσης καθυστέρησης από 90% (στα 100Kbps) έως 96% σε συνθήκες πολύ υψηλού φορτίου. Η μείωση αυτή είναι σημαντικότερη και πλέον καθιστά το δίκτυο πολύ πιο σταθερό και προβλέψιμο αυξάνοντας κατά πολύ την ικανότητα ικανοποίησης απαιτήσεων πραγματικού χρόνου, σίγουρα ελαστικού αλλά και αυστηρού.

Στο Σχήμα 6- 13 δείχνουμε τις αντίστοιχες μετρήσεις όταν οι ροές έχουν τέτοια θέση ώστε να υπάρχει μικρή επίδραση της μιας από την άλλη. Για μια ακόμα φορά αποδεικνύεται ότι η θέση των ροών στο δίκτυο είναι κρίσιμος παράγοντας, καθώς ακόμα και για 150Kbps (σημειώνουμε υπάρχουν 4 τέτοιες ροές) το δίκτυο ανταποκρίνεται πολύ καλά δίνοντας χαμηλές καθυστερήσεις και παρουσιάζοντας

σταθερή συμπεριφορά. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για υψηλά και πολύ υψηλά φορτία όπου η καθυστέρηση αυξάνεται σημαντικά (παραμένοντας πάντως αρκετά χαμηλότερη από την αντίστοιχη των αλληλεπιδρώντων ροών). Στις περιπτώσεις αυτές βλέπουμε ότι παρεμβαίνει το προτεινόμενο πλαίσιο πολύ αποτελεσματικά κρατώντας την καθυστέρηση σε πολύ χαμηλά επίπεδα ικανά να ικανοποιήσουν τις περισσότερες εφαρμογές που υπάρχουν.

Σχήμα 6-13. Μέση καθυστέρηση υπό 4 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Ανάλογα και αναμενόμενα αποτελέσματα έχουμε στις μετρήσεις του ποσοστού χαμένων πακέτων και για οικονομία χώρου παραθέτουμε μόνο τη περίπτωση των αλληλεπιδρώντων ροών στο Σχήμα 6-14.

Σχήμα 6-14. Ποσοστό χαμένων πακέτων υπό 4 αλληλεπιδρούσες ροές

Τα σημεία στα οποία θα σταθούμε είναι ανάλογα με αυτά της καθυστέρησης. Από τη μια παρατηρείται σημαντική αύξηση των χαμένων πακέτων, σε σχέση με τη

τοπολογία των 2 ταυτόχρονων ροών, σε όλες τις περιπτώσεις κίνησης. Είναι αξιοσημείωτο και ενδεικτικό των αδυναμιών των ασύρματων δικτύων το γεγονός ότι στην περίπτωση των 100Kbps 60% των πακέτων που παράγονται από τις αντίστοιχες CBR γεννήτριες χάνονται. Όπως όμως και στις μετρήσεις καθυστέρησης η προτεινόμενη αρχιτεκτονική οδηγεί σε σταθεροποίηση των ποσοστών ανεξαρτήτως αριθμού ροών. Και σταθερότητα στη συμπεριφορά είναι το βασικότερο χαρακτηριστικό για την ικανοποίηση απαιτήσεων πραγματικού χρόνου. Παράλληλα αυξάνεται το ποσοστό μείωσης χαμένων πακέτων που προσφέρει το πλαίσιο, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 90% 93%. Για τη περίπτωση των 4 μη αλληλεπιδρώντων ροών τα συμπεράσματα ακολουθούν πιστά αυτά της καθυστέρησης. Έτσι λοιπόν μέχρι και 150Kbps το δίκτυο διαχειρίζεται με επιτυχία την εισερχόμενη κίνηση δίνοντας πολύ χαμηλά ποσοστά χαμένων πακέτων όπως και καθυστέρησης. Μετά από το σημείο αυτό όμως η συμφόρηση που αναπτύσσεται είναι ισχυρότατη οδηγώντας το κλασσικό δίκτυο σε ποσοστά χαμένων πακέτων στην περιοχή του 60%, ενώ η ενεργοποίηση του μοντέλου εντοπισμού και αντιμετώπισης της συμφόρησης καταφέρνει και διατηρείται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα.

Για να εξετάσουμε ενδελεχώς τη περίπτωση των 4 ταυτόχρονων ροών πρέπει να μελετήσουμε τις μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας λόγω επικοινωνιακών λειτουργιών. Αυτό γίνεται καταρχήν στο Σχήμα 6- 15 όπου βλέπουμε την καταναλισκόμενη ενέργεια για την περίπτωση των 4 μη αλληλεπιδρώντων ροών.

Σχήμα 6- 15. Μέση καταναλισκόμενη ενέργεια σε 4 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Επιλέξαμε να παρουσιάσουμε τη περίπτωση των μη αλληλεπιδρώντων ροών κυρίως για να την αντιπαραβάλουμε με την αντίστοιχη περίπτωση των 2 ροών στη οποία παρατηρήθηκε ότι για χαμηλά φορτία το πλαίσιο, έστω και λίγο, επιβάρυνε τη λειτουργία του δικτύου αντί να τη βελτίωνε. Από το Σχήμα 6- 15 όμως είναι φανερό ότι τέτοιες περιπτώσεις δεν υπάρχουν πλέον καθώς για μικρά φορτία η κατανάλωση είναι ίδια με και χωρίς το πλαίσιο ενώ από εκεί και έπειτα υπάρχει μια σταδιακή αύξηση στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η μείωση αυτή της καταναλισκόμενης ενέργειας φτάνει το 41% από 150Kbps και πάνω όπου είναι φανερό ότι επιτυγχάνεται ένα μέγιστο τόσο με, όσο και χωρίς ενεργοποιημένο το πλαίσιο. Όπως είναι αναμενόμενο όταν οι ροές αλληλεπιδρούν τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με τη διαφορά ότι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι σημαντική από τα χαμηλά κιόλας φορτία και διατηρείται στα μεσαία και υψηλά.

Όπως και στην περίπτωση των 2 ροών στο Σχήμα 6- 16 παραθέτουμε την κατανομή της κατανάλωσης στο πλέγμα για την περίπτωση των 4 ανεξάρτητων ροών από τη μια με ενεργοποιημένο το πλαίσιο σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση και από τη άλλη θεωρώντας το δίκτυο χωρίς ενεργοποιημένο το πλαίσιο. Όπως είναι φανερό η επίδραση του πλαισίου αφορά όλο το εύρος του δικτύου και όχι μια συγκεκριμένη περιοχή. Η κατανομή είναι πολύ διαφορετική όταν χρησιμοποιείται το πλαίσιο και κάθε κόμβος του πλέγματος βρίσκεται τουλάχιστον ένα επίπεδο ενέργειας κάτω σε σχέση με το κλασικό δίκτυο επεκτείνοντας σημαντικά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου αλλά και τη μη εμφάνιση φαινομένων κατάτμησης.

Σχήμα 6- 16. Κατανομή κατανάλωσης σε τοπολογία πλέγματος

Σε κάθε περίπτωση όλα τα παραπάνω είναι ελλιπή αν δεν αξιολογηθεί η επίδραση που έχει η λειτουργία του πλαισίου στην ικανότητα διαμεταγωγής πληροφορίας, και για την περίπτωση των 4 ροών προέκυψαν πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Τα Σχήμα 6- 17, Σχήμα 6- 18 δείχνουν δύο περιπτώσεις όταν οι ροές έχουν άμεση αλληλεπίδραση.

Σχήμα 6- 17. Επίδραση στη διαμεταγωγή πακέτων όταν θεωρώντας μέσο ρυθμό μετάδοσης και αλληλεπιδρούσες ροές

Όπως και προηγουμένως είναι φανερό ότι η επιλεγόμενη διαμόρφωση είναι κρίσιμης σημασίας για την απόδοση του δικτύου ενώ αρχίζει να σχηματίζεται ένα συμπέρασμα που θέλει τις διαμορφώσεις 10_15 και 15_15 να αποδίδουν καλύτερα όταν η ικανότητα μετάδοσης είναι το ζητούμενο ενώ ο ρυθμός μείωσης παίζει το βασικότερο ρόλο καθώς υψηλός ρυθμός μείωσης συνεπάγεται ισχυρή επίδραση στη μέση διαμεταγωγή που μπορεί να πετύχει το δίκτυο με μικρότερη επίδραση από τον ρυθμό αύξησης. Το πολύ σημαντικό όμως σημείο στο οποίο πρέπει να σταθούμε είναι η εμφάνιση περιπτώσεων όπου ο μέσος ρυθμός μετάδοσης όχι μόνο δεν επηρεάζεται αρνητικά αλλά αντιθέτως αυξάνεται. Το γεγονός αυτό ενισχύει σημαντικά την αξία του προτεινόμενου πλαισίου καθώς δείχνει ότι σε περιπτώσεις έντονης συμφόρισης μπορεί να αποσυμφορίσει την κατάσταση και να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου από όλες τις απόψεις. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και από το Σχήμα 6- 18, όπου ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης δεν είναι ποτέ ίσο ή μεγαλύτερο σε σχέση με το κλασικό δίκτυο αν και σε μερικές διαμορφώσεις οι απώλειες είναι πολύ μικρές. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι για μια ακόμα φορά φαίνεται ότι η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης έχει σημαντική, και συνήθως αρνητική, επίδραση στη δίκαιη κατανομή του συνολικού ρυθμό μετάδοσης στις ροές που συνυπάρχουν στο δίκτυο.

Κάτι τέτοιο είναι φανερό σε περιπτώσεις όπως η 10_30 ή 60_60 όπου μια από τις ροές υποβαθμίζεται σημαντικά έναντι των άλλων.

Σχήμα 6- 18. Επίδραση στη διαμεταγωγή πακέτων όταν θεωρώντας μέσο ρυθμό μετάδοσης και αλληλεπιδρούσες ροές

Η επίδραση της αρχιτεκτονικής είναι πολύ πιο ευνοϊκή όταν οι ροές είναι τοποθετημένες ώστε να μην αλληλεπιδρούν. Το γενικό αυτό συμπέρασμα καταδεικνύεται εύκολα από τα Σχήμα 6- 19 και Σχήμα 6- 20. Είναι φανερό ότι όλες οι διαμορφώσεις αποδίδουν πολύ καλύτερα και πλησιάζουν το εξ ορισμού δίκτυο με αποτέλεσμα όλο και περισσότερες να το φτάνουν και να το ξεπερνούν στη μέση διαμεταγωγή, μέγεθος το οποίο είναι το αδύνατο σημείο όταν ελέγχουμε την συμφόρηση. Ειδικά δε για υψηλά φορτία παρατηρούμε ότι 3 διαμορφώσεις σε σχέση με το δίκτυο χωρίς το πλαίσιο παρέχουν υψηλότερο μέσο ρυθμό μετάδοσης, 2 σχεδόν ίδιο, ενώ 2 παρουσιάζουν κάποια μείωση και μόνο σε μια περίπτωση η μείωση μπορεί να χαρακτηριστεί σημαντική. Τέλος για 2 από τις διαμορφώσεις που ξεπερνούν το κλασσικό δίκτυο η αύξηση είναι ιδιαίτερα σημαντική ειδικά αν αναλογιστούμε τις βελτιώσεις και στους άλλους τομείς.

Περνώντας τέλος στην περίπτωση 5 ταυτόχρονων ροών θα επικεντρώσουμε στις τοπολογίες όπου η ροές έχουν τέτοια θέση ώστε να επηρεάζονται όσο το δυνατόν λιγότερο η μία από την άλλη, πράγμα βέβαια δύσκολο καθώς όποια θέση και αν πάρουν, η αλληλεπίδραση σε κάποιο βαθμό είναι αναπόφευκτη.

Σχήμα 6- 19. Επίδραση στη διαμεταγωγή πακέτων θεωρώντας μέσο ρυθμό μετάδοσης και μη αλληλεπιδρούσες ροές

Σχήμα 6- 20. Επίδραση στη διαμεταγωγή πακέτων θεωρώντας υψηλό ρυθμό μετάδοσης και μη αλληλεπιδρούσες ροές

Ο κύριος λόγος για την εστίαση αυτή είναι ότι για τις περιπτώσεις όπου οι ροές αλληλεπιδρούν τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με αυτά των σεναρίων 4 ροών όπου η ευεργετική επίδραση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής έχει καταστεί σαφής, έτσι λοιπόν για οικονομία χώρου και για μη γίνεται η επίδειξη των αποτελεσμάτων υπερβολικά κουραστική οι περιπτώσεις αυτές δεν θα παρουσιαστούν. Αντίθετα όταν έχουμε 5 ροές και τοπολογία μη αλληλεπιδρόντων ροών έχουμε νέα συμπεράσματα καθώς το εύρος όπου η θετική επίδραση είναι εμφανής αυξάνεται σημαντικά.

Σχήμα 6- 21. Μέση καθυστέρηση υπό 5 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Στο Σχήμα 6- 21 φαίνεται η μέση καθυστέρηση που παρατηρείται στις εξομοιώσεις που μας ενδιαφέρουν. Πέρα από τη σημαντική βελτίωση που προσφέρουν όλες οι διαμορφώσεις του πλαισίου εκεί που πρέπει να σταθούμε είναι στη σύγκριση με το αντίστοιχο σχήμα 4 ροών. Το δύο σημεία άξια αναφοράς είναι από τη μία ο αυξημένος βαθμός βελτίωσης στα υψηλά φορτία και από την άλλη, και ίσως σημαντικότερο, το γεγονός ότι πλέον και στα χαμηλά και μεσαία φορτία η επίδραση της αρχιτεκτονικής είναι καταλυτική και εμφανής σε αντίθεση με τις 4 ροές όπου για να γίνει σαφής η διαφοροποίηση έπρεπε το δίκτυο να τροφοδοτηθεί με υψηλά φορτία. Είναι χαρακτηριστικό για παράδειγμα ότι στα 100Kbps κιόλας παρατηρούμε μια βελτίωση 90% η οποία αυξανόμενου του φορτίου αυξάνεται και γραμμικά καθώς παρατηρούμε ότι η καθυστέρηση του εξ ορισμού δικτύου αυξάνεται ενώ με τη βοήθεια του προτεινόμενου πλαισίου η καθυστέρηση παραμένει σταθερή και σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Στο Σχήμα 6- 22 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μετρήσεις σχετικά με τα ποσοστά χαμένων πακέτων. Και εδώ, σε σχέση με λιγότερες ροές, το ιδιαίτερο σημείο που πρέπει να δοθεί βάρος είναι το ότι η βελτίωση είναι ιδιαίτερος μεγάλη από τα 100kbps κιόλας. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι, χωρίς τον έλεγχο που παρέχει το προτεινόμενο πλαίσιο, είναι ιδιαίτερος εύκολο να αναπτυχθούν συνθήκες συμφόρισης. Αυξανόμενου δε του ρυθμού μετάδοσης το δίκτυο οδηγείται όλο και βαθύτερα σε κατάσταση κορεσμού δεδομένου ότι δεν υπάρχει μηχανισμός ο οποίος να μπορεί να αντιληφθεί αποτελεσματικά τις συνθήκες αυτές και να επηρεάσει την

γενεσιουργό αιτία που δεν είναι άλλη από τον υπερβολικό ρυθμό γέννησης πακέτων για τις δυνατότητες του δικτύου που εξετάζουμε.

Σχήμα 6- 22. Ποσοστό χαμένων πακέτων υπό 5 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Όπως στα προηγούμενα μεγέθη έτσι και στη κατανάλωση ενέργειας είναι χαρακτηριστικό ότι η συμφόρηση που επιφέρουν οι 5 ταυτόχρονες ροές είναι τόσο ισχυρή που οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλή σπατάλη ενέργειας το δίκτυο σε όλο το φάσμα των ρυθμών δημιουργίας πακέτων που δοκιμάσαμε. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σύγκριση των Σχήμα 6- 23 και Σχήμα 6- 15 στα 100Kbps. Στο ρυθμό αυτό το προτεινόμενο πλαίσιο παρέχει μια βελτίωση της τάξης του 13% όταν εξετάζουμε τις 4 ροές, η οποία όμως εκτοξεύεται στα 43% περίπου όταν οι ροές γίνονται 5.

Σχήμα 6- 23. Μέση καταναλισκόμενη ενέργεια σε 5 μη αλληλεπιδρούσες ροές

Αυτή είναι και η περίπτωση που θα χρησιμοποιήσουμε για να δείξουμε την επίδραση του πλαισίου στην κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στο Σχήμα 6- 24. Εδώ αντιπαραθέτουμε την πορεία κατανάλωσης στη διάρκεια της εξομοίωσης όταν δεν χρησιμοποιείται το πλαίσιο και όταν χρησιμοποιείται σε διαμόρφωση 30_60.

Σχήμα 6- 24. Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας στη περίπτωση 5 μη αλληλεπιδρώντων ροών με 100Kbps ανά ροή

Για μια ακόμα φορά φαίνεται ότι όλο το εύρος του δικτύου επωφελείται σημαντικά από τη χρήση του πλαισίου. Ειδική αναφορά αξίζει να γίνει στο επίπεδο κατανάλωσης 60-70. Βλέπουμε ότι στο κλασσικό δίκτυο στο τέλος της εξομοίωσης μια ιδιαίτερα μεγάλη περιοχή που σχεδόν έκοβε το δίκτυο στη μέση βρίσκεται σε αυτό το επίπεδο κατανάλωσης, εν αντιθέσει με τη περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το πλαίσιο και όπως παρατηρούμε η μέγιστη κατανάλωση βρίσκεται μόλις στο επίπεδο 40-50. Είναι λοιπόν φανερό ότι το προσδόκιμο χρονικό διάστημα ζωής ενός κόμβου αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση του πλαισίου. Αλλά ακόμα περισσότερο αυξάνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου ολόκληρου καθώς είναι λογικό ότι στην περίπτωση χωρίς το πλαίσιο επίκειται κατάρτιση του δικτύου πολύ πιο γρήγορα. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται εύκολα καθώς αν νεκρωθεί επικοινωνιακά το δίκτυο στην μαύρη περιοχή τότε κόμβοι που βρίσκονται εκατέρωθεν τη περιοχής αυτής δεν

μπορούν να επικοινωνήσουν καθώς δεν υπάρχει αντίστοιχος δρόμος και άρα το αποτέλεσμα είναι το ίδιο ακόμα και αν κάποιοι κόμβοι έχουν απόθεμα ενέργειας.

Τελειώνοντας την παρουσίαση της επίδρασης του πλαισίου σε στατική τοπολογία και υπό την προϋπόθεση χρήσης του AODV πρωτοκόλλου δρομολόγησης θα δείξουμε και πως επηρεάζεται η ικανότητα διαμεταγωγής δεδομένων του δικτύου. Στο Σχήμα 6- 25 παρουσιάζονται οι μετρήσεις όταν οι ροές έχουν τέτοια θέση ώστε να αλληλεπιδρούν έντονα μεταξύ τους ενώ η κάθε μια εισάγει κίνηση 150Kbps στο δίκτυο.

Σχήμα 6- 25. Επίδραση στη διαμεταγωγή πακέτων θεωρώντας μέσο ρυθμό μετάδοσης και αλληλεπιδρούσες ροές

Είναι φανερό ότι σε τέτοιες συνθήκες δικτύου η χρήση του πλαισίου σε κατάλληλη διαμόρφωση οδηγεί σε, είτε πολύ μικρή μείωση του μέσο ρυθμό μετάδοσης είτε ακόμα σε αύξηση αυτού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η διαμόρφωση 15_15 η οποία οδηγεί σε σημαντική αύξηση την ικανότητα διαμεταγωγής του δικτύου.

Σχήμα 6- 26. Επίδραση στη διαμεταγωγή πακέτων θεωρώντας υψηλό ρυθμό μετάδοσης και μη αλληλεπιδρούσες ροές

Ακόμα πιο εντυπωσιακές είναι οι μετρήσεις όταν οι ροές έχουν μη αλληλεπιδρούσα διάταξη. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6- 26 η συνολική μέση διαμεταγωγή του δικτύου υπό την επίδραση του πλαισίου σε ελάχιστες περιπτώσεις υστερεί αυτής που αποδίδει το απλό δίκτυο. Αντιθέτως αυξάνονται οι διαμορφώσεις που επιφέρουν ίσες ή και υψηλότερες μετρήσεις. Φυσικά για να κατανοήσουμε το μέγεθος της θετικής επίδρασης πρέπει να έχουμε πάντα κατά νου τις σημαντικές μειώσεις που δείξαμε σε όλες τις άλλες κατηγορίες καθώς και ότι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης έχει το χαρακτηριστικό ότι με τη χρήση του πλαισίου εξ αρχής δεν ήταν στόχος η αύξησή του παρά η διατήρησή του σε ίδια επίπεδα, ενώ τώρα βλέπουμε, υπό συνθήκες, βελτίωση και σε αυτόν τομέα. Από τα παραπάνω σχήμα καταδεικνύεται ότι προσοχή πρέπει να δοθεί στη δικαιοσύνη μεταξύ των ροών. Όπως βλέπουμε σε αρκετές περιπτώσεις (τόσο με όσο και χωρίς τη χρήση του πλαισίου) ορισμένες ροές ευνοούνται δυσανάλογα σε βάρος κάποιων άλλων. Κάτι τέτοιο μπορεί να θεωρηθεί επέκταση της παρούσας διατριβής.

6.4.Αποτελέσματα σε τοπολογίες με μη στατικούς κόμβους.

Η κινητικότητα των κόμβων αποτελούσε, αποτελεί και πιθανότατα θα αποτελεί πάντα το κυριότερο λόγο κακής απόδοσης ενός ασύρματου δικτύου. Οι αστάθμητοι παράγοντες που υπεισέρχονται δημιουργούν ιδιαίτερα δύσκολες καταστάσεις για όλα τα επίπεδα του OSI προτύπου. Από την άλλη καθιστούν πολύ δύσκολη την δημιουργία ενός αναλυτικού μοντέλου ικανού να καλύψει κάθε δίκτυο και κάθε πιθανή κατάσταση που μπορεί να εμφανιστεί. Έτσι λοιπόν συνήθως (όπως και στη παρούσα διατριβή) καταλήγουμε σε ευρετικές μεθόδους εκτίμησης της συμπεριφοράς και απόδοσης του δικτύου μέσω εξομοιώσεων.

Η επίδραση του χαρακτηριστικού της κινητικότητας εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων όπως:

- Ταχύτητα: Όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχουν οι κόμβοι κατά τη κίνησή τους τόσο δυσκολότερο είναι για το δίκτυο να παρουσιάσει υψηλές αποδόσεις.
- Σχετική κίνηση των κόμβων: Σε πολλές εφαρμογές (π.χ. στρατιωτικές) οι κόμβοι κινούνται κατά ομάδες το οποίο διευκολύνει σημαντικά τη λειτουργία

όλων των εμπλεκόμενων πρωτόκολλων και κυρίως του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και προσπέλασης του μέσου.

- Πρόβλεψη αλλαγής διεύθυνσης: Και εδώ υπάρχουν εφαρμογές (κίνηση στους δρόμους μιας πόλης ή σε χώρο με σαφείς κανόνες κίνησης) που καθιστούν προβλέψιμη σε κάποιο βαθμό την κίνηση των κόμβων. Το χαρακτηριστικό αυτό επίσης οδηγεί σε υψηλότερες επιδόσεις ένα δίκτυο σε αντίθεση με περιπτώσεις όπου οι κόμβοι κινούνται σε μια εντελώς ελεύθερη περιοχή όπου η χρονική στιγμή αλλά και η νέα διεύθυνση είναι εντελώς τυχαίες.
- Ποσοστό κινούμενων κόμβων σε σχέση με όλους τους υπάρχοντες κόμβους. Και εδώ ξεχωρίζουμε τις περιπτώσεις ύπαρξης ενός αριθμού (έστω και μικρού) σταθερών κόμβων σε ένα εν γένει δίκτυο κινούμενων κόμβων. Σε τέτοιες περιπτώσεις επίσης η απόδοση του δικτύου είναι καλύτερη συγκρινόμενη με τη περίπτωση όπου όλοι οι κόμβοι κινούνται και έτσι δεν υπάρχει καμία σταθερή αναφορά.

Στη παρούσα διατριβή θέλοντας να εξετάσουμε τη χειρότερη δυνατή περίπτωση θεωρήσαμε ότι όλοι οι κόμβοι κινούνται, δεν υπάρχει καμία σχέση της πορείας ενός κόμβου με κάποιον άλλον, η κίνηση είναι συνεχής και η χρονική στιγμή και νέα διεύθυνση είναι τυχαίες. Τέλος η μέση ταχύτητα κίνησης είναι 10m/sec που θεωρείται ανάλογη με την ταχύτητα βαδίσματος ενός ανθρώπου.

Για το σκοπό της μελέτης θεωρήσαμε δύο σενάρια κίνησης με τα παραπάνω χαρακτηριστικά με μόνη μέριμνα να υπάρχει πάντα δρόμος σύνδεσης μεταξύ των επιλεγμένων αποστολών και παραληπτών. Προς οικονομία χώρου θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα μόνο για το ένα σενάριο και μικρότερη λεπτομέρεια και ανάλυση σε σχέση με το υποκεφάλαιο 2.2. Φυσικά όλα τα αποτελέσματα και τα αρχεία εξομοιώσεων είναι διαθέσιμα σε όποιον ενδιαφέρεται. Επιπλέον η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα γίνει με διαφορετικό τρόπο καθώς θα αναλύεται το πέρασμα από 3 σε 4 και 5 ταυτόχρονες ροές για κάθε μετρούμενο μέγεθος.

Στο Σχήμα 6- 27 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση στο δίκτυο θεωρώντας 3 ταυτόχρονες ροές. Είναι φανερό ότι το γράφημα και η ανάλυση αυτού είναι αρκετά πιο σύνθετες υποθέσεις σε σχέση με τις περιπτώσεις των στατικών τοπολογιών. Έτσι λοιπόν βλέπουμε ότι μέχρι και 100Kbps υπάρχουν διαμορφώσεις του πλαισίου που

οδηγούν το δίκτυο σε υψηλότερες καθυστερήσεις ενώ όταν υπάρχει βελτίωση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Σχήμα 6- 27. Μέση καθυστέρηση για 3 ταυτόχρονες ροές θεωρώντας κινούμενους κόμβους.

Σημαντική βελτίωση λόγω χρήσης του πλαισίου παρατηρείται από 150Kbps και πάνω. Αλλά ακόμα και εκεί παρατηρούνται μεμονωμένες περιπτώσεις όπου το πλαίσιο παράγει ανάλογες καθυστερήσεις με το απλό δίκτυο. Το τελευταίο χαρακτηριστικό ενδεικτικό των απαιτητικών καταστάσεων που δημιουργεί η κινητικότητα των κόμβων είναι ότι, αντίθετα με όσα είχαμε δει στα στατικά δίκτυα, αύξηση της καθυστέρησης παρατηρείται και με τη χρήση του πλαισίου. Πράγματι μπορούμε να δούμε ότι για 250Kbps ανά ροή οι περισσότερες διαμορφώσεις επιδεικνύουν μια αισθητή αύξηση της μέσης καθυστέρησης, αν και πάντα η καθυστέρηση αυτή είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή του χωρίς το μοντέλο δικτύου.

Σχήμα 6- 28. Μέση καθυστέρηση για 4 ταυτόχρονες ροές θεωρώντας κινούμενους κόμβους.

Σημαντικά καλύτερη απόδοση παρατηρείται όταν υπάρχουν 4 ταυτόχρονες ροές στο δίκτυο. Αν και πάλι η ευεργετική επίδραση του πλαισίου γίνεται αισθητή από τα μεσαία φορτία και άνω το ιδιαίτερα θετικό σημείο είναι η πολύ πιο σταθερή συμπεριφορά του δικτύου υπό την ύπαρξη του πλαισίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι καλύτερη σχετική απόδοση δεν οφείλεται τόσο στη χειροτέρευση του απλού δικτύου (στην πραγματικότητα και αυτή βελτιώθηκε) αλλά στην σημαντική σταθεροποίηση που παρείχε στο δίκτυο το πλαίσιο. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη ενεργοποίηση της 4^{ης} ροής της οποίας ο πομπός και ο τελικός δέκτης είχαν ανεμπόδιστη επικοινωνία και έτσι ωφελήθηκε σημαντικά η συμπεριφορά του όλου δικτύου. Το γεγονός αυτό δείχνει γλαφυρά τη σημαντική επίδραση που μπορεί να έχει η κινητικότητα σε ένα δίκτυο ad-hoc. Ολοκληρώνοντας τη παρουσίαση των μετρήσεων σχετικά με την καθυστέρηση στο Σχήμα 6- 29 φαίνονται οι αντίστοιχες μετρήσεις όταν υπάρχουν 5 ταυτόχρονες ροές στο δίκτυο. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στο σχήμα αυτό είναι η διαφοροποίηση των μετρήσεων ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση του πλαισίου. Πράγματι μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην περίπτωση των 200Kbps ανά ροή ανάλογα με τη διαμόρφωση του πλαισίου παρατηρείται απόκλιση στη μετρούμενη μέση καθυστέρηση της τάξης του 70%. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις το πλαίσιο αποδίδει τα μέγιστα από 150 Kbps και άνω καθώς όπως φαίνεται τόσο στα 100Kbps όσο και στα 150Kbps υπάρχει αισθητή μείωση της μέσης καθυστέρησης η οποία οφείλεται στην επίδραση του πλαισίου.

Σχήμα 6- 29. Μέση καθυστέρηση για 5 ταυτόχρονες ροές θεωρώντας κινούμενους κόμβους.

Αντίθετα με τη μέση καθυστέρηση οι μετρήσεις των χαμένων πακέτων είναι αρκετά πιο ξεκάθαρες. Στο Σχήμα 6- 30 φαίνονται οι αντίστοιχες μετρήσεις θεωρώντας 4 ταυτόχρονες ροές.

Σχήμα 6- 30. Ποσοστό χαμένων πακέτων σε δίκτυο κινητών κόμβων και υπό 4 ταυτόχρονες ροές

Λόγω ομοιότητας των γενικών συμπερασμάτων παραλείπουμε τις περιπτώσεις των 3 και 5 ροών. Όπως και στις μετρήσεις των καθυστερήσεων ο ρυθμός αύξησης του % χαμένων πακέτων αυξάνεται σημαντικά από τα 100Kbps και πάνω ενώ υπό το έλεγχο του πλαισίου τα αντίστοιχα ποσοστά παρουσιάζουν κατά πολύ μικρότερη αύξηση. Είναι σημαντικό ότι στα υψηλά φορτία ενώ το δίκτυο χωρίς τη βοήθεια του πλαισίου φτάνει το 50% στις απώλειες πακέτων με τη χρήση του πλαισίου ακόμα στην χειρότερη διαμόρφωση αυτού το ποσοστό δεν ξεπερνάει το 10%. Σε σχέση με τα στατικά δίκτυα και πάλι παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση μετρήσεων μεταξύ των διαμορφώσεων του πλαισίου, κάτι που παρατηρήσαμε και στις καθυστερήσεις, η οποία όμως κρίνεται πολύ μικρή όταν εξεταστεί στο ίδιο γράφημα με τις μετρήσεις δικτύου χωρίς το πλαίσιο.

Περνώντας στις μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας στο Σχήμα 6- 31 βλέπουμε τη μέση κατανάλωση ενέργειας

Σχήμα 6- 31. Μέση καταναλισκόμενη ενέργεια θεωρώντας 5 ταυτόχρονες ροές σε δίκτυο κινητών κόμβων

Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις είναι ξεκάθαρη η θετική επίδραση του προτεινόμενου πλαισίου. Στα χαμηλά προς μεσαία φορτία αν και υπάρχει σαφής μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας ανάλογα και με τη διαμόρφωση το πλαίσιο παρουσιάζει ανάλογο ρυθμό αύξησης με το δίκτυο χωρίς τη βοήθεια του πλαισίου. Η σημαντική βελτίωση στην απόδοση έρχεται στα μεσαία φορτία (150Kbps), και υψηλότερα παραμένει σταθερή. Για μια ακόμα φορά παρατηρείται σημαντική εξάρτηση της απόδοσης του πλαισίου από την επιλεγόμενη διαμόρφωση. Στα 100 Kbps η απόκλιση στην μέση καταναλισκόμενη ενέργεια μεταξύ καλύτερης και χειρότερης διαμόρφωσης είναι ~44% ενώ στα 150Kbps πέφτει στα ~37%. Είναι λοιπόν φανερό ότι και σε αυτή τη περίπτωση η κινητικότητα εισάγει νέες παραμέτρους έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση.

Τέλος για να υπάρχει σφαιρική μελέτη της επίδρασης του πλαισίου πρέπει να δούμε πως επηρεάζονται οι μετρήσεις διαμεταγωγής καθώς αυτός είναι ο τομέας όπου θα υπάρξει, αν υπάρξει, η όποια ζημία, η οποία και θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Στο Σχήμα 6- 32 φαίνονται οι μετρήσεις όταν υπάρχουν 4 ταυτόχρονες ροές στο δίκτυο και υπό την προϋπόθεση ότι κάθε μια από αυτές εισάγει κίνηση ίση με 200Kbps. Όπως και στους άλλους τομείς είναι φανερό ότι η επιλογή της διαμόρφωσης επηρεάζει καταλυτικά την απόδοση του δικτύου. Οι καλύτερες περιπτώσεις διαμόρφωσης (10_15 και 45_45) οδηγούν σε μείωση της συνολικής ικανότητας διαμεταγωγής δεδομένων της τάξης του 17% το οποίο ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής (και τις παραμέτρους που θεωρούνται κρίσιμες) μπορεί να

είναι αποδεκτή ειδικά αν αναλογιστούμε τις ωφέλειες που παρέχονται στους υπόλοιπους τομείς. Για υψηλότερα φορτία και πάλι το πλαίσιο οδηγεί σε μειωμένη μετρούμενη μέση διαμεταγωγή έτσι ώστε να παράσχει τις παρατηρούμενες βελτιώσεις στην απόδοση στους τομείς καθυστέρησης, κατανάλωσης και μείωση των χαμένων πακέτων.

Σχήμα 6- 32. Μέση ικανότητα διαμεταγωγής θεωρώντας 4 ταυτόχρονες ροές και κινούμενους κόμβους.

Για λόγους πληρότητας και ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των μετρήσεων για κινούμενους κόμβους στο Σχήμα 6- 33 φαίνονται οι αντίστοιχες μετρήσεις θεωρώντας δίκτυο 5 ροών και εισαγωγή δεδομένων με ρυθμό 250Kbps από κάθε μια.

Σχήμα 6- 33. Μέση ικανότητα διαμεταγωγής θεωρώντας 5 ταυτόχρονες ροές και κινούμενους κόμβους.

Και σε αυτό το γράφημα καθίσταται φανερό η κρισιμότητα της σωστής διαμόρφωσης του πλαισίου. Σε περίπτωση κακής επιλογής, όπως η 10_30 στο συγκεκριμένο πείραμα η μείωση στη μέση διαμεταγωγή του δικτύου μπορεί να φτάσει το 45% ενώ

η διαμόρφωση 45_45 οδηγεί σε μείωση μόλις 12%. Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε, στα θετικά σημεία, ότι στη μεγάλη πλειοψηφία των πειραμάτων με κινητούς κόμβους η επίδραση του πλαισίου στη δικαιοσύνη μεταξύ των ροών ήταν μικρή. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία το κάθε τμήματος (που αντιστοιχεί σε μια ροή) σε κάθε στήλη παραμένει ίδια ή μεταβάλλεται πολύ λίγο μεταξύ του απλού δικτύου και αυτού που χρησιμοποιεί το πλαίσιο.

6.5. Αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης σε στατική τοπολογία πλέγματος

Από προηγούμενη μελέτη [17] το DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης είχε παρουσιάσει σημεία αστάθειας και χαμηλής απόδοσης σε σχέση με το AODV το οποίο αποτέλεσε το κύριο πρωτόκολλο δρομολόγησης της μελέτης μας. Εκτιμήθηκε όμως ότι θα είχε ενδιαφέρον να χρησιμοποιηθεί το εν λόγω πρωτόκολλο στα πλαίσια του προτεινομένου πλαισίου έτσι ώστε να διαπιστωθούν περιπτώσεις αστάθειας σε σχέση με το AODV, να μελετηθεί η επίδραση του πλαισίου αλλά και προταθούν πιθανές περαιτέρω βελτιώσεις όταν χρησιμοποιείται το DSR πρωτόκολλο.

Για το λόγο αυτό εκτελέστηκαν επιπλέον εξομοιώσεις ενδεικτικά αποτελέσματα από τις οποίες θα παρουσιαστούν στο σημείο αυτό. Στα Σχήμα 6- 34, Σχήμα 6- 35, Σχήμα 6- 36 φαίνονται οι μετρήσεις μέση καθυστέρησης μετάδοσης πακέτου στις περιπτώσεις 3 ροών (τόσο αλληλεπιδρόντων όσο και μη) και 4 αλληλεπιδρόντων ροών.

Σχήμα 6- 34. Μέση καθυστέρηση για 3 αλληλεπιδρούσες ροές θεωρώντας DSR πρωτόκολλο.

Σχήμα 6- 35. Μέση καθυστέρηση για 3 μη αλληλεπιδρούσες ροές θεωρώντας DSR πρωτόκολλο.

Σχήμα 6- 36. Μέση καθυστέρηση για 4 αλληλεπιδρούσες ροές θεωρώντας DSR πρωτόκολλο.

Στο Σχήμα 6- 34 η αλληλεπίδραση των ροών γίνεται φανερή από το γεγονός ότι η καθυστέρηση που παρατηρείται στο χωρίς την βοήθεια του μοντέλου δίκτυο (default στα γραφήματα) είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν του σχήματος 6-35. Είναι χαρακτηριστικό ότι από τα 100Kbps η μέση καθυστέρηση έχει ξεπεράσει τα 5 sec ενώ για την αντίστοιχη περίπτωση μη αλληλεπιδρώντων ροών είναι στο 0.1 ενώ η μέγιστη μέση καθυστέρηση που μετρήθηκε ήταν κοντά στα 1.2sec. Τόσο στο Σχήμα 6- 34 όσο στο Σχήμα 6- 35 η συνεισφορά του προτεινόμενου πλαισίου είναι σημαντική. Όπως είναι αναμενόμενο στην περίπτωση των αλληλεπιδρώντων ροών η παρατηρούμενη μείωση είναι μεγαλύτερη καθώς φτάνει το 97% στην περίπτωση των 200Kbps ανά ροή δεδομένων. Εντούτοις παρατηρείται ότι η διαμόρφωση 30_60 δεν αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά όπως οι υπόλοιπες καθώς σε μερικές περιπτώσεις (100Kbps) η καθυστέρηση αυξήθηκε και ξεπέρασε το 1 sec. Επιπλέον στην πιο απαιτητική περίπτωση (250Kbps) το δίκτυο παρουσιάζει έντονα σημεία κορεσμού και η καθυστέρηση και με τη βοήθεια του πλαισίου παρουσιάζει αυξητικές τάσεις.

Στο περίπτωξη όπου οι ροές έχουν τέτοια τοπολογία ώστε να μη αλληλεπιδρούν το δίκτυο αποδίδει πολύ καλύτερα αν και πάλι η χρήση της αρχιτεκτονικής μειώνει σημαντική την αναμενόμενη μέση καθυστέρηση και κατά συνέπεια την ικανότητα ικανοποίησης χρονικών περιορισμών. Η καλή λειτουργία του δικτύου πέρα από τις εν γένει χαμηλότερες καθυστερήσεις, παρατηρείται και από το γεγονός ότι μέχρι και φορίτο ίσο με 100Kbps ανά ροή το πλαίσιο δεν προσφέρει σημαντική βελτίωση. Η μείωση δε της καθυστέρησης για πολύ υψηλά φορτία είναι σημείο έντονου κορεσμού όπου λίγα πακέτα καταφέρνουν να μεταδοθούν επιτυχώς.

Στο δε Σχήμα 6- 36 παρουσιάζεται η περίπτωση 4 αλληλεπιδρόντων ροών. Εδώ παρατηρούνται τα φαινόμενα αστάθειας στα οποία αναφερθήκαμε πιο πάνω. Για μια ακόμα φορά το πλαίσιο καταφέρει να μειώσει την αναμενόμενη μέση καθυστέρηση. Ο βαθμός όμως μείωσης είναι σημαντικά χαμηλότερος και σαν απόλυτη τιμή μέση καθυστέρηση της τάξης των 4 sec δεν είναι αποδεκτός για ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών ελαστικού πραγματικού χρόνου. Επίσης πολύ σημαντικές είναι οι απότομες αυξομειώσεις που παρατηρούνται κατά την αύξησης του ρυθμού μετάδοσης σε αρκετές από τις διαμορφώσεις. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο μεγάλο αριθμό πακέτων δρομολόγησης του εν λόγω πρωτοκόλλου που καθιστούν δύσκολη σε ορισμένες περιπτώσεις την ακριβή ανίχνευση καταστάσεων συμφόρησης. Κάτι τέτοιο όμως καθιστά την συμπεριφορά του δικτύου μη προβλέψιμη το οποίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα.

Για τις μετρήσεις του ποσοστού χαμένων πακέτων θα αντιπαραβάλουμε τις περιπτώσεις των 5 μη αλληλεπιδρώντων και 5 αλληλεπιδρώντων όπου η διαφορετική συμπεριφορά είναι πιο χαρακτηριστική.

Συγκρίνοντας τα δύο προηγούμενα σχήματα είναι σαφής η καταλυτική επίδραση που έχει η τοπολογία των ροών στην απόδοση του δικτύου, από την μια, αλλά και στην βελτίωση που επιφέρει το προτεινόμενο πλαίσιο από την άλλη. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση των μη αλληλεπιδρώντων ροών η χρήση του προτεινόμενου πλαισίου καταφέρνει και κρατάει σε πολύ χαμηλά επίπεδα τα ποσοστά χαμένων πακέτων μέχρι και τα 150Kbps ανά ροή.

Αντίθετα όταν θεωρούμε τοπολογία αλληλεπιδρώντων ροών παρατηρούμε ότι αν και παρέχεται σαφής βελτίωση σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς τη χρήση του πλαισίου εντούτοις τα ποσοστά χαμένων πακέτων παραμένουν υψηλά καθώς (ανάλογα και με τη διαμόρφωση που επιλέγεται) αγγίζουν το 40% από τα 100Kbps κιόλας.

Σχήμα 6- 37. Ποσοστό χαμένων πακέτων σε δίκτυο στατικών κόμβων και υπό 5 αλληλεπιδρούσες ροές χρησιμοποιώντας DSR.

Σχήμα 6- 38. Ποσοστό χαμένων πακέτων σε δίκτυο στατικών κόμβων και υπό 5 αλληλεπιδρούσες ροές χρησιμοποιώντας DSR.

Επιπλέον η δυναμική συμπεριφορά του δικτύου όταν οι ροές αλληλεπιδρούν είναι φανερή στις μετρήσεις αυτές από το γεγονός ότι η απόκλιση των μετρήσεων ανάλογα με τη επιλεγόμενη διαμόρφωση του πλαισίου είναι σημαντική σε κάθε περίπτωση φορτίου.

Προχωρώντας στα σχήματα που ακολουθούν θα παρουσιάσουμε μετρήσεις της μέσης κατανάλωσης ενέργειας που εστιάζουν σε περιπτώσεις όπου το εισερχόμενο φορτίο είναι μεγάλο και το δίκτυο κινείται στα όρια του κορεσμού και πέρα από ένα σημείο είναι σαφές ότι τα φτάνει. Επίσης θα μείνουμε σε σενάρια στα οποία οι ροές δεν αλληλεπιδρούν καθώς εκεί παρατηρήθηκε η πιο σταθερή συμπεριφορά (όταν

χρησιμοποιείται DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης) και κατά συνέπεια οι συγκρίσεις είναι πιο αντικειμενικές.

Σχήμα 6- 39. Μέση καταναλισκόμενη ενέργεια θεωρώντας 4 μη αλληλεπιδρούσες ροές σε στατικό δίκτυο που χρησιμοποιεί DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Σχήμα 6- 40. Μέση καταναλισκόμενη ενέργεια θεωρώντας 5 μη αλληλεπιδρούσες ροές σε στατικό δίκτυο που χρησιμοποιεί DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Σε δίκτυο όπου δεν χρησιμοποιείται το προτεινόμενο πλαίσιο η αύξηση των ροών από 4 σε 5 πρακτικά γίνεται αντιληπτή από το γεγονός ότι το δίκτυο φτάνει το σημείο κορεσμού πολύ πιο γρήγορα. Συγκεκριμένα είναι φανερό ότι και στις δύο περιπτώσεις το σημείο αυτό είναι λίγο πάνω από τα 60 Joules. Στην περίπτωση των 4 ροών η κατανάλωση φτάνει τα όρια αυτά όταν το φορτίο είναι 150 Kbps ανά ροή ενώ με 5 ταυτόχρονες ροές το συγκεκριμένο επίπεδο κατανάλωσης μετριέται από τα 100Kbps ανά ροή. Περνώντας στην ανάλυση των γραφικών που αφορούν το

προτεινόμενο πλαίσιο παρατηρούμε καταρχήν ότι τα αντίστοιχα επίπεδα κορεσμού στις μετρήσεις μέσης κατανάλωσης είναι περίπου στο 50%. Και εδώ το όριο αυτό επέρχεται πιο νωρίς (σε κλίμακα φορτίο ανά ροή) όταν θεωρούμε 5 ροές σε σχέση με τις 4. Επίσης πολύ σημαντικό είναι να αναλυθεί η πτώση της κατανάλωσης ενέργειας που παρατηρείται στο Σχήμα 6- 40 για φορτία 200Kbps/ροή και άνω. Η σημαντική μείωση της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας που παρατηρείται σε μέρος των διαμορφώσεων που χρησιμοποιήσαμε είναι αρνητικό σημείο και καταδεικνύει αστάθεια στη συμπεριφορά του δικτύου. Πρακτικά η τόσο χαμηλή κατανάλωση οφείλεται στο ότι πολύ λίγα πακέτα μεταδόθηκαν επιτυχώς. Αυτό άλλωστε έρχεται σε συμφωνία με το Σχήμα 6- 38 στο οποίο παρουσιάζονται τα ποσοστά χαμένων πακέτων στις ίδιες συνθήκες εξομοίωσης και όπως μπορεί να παρατηρηθεί και εκεί στα υψηλά φορτία τα ποσοστά χαμένων πακέτων είναι μάλλον υψηλά. Στην περίπτωση των 4 ροών όμως και εδώ παρατηρείται μια σταθερά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας η οποία μάλιστα ακολουθείται από μια ομοιόμορφη συμπεριφορά ανεξάρτητα την ακριβή διαμόρφωση του πλαισίου.

Εκεί όμως όπου η αστάθεια στη συμπεριφορά του δικτύου «κοστίζει» περισσότερο είναι στη ικανότητα διαμεταγωγής των πακέτων. Στις μετρήσεις αυτές δύο είναι οι παράγοντες που αποδειχθήκαν καθοριστικοί για το αν θα υπάρξει μείωση/αύξηση στη ικανότητα μεταφοράς δεδομένων και σε τι βαθμό. Βασικότερος αποδείχθηκε η τοπολογία των ροών. Όπως και στα προηγούμενα μεγέθη το DSR φαίνεται να παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες όταν οι διαδρομές των ροών διασταυρώνονται, αυτό με τη σειρά το επηρεάζει σημαντικά και τη συμπεριφορά του πλαισίου και ο λόγος θα αναλυθεί παρακάτω. Κατά δεύτερον είναι η διαμόρφωση που επιλέγεται. Ειδικά δε στις «κακές» περιπτώσεις αλληλεπιδρώντων ροών παρατηρήθηκε ότι ανάλογα με τη διαμόρφωση το πλαίσιο μπορεί να αποδώσει πολύ καλά, μέτρια ή ακόμα και απογοητευτικά. Και για τις μετρήσεις αυτές θα δείξουμε μερικές ενδεικτικές μετρήσεις καθώς οι παρουσιάσεις όλων θα απαιτούσε ιδιαίτερα μεγάλο χώρο.

Για να είναι η σύγκριση όσο πιο αντικειμενική γίνεται και η σημασία των παραπάνω παραμέτρων όσο πιο σαφής γίνεται επιλέξαμε καταρχήν οι μετρήσεις να αναφέρονται σε ίδιες περιπτώσεις αριθμού ταυτόχρονων ροών (παράμετρος πολύ σημαντική όπως έχει φανεί και από προηγούμενες αναλύσεις). Επιπλέον σε κάθε περίπτωση το φορτίο ανά ροή χαρακτηρίζεται υψηλό καθώς σε τέτοιες συνθήκες το εκάστοτε δίκτυο φτάνει τα λειτουργικά του όρια και επομένως τότε εμφανίζονται χαρακτηριστικά

κορεσμού ή αστάθειας στην λειτουργία και απόδοση αυτού. Στο Σχήμα 6- 41 βλέπουμε το σενάριο όπου οι διαδρομές των ροών δεν διασταυρώνονται και είναι φανερό ότι αποτελεί μια περίπτωση όπου η εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου είναι ιδιαίτερος ευεργετική. Η πρώτη σημαντική παρατήρηση είναι ότι σε καμία διαμόρφωση δεν υπήρξε μείωση στην συνολική ικανότητα διαμεταγωγής πακέτων από το δίκτυο. Αντιθέτως στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή ενισχύθηκε σημαντικά όπως στις διαμορφώσεις 15_15 και 45_45 (αύξηση ~50Kbps) αλλά και ακόμα περισσότερο στις περιπτώσεις 30_45, 30_30 (αύξηση ~100Kbps). Το δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ανά ροή δικαιοσύνη η οποία εκφράζεται από το ποσοστό του κάθε χρώματος σε μία στήλη για τις διάφορες περιπτώσεις διαμόρφωσης.

Σχήμα 6- 41. Μέση ικανότητα διαμεταγωγής θεωρώντας 4 ταυτόχρονες μη αλληλεπιδρούσες ροές σε στατική τοπολογία και DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Το χαρακτηριστικό αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς συνδέεται άμεσα με τις ικανότητες ποιότητας υπηρεσιών του δικτύου. Επιπλέον όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο σημείο το πλαίσιο που προτείνουμε σκοπό έχει να μην επηρεάσει αυτά τα χαρακτηριστικά των δικτύων που εξετάζουμε, τουλάχιστον στην παρούσα φάση καθώς είναι στις μελλοντικές προθέσεις να επεκταθεί η προσπάθεια και προς την κατεύθυνση αυτή.

Αντίθετα από το Σχήμα 6- 41 στο Σχήμα 6- 42 βλέπουμε μια κακή συμπεριφορά τόσο του δικτύου αυτού καθαυτού όσο και υπό την επίδραση του προτεινόμενου πλαισίου.

Η κακή συμπεριφορά του δικτύου καταδεικνύεται από την άνιση κατανομή των μερών της στήλης του χωρίς το προτεινόμενο πλαίσιο δικτύου.

Σχήμα 6- 42. Μέση ικανότητα διαμεταγωγής θεωρώντας 4 αλληλεπιδρούσες ροές σε στατική τοπολογία και DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Από εκεί και έπειτα είναι φανερό ότι για 3 διαμορφώσεις η συμπεριφορά του δικτύου είναι απογοητευτική. Για δύο μπορεί να χαρακτηριστεί ανεκτή για ορισμένες εφαρμογές (10_15, 45_45) ενώ μόνο σε μια διαμόρφωση (15_15) το δίκτυο σαν σύνολο προσέγγισε την απόδοση του κλασσικού δικτύου. Το τελευταίο αρνητικό σημείο αστάθειας και μη ντετερμινιστικής συμπεριφοράς του δικτύου είναι τα ποσοστά της κάθε ροής σε σχέση με τη συνολική μέση διαμεταγωγή του δικτύου. Όπως είναι φανερό σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. 10_15, 30_45, 30_60) μια ροή καταλαμβάνει όλη τη διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού αφήνοντας τις υπόλοιπες να μεταδώσουν ελάχιστα (και πρακτικά μη αποδεκτά από πραγματικές εφαρμογές) πακέτα ανά δευτερόλεπτο. Πραγματικά η συμπεριφορά ως προς αυτή τη παράμετρο είναι εντελώς δυναμική και απρόβλεπτη στοιχείο αρνητικό όταν σε πολλές σημερινές εφαρμογές είναι κρίσιμης σημασίας η εγγυημένη συμπεριφοράς και απόδοση του δικτύου έστω και σε εύρος περιπτώσεων.

Σαν κλείσιμο της ανάλυσης των εξομοιώσεων θεωρώντας DSR πρωτόκολλο δρομολόγησης τα παρακάτω γενικά σχόλια μπορούν να γίνουν. Καταρχήν η χρήση του DSR αποδεικνύει ότι η αντιμετώπιση της απώλειας ενός πακέτου πρέπει να διαφέρει ή να προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος του πακέτου. Όπως δεικνύεται και στην [95] λόγω της τάσης του εν λόγω πρωτοκόλλου να πλημμυρίζει το δίκτυο με

πακέτα δρομολόγησης το μεγαλύτερο ποσοστό των χαμένων πακέτων είναι δρομολόγησης το οποίο είναι δυσανάλογο με το πραγματικό επίπεδο συμφόρησης που έχει αναπτυχθεί. Άρα ο τρόπος αντίδρασης σε μια απώλεια πακέτου δρομολόγησης πρέπει να διαφέρει από ότι σε μια απώλεια ενός άλλου είδους πακέτου. Δεδομένου ότι στη παρούσα μελέτη όλες οι απώλειες αντιμετωπίζοντας κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο είναι σαφές ότι πολλές φορές υπήρξε υπερβολική ή και εσφαλμένη μείωση του ρυθμού μετάδοσης το οποίο οδηγεί σε κακή και ασταθή απόδοση το υπό μελέτη δίκτυο. Μια τέτοια μέριμνα μπορεί να γίνει εισάγοντας βάρη αλλά χρειάζεται μελέτη και προσεκτική επιλογή και είναι επίσης στα μελλοντικά σχέδιά μας.

Επίσης μια άλλη αντιμετώπιση του φαινομένου είναι η ύπαρξη ενός κάτω ορίου στο ρυθμό μετάδοσης. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατόν να υπάρξει σαφής ωφέλεια σε διάφορα μεγέθη όπως καθυστέρηση, κατανάλωση κ.α. ενώ παράλληλα να περιοριστεί κάποια πιθανή υπερβολική μείωση στη ικανότητα διαμεταγωγής. Επιπλέον σε διαστήματα καταιγιστικών λαθών (χρονικά διαστήματα με ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς απωλειών που όμως δεν αντιπροσωπεύουν την εν γένει και συνολική εικόνα του δικτύου) θα περιοριζόταν η υπερβολική και μάλλον χωρίς λόγο μείωση του ρυθμού μετάδοσης και κατά συνέπεια θα είναι πιο εύκολη η ανάκαμψη μετά το χρονικό αυτό διάστημα υψηλού ρυθμού λαθών.

6.6. Ανακεφαλαίωση

Αναμφισβήτητα η αξιολόγηση και εκτίμηση της απόδοσης μιας σχεδίασης αποτελεί σημαντικό κομμάτι σε οποιαδήποτε εργασία. Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα μιας διεξοδικής αξιολόγησης της προτεινόμενης σχεδίασης. Η υλοποίηση της σχεδίασης έγινε σε ένα πολύ γνωστό και έγκυρο εξομοιωτικό περιβάλλον. Το περιβάλλον αυτό (εξομοιωτής δικτύων NS2) εστιάζει στα ασύρματα δίκτυα, περιλαμβάνει όλα τα επίπεδα που μας ενδιαφέρουν και η εγκυρότητά του αποδεικνύεται από το ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος ερευνητικών εργασιών και προγραμμάτων στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί.

Θέλοντας η αξιολόγηση να είναι όσο πιο αντικειμενική και αντιπροσωπευτική γίνεται οι τιμές ενός σημαντικού εύρους παραμέτρων μεταβάλλονταν έτσι ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι πιθανές δικτυακές συνθήκες στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

Αποτέλεσμα, βέβαια, αυτού ήταν να καταλήξουμε με έναν πολύ μεγάλο αριθμό εξομοιώσεων και μετρήσεων η διαχείριση και μόνο των οποίων αποτέλεσε μια απαιτητική διαδικασία.

Μέσα από τις μετρήσεις καταδεικνύεται ότι το πλαίσιο που ανεπτύχθη μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση στις συγκεκριμένες περιοχές που μας ενδιαφέρουν όπως καθυστέρηση μετάδοσης, κατανάλωση ενέργειας και ποσοστό χαμένων πακέτων. Ενώ ανάλογα και με τη διαμόρφωση λειτουργίας του, οι επιπτώσεις στις ικανότητα διαμεταγωγής να κυμαίνονται από αποδεκτές μέχρι πολύ θετικές καθώς σε πολλές περιπτώσεις (ειδικά έντονης συμφόρησης) και σε αυτό το τομέα παρατηρήθηκε βελτίωση. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση με την οποία έγινε η παρουσίαση το AODV πρωτόκολλο δρομολόγησης χάρη στην σταθερότητά του και καλή απόδοσή του συνεργάζεται καλύτερα με το πλαίσιο. Πράγματι παρατηρήθηκε πολύ καλή διαχείριση των συνθηκών συμφόρησης και η βελτίωση σε πολλές περίπτωση είναι εντυπωσιακή. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι όσο πιο έντονες είναι οι συνθήκες αυτές τόσο η βελτίωση που παρέχει το πλαίσιο είναι πιο φανερή. Αντίθετα σε συνθήκες ηρεμίας όπου το δίκτυο έχει την απαραίτητη χωρητικότητα το πλαίσιο δεν επεμβαίνει και η μεταφορά εξελίσσεται χωρίς παρεμβάσεις. Επίσης, κατέστη φανερό ότι συνθήκες συμφόρησης οφειλόμενες σε αλληλεπιδρούσες ροές είναι πιο δύσκολα διαχειρίσιμες από ότι συνθήκες που οφείλονται μόνο σε αυξημένο φορτίο. Επίσης και σε τοπολογίες με κινούμενους κόμβους το πλαίσιο προσέδωσε σημαντικά βελτιωμένες επιδόσεις με άμεσο αντίκτυπο στην ικανότητα επικοινωνίας πραγματικού χρόνου (κυρίως ελαστικού πραγματικού χρόνου), στην διάρκεια ζωής κόμβου και δικτύου γενικότερα αλλά σε αρκετές περιπτώσεις και δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν οι μετρήσεις υπό τη χρήση του DSR πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Η έντονη επικοινωνιακή κίνηση που επιφέρει το συγκεκριμένο πρωτόκολλο και η ασταθής μερικές φορές συμπεριφορά του σε σχέση με το AODV δυσκολεύουν την όποια προσπάθεια ελέγχου της απόδοσης του δικτύου. Και με τη χρήση του πλαισίου η αστάθεια, κυρίως, ήταν ορατή. Αλλά και πάλι επιλέγοντας κατάλληλη διαμόρφωση λειτουργίας τα οφέλη από την χρήση του είναι σημαντικά. Ειδικά δε με τη χρήση του DSR το οποίο παρουσίασε δυσκολίες υπό τη παρουσία έντονης συμφόρησης μια cross-layer αρχιτεκτονική σαν τα προτεινόμενο πλαίσιο και κατάλληλη χρήση αυτής έχει πολλά να προσφέρει.

7. Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές Προεκτάσεις

7.1.Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Χωρίς αμφιβολία τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν το παρόν και το μέλλον του χώρου των δικτύων τόσο στη βιομηχανία, στις εμπορικές εφαρμογές όσο και στην έρευνα, ο οποίος είναι άλλωστε και ο χώρος όπου εστιάζει η παρούσα διατριβή. Τα πλεονεκτήματα και οι λόγοι μετάβασης από τις ενσύρματες στις αντίστοιχες ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης είναι αναρίθμητοι με μερικούς από αυτούς να είναι: η ελαχιστοποίηση του απαραίτητου εξοπλισμού καθώς και της συντήρησης αυτού, η ευκολία εγκατάστασης και χρήσης, η κινητικότητα, η ανάπτυξη σε χώρους όπου συμβατικές λύσεις αδυνατούν, το άνοιγμα νέων αγορών και εφαρμογών. Επιπλέον η κατηγοριοποίηση με βασικό μέτρο σύγκρισης την περιοχή κάλυψης δημιουργεί ένα μεγάλο εύρος ειδών δικτύων ικανών να καλύψουν ιδιαίτερα μεγάλο εύρος αναγκών και εφαρμογών.

Τα τελευταία δε χρόνια έχει δοθεί έμφαση σε μια υποκατηγορία ασύρματων δικτύων η οποία χαρακτηρίζεται από τον όρο “ad-hoc” ή σε ελληνική ορολογία τα δίκτυα αυτά θα χαρακτηρίζονταν ως “αυτό-οργανώμενα” ή “χωρίς υποδομή ασύρματα δίκτυα”. Πρακτικά αναφερόμαστε σε δίκτυα οι κόμβοι των οποίων εμπεριέχουν όλη την απαραίτητη ευφυΐα ώστε με την ενεργοποίησή τους (και δεδομένου ότι στο χώρο δεν υπάρχει καμία προεγκατεστημένη δικτυακή υποδομή) να αναγνωρίσουν την ύπαρξη συσκευών με τις οποίες μπορούν να επικοινωνήσουν και να δημιουργήσουν δρόμους επικοινωνίας με αυτές και κατ’ επέκταση δίκτυα επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων. Οι προοπτικές μιας τέτοιας προσέγγισης είναι πολύ μεγάλες και συνεπικουρούνται από την βιομηχανία και το γεγονός ότι δυνατότητα ad-hoc ασύρματης δικτύωσης μπορούμε πλέον να συναντήσουμε σε έναν υπολογιστή παλάμης (PDA) ή ακόμα και σε ένα κινητό τηλέφωνο. Άλλωστε δύο συναφείς αν και διακριτές ερευνητικές περιοχές έχουν αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια με αυτά τα χαρακτηριστικά : τα Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) αλλά και τα δίκτυα αισθητήρων τα οποία όμως εστιάζουν σε σαφή λειτουργικά χαρακτηριστικά και

κόμβους με μεγαλύτερους περιορισμούς. Η παρούσα διατριβή εστιάζει στο χώρο αυτό και για το λόγο αυτό γίνεται λεπτομερής μελέτη των χαρακτηριστικών, μέτρων απόδοσης, πλεονεκτημάτων, μειονεκτημάτων αλλά και εργαλείων ανάπτυξης και μελέτης τέτοιων δικτύων.

Έννοια κλειδί στην έρευνα που έγινε στα πλαίσια της διατριβής αυτής αποτέλεσε η cross-layer (διαστρωματική) προσέγγιση σχεδίασης. Η βασική ιδέα προέρχεται από την διαπίστωση ότι η διαστρωμάτωση που ορίζεται από το γνωστό μοντέλο αναφοράς OSI/ISO RF σε πολλές περιπτώσεις λειτουργεί σαν τροχοπέδη στην περαιτέρω εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων. Το μοντέλο αυτό αποτέλεσε και αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο στην εξέλιξη των ενσύρματων δικτύων και φυσιολογικά υιοθετήθηκε και από την πλευρά των ασυρμάτων. Εκεί όμως οι συνθήκες και οι σχέσεις είναι πολύ πιο δυναμικές και πολύ σύνθετες. Έτσι λοιπόν αν και πολύ σημαντική ερευνητική εργασία έχει παρουσιαστεί σε όλα τα επίπεδα κάτω από την προσέγγιση του μοντέλου αυτού, τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν οι προσπάθειες που υποστηρίζουν ότι πολλά και σημαντικά χαρακτηριστικά στην λειτουργία των ασύρματων δικτύων παραλείπονται και δεν αναδεικνύονται όταν υπάρχει εστίαση σε ένα μόνο επίπεδο παραβλέποντας την αλληλεπίδραση, αλληλεξάρτηση και συνεργασία που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα σε γειτονικά και όχι μόνο επίπεδα. Μεγάλο και βασικότατο μέρος της διατριβής αυτής είναι η μελέτη της προσέγγισης αυτής και η αξιολόγηση της ισχύος των αιτιάσεών της.

Για να γίνει κάτι τέτοιο μελετήθηκαν διεξοδικά όλα τα επίπεδα που προδιαγράφει το μοντέλο. Έμφαση δόθηκε όμως σε μερικά που επηρεάζουν καθοριστικά την απόδοση ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου και αυτά είναι: επίπεδο εφαρμογής, δικτύου, δρομολόγησης και προσπέλασης μέσου. Μέσα από πολυάριθμες εξομοιώσεις και λεπτομερή μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η αλληλεπίδραση και αλληλεξάρτηση μεταξύ διαφόρων επιπέδων και πρωτοκόλλων είναι ιδιαίτερος ισχυρή, και μόνο λαμβάνοντας υπ' όψην μας αυτά τα δεδομένα μπορούν να σχεδιαστούν νέα πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές γενικότερα που να προσφέρουν σημαντική βελτίωση στην απόδοση. Τα κυριότερα οφέλη που μπορεί να παράσχει η προσέγγιση αυτή σε μια σχεδίαση είναι:

- Αντιμετώπιση ενός προβλήματος ή ενός παράγοντα απόδοσης σε πολλαπλά επίπεδα και άρα υψηλότερο βαθμό βελτιστοποίησης

- Εντοπισμός και αντιμετώπιση αλληλοσυγκρουόμενων στόχων. Βασική παρενέργεια όταν βελτιστοποιείται ένα επίπεδο απομονωμένα είναι η επίδραση αυτού σε ένα άλλο επίπεδο η οποία πολλές φορές είναι και αρνητική οπότε το γενικότερο αποτέλεσμα είναι μειωμένης αξίας ή ακόμα χειρότερο του αρχικού.
- Συνεργασία μεταξύ επιπέδων. Πολλές φορές είναι χρήσιμο ένα επίπεδο να έχει πληροφορίες και δεδομένα για την κατάσταση του δικτύου ή γενικότερα από άλλα επίπεδα.
- Οι κόμβοι που αποτελούν τα δίκτυα στα οποία αναφερόμαστε συνήθως έχουν αυστηρούς περιορισμούς σε πόρους όπως επεξεργαστική ισχύς, διαθέσιμη μνήμη κ.α. Κατά συνέπεια είναι κρίσιμης σημασίας να εντοπίζονται τμήματα του δικτυακού σωρού (network stack) τα οποία δεν προσφέρουν τίποτα και να απομακρύνονται.

Κύριοι τομείς που προκύπτει ότι μπορούν να επωφεληθούν από σχεδιάσεις που ενστερνίζονται την cross-layer προσέγγιση και στις οποίες εστίασε η διατριβή είναι:

- Κατανάλωση ενέργειας
- Διατήρηση συγκεκριμένου επιπέδου παροχή υπηρεσιών (QoS)
- Βέλτιστη διαχείριση του διαθέσιμου εύρους καναλιού
- Καθυστέρηση μετάδοσης. Όπως σε όλα τα ασύρματα δίκτυα Αχίλλειος πτέρνα αποτελεί η εγγυημένη χρονικά συμπεριφορά. Πολλές εφαρμογές περιλαμβάνουν επικοινωνίες οι οποίες υπόκεινται σε χρονικούς περιορισμούς, άλλες φορές αυστηρούς και άλλες πιο χαλαρούς. Η ικανότητα ικανοποίησης αυστηρών χρονικών περιορισμών συνήθως εκτιμάται από την μέγιστη καθυστέρηση που παρατηρείται ενώ οι πιο χαλαροί περιορισμοί από την μέση καθυστέρηση καθώς υπάρχει πάντα ένα ποσοστό που είναι ανεκτό να ξεπεράσει τα δοθέντα όρια. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η δυναμική συμπεριφορά των ασύρματων δικτύων και πολύ περισσότερο των ad-hoc δεν επιτρέπει τη χρήση τους όταν υπάρχουν αυστηροί χρονικοί περιορισμοί. Κάτι τέτοιο αποδεικνύεται και στην παρούσα διατριβή. Εντούτοις υπό συνθήκες

(κατάλληλη cross-layer σχεδίαση) είναι η δυνατή η ικανοποίηση όχι αυστηρών χρονικών απαιτήσεων.

Επιπλέον κυρίαρχο μέρος της διατριβής καταλαμβάνει η σχεδίαση και παρουσίαση μια τέτοιας αρχιτεκτονικής. Βασικός στόχος της σχεδίασης είναι να καταδείξει πως μπορεί η προσέγγιση να προσφέρει σημαντικά οφέλη σε διάφορους τομείς απόδοσης αλλά παράλληλα να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω εξέλιξη ή προέκταση προς άλλες κατευθύνσεις. Στόχος μας λοιπόν ήταν η σχεδίαση μιας αρχιτεκτονικής βάσης η οποία θα έχει την απαιτούμενη ευελιξία για περαιτέρω εξέλιξη. Από τους τρεις τρόπους υλοποίησης μιας cross-layer σχεδίασης επιλέξαμε την δημιουργία ενός πλαισίου το οποίο επικοινωνώντας με τα κατάλληλα επίπεδα θα υλοποιήσουν τους αλγορίθμους που θα συναποτελούσαν την προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς μας παρείχε πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Αποφυγή συνθηκών μη συμβατότητας με διάφορα πρωτόκολλα και standards.
- Ελαχιστοποίηση του overhead πολυπλοκότητας.
- Ευελιξία.
- Δυνατότητα συνεργασίας κόμβων που δεν ενσωματώνουν τη προτεινόμενη σχεδίαση με κόμβους που την ενσωματώνουν.

Η προτεινόμενη σχεδίαση μπορεί να χωριστεί σε τρία κύρια μέρη

- Το πρώτο αφορά την ικανότητα ενός κόμβου να αντιλαμβάνεται την ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης ή ανταγωνισμού στην περιοχή του. Το μέσο μιας τέτοιας εκτίμησης είναι τα χαμένα πακέτα.
- Το δεύτερο είναι η ικανότητα ειδοποίησης των κόμβων οι οποίοι δημιουργούν πακέτα που περνάνε από ένα τέτοιο κόμβο για την ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης. Πρέπει να έχουμε κατά νου ότι αφού αναφερόμαστε σε ασύρματα δίκτυα στα οποία τα πακέτα δέχονται πολλαπλές προωθήσεις για να φτάσουν στον προορισμό τους αυτή είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία και περιλαμβάνει τη διατήρηση ενημερωμένων πινάκων. Επίσης σαφείς κανόνες για το πότε οι συνθήκες συμφόρησης ξεπερνάνε το όριο είναι επίσης σημαντικοί.

- Το τρίτο αφορά την δυνατότητα διαχείρισης του ρυθμού δημιουργίας πακέτων από την εφαρμογή σε περίπτωση ενημέρωσης για ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης.

Η υλοποίηση της σχεδίασης έγινε στα πλαίσια ενός πολύ γνωστού και ευρέως χρησιμοποιούμενου εξομοιωτή, του NS2. Η εκτίμηση της απόδοσης της προτεινόμενης σχεδίασης έγινε μέσα από μεγάλο πλήθος εξομοιώσεων μεταβάλλοντας κρίσιμες παραμέτρους ενός δικτύου και μετρώντας σημαντικά μεγέθη απόδοσης όπως καθυστερήσεις μετάδοσης, κατανάλωση ενέργειας, ποσοστά χαμένων πακέτων και φυσικά τη μέση διαμεταγωγή του δικτύου.

Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο και αποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη σχεδίαση προσφέρει σημαντικά οφέλη σε όλους τους τομείς. Επίσης όπως ήταν και ο στόχος όσο πιο έντονες είναι οι συνθήκες ανάπτυξης συμφόρησης τόσο μεγαλύτερη είναι η βελτίωση που παρέχει. Οι κύριοι μεταβαλλόμενοι παράμετροι περιλαμβάνουν: αριθμό ταυτόχρονων ροών αλληλεπιδρώντων και μη, μεταβαλλόμενο φορτίο ανά ροή, διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, στατική και κινητή τοπολογία κ.α.

Υπό αυτές τις συνθήκες μεγάλη ήταν η μείωση στις μετρήσεις καθυστέρησης τόσο μέγιστης όσο και μέσης. Όπως έχει αναφερθεί κάτι τέτοιο υποδηλώνει μεγάλη βελτίωση στην ικανότητα ικανοποίησης επικοινωνιών με χρονικούς περιορισμούς. Η επικοινωνία αυστηρού πραγματικού χρόνου όπως είναι γνωστή στη βιομηχανία ίσως είναι ανέφικτη ακόμα, αλλά σίγουρα, ελαστικός πραγματικός χρόνος όπως υπαγορεύεται από πλειάδα καθημερινών εφαρμογών είναι εφικτός σε πολλές περιπτώσεις υπό τη βοήθεια σχεδιάσεων όπως αυτή που προτείνεται στην παρούσα διατριβή.

Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί τη συνεχή επιδίωξη μεγάλου μέρους της ερευνητικής κοινότητας. Αυτή πέρα από το ότι η ίδια αποτελεί κρίσιμο μέγεθος εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία ενός δικτύου από πολλές πλευρές αποφεύγοντας φαινόμενα κατάτμησης κ.α. Και εδώ η προτεινόμενη σχεδίαση παρουσίασε σημαντική μείωση τόσο στη μέση όσο και στη μέγιστη παρατηρούμενη κατανάλωση. Έτσι λοιπόν με τη χρήση μιας τέτοιας προσέγγισης κανείς μπορεί να περιμένει τόσο αύξηση του αναμενόμενου χρόνου ζωής του δικτύου όσο και το διαστήματος χωρίς κατατμήσεις αλλά και δημιουργία σημείων συμφόρησης.

Όλα αυτά βέβαια αναλύονται σε σχέση με την επίπτωση που υπάρχει στην μετρούμενη ικανότητα διαμεταγωγής της πληροφορίας. Εδώ παρατηρήθηκε ότι αν η μείωση αυτή μπορεί να ελεγχθεί με κατάλληλη επιλογή διαμόρφωσης του πλαισίου και είναι πάντα πολύ μικρή θα είναι σίγουρα αποδεκτή λόγω των ωφελειών σε όλους τους άλλους τομείς. Μη ξεχνάμε ότι βελτίωση στον τομέα της διαμεταγωγής δεν είναι στους στόχους της σχεδίασης. Εκεί όμως είχαμε και την επόμενη ευχάριστη έκπληξη. Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά σε συνθήκες υψηλής συμφόρησης, παρατηρήθηκε ότι όχι μόνο δεν υπήρξε μείωση αλλά αντίθετα μετρήθηκε αύξηση στην ικανότητα μεταφοράς δεδομένων. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο ότι όταν το δίκτυο βρίσκεται βαθιά στον κορεσμό, μέρος των πακέτων που θα μπορούσε πρακτικά να εξυπηρετήσει χάνονται στη προσπάθεια διαχείρισης των συνθηκών συμφόρησης. Χαλαρώνοντας τις συνθήκες αυτές η σχεδίασή μας επέτρεψε στο ανενεργό κομμάτι να ξαναχρησιμοποιηθεί από το δίκτυο.

Εν γένη, λοιπόν, η σχεδίαση απέδωσε πολύ καλά και σε συνδυασμό με τις μελλοντικές προεκτάσεις που θα παρουσιάσουμε αμέσως μετά είναι μια προσπάθεια που μπορεί να αποδώσει ακόμα περισσότερο.

7.2.Μελλοντικές Κατευθύνσεις.

Με βάση τις αναλύσεις και παρατηρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορα σημεία της παρούσας διατριβής η προσπάθεια αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί προς τις ακόλουθες κατευθύνσεις και σε μερικές επεκτάσεις που αποτελούν τρέχουσες εργασίες.

Η υλοποίηση και εκτίμηση της απόδοσης της προτεινόμενης σχεδίασης βασίστηκε σε έναν αναγνωρισμένης αξίας και εγκυρότητας εξομοιωτή. Ενδιαφέρον θα είχε η υλοποίηση της πρότασης σε μια πλατφόρμα ανάπτυξης αρχιτεκτονικών για ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε ένα πλήθος κατάλληλων λύσεων διαθέσιμων στο εμπόριο.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης αποτελεί κύρια παράμετρο της απόδοσης ενός τέτοιου δικτύου και κατά συνέπεια ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μεγαλύτερη εμπλοκή του σε

μια cross-layer σχεδίαση βασισμένη στην παρούσα εργασία. Για παράδειγμα, επί του παρόντος γίνεται προσπάθεια να σχεδιαστεί κατάλληλος μηχανισμός ο οποίος σαν αντίδραση σε ενημέρωση για ανάπτυξη συνθηκών συμφόρησης να δίδει εντολή στο πρωτόκολλο δρομολόγησης και να βρίσκει διαδρομή που να μη περιλαμβάνει τον κόμβο (ή κόμβους) στην επίμαχη περιοχή.

Η δυνατότητα υποστήριξης διαφοροποιημένου QoS αποτελεί επίσης σημαντική κατεύθυνση. Στις σημερινές εφαρμογές οι ταυτόχρονες ροές προέρχονται από διαφορετικές εφαρμογές οι οποίες απαιτούν και διαφορετικό επίπεδο υπηρεσιών. Κατά συνέπεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν βάρη τα οποία να καθορίζουν διαφορετική αντιμετώπιση της κατάστασης ανάπτυξης συμφόρησης ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής διεξείχθη μελέτη για τη σχέση ανάμεσα στο πλήθος των γεγονότων απώλειας πακέτων, το είδος των πακέτων και τις συνέπειες της απώλειας ενός πακέτου ανάλογα με το είδος του. Τα συμπεράσματα ήταν πολύ ενδιαφέροντα [95] και σίγουρα δικαιολογούν την προσπάθεια ενσωμάτωσής τους στην σχεδίαση που παρουσιάζουμε εδώ. Συγκεκριμένα είναι σαφές ότι κάθε απώλεια πακέτου δεν πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη με τον ίδιο τρόπο ανεξάρτητα του είδους του πακέτου αλλά και άλλων συνθηκών του δικτύου.

Μια τέτοια προσπάθεια απαιτεί και την αναλυτική μελέτη ενός τέτοιου δικτύου το οποίο αποτελεί από μόνο του μια ενδιαφέρουσα και απαιτητική προέκταση.

Τέλος μια κατεύθυνση που συγκεντρώνει μεγάλη προσοχή από την ερευνητική κοινότητα είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του χώρου (spatial reuse). Η βασική ιδέα είναι ότι λόγω των υπάρχοντων πρωτοκόλλων και ειδικά του MAC πολλές επικοινωνίες εμποδίζονται επειδή άλλες επικοινωνίες συμβαίνουν την ίδια στιγμή αλλά αρκετά μακριά ώστε να μη υπάρχει πρόβλημα να διεξαχθούν και οι δύο χωρίς πρόβλημα. Η cross-layer προσέγγιση μπορεί να δώσει τα απαραίτητα εργαλεία ώστε να υλοποιηθεί ένα αποδοτικό spatial reuse σύστημα.

8. Αναφορές

- [1] P. Mohaparta, S. Krishnamurthy, "AD HOC NETWORKS Technologies and Protocols", 2005 Springer Science + Business Media, Inc. eBook ISBN 0-387-22690-7
- [2] N. Pogkas, "Analysis design and development of self organized wireless networks based on embedded systems", PhD Thesis in Electrical and Computer Engineering, University of Patras Greece, 2006
- [3] S. Kumar, V. S. Raghavan, J. Deng, "Médium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey" Ad Hoc Networks, Elsevier 2006
- [4] N. Grumman, "RQ-4A GLOBAL HAWK UAV ACHIEVES MILITARY AIRWORTHINESS CERTIFICATION" Society of Flight Test Engineers, USA, Volume 37, number 2, February 2006
- [5] <http://www.loccatec.org/>
- [6] M. Mancuso, F. Bustaffa, "A Wireless Sensors Network for Monitoring Environmental Variables in a Tomato Greenhouse" 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, June 28-30, 2006, Torino, Italy
- [7] <http://www.uswn.eu>
- [8] <http://www.cs.unibo.it/bison/>
- [9] <http://www.embedded-wisents.org/>
- [10] <http://www.eyes.eu.org/>
- [11] M. Edrich, R. Schmalenberger, "Combined DSSS/FHSS approach to interference rejection and navigation support in UAV communications and control" IEEE 7th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2002
- [12] Marianne A. Azer, "Threshold Cryptography and Authentication in Ad Hoc Networks", 2nd IEEE International conference on Systems and Networks Communications (ICSNC) 2007
- [13] A. A. Pirzada, C. McDonald, "Kerberos Assisted Authentication in Mobile Ad-hoc Networks", 27th Australasian Computer Science Conference, University of Otago, Dunedin, New Zealand.
- [14] Eric Verheul, "Selecting secure passwords", RSA Security Conference Cryptographers' Track, 2007
- [15] Khalili, A., J. Katz, & Arbaugh, W.A. (2003) Toward Secure Key Distribution in Truly Ad-hoc Networks. 2003 IEEE Comput. Soc. SAINT 2003 Workshops) Orlando, FL, USA.
- [16] N. Pogas, G. Karastergios, Ch. Antonopoulos, S. Koubias, G. Papadopoulo, "An ad-hoc sensor network for disaster relief operations", 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Catania, Italy 19-22 September 2005.
- [17] Ch. Antonopoulos, S. Giannoulis, S. Koubias, I. Lyperopoulos, "The Effect of Power Consumption on the Real time Performance of Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks" 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Catania, Italy 19-22 September 2005.
- [18] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [19] O. Bonaventure, "Software Tools for Networking" IEEE Network, November/December 2004
- [20] <http://www.opnet.com/>
- [21] J. Shneidman et al., "Hourglass: An Infrastructure for Connecting Sensor Networks and Applications", Technical Report TR-21-04, Harvard University, Sept. 2004.

- [22] T. Gao et al., “Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network”, in Proc. IEEE EMBS’2005.
- [23] D. Myung et al., “Vital dust: Wireless sensors and a sensor network for real time patient monitoring”, in Proc. 8th Annual New England Regional Trauma Conference, 2002.
- [24] V.Shnayder, B.Chen, K.Lorincz, T. R. F. Fulford-Jones, M.Welsh “Sensor Networks for Medical Care”, Technical Report TR-08-05, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2005.
- [25] A.T. Campbell, et al. “Comparison of IP Micro-mobility Protocols”, IEEE Wireless Communication, February 2002
- [26] Z. Ush-Shamszaman et al., “A mobility Management Scheme in All-IP integrated Network” Parallel and Distributed Computing and Networks (PDCN), Innsbruck Austria, 2005
- [27] K. Mayer, W. Fritsche, “IP-enabled Wireless Sensor Networks and their integration into the Internet” InterSense ’06. Proceedings of the First International Conference on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks, May 30-May 31 2006, Nice, France, 2006 ACM.
- [28] V. C. Giruka, M. Singhal, “A Localized IP-address Auto-configuration Protocol for Wireless Ad-hoc Networks”, WMASH ’06, September 29, 2006, Los Angeles, California, USA 2006
- [29] G. Holland, N. Vaidya, “Analysis of TCP Performance over Mobile Ad Hoc Networks”, Wireless Networks 8, 275-288, 2002 Kluwer Academic Publisher
- [30] F. Anjum, L. Tassiulas, “On the Behavior of Different TCP Algorithms over a Wireless Channel with Correlated Packet Losses”, ACM SIGMETRICS ’99 5/99 Atlanta Georgia, USA
- [31] | Y. Gu, R. L. Grossman “Optimizing UDP-based Protocol Implementations”, 3rd International Workshop on Protocols for Fast Long-Distance Networks (PFLDNet), Lyon, France, February 2005
- [32] Cheng Jin et. al, “FAST TCP: From Theory to Experiments” IEEE Network, January/February 2005
- [33] C. Peng Fu, S. C. Liew, “TCP Veno: TCP Enhancement for Transmission Over Wireless Access Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 21 No. 2, February 2003
- [34] Yuan-Cheng Lai, Chang-Li Yao, “The Performance Comparison between TCP Reno and TCP Vegas”, IEEE 7th International Conference on Parallel and Distributed Systems, 4-7 July 2000
- [35] B. Sikdar, S. Kalyanaraman, K. S. Vastola, “Analytic Models for the Latency and Steady-State Throughput of TCP Tahoe, Reno, and SACK”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, N. 6 December 2003
- [36] S. Giannoulis, C. Antonopoulos, E. Topalis, A. Athanasopoulos, A. Prayati, S. Koubias, “TCP vs UDP performance evaluation for CBR traffic on Wireless Multihop Networks“, CSNDSP 2006, 5th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, Patras, Greece, 19-21 July 2006.
- [37] IEEE 802.11 WG, Reference number ISO/IEC 8802- 11:1999(E) IEEE Std 802.11, 1999 edition, International Standard [for] Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1999
- [38] D. Vassis, G. Kormentzas, A. Rouskas, I. Maglogiannis, “The IEEE 802.11g Standards for High Data Rate WLANs”, IEEE Network Journal, May/June 2005.
- [39] A. Grilo, M. Macedo, M. Nunes, “A Scheduling Algorithm for QoS support in IEEE 802.11e Networks”, IEEE Wireless Communications, June 2003
- [40] Ch. Antonopoulos, P. Chondros, A. Athanasopoulo, S. Koubias, “Comparative Performance Evaluation of 802.15.4 and 802.11b for Usage in Ad-Hoc Wireless Networks”, 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, June 28-30 2006, Torino, Italy

-
- [41] Ιωάννης Λυμπερόπουλος, “Σχεδίαση και εξομοίωση βιομηχανικής εφαρμογής με βάση πρότυπο ασύρματο τοπικό δίκτυο” Διπλωματική Εργασία στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστημίου Πατρών, Φεβρουάριος 2005
 - [42] A. Boukerche “Analysis of a Randomized Congestion Control Scheme with DSDV routing in ad Hoc Wireless Networks”, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Volume 61, Issue 7, July 2001
 - [43] D.B. Johnson, D. A. Maltz, Yih-Chun, “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks”, Internet Draft, MANET Working Group, draft-ietf-manet-dsr-10.txt, July 2004
 - [44] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das, “Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing”, Internet Draft, MANET Working Group, draft-ietf-manet-aodv-04.txt, October 2003
 - [45] Vee Liem Chee, Wei Chuen Yau, “Security Analysis of TORA Routing Protocol” *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2007*, Springer Berlin
 - [46] Vikas Kawadia, P.R. Kumar, “Principles and Protocols for Power Control in Wireless Ad Hoc Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, January 2005
 - [47] P. Mohapatras, J. Li, C. Gui, “QoS In Mobile Ad Hoc Networks”, *IEEE Wireless Communications*, June 2003
 - [48] Ιωάννης Λυμπερόπουλος, “Σχεδίαση και εξομοίωση βιομηχανικής εφαρμογής με βάση πρότυπο ασύρματο τοπικό δίκτυο” Διπλωματική Εργασία στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστημίου Πατρών, Φεβρουάριος 2005
 - [49] Olivier Bonaventure, “Software Tools for Networking”, *IEEE Network*, November/December 2004
 - [50] S-B Lee, G-S.Ahn, A.T. Cambel, “Improving UDP and TCP Performance in Mobile Ad Hoc etworks with INSIGNIA” *IEEE Communications Magazine*, June 2001
 - [51] Kai Chen, Samarth H.Shah, Klara Nahrstedt “Cross-layer design for data accessibility in mobile ad hoc networks” *Wireless Personal Communications* 21: 49-76, 2002
 - [52] W. Yuan, K. Nahrstedt, S. V. Adve, D. L. Jones, R. H. Kravets “Design and Evaluation of a cross-layer adaptation framework for mobile multimedia Systems” *SPIE/ACM Multimedia Computing and Networking Conference (MMCN)*, 2003
 - [53] A. Pitsillides, P. Ioannou, M. Letsas, L. Rossides “Adaptive Nonlinear Congestion Controller for a Differentiated-Services Framework” *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol. 13, No.1, February 2005
 - [54] M. Maimour, C.D. Pham “A Throughput Analysis of Reliable Multicast Protocols in an Active Networking Environment” 6th *IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2001
 - [55] A. Gotta et al. “An Analysis of TCP Startup over an Experimental DVF-RCS Platform” *International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC)*, Leganes, Spain, September 2006
 - [56] Hala Elaarag, “Improving TCP performance over mobile networks” *ACM Computing Surveys (CSUR)* Volume 34, Issue 3, September 2002
 - [57] W. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1, The Protocols*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1994.
 - [58] J. Ebihara, T. Kato, S. Itoh, “High Performance TCP Communication Over Mobile IP Handoff for Mobile Node Receiving Data Segments” *Communication Systems and Networks (CSN) 2004*, Marbella, Spain
 - [59] K.N. Srijith et al., “TCP Vegas-A: Improving the Performance of TCP Vegas” *Elsevier Computer Communications* 2005
 - [60] “Traffic Management Specification Version 4.0,” *ATM Forum, Tech. Rep. AF-TM-0056.000*, 1996.
 - [61] X. Lei, W. Jie “A Self-Adaptive Congestion Control Algorithm of ATM Networks” *IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada*, July 2005
 - [62] J. Yan, Q. Zhang, J. Li “Application-Rate Aware Congestion Control Algorithm for Video Streams” *Book: Information Networking. Advances in Data Communications and Wireless Networks*, SpringerLink 2006
-

- [63] Ji-C. Moon, B. Gi LEE “A Backward Congestion Notification Scheme for Mixed ECN-Capable and ECV-Incapable TCP Flows” IEICE Transactions on Communications 2006
- [64] Cheng-Yuan HO et al. “TCP-Ho: A Congestion Control Algorithm with Design and Performance Evaluation” IEICE Transactions on Communication, March 2007
- [65] K. Tsumura, “H2 Performance Limitation of Congestion Contrller for TCP/AQM Network Systems” 44th IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain, December 2005
- [66] Fabian Wirth, Robert Shorten, Mehmet Akar “State Dependent AIMD Algorithms and Consensus Problems” GAMM Annual Meeting 2006 - Berlin
- [67] X. Gao, L. J. Schulman “Feedback Control for Router Congestion Resolution” 24th Annual ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on Principles of Distributed Computing(PODC) 2005, July 2005, Nevada, USA
- [68] S. Tarbouriech et al. “Saturated Controller Design of an ABR Explicit Rate Algorithm for ATM Switches” Book chapter: Advances in Communication Control Networks, SpringerLink 2005
- [69] Franco Blanchini, “Robust rate control for integrated services packet networks” IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 10, 2002
- [70] S. Jagannathan, “Adaptive Predictive Congestion Control of High-Speed ATM Networks” IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, No2, June 2002
- [71] Roman Pleta et al. “PURPLE: Predictive Active Queue Management Utilizing Congestion Information” 28th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), October 2003, Bonn/Konigswinter Germany
- [72] C. Chrysostomou, A. Pitsillides, “Fuzzy Logic Congestion Control in TCP/IP Tandem Networks” 11th IEEE Symposium on Computers and Communicatio, June 2006, Sardinia, Italy
- [73] J. L. Su, “GPRS Congestion Control Algorithm Based on Fuzzy Kernel Neural Networks” 6th IEEE International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), October 2006, Jinan, China
- [74] A. Pitsillides and A. Sekercioglu, *Congestion Control in Computational Intelligence in Telecommunications Networks*, W. Pedrycz and A. V. Vasilakos, Eds. Cleveland, OH: CRC Press, 2000, pp. 109–158.
- [75] K. Bouyoucef, K. Khorasani, “Variable Structure-based Nonlinear Congestion Control for Networked Controlled Systems” International Conference, PhysCon 2005, Saint Petersburg, Russia
- [76] Mung Chiang, Steven Low “Optimization and Control of Communication Networks” ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2005
- [77] F. Paganini et al. “Congestion Control for High Performance, Stability and Fairness in general networks” IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), February 2005
- [78] I.A. Akyildiz, O. B. Akan, G. Morabito, “A Rate Control Scheme for Adaptive Real-Time Applications in IP Networks With Lossy Links and Long Round Trip Times”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 13, No. 3, June 2005
- [79] M. Krunz, Al. Muqattash, S-J. Lee, “Transmission Power Control in Wireless Ad Hoc Networks: Challenges, Solutions, and Open Issues”, IEEE Network Journal, September/October 2004
- [80] Saikat Ray, Jeffrey B. Carruthers, and David Starobinski, "RTS/CTS-induced congestion in ad-hoc wireless LANs," in IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC), March 2003, pp. 1516--1521
- [81] Y-C. Hu, D.B. Johnson, “Exploiting Congestion Information in Network and Higher Layer Protocols in Multihop Wireless Ad Hoc Networks”, ICDCS 2004
- [82] B. Hull, K. Jamieson, H. Balakrishnan, “Mitigating Congestion in Wireless Sensor Networks”, SenSys '04, November 3-5, 2004, Baltimore, Maryland, USA.

- [83] Mung Chiang, “Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks: Jointly Optimal Congestion Control and Power Control”, *IEEE Journal on Selected areas in communications*, Vol. 23, No. 1, January 2005
- [84] S. Cen, P. C. Cosman, G. M. Voelker, “End-to-End Differentiation of Congestion and Wireless Losses”, *IEEE/ACM Transactions On Networking*, Vol. 11, No. 5, October 2003
- [85] O. B. Akan, I.F. Akyildiz, “ARC: The Analytical Rate Control Scheme for Real-Time Traffic in Wireless Networks”, *IEEE/ACM Transactions On Networking*, Vol. 12, No. 4, August 2004.
- [86] G. Holland, N. Vaidya, P. Bahl, “A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks”, *ACM SIGMOBILE 7/2001*, Rome, Italy
- [87] O. Sharon, E. Altman, “An Efficient Polling MAC for Wireless LANs”, *IEEE/ACM Transactions On Networking*, Vol. 9, No. 4, August 2001
- [88] A. Muqattash, M. Krunz, “CDMA-Based MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks”, *MobiHoc '03*, June 1-3, 2003, Annapolis, Maryland, USA
- [89] S-T. Sheu, Y. Tsai, J. Chen, “MR²RP: The Multi-Rate and Multi-Range Routing Protocol for IEEE 802.11 Ad Hoc Wireless Networks”, *Wireless Networks* 9, 165-177, 2003
- [90] J-H. Chang, L. Tassiulas, “Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks”, *IEEE/ACM Transactions On Networking*, Vol. 12, No. 4, August 2004.
- [91] L. Blazevic, Silvia Giordano, J-Y. Le Boudec, “Self Organized Terminode Routing”, *Cluster Computing Volume 5 , Issue 2 (April 2002)*, Pages: 205 – 218, 2002 ISSN:1386-7857
- [92] S. Kunniyur, R. Srikant, “End-to-End Congestion Control Schemes: Utility Functions, Random Losses and ECN Marks”, *IEEE/ACM Transactions On Networking*, Vol. 11, No. 5, October 2003
- [93] E. Altman, K.E. Avrachenkov, B.J. Prabhu “Fairness in MIMD Congestion Control Algorithms” *IEEE INFOCOM 2005*
- [94] IEEE Standard, “802.16 IEEE Standard for Local and metropolitan area network, Part 16: Air Interface for fixed broadband wireless access systems” *IEEE Computer Society and IEEE Microwave Theory and Techniques Society*.
- [95] Ch. Antonopoulos, A. Athanasopoulos, S. Koubias, “A simulation study on dropping tendencies of an ad-hoc wireless network” *11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, September 20-22, 2006, Prague, Czech Republic
- [96] Y. Zhang, L. Cheng, “Cross-Layer Optimization for Sensor Networks” *3rd New York Metro Area Networking Workshop (NYMAN 2003)*
- [97] Rfieldbus IST- IST-1999-11316
- [98] J. Monks, V. Bharghavan, W. Hwu, “A Power Controlled Multiple Access protocol for wireless packet networks”, in: *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, April 2001.
- [99] M. L. Sichitiu, “Cross-layer Scheduling for Power Efficiency in Wireless Sensor Networks”, *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*
- [100] S. Bandyopadhyay, K. Hasuike, S. Horisawa, S. Tawara, “An Adaptive MAC and Directional Routing Protocol for Ad Hoc Wireless Network Using ESPAR Antenna”, *MobiHOC 2001*, Long Beach, CA, USA