



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας
και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλου εύρους
Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

Λεωνίδας Μ. Τζεβελέκας

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΙΟΣ 2010

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλου εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Λεωνίδας Μ. Τζεβελέκας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ιωάννης Σταυρακάκης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Ιωάννης Σταυρακάκης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Γεώργιος Στεφάνου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ιωάννης Σταυρακάκης
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Λάζαρος Μεράκος
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Γεώργιος Στεφάνου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Οικονόμου
Λέκτορας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής ΠΑΠΕΙ

Αθανασία Αλωνισιώτη
Λέκτορας, ΕΚΠΑ

Μερκούρης Καραλιόπουλος
Ερευνητής Πολυτεχνείο Ζυρίχης

Ημερομηνία εξέτασης, Μάιος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πρόσφατες επιστημονικές εξελίξεις στους χώρους της μικροηλεκτρονικής, των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των τηλεπικοινωνιών επιτρέπουν το σχεδιασμό και τη λειτουργία καινοτόμων μοντέλων ασύρματων δικτύων επικοινωνιών που βασίζονται στη συνεργατική λειτουργία μεγάλου πλήθους μικροσκοπικών κόμβων αισθητήρων. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στην μελέτη/ πρόταση ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων που εφαρμόζονται σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) μεγάλου πλήθους κόμβων με στόχο τον έλεγχο της τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφορίας στο δίκτυο. Η διατριβή περιλαμβάνει τέσσερα κεφάλαια, όπως περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί μια εκτενή εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Αρχικά αναφέρεται η επιμέρους τεχνολογική πρόοδος που έχει λάβει χώρα, προκειμένου να είναι τεχνικά δυνατό να κατασκευαστούν οι κόμβοι αισθητήρες σε μεγάλες κλίμακες. Μια μεγάλη συλλογή από κόμβους αισθητήρες, ενταγμένοι στο φυσικό χώρο αποτελούν ένα «έξυπνο περιβάλλον». Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του «έξυπνου περιβάλλοντος» αναλύονται και τα μοντέλα λειτουργίας των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία εξηγούνται. Τέλος, γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις τεχνικές προκλήσεις που καλούνται τα πρωτοκόλλα λειτουργίας των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων να καλύψουν και τα πιο ευρέως διαδεδομένα, προτεινόμενα πρωτόκολλα αναπτύσσονται διεξοδικά (SPIN protocol, LEACH protocol, Directed Diffusion protocol, Publish/ Subscribe protocol).

Στο Κεφάλαιο 2 παραθέτουμε μια καινούρια τεχνική για την κατανεμημένη ομαδοποίηση των κόμβων αισθητήρων εντός ενός δικτύου αισθητήρων μεγάλου πλήθους κόμβων. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι Directed Budget Based (DBB) και Directed Budget Based with Random Delays (DBB-RD) είναι βασισμένοι σε δυο παλαιότερα δημοσιευμένους αλγόριθμους κατανεμημένης ομαδοποίησης κόμβων με ονόματα Rapid και Persistent. Οι αλγόριθμοι ξεκινούν την ομαδοποίηση από ένα αρχικό πλήθος κουπονιών που δίνονται στον κόμβο αρχηγό, τα οποία στη συνέχεια διαμοιράζονται τμηματικά προς τους πρώτους γείτονες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κύκλους λειτουργίας έως ότου τα κουπόνια διαμοιρασμού καταναλωθούν πλήρως ή δεν υπάρχει επιπλέον χώρος για ανάπτυξη των ομάδων. Η κατευθυνόμενη ομαδοποίηση σύμφωνα με τους DBB και DBB-RD αποδεικνύεται μέσω προσομοιώσεων ότι είναι επωφελής για το δίκτυο

αισθητήρων τόσο λόγω του μειωμένου πλήθους ανταλλασσόμενων μηνυμάτων για την ολοκλήρωση της διαδικασίας ομαδοποίησης όσο και λόγω των αποτελεσμάτων της διαδικασίας που καταλήγει σε ομάδες εντός του δικτύου που είναι πολύ κοντά στο επιθυμητό αρχικό πλήθος κόμβων.

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται μια καινούρια τεχνική για τη διάχυση πληροφοριών σε Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων μεγάλου πλήθους κόμβων. Η τεχνική που περιγράφεται βασίζεται στη χρήση τυχαίων περιπάτων για τη μεταφορά πληροφοριών στο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο μοντελοποιείται ως τυχαίος γεωμετρικός γράφος και αποτελεί ουσιαστικά την επιτάχυνση της διαδικασίας κάλυψης δικτύου από έναν τυχαίο περίπατο. Ο κλασικός, ευρέως διαδεδομένος τυχαίος περίπατος περιλαμβάνει την μετακίνηση του πράκτορα στο δίκτυο κάνοντας τυχαία επιλογή μεταξύ όλων των πρώτων γειτόνων του επισκεπτόμενου κόμβου. Σε αντιπαράθεση με αυτόν, το προτεινόμενο σχήμα στο Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός μηχανισμού «παγώματος» της διεύθυνσης προώθησης του τυχαίου πράκτορα εντός του δικτύου, έτσι ώστε να είναι δυνατό ο πράκτορας να προωθείται προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση στο χώρο. Αυτή η διεύθυνση κρατείται για όσο χρόνο ο πράκτορας ΤΠΑ, δηλαδή, ο τυχαίος περίπατος με άλματα, παραμένει στην κατάσταση 1, άρα η διεύθυνση κίνησης του είναι φεξαρισμένη. Δείχνεται από τα αποτελέσματά μας ότι μια τέτοια μεταβολή στον τρόπο λειτουργίας του τυχαίου περιπάτου είναι επωφελής ως προς την κάλυψη του δικτύου αισθητήρων (μοντελοποιούμενο ως τυχαίος γεωμετρικός γράφος). Το προτεινόμενο μοντέλο εξετάζεται τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά και αποδεικνύεται ότι υπάρχει πράγματι επιτάχυνση στη διαδικασία κάλυψης του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 4 μελετάται η συνεισφορά των τυχαίων περιπάτων κατά τη συγκομιδή δεδομένων όταν το μοντέλο συγκομιδής δεδομένων (data harvesting scheme) περιλαμβάνει ένα κινούμενο κόμβο που ενεργεί σαν καταβόθρα πληροφοριών (sink). Μελετάται η κίνηση του κόμβου όταν αυτός ακολουθεί τροχιές στο δίκτυο που είναι σχετισμένες με α) τη μετάδοση πληροφορίας σε απόσταση 1-hop μακριά από το κόμβο πηγή και β) τη μετάδοση πληροφορίας σε απόσταση (σχεδόν) 0-hop μακριά από το κόμβο πηγή. Επιπλέον το μοντέλο κίνησης περιλαμβάνει την ντετερμινιστική μεταβολή θέσης του κινούμενου κόμβου – καταβόθρα ή την τυχαία μεταβολή θέσης του κινούμενου κόμβου με βάση το πρότυπο του τυχαίου περιπάτου.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα Επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, κατανεμημένη ομαδοποίηση, τυχαίοι περίπατοι, διάχυση πληροφορίας, συλλογή πληροφορίας από αισθητήρες, κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων

ABSTRACT

Recent technological and scientific advances in the areas of solid state physics, integrated circuit design and telecommunications have led to enabling the functional design of innovative wireless networking models. These models comprise of a large number of tiny sensor nodes working cooperatively towards building a wireless communication network. This doctoral dissertation focuses on the study/ proposal of energy efficient algorithms for topology control and dissemination/ harvesting of information in large-scale Wireless Sensor Networks (WSNs). The doctoral dissertation comprises of four chapters, as described in the sequel.

Chapter 1 of this dissertation is a detailed introduction in the subject of Wireless Sensor Networks. Specific details of recent technological advances are explained towards making it technically feasible to produce large numbers of tiny sensor nodes. A large ensemble of sensor nodes, which are embedded in the physical space, can produce a “smart environment”. The technical characteristics of “smart environments” are listed and the major models for Wireless Sensor Networks operation (as they have been proposed in literature) are explained. There is also a detailed report regarding the new technical challenges bound to be tackled by operation protocols designed for Wireless Sensor Networks. The most well known protocols in literature are explained at the end of chapter (SPIN protocol, LEACH protocol, Directed Diffusion protocol, Publish/Subscribe protocol).

In Chapter 2, there is a novel technique proposed for distributed clustering of sensor nodes in a large scale Wireless Sensor Network. The proposed Directed Budget Based (DBB) and Directed Budget Based with Random Delays (DBB-RD) algorithms have their basis on two previously published algorithms for distributed clustering of nodes in wireless networks, called Rapid and Persistent. The algorithms begin the distributed clustering process by distributing a set of coupons/ tokens offered to the initiator node evenly among the neighbors of that node; the process is then repeated in consecutive cycles of operation until the tokens are completely distributed or there is no more growth possible in the network. The directed budget based clustering algorithms called DBB and DBB-RD are proved through simulations to be energy beneficial for the wireless sensor network due to both the reduced total number of exchanged messages in the network and the final clustersizes achieved (close to the desired offered budget).

Chapter 3 describes an innovative technique for information diffusion in a large scale Wireless Sensor Network. The described technique is based on random walks for information propagation inside the sensor network, modeled as a random geometric graph. The classic, well known, random walk involves the proliferation of the agent in the network by choosing uniformly at random among all next hop neighbors of the currently visited node. In contrast to this, the in chapter 3 described technique involves the design of a “freezing” mechanism for the direction of movement of the random walk agent, such that the agent is allowed to be forwarded towards a specific direction in the network. The particular forwarding direction is kept for the random walk with jumps agent for as long as the agent will stay in state 1; the “freezing state”. It is shown through both simulations and analysis that the incorporation of such a freezing mechanism into the otherwise pure random walk movement of the random walk agent will be beneficial for the overall covering process of the sensor network, modeled as a random geometric graph.

In chapter 4, the random walk based movement is tested for contributing in the data harvesting process when the mobile sink based data harvesting is assumed. The movement of the mobile sink inside the sensor field is designed based on a) the wireless transmission of sensed data at 1-hop distance away from the producing node and b) the wireless transmission of sensed data at almost 0-hop distance away from the producer node. Furthermore, the movement of the mobile sink involves a deterministic variant (deterministically scheduling the changes in location of the mobile sink) and a random walk based variant (choosing randomly among all possible next mobile sink locations).

SUBJECT AREA: Communication Networks

KEYWORDS: Wireless Sensor Networks, distributed clustering, random walks, information dissemination, information harvesting from sensors, mobile sink based data harvesting

Αφιερωμένο στον πατέρα μου, τη μητέρα μου και τον καθηγητή μου.

Ευχαριστούμε για την υποστήριξη τους το Υπουργείο Ανάπτυξης και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τις πρωτοβουλίες ΠΕΝΕΔ, IST, IST-FET και τις υπηρεσίες χρηματοδότησης του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών για την διάθεση πολύτιμων πόρων που έκαναν δυνατή την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστούμε για την υποστήριξη της παρούσας διδακτορικής διατριβής το πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ2003, που συγχρηματοδοτείται με:

- **75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο**
- **25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας**
- **και από τον Ιδιωτικό Τομέα**

στο πλαίσιο του Μετρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | 22 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ | 23 |
| 1.1 Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις | 24 |
| 1.2 «Έξυπνα» κατά περίπτωση περιβάλλοντα | 25 |
| 1.3 Μοντέλα λειτουργίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων | 26 |
| 1.4 Σχεδιασμός και ιδιαιτερότητες για πρωτόκολλα λειτουργίας σε ΑΔΑ | 28 |
| 1.5 Γνωστά πρωτόκολλα και τεχνικές λειτουργίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων | 34 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ | 40 |
| 2.1 Οι αλγόριθμοι Rapid και Persistent | 40 |
| 2.2 Ομαδοποίηση με βάση το δυναμικό των κόμβων | 44 |
| 2.3 Κατευθυνόμενη ομαδοποίηση με χρήση κουπονιών για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων | 53 |
| 2.3.1 Ο αλγόριθμος κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών (DBB algorithm) | 57 |
| 2.3.2 Ο αλγόριθμος κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών και τυχαίων καθυστερήσεων (DBB-RD algorithm) | 61 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΤΥΧΑΙΟΙ ΠΕΡΙΠΑΤΟΙ ΜΕ ΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥΣ ΓΡΑΦΟΥΣ | 71 |
| 3.1 Διάχυση πληροφορίας μέσω πλημμυρίδας σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους μεγάλου πλήθους κόμβων | 72 |
| 3.2 Διάχυση πληροφορίας μέσω τυχαίων περιπάτων σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους | 73 |

| | |
|---|------------|
| 3.3 Διάχυση πληροφορίας μέσω τυχαίων περιπάτων με άλματα σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους | 79 |
| 3.3.1 Εισαγωγή | 79 |
| 3.3.2 Αναλυτική περιγραφή | 83 |
| 3.4 Αναλυτικά αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα και του ΤΠΑ πράκτορα σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους | 85 |
| 3.4.1 Αναλυτικά αποτελέσματα για τον ΤΠ πράκτορα | 85 |
| 3.4.2 Αναλυτικά αποτελέσματα για τον ΤΠΑ πράκτορα | 90 |
| 3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων | 92 |
| 3.5.1 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα | 93 |
| 3.5.2 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα | 97 |
| 3.5.3 Αποτελέσματα για L-κάλυψη δικτύου στους ΤΠ και ΤΠ πράκτορες όταν $L=0,1,2,3$ | 107 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΚΟΜΒΟ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΤΑΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ Ή ΜΗΔΕΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ | 116 |
| 4.1 Εισαγωγή | 116 |
| 4.2 Συλλογή πακέτων δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου άλματος | 123 |
| 4.2.1 Συλλογή δεδομένων με κίνηση τυχαία του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος | 124 |
| 4.2.2 Συλλογή δεδομένων με κίνηση ντετερμινιστική του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος | 126 |
| 4.3 Συλλογή δεδομένων δικτύου κάτω από προώθηση δεδομένων μηδενικού βήματος | 130 |
| 4.3.1 Συλλογή δεδομένων κάτω από τυχαία κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος | 130 |
| 4.3.2 Συλλογή δεδομένων κάτω από ντετερμινιστική κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος | 131 |
| 4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων | 135 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.1 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου με τυχαίο/ ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων κινούμενου κόμβου κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος | 136 |
| 4.4.2 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου με τυχαίο/ ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος | 138 |
| ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ | 141 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 142 |

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ολοκληρώθηκε μένα από ένα μακρύ ταξίδι με διαδοχικές εναλλαγές μεταξύ θετικού και αρνητικού αποτελέσματος, ολοκλήρωση της επεξεργασίας κάποιου θέματος και παράλληλη έναρξη ενασχόλησης με κάποιο επόμενο θέμα που ήταν και πάλι δυσκολότερο από όσα είχα ασχοληθεί έως τότε. Η διαρκής αυτή εναλλαγή μεταξύ απογοητεύσεων, χαρών, αρνητικών και θετικών αποτελεσμάτων είναι η πορεία που πρέπει να ακολουθήσει κάθε φοιτητής ώστε να μεταμορφωθεί από παθητικός παρατηρητής εξελίξεων και αποτελεσμάτων σε ικανό να διεξάγει έρευνα επιστήμονα με πίστη στον εαυτό του και τις ικανότητες του. Αυτή είναι και η αξία της διδακτορικής διατριβής σε επίπεδο προσωπικό, σε συνδυασμό φυσικά με τις επιστημονικές γνώσεις που αποκτά κανείς και τον συνοδεύουν στο μέλλον. Οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ σε όλους όσους με στήριξαν σε αυτή την τόσο δύσκολη πορεία, τον πατέρα μου, τη μητέρα μου και τον καθηγητή μου.

Κοιτώντας προς τα πίσω, δεν μπορώ παρά να συνοψίσω την όλη προσπάθεια με λίγα λόγια που αφορούν τη συνειδητοποίηση βασικών αξιών που είναι ικανές και αναγκαίες προκειμένου ο άνθρωπος να έχει επιτυχία στα διάφορα εγχειρήματα της ακαδημαϊκής, επαγγελματικής ή προσωπικής ζωής, και έτσι να νιώθει ευχαριστημένος. Τέτοιες αξίες είναι η εργατικότητα, η αισιοδοξία, η πίστη στις ικανότητες των συνανθρώπων αλλά και η ευθύτητα, η αναγνώριση ικανοτήτων, επιθυμιών, φιλοδοξιών και ορίων των συνανθρώπων. Όλα τα παραπάνω είναι προσανατολισμοί που θα ακολουθήσω στο μέλλον προκειμένου να αναζητήσω την επιτυχία και την ευτυχία σε όλα τα επίπεδα.

Τέλος, θα ήθελα να αναφερθώ σε όλους εκείνους τους αξιόλογους συμφοιτητές και φίλους που γνώρισα και συνεργάστηκα στα πλαίσια της διεξαγωγής της διατριβής μου στο πανεπιστήμιο Αθηνών. Ξεκινώντας από το πρώτο γραφείο που βρεθήκαμε στον πρώτο όροφο του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών να ευχαριστήσω τους: Νικόλαο Λαουτάρη, Ηλία Μπαλαφούτη, Αντώνη Παναγάκη, Νάσο Βάιο, Έφη Τσουκάλη, Δημήτρη Κόγια. Χρήστο Ξενάκη, Κωνσταντίνο Βασιλάκη, Μανώλη Καφετζάκη και κατόπιν της μεταφοράς μας στο γραφείο του ισογείου τους: Παναγιώτη Πανταζόπουλο, Κωνσταντίνο Οικονόμου, Εύα Γιάχο, Μερκούρη Καραλιόπουλο, Γρηγόρη Καραγιώργο.

Αθήνα, Μάιος 2010

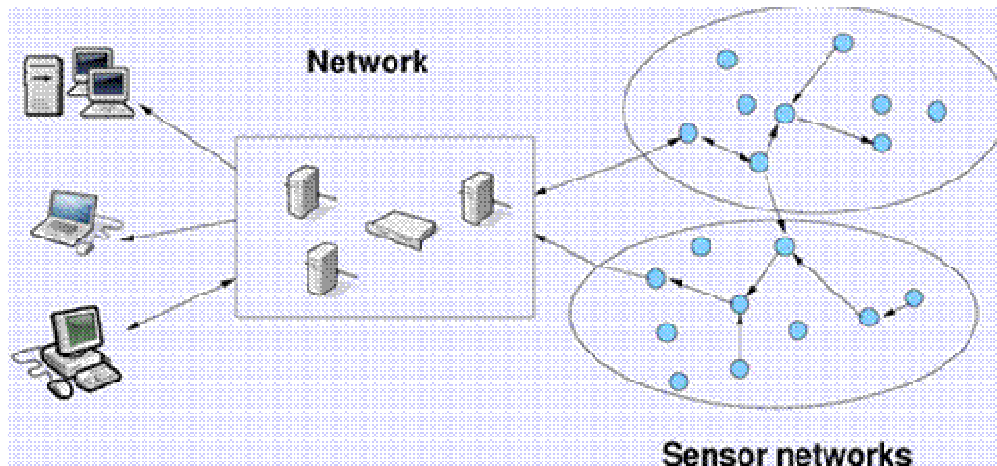
1.1 Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις

Τα αποτελέσματα της έρευνας στα επιστημονικά πεδία της επιστήμης υλικών, μικροηλεκτρονικής και ενσωματωμένων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχουν οδηγήσει στη δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης ενός μεγάλου πλήθους από κυκλώματα χαμηλής ισχύος, εξοπλισμένα με μικρο-επεξεργαστές, τεχνολογίες ραδιο-επικοινωνίας και αισθητήρες για το ευρύτερο περιβάλλον. Η δυνατότητα αυτόματης ασύρματης δικτύωσης μεταξύ όλων των επιμέρους κόμβων της πλατφόρμας σε συνδυασμό με τη δυνατότητα επεξεργασίας των συλλεγόμενων από την πλατφόρμα πληροφοριών (sensed data) οδηγεί στην υλοποίηση ενός νέου εργαλείου παρακολούθησης φυσικών φαινομένων με μοναδικές ικανότητες συνδυασμένης παρακολούθησης, μεταφοράς και επεξεργασίας δεδομένων που ονομάζεται Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (ΑΔΑ).

Τα ΑΔΑ δύνανται να υλοποιούν τεχνικές κατανεμημένης δικτύωσης με δυνατότητα πρόσβασης των επιμέρους κόμβων – αισθητήρων στο Διαδίκτυο, δυνατότητες ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων και υλοποιήσεις που δύνανται να ενσωματωθούν στον εξοπλισμό ενός κτηρίου, τις εγκαταστάσεις, και ακόμη και το ίδιο το φυσικό περιβάλλον. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων μπορούν να έχουν εφαρμογή σε τέτοιες βιομηχανίες όπως τις μεταφορές, τον κατασκευαστικό κλάδο, την υγειονομική περίθαλψη, περιβαλλοντική παρακολούθηση, και ασφάλεια. Ακόμη είναι δυνατόν να υπάρξει εφαρμογή στο χώρο της διαστημικής τεχνολογίας, όπου γίνονται το ΑΔΑ επι της ουσίας μπορεί να αποτελέσει ένα μεγάλης κλίμακας επιστημονικό εργαλείο συλλογής πληροφοριών για διάφορα φυσικά μεγέθη (μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο της γης).

Τα ΑΔΑ συνδυάζουν την τεχνολογία microsensor και χαμηλής ισχύος επεξεργασία σήματος, υπολογισμούς, και χαμηλού κόστους ασύρματη δικτύωση σε ένα συμπαγές σύστημα [1], [7-10]. Η συμπαγής γεωμετρία και το αναμενόμενο χαμηλό κόστος ενός ΑΔΑ επιτρέπει την ενσωμάτωση και διανομή του με ένα κόστος χαμηλό σχετικά με άλλα, συμβατικά συστήματα αισθητήρων και ενεργοποιητών που υπάρχουν στη βιομηχανία. Οι ευκαιρίες υλοποιήσεων στα δίκτυα ΑΔΑ εξαρτώνται από την ανάπτυξη μιας εξελικτικής, χαμηλού κόστους, αρχιτεκτονικής αισθητήρας – δίκτυο ΑΔΑ. Τέτοιες υλοποιήσεις απαιτούν την παράδοση των πληροφοριών αισθητήρων στο χρήστη σε ένα

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χαμηλό ρυθμό δυαδικών δεδομένων μέσω των χαμηλής ισχύος πομποδεκτών. Η συνεχής επεξεργασία σημάτων από τους αισθητήρες επιτρέπει το σταθερό έλεγχο των γεγονότων σε ένα περιβάλλον στο οποίο τα πακέτα μηνυμάτων μικρού μεγέθους (σε bits) είναι αρκετά. Μελλοντικές απαιτήσεις των κατανεμημένων ενσωματωμένων επεξεργαστικών συστημάτων και των αισθητήρων θα απαιτούν τεράστιους αριθμούς από τέτοιες συσκευές (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Αυτοματοποιημένη χρήση για απομακρυσμένη παρακολούθηση Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Συμβατικές μέθοδοι δικτύωσης αισθητήρων αντιπροσωπεύουν μια μη πρακτική απαίτηση στην εγκατάσταση καλωδίων και το εύρος ζώνης δικτύων. Η επεξεργασία στην πηγή δραστικά μειώνει το οικονομικό, το υπολογιστικό, και διοικητικό βάρος στο σύστημα επικοινωνιών, στα συστατικά, δικτύου, και στο ανθρώπινο δυναμικό.

1.2 «Έξυπνα» κατά περίπτωση περιβάλλοντα

Η ασύρματη δικτύωση αισθητήρων χαμηλού κόστους, και το επακόλουθο της δημιουργίας ενός «έξυπνου» τεχνικού περιβάλλοντος παρακολούθησης μπορεί να δημιουργήσει επανάσταση στον τρόπο συλλογής πληροφοριών σε διάφορους τομείς εφαρμογών. Ένας τέτοιος τομέας εφαρμογής του «έξυπνου περιβάλλοντος» είναι το έξυπνο, κατά περίπτωση (smart ad hoc environment) περιβάλλον. Το πιο γνωστό,

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
εφαρμοσμένο παράδειγμα για ένα έξυπνο, κατά περίπτωση περιβάλλον είναι η εφαρμογή του δικτύου ασύρματων αισθητήρων έτσι ώστε οι κόμβοι αισθητήρες να διασπείρονται πυκνά σε ένα πρόσφατα κατεστραμμένο κτήριο από ισχυρό σεισμό. Άλλες γνωστές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων που έχουν υλοποιηθεί και αναφερθεί στη βιβλιογραφία για τη παρακολούθηση εξωτερικών χώρων και άλλων περιβαλλοντικών θεμάτων μπορεί κανείς να βρει στο [14]. Οι κόμβοι - αισθητήρες του δικτύου ΑΔΑ συνεργάζονται και δομούν ένα δίκτυο επικοινωνιών έτσι ώστε να μοιράζεται το συνολικό πλήθος των διεργασιών που απαιτούνται για την παρακολούθηση του κτιρίου με έναν τρόπο ο οποίος να θεωρείται ενεργειακά αποδοτικός και παράλληλα να προσαρμόζεται η τελική ανάλυση της εφαρμογής παρακολούθησης (έτσι ώστε να είναι σε ενεργειακά αποδοτικά επίπεδα). Οι κόμβοι αισθητήρες μπορούν να αναδιοργανώνουν το σχεδιασμό των διεργασιών μεταξύ τους αυτόματα και με τέτοιο τρόπο ώστε όταν κάποιος από τους κόμβους έχει εξασθενήσει ενεργειακά να αποσύρονται από τη λειτουργία του συνολικού δικτύου. Όταν πρόσθετοι αισθητήρες προστίθενται ή παλαιοί αισθητήρες εξασθενούν, τότε το πρόγραμμα των διεργασιών στο δίκτυο αισθητήρων αναδιοργανώνεται κατάλληλα έτσι ώστε το σύστημα να αφομοιώσει κατάλληλα το πλεονέκτημα της παρουσίας προστιθέμενων πόρων του συστήματος. Στην περίπτωση που γίνεται παρακολούθηση ενός κατεστραμμένου από σεισμό κτηρίου, ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί αυτόματα, και γρήγορα να εξαπλωθεί στην περιοχή της καταστροφής και να κατευθύνει την κοντινότερη έκτακτη ανάγκη σχετικά με τις ομάδες ανταπόκρισης στα πληγωμένα άτομα, ή να βρει τις ασφαλείς πορείες εγκατάλειψης του κτιρίου.

Τα «έξυπνα» κατά περίπτωση περιβάλλοντα σχετίζονται με δύο σημαντικές τεχνικές προκλήσεις για το σχεδιασμό πρωτοκόλλων επικοινωνίας και δικτύωσης: Την υποστήριξη πολύ μεγάλου πλήθους αφύλακτων, αυτόνομων κόμβων και την προσαρμοστικότητα σε δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα και στόχους.

Πολλά δίκτυα μεγάλης κλίμακας υπάρχουν σήμερα. Το Διαδίκτυο είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα. Τα «έξυπνα» κατά περίπτωση περιβάλλοντα παρουσιάζουν ένα πολύ διαφορετικό και δυσκολότερο πρόβλημα, εν τούτοις, επειδή η αναλογία μεταξύ κόμβων επικοινωνίας (ασύρματοι αισθητήρες) προς τελικούς χρήστες είναι πολύ μεγαλύτερη. Κάθε προσωπικός Η/Υ στο διαδίκτυο έχει ένα χρήστη που μπορεί να επιλύσει ή να εκθέσει τουλάχιστον στο συντονιστή του συστήματος ένα σύνολο δευτερευόντων λαθών και προβλημάτων που μπορεί να εμφανιστούν. Αυτό το ανθρώπινο στοιχείο επιτρέπει στο Διαδίκτυο να λειτουργεί με λογισμικό που είναι σχετικά απλό σε πολυπλοκότητα.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα «έξυπνα» κατά περίπτωση περιβάλλοντα, από την άλλη μεριά, θα υλοποιούνται σε αναλογίες χιλιάδων κόμβων ανά ανθρώπινο τελικό χρήστη (ή και περισσότεροι κόμβοι ανά χρήστη). Σε τέτοιες υψηλές αναλογίες, είναι πρακτικά αδύνατο να εφαρμοστεί διόρθωση προβλημάτων σε επίπεδο μεμονωμένου κόμβου επικοινωνίας στο δίκτυο. Επιπλέον, ακόμα κι αν ήταν δυνατό να εξεταστεί κάθε κόμβος μεμονωμένα, οι αισθητήρες μπορεί να είναι απρόσιτοι, είτε επειδή ενσωματώνονται στις φυσικές δομές ή επειδή διαμορφώνονται σε αφιλόξενη έκταση. Κατά συνέπεια, ένα τέτοιο σύστημα προκειμένου να είναι αποτελεσματικό, πρέπει να παρέχει αφύλακτη, απαλλαγμένη από λάθη μεμονωμένων κόμβων λειτουργία. Οι κόμβοι πρέπει να είναι αυτό-οργανούμενοι και επιπλέον χρειάζεται να είναι προσαρμοστικοί σε αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας τους.

Δεν είναι απολύτως αληθές ότι δεν λειτουργούν αυτόνομα δικτυακά συστήματα μεγάλης κλίμακας σήμερα. Τα αυτοματοποιημένα εργοστάσια, παραδείγματος χάριν, μπορεί να περιέχουν εκατοντάδες, κατά ένα μεγάλο μέρος ανεπίβλεπτους υπολογιστές, αλλά με κόστος τον προσεκτικό προ-σχεδιασμό και την ανάλυση λειτουργίας. Αυτό το παράδειγμα αναδεικνύει τη δεύτερη απαίτηση για «έξυπνα» περιβάλλοντα: Αντίθετα με τα εργοστάσια, πρέπει να λειτουργούν και να ανταποκρίνονται σε πολύ δυναμικά περιβάλλοντα χωρίς προηγούμενη προσεκτική ανάλυση και σχεδιασμό. Ο τελικός χρήστης και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις συμβάλλουν επίσης στη δυναμική του συστήματος ως προς αυτό που τίθεται υπό παρακολούθηση και ως προς ενδιαφέρουσες αλλαγές. Κατά συνέπεια τα «έξυπνα» κατά περίπτωση περιβάλλοντα πρέπει αυτόματα να προσαρμόζονται στις αλλαγές στο περιβάλλον και στις απαιτήσεις του τελικού χρήστη.

Μια γενικευμένη υπόθεση για το σχεδιασμό - ανάπτυξη τέτοιων περιβαλλόντων είναι ότι απαιτείται εν γένει οι εφαρμογές τους να χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες Διαδικτύου, συνδυασμένες με ειδικούς μηχανισμούς δρομολόγησης για κατά περίπτωση δίκτυα. Σε ένα τέτοιο σχεδιασμό, ο κάθε κόμβος αισθητήρας είναι μια συσκευή ικανή για χρήση στο διαδίκτυο (έχει μια ή περισσότερες διευθύνσεις διαδικτύου) και μπορεί να τρέξει εφαρμογές και υπηρεσίες. Όταν οι κόμβοι αισθητήρες αναπτύσσονται στο πεδίο καθιερώνουν ένα ασύρματο δίκτυο στην περιοχή που εκτείθενται. Από εκείνο το σημείο και μετά οι διάφορες διεργασίες εφαρμογών που τρέχουν στους επιμέρους κόμβους μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Οι εφαρμογές, βοηθούμενες από υπηρεσίες ευρέσεως καταλόγου και ευρέσεως πόρων, είναι δομημένες με σχεδόν τον ίδιο τρόπο όπως οποιεσδήποτε άλλες παραδοσιακές εφαρμογές Διαδικτύου.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Εντούτοις, υπάρχει η πεποίθηση ότι οι απαιτήσεις των «έξυπνων» κατά περίπτωση περιβάλλοντων είναι αρκετά διαφορετικές από εκείνες των παραδοσιακά με καλώδιο συνδεδεμένων δικτύων και των ασύρματων δικτύων. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γνωρίσματα [3].

1. Λειτουργία δικτύου προσαρμοσμένη στη μεταφορά δεδομένων
2. Λειτουργία δικτύου προσαρμοσμένη στις εφαρμογές
3. Λειτουργία δικτύου προσαρμοσμένη στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
4. Κρισιμότητα στην κατανάλωση ενέργειας και ασύρματη επικοινωνία, απαιτείται μέγιστη προσοχή στην ενεργειακή αποδοτικότητα
5. Κατά περίπτωση εφαρμογή (ad hoc deployment), με απαίτηση για ικανότητα αναγνώρισης και αυτο-οργάνωσης των κόμβων.
6. Δυναμικά μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας λόγω αλλαγών στο περιβάλλον, που απαιτούν την προσαρμογή του συστήματος ως προς την συνδεσιμότητα.
7. Λειτουργία του δικτύου χωρίς παρεμβάσεις τεχνικών ή χειριστών συστήματος, έτσι ώστε να απαιτείται η αυτόματη οργάνωση και λειτουργία.

Πολλές από τις παραπάνω λειτουργίες και τεχνικά χαρακτηριστικά για έξυπνα περιβάλλοντα γίνονται πράξη μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού των πρωτοκόλλων λειτουργίας για τα ΑΔΑ, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια.

1.3 Μοντέλα λειτουργίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η μεθοδολογία χρήσης των δικτύων ΑΔΑ υποδεικνύει ένα μοντέλο λειτουργίας με τρία βασικά χαρακτηριστικά [5]: **(α) Ο αισθητήρας.** Είναι το αντικείμενο που υλοποιεί τη μετάβαση από το φυσικό κόσμο στην ηλεκτρονική πραγματικότητα και μεταφέρει ασύρματα τις πληροφορίες. Κατά κύριο λόγο αποτελείται από πέντε χαρακτηριστικά τμήματα, το υλικό του αισθητήρα, τη μνήμη, τη μπαταρία ή κάποιο άλλο συσσωρευτή ενέργειας, ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή και πομποδέκτη. **(β) Ο παρατηρητής.** Είναι ο τελικός χρήστης που ενδιαφέρεται να αποκτήσει την πληροφορία η οποία διαχέεται μέσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και αφορά το φαινόμενο προς παρακολούθηση. Ο παρατηρητής μπορεί να εισάγει ερωτήματα στο δίκτυο και να

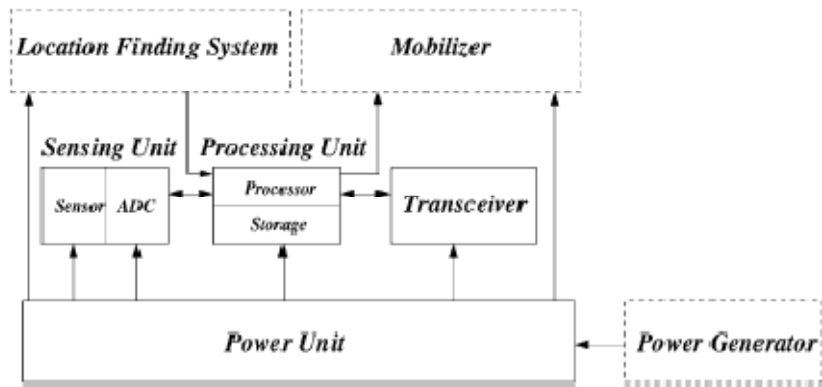
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων περιμένει για τη λήψη απαντήσεων από το δίκτυο αισθητήρων. Επίσης μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός παρατηρητές, οι οποίοι θέτουν διάφορα ερωτήματα. **(γ) Το φαινόμενο.** Είναι το αντικείμενο ενδιαφέροντος του παρατηρητή, το οποίο γίνεται αισθητό από το δίκτυο και πιθανά υπόκειται σε επεξεργασία ή ανάλυση από το δίκτυο. Είναι δυνατό να παρακολουθούνται περισσότερα του ενός φαινόμενα την ίδια χρονική στιγμή.

Οι Ratnasamy et al παρουσιάζουν μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση των δικτύων αισθητήρων με βάση ένα μοντέλο το οποίο βασίζεται στη διάχυση πληροφορίας. Προτείνουν ότι η διάχυση πληροφορίας μπορεί να γίνει με τουλάχιστον τρεις διαφορετικούς τρόπους: (1) με βάση την εξωτερική αποθήκευση – προωθήστε όλα τα δεδομένα στον κόμβο παρατηρητή και μετά άσε αυτόν να επεξεργαστεί την πληροφορία, (2) τοπική αποθήκευση – οι πληροφορίες που σχετίζονται με το γεγονός είναι αποθηκευμένες τοπικά στους κόμβους αισθητήρες και (3) αποθήκευση πληροφοριών σχετική με την πληροφορία – τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα με το όνομα τους και τα αιτήματα κατευθύνονται με χρήση του ονόματος προς τον κατάλληλο κόμβο - αισθητήρα. Είναι προφανές ότι κάθε τύπος μοντέλου θα συσχετίζεται και με τον κατάλληλο τύπο επικοινωνιών εντός του δικτύου.

1.4 Σχεδιασμός και ιδιαιτερότητες για πρωτόκολλα λειτουργίας σε ΑΔΑ

Τα πρωτόκολλα λειτουργίας των δικτύων αισθητήρων που είναι ήδη κατασκευασμένα στο βιομηχανικό κόσμο είναι ακατάλληλα για εφαρμογή στα καινούρια Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι οι ουσιαστικές διαφορές στις εφαρμογές, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες λειτουργίας των δυο κατηγοριών δικτύων. Επιπλέον, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους που έχουν οι κόμβοι – αισθητήρες, είναι κατανοητό ότι τα επιμέρους τμήματα που τους συνθέτουν (μπαταρίες, επεξεργαστής, ραδιοπομπός, μνήμη, αισθητήρας, κλπ.) έχουν το καθένα αρκετά περιορισμένες δυνατότητες. Μια ευρύτερα αποδεκτή σχηματική δομή του μεμονωμένου κόμβου – αισθητήρα έχει παρουσιαστεί στο [1] από το οποίο παραθέτουμε την εικόνα 2.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων



Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου κόμβου αισθητήρα

Όπως είναι φανερό στην Εικόνα 2 η συλλογή υπο-μερών του κόμβου αισθητήρα φανερώνει ότι οι αισθητήρες στα ΑΔΑ έχουν μοναδικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Κατά συνέπεια, τα οποιαδήποτε πρωτόκολλα λειτουργίας που προορίζονται για λειτουργία σε ΑΔΑ πρέπει να είναι προσαρμοσμένα στα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά. Ένα σύνολο παραγόντων που παίζουν ρόλο στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων για τα ΑΔΑ και ρυθμίζουν τις συνθήκες λειτουργίας τους έχουν περιγραφεί στο [4] και αποτελούν συνοπτικά τα εξής:

Πίνακας 1 Σχεδιαστικά κριτήρια για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

| # | Σημαντικοί παράγοντες σχεδιασμού για πρωτόκολλα σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων |
|---|---|
| 1 | Αντοχή πρωτοκόλλων σε σφάλματα, δυσλειτουργίες κόμβων του δικτύου / fault tolerance |
| 2 | Επεκτασιμότητα πρωτοκόλλων σε μεγαλύτερα δίκτυα / scalability |
| 3 | Προσαρμογή στο χαμηλό κόστος παραγωγής / production cost |
| 4 | Προσαρμογή στο περιβάλλον λειτουργίας / operating environment |
| 5 | Προσαρμογή στις τοπολογίες δικτύων αισθητήρων / sensor network topology |
| 6 | Προσαρμογή στο υλικό των αισθητήρων / hardware constraints |

| | |
|---|---|
| 7 | Καταλληλότητα για το μέσο εκπομπής / transmission media |
| 8 | Περιορισμός στην κατανάλωση ισχύος / Power consumption |

Στη συνέχεια θα εξηγηθούν συνοπτικά οι παραπάνω παράγοντες λειτουργίας και θα αναπτυχθούν οι αναγκαίες μετατροπές για τη λειτουργία των πρωτοκόλλων σε ΑΔΑ. Οι παράγοντες αυτοί είναι σημαντικοί προκειμένου τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι που θα προταθούν για ΑΔΑ να είναι κατάλληλοι για λειτουργία σε τέτοια δίκτυα.

Ανοχή πρωτοκόλλων σε σφάλματα - δυσλειτουργίες κόμβων

Μερικοί κόμβοι αισθητήρες μπορούν να εξασθενίσουν ή να παρεμποδιστούν στην εκπομπή πληροφοριών λόγω της έλλειψης κατάλληλου αποθέματος ενέργειας, να έχουν κάποια ζημία στο υλικό τους ή να βρίσκονται υπό το καθεστώς κάποιας περιβαλλοντικής παρέμβασης. Η αποτυχία μεμονομένων κόμβων αισθητήρων δεν πρέπει να έχει επιπτώσεις στη συνολική λειτουργία του δικτύου αισθητήρων, κάτι που μπορεί να περιγραφεί ως ανοχή ελαττωμάτων λειτουργίας (fault tolerance). Η ανοχή ελαττωμάτων συμπεριλαμβάνει την υποστήριξη των λειτουργιών του δικτύου αισθητήρων χωρίς οποιαδήποτε διακοπή λόγω των αποτυχιών μεμονωμένων κόμβων αισθητήρων [11,12,13]. Η ανθεκτικότητα $R_k(t)$ ή ανοχή ελαττωμάτων ενός κόμβου αισθητήρα μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση το [11] με χρήση της κατανομής Poisson ως η πιθανότητα του κόμβου να μη γίνει ελαττωματικός μέσα στο χρονικό διάστημα $(0, t)$ με χρήση της εξίσωσης

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \quad (1.1)$$

όπου λ_k και t είναι ο ρυθμός εμφάνισης ελαττώματος και ο χρόνος που περνάει αντίστοιχα. Ας σημειωθεί εδώ ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι μπορούν να σχεδιαστούν για να εξετάσουν το επίπεδο ανοχής ελαττωμάτων που απαιτείται από τα δίκτυα αισθητήρων. Εάν το περιβάλλον όπου οι κόμβοι αισθητήρες αναπτύσσονται έχει λίγη παρεμβολή, τότε τα πρωτόκολλα μπορούν να είναι πιο χαλαρά.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Επεκτασιμότητα λειτουργίας σε μεγάλο πλήθος κόμβων

Ο αριθμός κόμβων αισθητήρων που αναπτύσσονται κατά τη μελέτη ενός φαινομένου μπορεί να είναι της τάξεως των εκατοντάδων ή των χιλιάδων. Ανάλογα με την εφαρμογή ο αριθμός μπορεί να φθάσει σε μια ακραία τάξη των εκατομμυρίων. Τα νέα πρωτόκολλα λειτουργίας πρέπει να μπορούν να εντάξουν έναν τόσο μεγάλο αριθμό κόμβων σε ένα λειτουργικό δίκτυο αισθητήρων. Πρέπει επίσης να χρησιμοποιείται θετικά η από φύση υψηλή πυκνότητα κόμβων στην περιοχή υλοποίησης ενός δικτύου αισθητήρων. Η πυκνότητα κόμβων μπορεί να κυμανθεί από λίγους κόμβους αισθητήρες ως λίγες εκατοντάδες κόμβους αισθητήρες σε μια περιοχή, η οποία μπορεί να είναι μικρότερη από 10μ σε διάμετρο [15]. Η πυκνότητα των κόμβων αισθητήρων μπορεί να υπολογιστεί από το [16] με βάση τα

$$\mu(R) = (N\pi R^2)/A \quad (1.2)$$

όπου N είναι το πλήθος των κόμβων που είναι διασκορπισμένοι στο πεδίο αισθητήρων με έκταση A και R είναι η ακτίνα συνδεσιμότητας του κάθε κόμβου αισθητήρα. Η ποσότητα $\mu(R)$ τελικά θα δίνει το πλήθος των πρώτων γειτόνων ενός κάθε κόμβου στο δίκτυο αισθητήρων που βρίσκεται στο χώρο.

Επιπλέον, ο αριθμός κόμβων σε μια περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την πυκνότητα κόμβων. Η πυκνότητα κόμβων εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία οι κόμβοι αισθητήρες αναπτύσσονται. Για την εφαρμογή διάγνωσης μηχανών, η πυκνότητα κόμβων είναι περίπου 300 κόμβοι αισθητήρων σε μια 5x5 m² περιοχή, και η πυκνότητα για την εφαρμογή καταδίωξης οχημάτων είναι περίπου 10 κόμβοι αισθητήρων ανά περιοχή [17]. Γενικά, η πυκνότητα μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 20 αισθητήρες κόμβοι ανά τετραγωνικό μέτρο. Ένα σπίτι μπορεί να περιέχει περίπου δύο δωδεκάδες των οικιακών συσκευών που περιέχουν κόμβους αισθητήρες [67], αλλά αυτός ο αριθμός θα αυξηθεί εάν οι κόμβοι αισθητήρων ενσωματώνονται στα έπιπλα και άλλα διάφορα αντικείμενα. Για την εφαρμογή ελέγχου βιότοπων, ο αριθμός κόμβων αισθητήρων κυμαίνεται από 25 έως 100 ανά περιοχή [18].

Χαμηλό κόστος παραγωγής

Δεδομένου ότι τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων, το κόστος ενός κόμβου είναι πολύ σημαντική παράμετρος για να δικαιολογήσει το συνολικό κόστος των δικτύων. Εάν το κόστος του δικτύου είναι

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ακριβότερο από την ανάπτυξη παραδοσιακών αισθητήρων, το δίκτυο αισθητήρων δεν είναι δικαιολογημένο. Κατά συνέπεια, το κόστος κάθε κόμβου αισθητήρων πρέπει να κρατηθεί χαμηλό.

Περιορισμοί στο υλικό – hardware

Ένας κόμβος αισθητήρας αποτελείται από τέσσερα βασικά modules, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, τη μονάδα με αισθητήρες, τη μονάδα με επεξεργαστή, μια μονάδα πομποδεκτών και μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Μπορεί επίσης να υπάρχουν πρόσθετα τμήματα στον κόμβο αισθητήρα σχετιζόμενα με την εκάστοτε εφαρμογή, που μπορεί να είναι ένα σύστημα ευρέσεως θέσης, μια γεννήτρια ηλεκτρικής ισχύος και ένα σύστημα κινητοποίησης του κόμβου – αισθητήρα. Το διάγραμμα της μονάδας αισθητήρων αποτελείται συνήθως από δύο υπομονάδες: αισθητήρες και αναλογικο-ψηφιακούς μετατροπείς. Τα αναλογικά σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες με βάση το υπό παρακολούθηση φαινόμενο μετατρέπονται σε ψηφιακά σήματα από την αναλογικο-ψηφιακή μονάδα μετατροπής, και τροφοδοτούνται έπειτα στη μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα επεξεργασίας, που συνδέεται γενικά με μια μικρή μονάδα αποθήκευσης δεδομένων, διαχειρίζεται τις διαδικασίες που κάνουν τον κόμβο αισθητήρων να συνεργαστεί με τους άλλους κόμβους ώστε να εκτελέσουν τους ανατεθειμένους στόχους. Μια μονάδα πομποδεκτών συνδέει τον κόμβο με το δίκτυο. Ένα από τα σημαντικότερα συστατικά ενός κόμβου αισθητήρων είναι η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να υποστηριχθούν από μια μονάδα σάρωσης ενέργειας όπως τα ηλιακά κύτταρα. Υπάρχουν επίσης άλλες υπομονάδες, οι οποίες είναι πάντα εξαρτώμενες από τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

Προσαρμογή στις τοπολογίες δικτύων αισθητήρων

Υψηλοί αριθμοί απρόσιτων και αφύλακτων κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι είναι επιρρεπείς σε συχνές αποτυχίες, κάνουν τη συντήρηση της τοπολογίας δικτύου έναν προκλητικό στόχο. Εκατοντάδες έως αρκετές χιλιάδες κόμβοι επεκτείνονται σε όλη τη περιοχή ανάπτυξης του δικτύου αισθητήρων. Οι κόμβοι αισθητήρες μπορεί να επεκτείνονται εντός δεκάδων μέτρων ο ένας από τον άλλο [19]. Οι πυκνότητες κόμβων μπορεί να είναι τόσο υψηλές όσο 20 κόμβοι ανά τετραγωνικό μέτρο. Η ανάπτυξη του

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
μεγάλου αριθμού των κόμβων απαιτεί συχνά τον προσεκτικό χειρισμό της συντήρησης τοπολογίας δικτύου.

Προσαρμογή στο περιβάλλον λειτουργίας

Οι κόμβοι αισθητήρες επεκτείνονται πυκνά, είτε πολύ κοντά στο φαινόμενο προς παρατήρηση είτε άμεσα εντός της περιοχής του φαινομένου. Επομένως, οι κόμβοι λειτουργούν αφύλακτοι σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Λειτουργούν κάτω από υψηλή πίεση στο κατώτατο σημείο ενός ωκεανού, σε σκληρά περιβάλλοντα όπως συντρίμμια ή ένα πεδίο μάχη, κάτω από ακραία θερμότητα και κρύο όπως στο ακροφύσιο μιας μηχανής αεροσκαφών ή στις αρκτικές περιοχές, και σε ένα εξαιρετικά θορυβώδες περιβάλλον όπως κάτω από το σκόπιμο μπλοκάρισμα. Τέτοιες ακραίες συνθήκες λειτουργίας απαιτούν τη δυνατότητα προσαρμογής από πλευράς των σχεδιαζόμενων πρωτοκόλλων.

Μέσο ασύρματης επικοινωνίας

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών μεταβάσεων, οι κόμβοι επικοινωνίας συνδέονται από ένα ασύρματο μέσο. Αυτές οι συνδέσεις μπορούν να διαμορφωθούν από τα ραδιοκυματικά, υπέρυθρα ή οπτικά μέσα. Για να επιτραπεί η ομαλή λειτουργία αυτών των δικτύων, το επιλεγμένο μέσο μετάδοσης πρέπει να είναι διαθέσιμο παγκοσμίως.

Κατανάλωση ενέργειας

Ο ασύρματος κόμβος- αισθητήρας, που είναι μια μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί μόνο να εξοπλιστεί με πηγή ισχύος περιορισμένης δυνατότητας. Σε μερικά σενάρια εφαρμογής, η επαναφόρτιση της μπαταρίας μπορεί να είναι αδύνατη. Η διάρκεια ζωής κόμβων αισθητήρων, επομένως, παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σε ένα πολύ αλματικό δίκτυο αισθητήρων, κάθε ένας κόμβος διαδραματίζει το διπλό ρόλο της πηγής δεδομένων και του δρομολογητή δεδομένων. Η έλλειψη λειτουργίας ορισμένων κόμβων μπορεί τότε να επιφέρει σημαντικές αλλαγές ως προς την τοπολογία δικτύου και μπορεί να προκαλέσει μεταφορά πακέτων δεδομένων και συνολική αναδιοργάνωση του δικτύου. Ως εκ τούτου, η συντήρηση της ενέργειας στην μπαταρία και η διαχείριση ισχύος από τα πρωτόκολλα λειτουργίας αποκτά αυξημένη σημασία. Είναι για αυτούς τους λόγους που οι ερευνητές στρέφουν προς το

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
σχεδιασμό των πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που είναι ενεργειακά αποδοτικοί σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων [20 – 26].

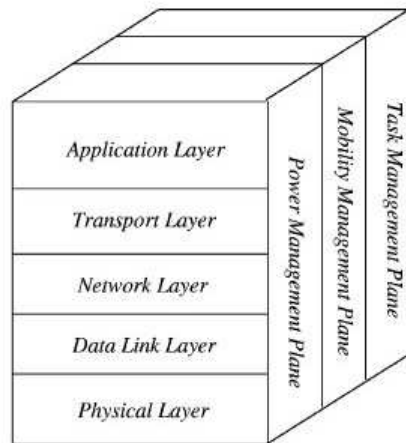
Σε άλλα κινητά και κατά περίπτωση δίκτυα, η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού, αλλά όχι η πρωταρχική προϋπόθεση, απλά επειδή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποκατασταθεί από το τελικό χρήστη. Η έμφαση των πρωτοκόλλων για αυτά τα δίκτυα είναι περισσότερο στην απόδοση μεθοδολογιών για ποιότητα υπηρεσίας παρά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Στα δίκτυα αισθητήρων, εν τούτοις, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μια σημαντική μετρική απόδοσης, με άμεσο επηρεασμό της διάρκειας ζωής των δικτύων. Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα σχετικά με την εφαρμογή μπορούν να σχεδιαστούν εναλλάσσοντας κατάλληλα άλλες μετρικές απόδοσης όπως η καθυστέρηση και η ρυθμαπόδοση με την εξοικονόμηση ενέργειας.

1.5 Γνωστά πρωτόκολλα και τεχνικές λειτουργίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Κάποια πρωτόκολλα που έχουν προταθεί για χρήση στα κατά περίπτωση δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενδεχομένως σαν προσαρμοσμένα πρωτόκολλα για ΑΔΑ. Ωστόσο, μια τέτοια επιλογή μπορεί να έχει κακές επιπτώσεις στο ΑΔΑ λόγω των ιδιαίτερων τεχνικών απαιτήσεων όπως εξηγήθηκε προηγουμένως: (i) οι κόμβοι αισθητήρες διαθέτουν χαμηλά αποθέματα ενέργειας στην μπαταρία τους καθώς και χαμηλές δυνατότητες μνήμης, (ii) οι πίνακες δρομολόγησης μεγαλώνουν σε συνάρτηση με το μέγεθος ή πλήθος κόμβων του δικτύου, (iii) τα κατά περίπτωση δίκτυα είναι σχεδιασμένα για επικοινωνία μεταξύ των δύο τελικών κόμβων μιας σύνδεσης (end-to-end communication) και επιπλέον τα πρωτόκολλα λειτουργίας δεν είναι ανεκτικά στη κίνηση κόμβων, (iv) τα ΑΔΑ έχουν διαφορετικές ανάγκες ως προς το σχήμα διευθυνσιοδότησης στο δίκτυο [31] και (v) τα πρωτόκολλα για τα κατά περίπτωση δίκτυα δεν υποστηρίζουν συνεργατική προώθηση δεδομένων.

Η στοίβα πρωτοκόλλων που είναι σχεδιασμένη για χρήση από τους κόμβους αισθητήρες και τον κόμβο – καταβόθρα (sink) εμφανίζεται στην Εικόνα 3. Το συγκεκριμένο σχήμα περιλαμβάνει επίγνωση της κατανάλωσης ενέργειας και

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
δρομολόγησης, επιφέρει την ενσωμάτωση των δεδομένων με τα πρωτόκολλα λειτουργίας / δρομολόγησης του δικτύου, μεταφέρει πληροφορία με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο πάνω από το ασύρματο μέσο και προωθεί τη συνεργατική προσπάθεια μεταξύ των κόμβων του δικτύου.



Εικόνα 3 Στοιβά πρωτοκόλλων για δίκτυα ΑΔΑ

Η στοιβά πρωτοκόλλων αποτελείται από τα εξής επίπεδα: το επίπεδο εφαρμογών, το επίπεδο μεταφοράς, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο ζεύξεων, το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο εξοικονόμησης κατανάλωσης ενέργειας, το επίπεδο ελέγχου κινητικότητας και το επίπεδο ελέγχου λειτουργιών. Ανάλογα με τον τύπο εφαρμογών για τους κόμβους αισθητήρες διαφορετικές τελικές εφαρμογές μπορούν να βασιστούν στο επίπεδο εφαρμογών. Το επίπεδο μεταφοράς αναλαμβάνει τη διαχείριση ροών πληροφορίας στο δίκτυο, εφόσον το επίπεδο εφαρμογών το απαιτεί. Στο επίπεδο δικτύου γίνεται η δρομολόγηση των πακέτων που απαιτεί το επίπεδο μεταφοράς. Δεδομένου ότι το περιβάλλον λειτουργίας είναι γεμάτο θόρυβο και οι κόμβοι αισθητήρες μπορεί να είναι κινούμενοι, το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC protocol) πρέπει να ελέγχει τις συγκρούσεις πακέτων κατά τη μετάδοση. Τέλος, το φυσικό επίπεδο πρέπει να αποτελείται από μια απλή και γερή τεχνική διαμόρφωσης για αποστολή και λήψη δεδομένων. Συμπληρωματικά, τα επίπεδα ελέγχου κατανάλωσης ενέργειας, ελέγχου κινητικότητας και διαχείρισης λειτουργιών του κόμβου αισθητήρα εκτελούν παράλληλα ελέγχους των αντίστοιχων λειτουργιών των κόμβων αισθητήρων. Αυτά τα επίπεδα ελέγχου βοηθούν τους ασύρματους κόμβους αισθητήρες να συντονίζονται στο επίπεδο, να συνεργάζονται προκειμένου να εκτελέσουν τη λειτουργία αίσθησης και παράλληλα

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων να χαμηλώσουν τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Στο ακόλουθο τμήμα της εισαγωγής της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα παρουσιάσουμε εν συντομία τα πιο χαρακτηριστικά πρωτόκολλα για το επίπεδο δικτύου που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

Πρωτόκολλα για τα κατά περίπτωση ασύρματα δίκτυα (MANET)

Δύο από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα για πολυαλματική δρομολόγηση πληροφοριών σε κατά περίπτωση δίκτυα (ad hoc networks) είναι τα DSR [32] και AODV [33], τα οποία υποστηρίζουν το σχηματισμό και συντήρηση μονοπατιών εντός του δικτύου για δρομολόγηση πακέτων από την πηγή στον προορισμό. Μελέτες σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων υπέδειξαν ότι η επεξεργασία δεδομένων εντός του δικτύου, ιδιαίτερα σε σχέση με τις ανάγκες των εφαρμογών που τρέχουν πάνω στο δίκτυο είναι απαραίτητες προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση των ΑΔΑ [31], [34]. Μια και τα πρωτόκολλα λειτουργίας για κατά περίπτωση δίκτυα δεν υποστηρίζουν τη σύμπτυξη δεδομένων και άλλες λειτουργίες σχετικά με τις πληροφορίες στο δίκτυο, αυτά δε θα είναι κατάλληλα για χρήση σε ΑΔΑ. Σε κάθε περίπτωση φαίνεται ότι από τη σκοπιά της λειτουργίας του δικτύου, πρωτόκολλα με προληπτική διαχείριση όπως είναι το DSDV [35] είναι καταλληλότερα για συνεχή μεταφορά δεδομένων στο δίκτυο εφόσον προβλέπουν την ύπαρξη των μονοπατιών εντός του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι η διαδικασία ενημέρωσης των ζεύξεων σε ένα δίκτυο είναι μια μορφή συνεχούς μεταφοράς δεδομένων εντός του δικτύου. Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να θεωρηθεί ότι τα πρωτόκολλα εκ των υστέρων αντίδρασης (DSR) είναι καταλληλότερα σε λειτουργία για διάχυση πληροφοριών που είναι εξαρτώμενη από την εκκίνηση σε συγκεκριμένα γεγονότα ή αιτήματα του τελικού χρήστη.

Πρωτόκολλα πλημμυρίδας – κουτσομπολιού

Η πλημμυρίδα είναι μια παλαιά τεχνική που μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στη πλημμυρίδα, κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων το επαναλαμβάνει με την αναμετάδοση, εκτός αν ένας μέγιστος αριθμός προωθήσεων για το πακέτο έχει επιτευχθεί ή το πακέτου έχει φτάσει το κόμβο προορισμό. Η πλημμυρίδα είναι μια αντιδραστική τεχνική, και δεν απαιτεί τη

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
δαπανηρή συντήρηση τοπολογίας και σύνθετους αλγορίθμους ανακαλύψεων διαδρομών.

Μια περαιτέρω τεχνική που προκύπτει από το πρωτόκολλο πλημμυρίδας είναι το πρωτόκολλο κουτσομπολιού [38] κατά το οποίο οι κόμβοι δεν εκπέμπουν συνολικά τα δεδομένα αλλά στέλνουν τα εισερχόμενα πακέτα σε έναν τυχαία επιλεγμένο γείτονά τους. Ένας κόμβος αισθητήρων επιλέγει τυχαία έναν από τους γείτονές του για να προωθήσει το πακέτο πληροφορίας. Μόλις λάβει ο κόμβος γείτονας τα δεδομένα, επιλέγει τυχαία έναν άλλο κόμβο αισθητήρων. Αν και αυτή η προσέγγιση αποφεύγει το πρόβλημα κατάρρευσης λόγω της κατοχής ακριβώς ενός αντιγράφου του μηνύματος σε οποιοδήποτε κόμβο, παίρνει μεγάλα χρονικά διαστήματα για να διαδοθεί το μήνυμα σε όλους τους κόμβους αισθητήρων του δικτύου.

Πρωτόκολλο SPIN

Μια οικογένεια προσαρμοστικών πρωτοκόλλων αποκαλούμενων SPIN έχει προταθεί για να απευθυνθεί στις ανεπάρκειες της κλασσικής πλημμύρας μέσω της διαπραγματεύσεως και της προσαρμογής πόρων. Η οικογένεια των πρωτοκόλλων SPIN [38] σχεδιάζεται βασισμένη σε δύο βασικούς άξονες: οι κόμβοι αισθητήρων πρέπει να ενεργούν αποτελεσματικά και να συντηρούν ενέργεια με την αποστολή δεδομένων που περιγράφουν τις πληροφορίες των αισθητήρων αντί της αποστολής ολόκληρων των δεδομένων, π.χ., εικόνα, και οι κόμβοι αισθητήρες πρέπει να ελέγχουν τις αλλαγές στους πόρους ενέργειας τους.

Πρωτόκολλο LEACH

Το πρωτόκολλο LEACH είναι ένα πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για δίκτυα αισθητήρων που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι δυνατή η συνεχής παράδοση δεδομένων στο δίκτυο δεδομένου ότι δεν υπάρχει κινητικότητα στο δίκτυο [34]. Το πρωτόκολλο LEACH χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική ομαδοποίησης όπου τα μέλη-κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους στον κόμβο- αρχηγό της τοπικής ομάδας. Οι κόμβοι αρχηγοί συμπυκνώνουν (aggregate) τα δεδομένα από κάθε ξεχωριστό κόμβο και προωθούν στη συνέχεια το συμπυκνωμένο πακέτο δεδομένων στον τελικό χρήστη- παρατηρητή. Το πρωτόκολλο LEACH εφαρμόζει κυκλική εναλλαγή του κόμβου αρχηγού στις ομάδες των κόμβων έτσι ώστε να γίνεται τοπικά ομοιόμορφη κατανάλωση

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ενέργειας. Για την εγκαθίδρυση κόμβων αρχηγών εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος κατά τη διάρκεια της περιόδου οργάνωσης του δικτύου. Ένας κόμβος αισθητήρας διαλέγει έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Εάν αυτός ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος από ένα κατώφλι $T(n)$, τότε ο κόμβος αισθητήρας γίνεται κόμβος αρχηγός. Το κατώφλι υπολογίζεται από τη σχέση

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P \lceil r \bmod (\frac{1}{P}) \rceil} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.3)$$

Όπου το P είναι το ποθητό ποσοστό κόμβων για να γίνουν κόμβοι αρχηγοί, r είναι ο παρών κύκλος λειτουργίας και G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν γίνει κόμβοι αρχηγοί στους τελευταίους $1/P$ κύκλους λειτουργίας.

Από τη στιγμή που εγκαθιδρύεται η ομαδοποίηση των κόμβων του δικτύου ξεκινά η σταθερή λειτουργία στο δίκτυο όπου τα κόμβοι μέλη χρησιμοποιούν ένα TDMA σχήμα (σχήμα διαμερισμού χρόνου σε μέλη ομάδων – time division multiplexing architecture) έτσι ώστε να τους ανατίθεται κάποιο χρονικό κομμάτι για να αποστείλουν τα δεδομένα τους. Έτσι το LEACH είναι κατάλληλο για χρησιμοποίηση σε δίκτυα όπου όλοι οι κόμβοι έχουν δεδομένα να αποστείλουν σε ομαλά ακολουθούμενα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο, είναι επιθυμητό το πρωτόκολλο να επεκταθεί για μοντέλα όπου οι κόμβοι μέλη του δικτύου δεν είναι συνεχώς σε λειτουργία και αποστέλλουν δεδομένα αλλά λειτουργεί σαν κινητοποιημένο από κάποιο γεγονός στο πεδίο παρακολούθησης. Επίσης το πρωτόκολλο μπορεί να επεκταθεί για δίκτυα με κινητούς κόμβους.

Πρωτόκολλο Directed Diffusion

Η κατευθυνόμενη διάχυση (Directed Diffusion) [19] είναι ένα πρωτόκολλο που λειτουργεί έχοντας ως βάση τα δεδομένα που ανακύπτουν στο δίκτυο κατά τη λειτουργία των αισθητήρων και όχι τη συγκεκριμένη τιμή για τη διεύθυνση του κάθε κόμβου. Τα δεδομένα στο δίκτυο ονομάζονται σύμφωνα με τα ζεύγη τιμών – ιδιοτήτων. Στην κατευθυνόμενη διάχυση το ενδιαφέρον για δεδομένα από τον τελικό χρήστη μπορεί να εκφραστεί από τους τελικούς χρήστες μέσω κόμβων παρατήρησης στο δίκτυο που διαχέουν αιτήματα στο δίκτυο κάνοντας χρήση των τοπικών μόνο αλληλεπιδράσεων μεταξύ κόμβων. Μόλις επιτευχθεί η επικοινωνία με έναν κόμβο αισθητήρων που ικανοποιεί το ερώτημα που διαχέεται στο δίκτυο (κόμβος πηγή), ο

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

κόμβος αυτός αρχίζει την αποστολή δεδομένων προς το κόμβο – καταβόθρα (sink node) χρησιμοποιώντας και πάλι τοπικές μόνον αλληλεπιδράσεις. Η απουσία της έννοιας μιας γενικότερης ταυτότητας (π.χ. της διεύθυνσης IP) κάνει το πρωτόκολλο της κατευθυνόμενης διάχυσης να είναι κατάλληλο και για δίκτυα που εμπεριέχουν κινητικότητα στους κόμβους. Η κατευθυνόμενη διάχυση είναι εφαρμόσιμη τόσο σε μοντέλα λειτουργίας που βασίζονται στα γεγονότα ενδιαφέροντος στο δίκτυο όσο και σε μοντέλα λειτουργίας που βασίζονται στα αιτήματα από τους τελικούς χρήστες. Οι αλληλεπιδράσεις τοπικού χαρακτήρα μεταξύ κόμβων επιτρέπουν στο πρωτόκολλο να είναι επεκτάσιμο για μεγάλα πλήθη κόμβων. Η κατευθυνόμενη διάχυση επεκτείνεται με βάση το πλήθος των ενεργών αιτημάτων που διατρέχουν το δίκτυο.

Πρωτόκολλα Publish/ Subscribe

Ένα άλλο σημαντικό μοντέλο για λειτουργία σε κινητά, ασύρματα δίκτυα είναι το μοντέλο της διαφήμισης/ προσεταιρισμού (publish/ subscribe) [36]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο οι επικοινωνίες είναι κυρίως ανώνυμες από τη φύση τους και εσωτερικά ασύγχρονες και με πολλαπλούς αποστολείς. Από πλευράς των εφαρμογών, ισχύει επίσης ότι το μοντέλο λειτουργίας με βάση τη διαφήμιση/ προσεταιρισμό εμπεριέχει τη σχέση μεταξύ παρατηρητή και φαινομένου για συγκεκριμένες εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν συγκεκριμένες αξιοπρόσεκτες ιδιότητες αυτού του μοντέλου σαν εναλλακτικό μοντέλο για ΑΔΑ. Μιας και το μοντέλο επικοινωνίας δεν είναι από χρήστη σε χρήστη, η επικοινωνία ανωνύμου φύσεως με το σχηματισμό πολλαπλών γκρουπ που λαμβάνουν πληροφορία συγχρόνως είναι μια δυνατή λύση. Από πλευράς υλοποίησεως, η ασύγχρονη επικοινωνία βοηθά στη διατήρηση της ενέργειας και την αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου.

2 ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) απαιτείται να είναι ικανά για την αυτό-οργάνωση των κόμβων αισθητήρων, έτσι ώστε ένα μεγάλο πλήθος κόμβων αισθητήρων να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρόπο που να είναι λειτουργικός, αξιόπιστος και κλιμακούμενος για μεγάλα πλήθη κόμβων. Προκειμένου να γίνεται εφικτή η συγκεκριμένη λειτουργία, είναι κατάλληλο η οργάνωση των κόμβων να γίνεται με την τεχνική της κατανεμημένης ομαδοποίησης για μεγάλα, ασύρματα δίκτυα. Η κατανεμημένη ομαδοποίηση των κόμβων αισθητήρων σε ομάδες σταθερού πλήθους κόμβων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι η διεξαγωγή ομαδοποίησης σε οσοδήποτε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων, παρέχει αυξημένη ομοιομορφία στην τελική τοπολογία του δικτύου και είναι αποδοτική από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας, όταν το δίκτυο είναι σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας.

2.1 Οι αλγόριθμοι Rapid και Persistent

Έχουν γίνει ήδη προσπάθειες ομαδοποίησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [39, 40], οι οποίες έδειξαν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, με σημαντικότερο μειονέκτημα ότι παρέβλεπαν να συμπεριλάβουν μια παράμετρο ουσιώδους σημασίας για μεθοδολογίες ομαδοποίησης, με πολύ σημαντική επίδραση πάνω στην τελική αξιοπιστία του συστήματος, που είναι το μέγεθος (δηλ. ο αριθμός κόμβων) της ομάδας που δημιουργείται στο τέλος της διαδικασίας. Μια εναλλακτική μεθοδολογία για ομαδοποίηση που καταλήγει σε ομάδες στο δίκτυο που έχουν περιορισμένο μέγεθος (σε αριθμό κόμβων) έχει προταθεί στο [41] από τους Krishnan, Starobinsky. Η προταθείσα μεθοδολογία έχει χαμηλό κόστος σε αριθμό μηνυμάτων που ανταλλάσσονται συνολικά στο δίκτυο και επιπλέον οι διαμορφωθείσες ομάδες κόμβων έχουν μικρή αλληλεπικάλυψη. Η μικρή αλληλεπικάλυψη των κόμβων είναι σημαντικό αποτέλεσμα γιατί επιτρέπει την πιο ομοιόμορφη κατανομή των ομάδων μέσα στο δίκτυο και επιπλέον δημιουργεί ομάδες με όσο το δυνατόν πιο κοντινό αριθμό κόμβων μεταξύ τους. Η ομαδοποίηση στο [41] βασίζεται στην ανάθεση ενός συγκεκριμένου αριθμού κουπονιών σε κάθε υπό διαμόρφωση ομάδα. Επιπλέον, οι διαμορφούμενες ομάδες στο

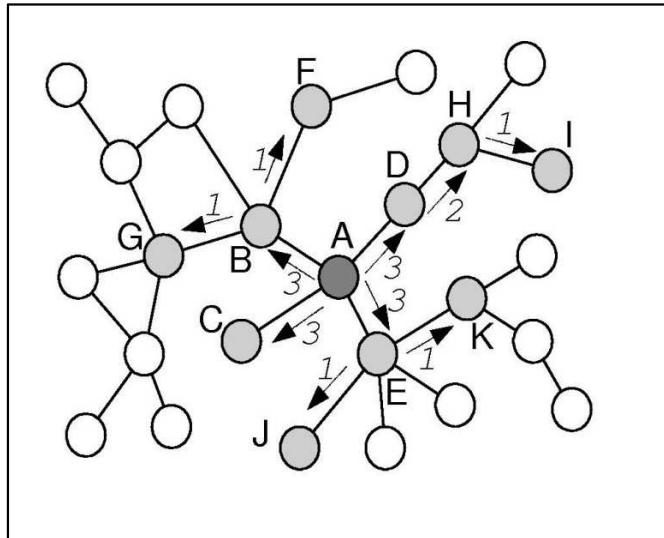
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
δίκτυο ξεκινούν από έναν κόμβο-αρχηγό, ο οποίος αναλαμβάνει να διαμοιράσει το συγκεκριμένο αριθμό κουπονιών, με στόχο να διαμορφώσει γύρω του μια ομάδα κόμβων πεπερασμένου μεγέθους. Ο κόμβος αρχηγός πολύ συχνά εξομοιώνεται με τον κόμβο αρχηγό της τελικής ομάδας στο δίκτυο ή αλλιώς γίνεται clusterhead μέσα στο συγκεκριμένο cluster.

Η υπό διαμόρφωση ομάδα στο δίκτυο αναπτύσσεται σταδιακά στους κόμβους που είναι πρώτοι ή δεύτεροι γείτονες γύρω από τον κόμβο αρχηγό. Η διαδικασία διαμόρφωσης είναι μια διαδικασία ανταλλαγής κουπονιών, τα οποία αρχικώς μοιράζονται από τον κόμβο αρχηγό και στη συνέχεια προωθούνται και διαμοιράζονται από τους άμεσα γείτονες του. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος γείτονας, όταν λαμβάνει ένα σύνολο κουπονιών από γείτονά του που έχει ήδη εισέλθει στην υπό διαμόρφωση ομάδα, καταναλώνει ένα κουπόνι για να εισέλθει ο ίδιος στην ομάδα και εφόσον υπάρχει υπόλειμμα κουπονιών, το προωθεί σε όσους γείτονες διαθέτει ώστε να γίνει περαιτέρω διαμοιρασμός. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πολλές φορές μέσα στο δίκτυο έως ότου μια ομάδα αναπτυχθεί πλήρως εντός του δικτύου (δηλ. ώσπου να καταναλωθούν όλα τα κουπόνια) ή αλλιώς ώσπου τα κουπόνια να περισσεύουν και να μην υπάρχουν ελεύθεροι κόμβοι να καταναλώσουν κουπόνι και άρα να εισέλθουν στην ομάδα.

Μια τέτοια μεθοδολογία για τη διαμόρφωση ομάδων μέσα στο δίκτυο επιτρέπει την ανάπτυξη ομάδων με βάση τοπικές αποφάσεις στους κόμβους του δικτύου. Με άλλα λόγια είναι μια πλήρως κατανεμημένη διαδικασία και δεν περιλαμβάνει σε κανένα βήμα της την ανάμειξη του κόμβου αρχηγού (δηλ. εκείνου που έκανε τον αρχικό διαμοιρασμό) ούτε καμιάς άλλης κεντρικοποιημένης οντότητας (π.χ. σταθμό βάσης) στο δίκτυο. Η ύπαρξη ενός πλήρως κατανεμημένου αλγορίθμου για το διαμοιρασμό κουπονιών και το σχηματισμό ομάδων είναι ωφέλιμη για ένα δίκτυο με μεγάλο αριθμό κόμβων (όπως τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων) γιατί μπορεί έτσι να περιοριστεί σημαντικά το φορτίο σε μηνύματα που σχετίζεται με την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Σε αντίθετη περίπτωση (δηλ. να πρέπει όλοι οι κόμβοι να επικοινωνούν με κεντρικό διακομιστή) ο αριθμός μηνυμάτων που ανταλλάσσεται στο δίκτυο είναι απαγορευτικός όταν το πλήθος των κόμβων αυξάνεται πολύ. Ένα ακόμη όφελος σχετιζόμενο με τη διαδικασία διαμοιρασμού κουπονιών των Krishnan, Starobinsky είναι η ευκολία καθορισμού του μεγέθους των ομάδων που σχηματίζονται μέσα στο δίκτυο. Μεταβάλλοντας το αρχικό πλήθος κουπονιών που διαμοιράζεται μπορεί κανείς εύκολα να ορίσει ένα άνω όριο στο πλήθος των κόμβων εντός κάθε ομάδας. Προφανώς το αρχικό πλήθος κουπονιών αποτελεί μοναχά άνω όριο του τελικού πλήθους των ομάδων. Το κάτω όριο για τις

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
ομάδες που σχηματίζονται είναι προφανώς ένας κόμβος. Η περίπτωση να έχουμε έναν κόμβο μόνο σε κάθε ομάδα εμφανίζεται όταν για κάποιο λόγο κάποιος κόμβος που έχει παραμείνει στο δίκτυο χωρίς να εντάσσεται σε ομάδα αποφασίσει να γίνει ο κόμβος αρχηγός. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν γύρω του γείτονες χωρίς ομάδα ώστε να διαμοιράσει τα κουπόνια του ο κόμβος αυτός θα ολοκληρώσει τελικά τη διαδικασία φτιάχνοντας ομάδα πλήθους ενός κόμβου. Τέλος, ο μέσος όρος του πλήθους κόμβων σε όλες τις ομάδες που έχουν φτιαχτεί στο δίκτυο σχετίζεται με την κατανομή των ομάδων εντός του δικτύου και εφόσον υπάρχει μικρή αλληλεπικάλυψη μεταξύ των ομάδων, ο τελικός μέσος όρος θα έχει τη μικρότερη δυνατή διακύμανση.

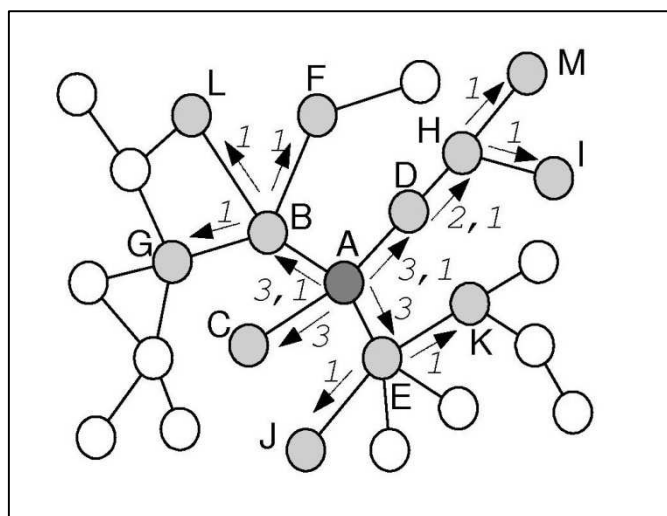
Έχουν προταθεί δύο μέθοδοι από τους Krishnan, Starobinski για αποτελεσματικό διαμοιρασμό κουπονιών εντός του δικτύου με ονομασίες: (α) Rapid και (β) Persistent. Στον αλγόριθμο Rapid, μια αρχική ποσότητα κουπονιών πλήθους $\beta_A - 1$ διαμοιράζεται από τον κόμβο A στους γείτονές του αφού πρώτα καταναλώνει ένα κουπόνι για τον εαυτό του ώστε να εισέλθει στην ομάδα που διαμορφώνεται. Οι γείτονες του A εκτελούν την ίδια ακριβώς διαδικασία έως ότου τα διαμοιραζόμενα κουπόνια να εξαντληθούν πλήρως. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα κουπόνι στέλνει απαντητικό μήνυμα (Acknowledgement) στον κόμβο αρχηγό A. Εάν ένας κόμβος λάβει ένα πλήθος από κουπόνια τα οποία δεν μπορεί να διαμοιράσει περαιτέρω γιατί δεν έχει άλλους κόμβους παιδιά στο υποδίκτυο του, τότε ο κόμβος αυτός απλά «σπαταλά» τα επιπλέον κουπόνια χωρίς να κάνει καμία χρήση για αυτά. Η επιβάρυνση (σε αριθμό μηνυμάτων) που δημιουργείται στο δίκτυο από αυτό τον αλγόριθμο είναι ελάχιστη. Επιπλέον, ο αλγόριθμος Rapid μπορεί να καταλήξει σε ομάδες με τελικό αριθμό κόμβων συμπεριλαμβανομένων στην ομάδα που είναι πολύ μικρότερος από το αρχικό πλήθος των κουπονιών που ανατέθηκαν στον κόμβο αρχηγό. Η Εικόνα 1 δίνει μια γραφική αναπαράσταση του τρόπου ανάπτυξης μιας ομάδας στο δίκτυο κατά το πρότυπο του αλγόριθμου Rapid.



Εικόνα 4 Ο αλγόριθμος κατανεμημένης ομαδοποίησης Rapid

Παρατηρώντας την ανάπτυξη του αλγορίθμου Rapid στο δίκτυο είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος Rapid, αν και γρήγορος στην εκτέλεση του, καταλήγει εύκολα σε ομάδες στο δίκτυο με πολύ μικρό πλήθος κόμβων. Ο διαμοιρασμός κουπονιών στον Rapid έχει συχνά αποτέλεσμα να χάνονται κουπόνια στο δίκτυο.

Ο αλγόριθμος Persistent από την άλλη μεριά έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε το τελικό μέγεθος της ομάδας που έχει δημιουργηθεί να είναι όσο πιο κοντά στο αρχικό πλήθος κουπονιών προς διαμοιρασμό.



Εικόνα 5 Ο αλγόριθμος κατανεμημένης ομαδοποίησης Persistent

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Στον αλγόριθμο Persistent, όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα δεν απαντά αμέσως στον κόμβο αρχηγό με Ack. Αντίθετα, ο κόμβος υπολογίζει πρώτα τον αριθμό των γειτόνων που έχει στο υποδίκτυο του και μετά διαμοιράζει τα κουπόνια που έλαβε στο μήνυμα. Στη συνέχεια ο κόμβος απαντάει με μήνυμα Ack ανάλογα με το αν το πλήθος των κουπονιών έχει διαμοιραστεί πλήρως στο υποδίκτυο ή αν έχουν περισσέψει κουπόνια αλλά περαιτέρω ανάπτυξη της ομάδας είναι αδύνατη. Στην περίπτωση που το πλήθος των κουπονιών δεν μπορεί να διαμοιραστεί στο σύνολό του (π.χ. εάν δεν υπάρχουν αρκετοί γείτονες). Τότε ο κόμβος στέλνει ένα Ack που περιλαμβάνει το πλήθος των κουπονιών που έχουν περισσέψει κατά τη διαδικασία. Ο κόμβος αρχηγός προσπαθεί να αναδιανείμει τα περισσευούμενα κουπόνια σε άλλους κόμβους γείτονές του. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν το πλήθος των κουπονιών έχει διανεμηθεί πλήρως στο δίκτυο ή αλλιώς όταν δεν υπάρχουν κόμβοι γύρω από τον κόμβο αρχηγό ώστε να διανεμηθούν κουπόνια επιτυχώς. Συνοψίζοντας, ο αλγόριθμος Persistent έχει ως βάση τον αλγόριθμο Rapid και είναι ενισχυμένος με ένα μηχανισμό ανάδρασης που φροντίζει να αναδιανείμονται τα περισσευούμενα κουπόνια (που είναι πολλά σε πλήθος, όπως είδαμε προηγουμένως κατά την αναλυτική περιγραφή του Rapid).

2.2 Ομαδοποίηση με βάση το δυναμικό των κόμβων

Οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης με χρήση πλήθους κουπονιών αποτελούν μια αποδοτική λύση για το πρόβλημα της κατανομής της ομαδοποίησης σε μεγάλα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δεδομένου ότι επιθυμούμε ένα μέγιστο αριθμό κουπονιών για κάθε ομάδα. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι στους αλγόριθμους Rapid και Persistent η διαδικασία διαμοιρασμού κουπονιών στους γείτονες-παιδιά των υποδικτύων των κόμβων που λαμβάνουν μήνυμα είναι τελείως αγνωστική σε σχέση με τους κόμβους-παιδιά, δηλ. οι κόμβοι που διαμοιράζουν κουπόνια έχουν άγνοια των ιδιοτήτων των κόμβων στους οποίους αναθέτουν κάποιο μέρος του συνόλου των κουπονιών. Σαν αποτέλεσμα, οι κόμβοι που διαμοιράζουν κουπόνια τείνουν είτε να αγνοούν κάποιο μέρος του υποδικτύου τους, που πιθανώς να έχει μεγάλο δυναμικό απορρόφησης κουπονιών, ή στην άλλη περίπτωση εφαρμόζουν επαναληπτικούς αλγορίθμους σαν διορθωτικό μέτρο για τον επιτυχή διαμοιρασμό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται κατά πολύ το κόστος στο

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων δίκτυο σε αριθμό μηνυμάτων (ακριβό κόστος για ενεργειακά αδύναμους κόμβους-αισθητήρες).

Με αφορμή την παραπάνω παρατήρηση για τους αλγόριθμους Rapid και Persistent, προτείνουμε μια καινούρια μεθοδολογία για τον καθορισμό των κόμβων αρχηγών μέσα στο δίκτυο και επίσης για τον αποδοτικότερο διαμοιρασμό του αρχικού πλήθους κουπονιών μεταξύ των κόμβων. Θεωρούμε ότι είναι αποδοτικότερος ο τρόπος διαμοιρασμού των κουπονιών όταν αυτός ενέχει κάποια γνώση για τους γείτονες που λαμβάνουν μηνύματα. Ένας αλγόριθμος με τέτοια χαρακτηριστικά θα ήταν απλός σε σχεδιασμό και θα συνδυαζόταν με χαμηλό κόστος λειτουργίας στο δίκτυο. Η βασική του ιδέα σχετίζεται με το διαμοιρασμό κουπονιών σε κόμβους των οποίων τα χαρακτηριστικά έχουν ληφθεί υπ' όψιν και χρησιμοποιούνται στην πράξη του διαμοιρασμού. Η υλοποίηση της μεταφοράς πληροφορίας μεταξύ των κόμβων γειτόνων θα γινόταν μέσω της ανταλλαγής HELLO μηνυμάτων, έτσι ώστε η διαδικασία αυτή να επιφέρει ελάχιστο επιπλέον κόστος στο δίκτυο (τα HELLO μηνύματα ανταλλάσσονται ούτως ή άλλως μέσα σε ένα πλήρως κατανομημένο δίκτυο – όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – και άρα δεν προκαλούμε επιπλέον κόστος χρησιμοποιώντας τα για να μεταφέρουμε κάποια πληροφορία σχετική με το διαμοιρασμό). Θεωρούμε την παρακάτω υπόθεση για να στοιχειοθετήσουμε τον αλγόριθμο που προτείνεται.

ΥΠΟΘΕΣΗ 1 Εάν ο κόμβος A έχει περισσότερους πρώτους γείτονες από τον κόμβο B, τότε το υπο-δέντρο που ενώνεται στον κόμβο A είναι πιθανότερο να είναι μεγαλύτερο (σε αριθμό κόμβων) από το υπο-δέντρο που ενώνεται στον κόμβο B.

Ονομάζουμε τον αριθμό πρώτων γειτόνων ενός κόμβου: *το δυναμικό του κόμβου*. Κάθε κόμβος στο δίκτυο διατηρεί ένα μικρό πίνακα που περιέχει το σύνολο των πρώτων γειτόνων του καθώς και τα αντίστοιχα δυναμικά τους. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν αυτό τον πίνακα για να επιλέξουν το πλήθος των κουπονιών που θα διανείμουν προς κάθε γείτονά τους, εφόσον έχουν κάποιο σύνολο κουπονιών προς διαμοιρασμό. Για οποιοδήποτε κόμβο X στο δίκτυο, έστω ότι $N(X) = \{x_1, x_2, \dots\}$ είναι το σύνολο των γειτόνων του κόμβου X , και έστω ότι $|N(X)|$ είναι το πλήθος των στοιχείων αυτού του συνόλου. Το δυναμικό του κόμβου X , που δηλώνεται με το σύμβολο $\pi(X)$, ορίζεται από την εξίσωση (2.1)

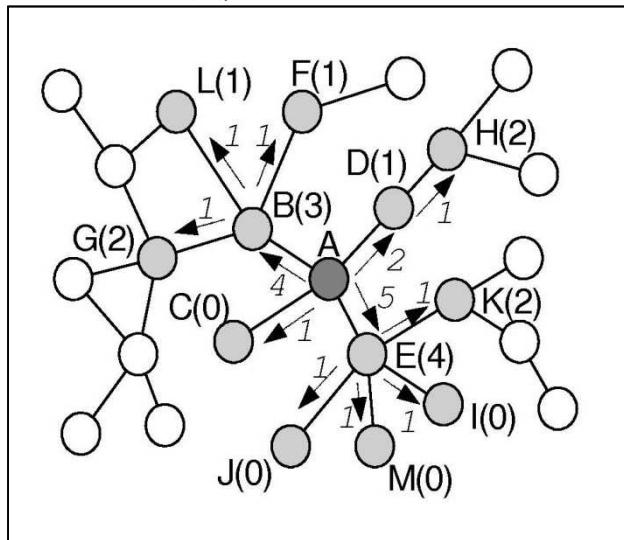
$$\pi(X) = |N(X)| \quad (2.1)$$

Έστω ότι A είναι ένας κόμβος αρχηγός που διαχειρίζεται κάποιο πλήθος κουπονιών β_A τα οποία πρέπει να διανεμηθούν μεταξύ όλων των γειτόνων του. Το πλήθος κουπονιών που γίνεται ανάθεση στον γείτονα $\alpha_i \in N(A)$ θα δίνεται από την εξίσωση 2.2

$$\beta_{\alpha_i} = \left\lfloor \frac{(\beta_A - 1)\pi(\alpha_i)}{\sum_{j=1}^{|N(A)|} \pi(\alpha_j)} \right\rfloor \quad (2.2)$$

Ο κόμβος A πρώτα κρατάει ένα κουπόνι για τον εαυτό του (έτσι ώστε να εισέλθει ο ίδιος στην αναπτυσσόμενη ομάδα) και στη συνέχεια μοιράζει τα υπολειπόμενα κουπόνια βάση των δυναμικών των κόμβων που είναι πρώτοι του γείτονες (δηλ. σε αναλογία με τα δυναμικά τους, βάση της εξίσωσης 2.2). Το σκεπτικό πίσω από αυτήν την εξίσωση είναι ότι οι κόμβοι γείτονες με τα μεγαλύτερα δυναμικά θα πρέπει να λαμβάνουν μεγαλύτερο πλήθος διαμοιραζόμενων κουπονιών σε σχέση με το πλήθος κουπονιών που θα λαμβάνουν οι πρώτοι γείτονες χαμηλότερου δυναμικού. Η αναλογία που εκφράζεται στην εξίσωση (2.2) είναι σύμφωνη με την υπόθεση 1 αυτού του κεφαλαίου.

Από την εξίσωση (2.2) μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι στην περίπτωση που το $(\beta_A - 1)$ δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας $\sum_{j=1}^{|N(A)|} \pi(\alpha_j)$ θα υπάρχει ένα πλήθος κουπονιών που δεν γίνονται ανάθεση σε γείτονες, και ισούται με το υπόλοιπο της παραπάνω διαίρεσης. Σε αυτήν την περίπτωση τα υπολειπόμενα κουπόνια πρέπει να γίνονται ανάθεση ομοιόμορφα μεταξύ των γειτόνων με τα υψηλότερα δυναμικά. Συγκεκριμένα, έστω ότι $\beta^r = (\beta_A - 1) - \sum_{j=1}^{|N(A)|} \beta_{\alpha_j}$, τότε για τους β^r γείτονες με τα υψηλότερα δυναμικά, ο κόμβος A θα εκτελεί $\beta_{\alpha_i} \leftarrow \beta_{\alpha_i} + 1$ πρώτου διανείμει τελικά τα κουπόνια στους κόμβους γείτονες. Η πρόταση αυτή μας εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξουν κουπόνια που χάνονται κατά το διαμοιρασμό κουπονιών. Ο ίδιος διαμοιρασμός με βάση τα δυναμικά κουπονιών επαναλαμβάνεται σε όλους τους κόμβους που λαμβάνουν κουπόνια σε όλα τα υπο-δέντρα των κόμβων γειτόνων του A . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σταδιακά έως ότου τα κουπόνια εξαντληθούν πλήρως ή δεν υπάρχει άλλος χώρος για ανάπτυξη της ομάδας στο δίκτυο. Ένα παράδειγμα διαμοιρασμού με βάση τα δυναμικά των κόμβων εμφανίζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 6 Διαμοιρασμός κουπονιών για κατανεμημένη ομαδοποίηση με βάση το δυναμικό κόμβων

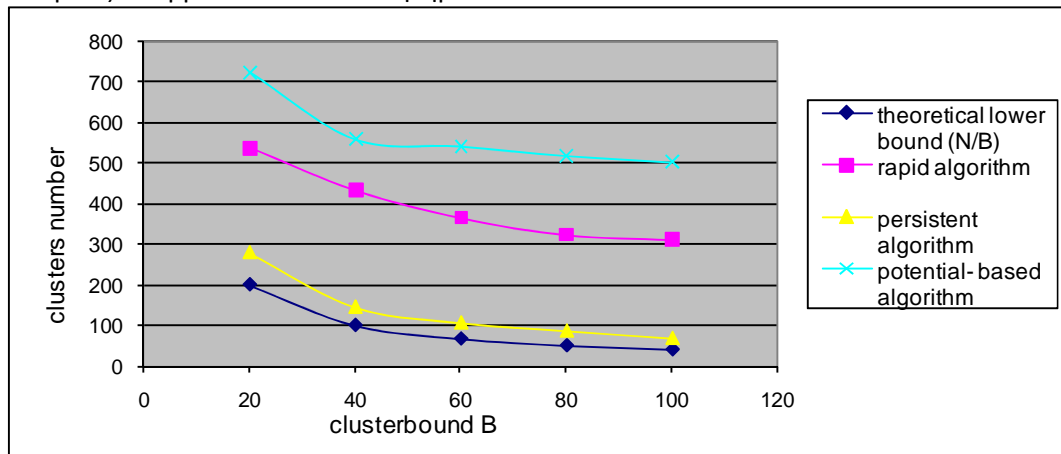
Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του αλγορίθμου μας πάνω σε κατανεμημένη ομαδοποίηση δικτύου με βάση τα δυναμικά των κόμβων, πρέπει να αναφερθούμε και στο θέμα της διαχείρισης των ομάδων στο δίκτυο. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε αλλαγές στην τοπολογία δικτύου, δηλ. είναι δυναμικά δίκτυα, γιατί οι κόμβοι είναι δυνατόν να αλλάζουν κατάσταση (ON/ OFF) και επιπλέον μπορεί οι κόμβοι να σταματούν τη λειτουργία τους λόγω εξαντλήσεως των ενεργειακών αποθεμάτων τους. Επίσης είναι πιθανό να προστίθενται καινούριοι κόμβοι στο δίκτυο. Τέτοιες αλλαγές στο πλήθος ή την κατάσταση λειτουργίας των κόμβων του δικτύου επιφέρουν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου αισθητήρων. Επιμέρους αλλαγές στην τοπολογία δικτύου θα πρέπει να ικανοποιούνται από αντίστοιχες αλλαγές στη δομή/ πλήθος των ομάδων που έχουν δομηθεί στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο ισχυριζόμαστε ότι πρέπει να υπάρχει μια μεθοδολογία διαχείρισης των υφιστάμενων ομάδων στο δίκτυο. Η μεθοδολογία διαχείρισης πρέπει να ενδείκνυται ώστε να διατηρεί τη δομή ομαδοποίησης στο δίκτυο μέσα σε ένα δυναμικά εναλλασσόμενο περιβάλλον.

Το προτεινόμενο σχήμα για ομαδοποίηση των κόμβων του δικτύου με βάση το δυναμικό των πρώτων γειτόνων τους υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον προσομοίωσης με όνομα Omnet++ (βασισμένου στη γλώσσα προγραμματισμού C++) [42]. Χρησιμοποιούμε τον προσομοιωτή για να ερευνήσουμε την απόδοση των τεχνικών ομαδοποίησης σε ένα στατικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, όπου η επικοινωνία μεταξύ κόμβων συνίσταται μονάχα στην ανταλλαγή μηνυμάτων. Για τις προσομοιώσεις

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
μας θα υλοποιήσουμε ένα ασύρματο δίκτυο μεγάλου πλήθους κόμβων, $N= 4000$, όπου τοποθετούμε τους κόμβους ομοιόμορφα σε ένα τετράγωνο μήκους $L= 100m$ και πλάτους $L= 100m$. Η τοπολογία δικτύου ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων με ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο μπορεί να δοθεί από το μοντέλο ενός Τυχαίου Γεωμετρικού Γράφου, $G(n,r)$, όπου n είναι το πλήθος των κόμβων του δικτύου και r είναι η ακτίνα ασύρματης επικοινωνίας που καθορίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Λόγω της ομοιόμορφης κατανομής των κόμβων στο χώρο, θα ισχύει ότι ο μέσος αριθμός πρώτων γειτόνων για κάθε κόμβο του δικτύου είναι σταθερός και ισούται με $\langle d \rangle = A\pi r^2$, με A να είναι η μέση πυκνότητα κόμβων στο δίκτυο. Πράγματι, ο μέσος αριθμός πρώτων γειτόνων στην τοπολογία μας προκύπτει ότι είναι $\langle d \rangle = 11.3$.

Εξετάζουμε στον προσομοιωτή μας τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης μέσω των τριών αλγορίθμων: (α) Rapid, (β) Persistent, (γ) Potential-based. Για τη σωστή διεξαγωγή της ομαδοποίησης στον προσομοιωτή χρησιμοποιούμε την απλουστευμένη διαδικασία για το χρονισμό των κόμβων αρχηγών. Επιλέγουμε τυχαία τον πρώτο κόμβο αρχηγό μέσα στο δίκτυο και στη συνέχεια διεξάγουμε ομαδοποίηση κατά Rapid, Persistent ή Potential-based. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία για τον πρώτο κόμβο αρχηγό, ο προσομοιωτής συλλέγει τα αποτελέσματα (τα ids των κόμβων) και στη συνέχεια επιλέγει τον επόμενο κόμβο τυχαία από το σύνολο των κόμβων στο δίκτυο που δεν ανήκουν σε καμία ομάδα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτείται ώστε όλοι οι κόμβοι του δικτύου να ενταχθούν σε κάποια ομάδα. Η μετρική που μας αφορά για την ομαδοποίηση είναι το τελικό πλήθος των ομάδων που δημιουργούνται μέσα στο δίκτυο.

Η Εικόνα 7 μας δίνει τα αποτελέσματα για προσομοίωση των αλγορίθμων, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με τεχνικά χαρακτηριστικά $N=4000$, $L=100m$ και $r=3m$. Το αρχικό πλήθος κουπονιών διαμορισμού B , που καθορίζει το μέγιστο αριθμό κόμβων που εισέρχεται σε κάθε ομάδα, μεταβάλλεται στις προσομοιώσεις μας, $B=20, 40, 60, 80, 100$. Η μετρική είναι ο τελικός αριθμός ομάδων που δημιουργούνται στο δίκτυο μετά το πέρας της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα των αλγορίθμων μπορούν να συγκριθούν ως προς μια θεωρητικής, βέλτιστης διαδικασίας η οποία θα έδινε έναν αριθμό από ομάδες στο δίκτυο που έχουν όλες το μέγιστο πλήθος κόμβων (B). Το αντίστοιχο πλήθος ομάδων δίνεται από το πηλίκο N/ B , και παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 ως η σειρά με τα μπλε τετράγωνα και όνομα «theoretical lower bound (N/B)».

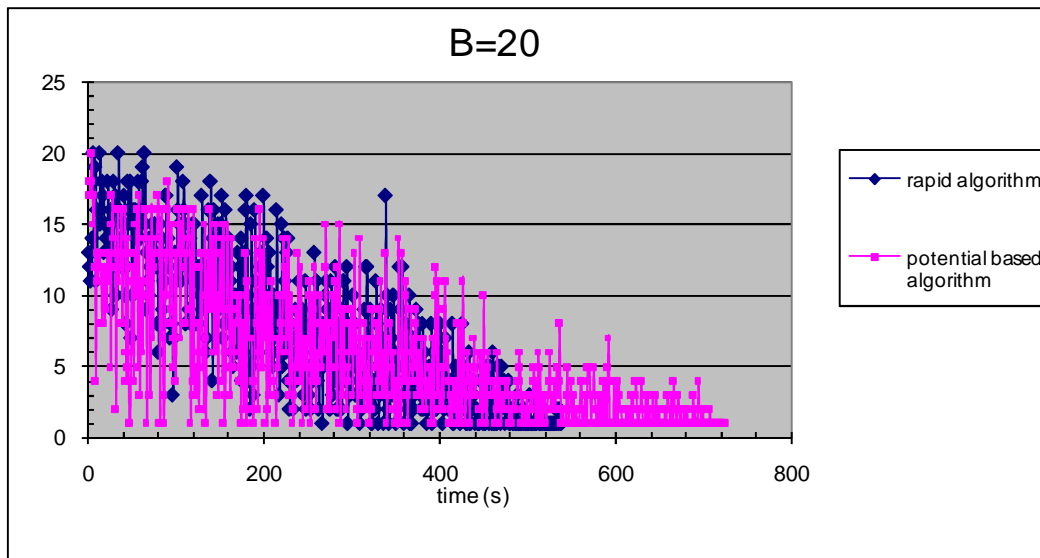


Εικόνα 7 Αποτελέσματα υλοποίησης αλγορίθμων ομαδοποίησης

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει στην Εικόνα 7 ότι ο αλγόριθμος Persistent δίνει αποτελέσματα που είναι πάρα πολύ κοντά στη θεωρητική, βέλτιστη λύση. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει όμως μεγάλο κόστος σε αριθμό μηνυμάτων, λόγω της επαναληπτικής φύσης του. Σε αντίθεση, ο Rapid αλγόριθμος έχει μικρότερο κόστος σε πλήθος μηνυμάτων, όμως το πλήθος των ομάδων είναι σημαντικά μεγαλύτερο σαν τελικό αποτέλεσμα. Κάτι τέτοιο συμβαίνει γιατί τα κουπόνια διαμοιρασμού χάνονται κατά την εξέλιξη του αλγόριθμου μέσα στο δίκτυο και τελικά οι ομάδες που σχηματίζονται έχουν αριθμό μελών σημαντικά μικρότερο σε σχέση με το αρχικό πλήθος κουπονιών που ανατέθηκε B. Τέλος, βλέπουμε στην Εικόνα 7, ότι ο αλγόριθμος Potential-based έχει και αυτός κακή συμπεριφορά για τη μετρική μας (χειρότερη από τον Rapid).

Το αποτέλεσμα για το διαμοιρασμό κουπονιών με βάση το δυναμικό των κόμβων γειτόνων προβλημάτισε πολύ κατά τη διεξαγωγή της έρευνας. Η τελική αιτία στην οποία καταλήξαμε ήταν ότι τα υψηλά δυναμικά των κόμβων στο δίκτυο προκαλούν «έλξη» πολλών κουπονιών προς τους κόμβους κάθε φορά που γίνεται διαμοιρασμός σε κοντινή περιοχή τους στο δίκτυο. Δεδομένου όμως ότι αυτοί οι κόμβοι μπορούν να εισαχθούν σε ομάδα κόμβων στο δίκτυο μόνο μια φορά, όλα τα «ελκούμενα» κουπόνια κατά τους επόμενους διαμοιρασμούς που θα συμβούν σε περιοχή κοντά στον κόμβο υψηλού δυναμικού, θα έχουν ως αποτέλεσμα την καταστροφή των κουπονιών και την μη αξιοποίησή τους. Έτσι δημιουργούνται εστίες καταστροφής κουπονιών εντός του δικτύου όταν τρέχει ο αλγόριθμος potential-based με αποτέλεσμα τα αποτελέσματά του να είναι κατά πολύ χειρότερα από τον αλγόριθμο rapid. Η εικόνα αυτή μπορεί να φανεί και στην Εικόνα 8, όπου φαίνεται η χρονική κατανομή των ομάδων που σχηματίζονται

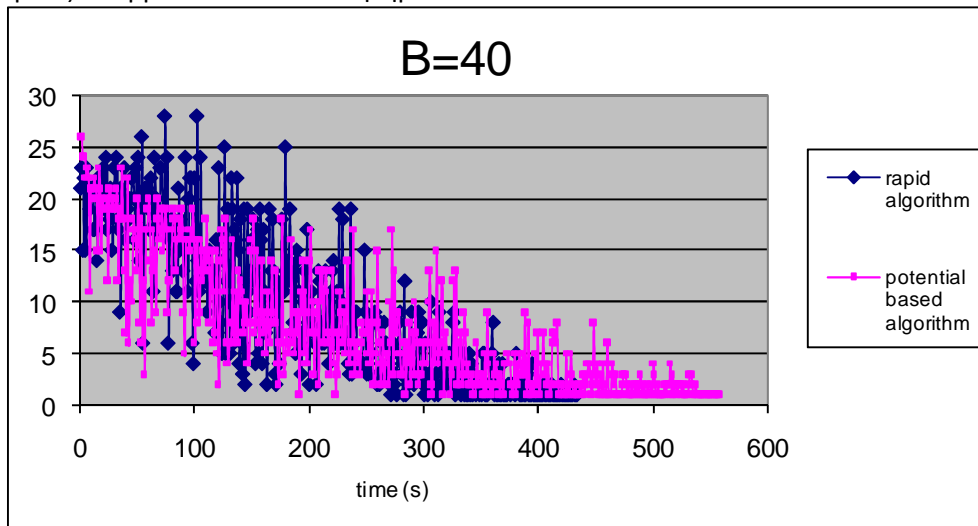
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων στο δίκτυο για τους αλγόριθμους Rapid και Potential-based, όταν το δίκτυο έχει χαρακτηριστικά $N=4000$, $L=100m$, $r=3m$, $B = 20$.



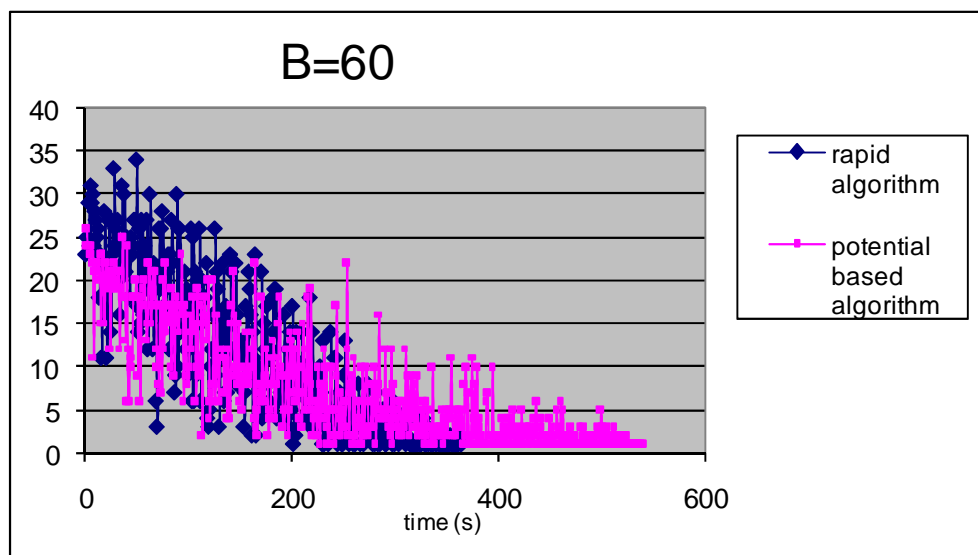
Εικόνα 8 Χρονική εξέλιξη της ομαδοποίησης δικτύου

Μπορεί κανείς να διακρίνει ότι ο αλγόριθμος potential-based προκαλεί τη δημιουργία περισσότερων ομάδων στο δίκτυο με μικρότερο πλήθος κόμβων ανά ομάδα. Αυτή η ομαδοποίηση είναι κακής ποιότητας γιατί οδηγεί μακριά από το επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι να έχουμε ομάδες κόμβους που είναι κοντά στο επιθυμητό πλήθος κόμβων B . Στη συνέχεια θα επισυνάψουμε στις Εικόνες 9, 10, 11 και 12 τις χρονοσειρές ομαδοποίησης των δύο αλγορίθμων για $B=40$, $B=60$, $B=80$ και $B=100$ αντίστοιχα. Παντού διακρίνεται η συμπεριφορά του αλγόριθμου potential-based που σημαίνει ότι προκαλείται η παρουσία περισσότερων ομάδων εντός του δικτύου με μικρότερο πλήθος κόμβων (σε σχέση με το Rapid). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά του αλγόριθμου προβλημάτισε και οδήγησε στην πρόταση της παρακάτω διαδικασίας ομαδοποίησης, που περιγράφεται στο τμήμα 2.3 και ονομάζεται κατευθυνόμενη ομαδοποίηση με χρήση κουπονιών για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

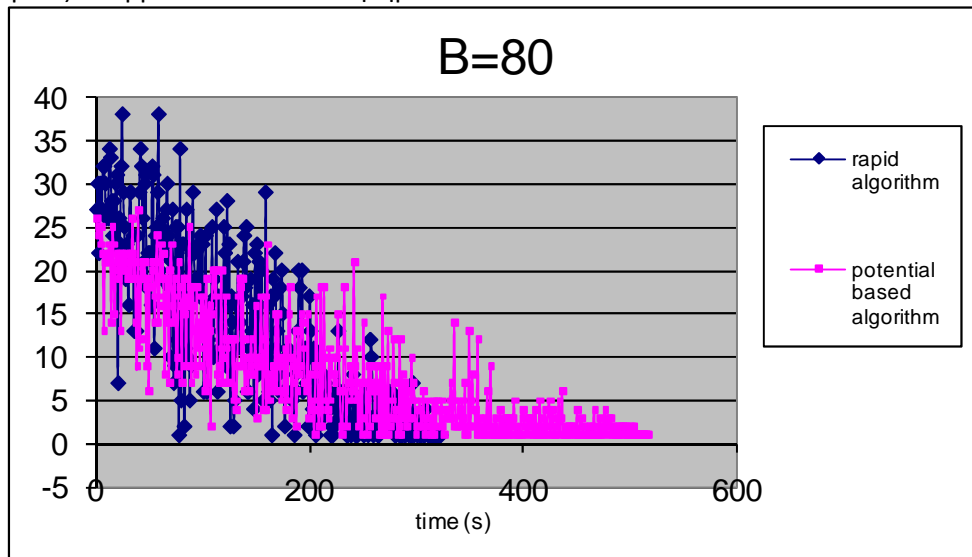


Εικόνα 9 Χρονική εξέλιξη της ομαδοποίησης δικτύου

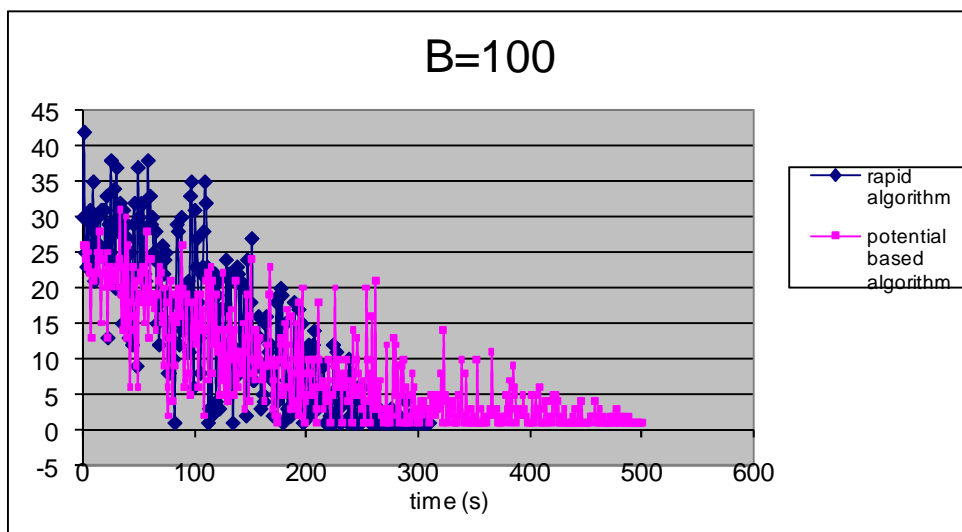


Εικόνα 10 Χρονική εξέλιξη της ομαδοποίησης δικτύου

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων



Εικόνα 11 Χρονική εξέλιξη της ομαδοποίησης δικτύου



Εικόνα 12 Χρονική εξέλιξη της ομαδοποίησης δικτύου

2.3 Κατευθυνόμενη ομαδοποίηση με χρήση κουπονιών για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μεγάλα πλήθη αυτόνομων κόμβων αισθητήρων, που είναι μικρές, φθηνές, ενσωματωμένες συσκευές. Οι κόμβοι αισθητήρες είναι εξοπλισμένοι με πομποδέκτες χαμηλής ισχύος που τους δίνουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με όλους τους κοντινούς τους γείτονες και τελικά μέσω αυτών με το υπόλοιπο δίκτυο. Παρά το περιορισμένο υλικό που διαθέτουν οι κόμβοι αισθητήρες και τα μικρά ενεργειακά τους αποθέματα, η ολική λειτουργία του δικτύου αισθητήρων μπορεί να γίνει υπερβολικά πολύπλοκη και εξεζητημένη.

Πρόσφατα τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναδείχθηκαν ως μια πολλά υποσχόμενη καινούργια πλατφόρμα για τη μεταφορά και επεξεργασία των εξαγόμενων δεδομένων από την παρακολουθούμενη περιοχή. Τέτοια δίκτυα ανανέωσαν το ενδιαφέρον για τεχνικές, αλγόριθμους ομαδοποίησης που είναι κατάλληλοι για εφαρμογή σε δίκτυα αισθητήρων. Τέτοιοι αλγόριθμοι πρέπει να είναι πλήρως κατανεμημένοι, να βασίζονται σε τοπική πληροφορία και κυρίως να είναι αποδοτική ενεργειακά έτσι ώστε να ταιριάζουν στα καινούργια, ιδιαίτερα απαιτητικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων κόμβων αισθητήρων και στις νεότερες εφαρμογές για δίκτυα αισθητήρων.

Η ύπαρξη των ομάδων μέσα στο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αποβεί θετική για τη λειτουργία του δικτύου, όπως έχει φανεί στα [40, 43]. Ένας τέτοιου είδους επιμερισμός στο δίκτυο μπορεί να ευνοήσει σημαντικά τις λειτουργίες του συντονισμού των κόμβων αισθητήρων, της διαχείρισης του δικτύου και της επεξεργασίας, σύμπτυξης των εξαγόμενων δεδομένων. Το ομαδοποιημένο δίκτυο είναι προτιμότερο να έχει ομάδες με δεδομένο αριθμό κόμβων ανά ομάδα. Αυτό ευνοεί τα πρωτόκολλα δρομολόγησης και άλλες εφαρμογές με αντίστοιχες απαιτήσεις. Την ίδια στιγμή η διαδικασία αυτό-οργάνωσης του δικτύου δεν πρέπει να εξαντλεί τις μπαταρίες των κόμβων [41]. Συνεπώς θα πρέπει οι αλγόριθμοι αυτό-οργάνωσης που χρησιμοποιούνται να τελειώνουν σε μικρά χρονικά διαστήματα ή αλλιώς να χρησιμοποιούν χαμηλό αριθμό ανταλλασσόμενων μηνυμάτων.

Μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να προσεχθεί κατά το σχεδιασμό αλγορίθμων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι το γεγονός ότι οι κόμβοι αισθητήρες είναι περιορισμένοι να επικοινωνούν μονάχα με τους άμεσα κοντινούς γείτονες τους. Επικοινωνία ενός κόμβου με άλλους κόμβους που είναι σε μακρινή θέση δεν είναι

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
επιθυμητή και επί πλέον είναι ακατάλληλη σε ΑΔΑ λόγω των ισχυρών περιορισμών σε ενεργειακά αποθέματα και λόγω άλλων τεχνικών δυσκολιών που υπάρχουν στα δίκτυα αισθητήρων. Κατά συνέπεια είναι σημαντικό να σχεδιάσουμε αλγόριθμους και πρωτόκολλα τα οποία είναι *περιορισμένα τοπικά* ή και *αυστηρώς περιορισμένα τοπικά*, όπως παρουσιάζεται στο [44]. Ένα αυστηρώς περιορισμένο τοπικά πρωτόκολλο είναι ένα περιορισμένο τοπικά πρωτόκολλο στο οποίο οποιαδήποτε πληροφορία επεξεργάζεται ένας κόμβος είναι είτε τοπική από τη φύση της είτε γενική από φύση της, αλλά είναι δυνατό να τη λάβει ο κόμβος μέσω ερωτημάτων των τοπικών γειτόνων του [45]. Τοπικές ανταλλαγές πληροφοριών είναι δυνατές μέσω των ανταλλαγών περιοδικών μηνυμάτων HELLO τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε ασύρματα δίκτυα για την εύρεση και διατήρηση της τοπικής γειτονιάς ενός κόμβου. Τα μηνύματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά πληροφορίας με οποιοδήποτε γενικό στόχο.

Σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής προτείνουμε ένα καινούργιο αυστηρώς τοπικά περιορισμένο πρωτόκολλο ομαδοποίησης για χρήση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο στόχος για το πρωτόκολλο είναι η ομαδοποίηση του δικτύου σε μη επικαλυπτόμενες ομάδες σταθερού πλήθους κόμβων. Το πρωτόκολλο αυτό που ονομάζεται «κατευθυνόμενη ομαδοποίηση με χρήση κουπονιών» καταλήγει σε ομάδες κόμβων με πλήθος όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο επιθυμητό άνω όριο. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτελείται σε κύκλους που συμπίπτουν με τις περιοδικές ανταλλαγές μηνυμάτων HELLO και επί πλέον τα χρησιμοποιούν ούτως ώστε εκείνα να μεταφέρουν (με ελάχιστο επί πλέον κόστος, μέσω σημαίας) την απαραίτητη πληροφορία για την πρόοδο της ομαδοποίησης.

Θα ορίσουμε εδώ κάποιες βασικές ποσότητες που χρησιμοποιούνται στην εργασία μας. Οι κόμβοι και οι ακμές του δικτύου ενώνονται σε ένα μη κατευθυντικό γράφο $G = (V, E)$, όπου το σύνολο V αντιπροσωπεύει τους κόμβους με πλήθος $|V| = n$ κόμβους και το σύνολο E αντιπροσωπεύει τις ακμές με πλήθος $|E| = m$. Μια ακμή $(u, v) \in E$ υφίσταται τότε και μόνον τότε όταν οι κόμβοι $u, v \in V$ μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα μεταξύ τους. Κάθε κόμβος $v \in V$ διαθέτει μοναδική ταυτότητα $ID(v)$. Μια ομάδα στο δίκτυο είναι ένα ενωμένο τμήμα του αρχικού γράφου G μαζί με έναν κόμβο ο οποίος έχει οριστεί σαν κόμβος αρχηγός $v_0 \in V$ και από τον οποίο ξεκινά (είναι η ρίζα) για ένα υπο-δέντρο μέσα στο γράφο. Υπάρχει τέλος ένα μέγιστο όριο για το πλήθος κόμβων στις ομάδες, το οποίο το ονομάζουμε όριο ομαδοποίησης B , όπου $B \ll n$.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η μεθοδολογία που προτείνουμε σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής ανήκει στην κατηγορία των αυστηρώς περιορισμένων τοπικά πρωτοκόλλων. Η συνολική πληροφορία που χρειάζεται το πρωτόκολλο για να λειτουργήσει μπορεί να εξαχθεί από τους άμεσα πρώτους γείτονες των κόμβων. Δεν απαιτείται σε καμία φάση λειτουργίας του πρωτοκόλλου κάποια επικοινωνία μεταξύ κόμβων στο δίκτυο, οι οποίοι να βρίσκονται περισσότερο από ένα άλματα μακριά μεταξύ τους.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο τμήμα 2.1 της παρούσας διδακτορικής διατριβής, έχουν ήδη προταθεί αλγόριθμοι στη βιβλιογραφία που ανήκουν στην κατηγορία των κατανεμημένων, χαμηλού πλήθους μηνυμάτων και μεγίστου πλήθους κουπονιών. Η βασική λειτουργία τέτοιων αλγορίθμων είναι να γίνεται ανάθεση κουπονιών από κάποιο κόμβο αρχηγό στους διπλανούς γείτονες κόμβους, έτσι ώστε τελικά να σχηματίζεται μια ομάδα εντός του δικτύου με με μέγιστο πλήθος κόμβων ίσο με το αρχικό πλήθος κουπονιών που ανατέθηκε στον κόμβο αρχηγό. Ένας κόμβος που συμμετέχει στη διαδικασία παίρνει αποφάσεις σε κάθε κύκλο λειτουργίας του πρωτοκόλλου σχετικές με την ανάπτυξη της ομάδας στην περιοχή του, οι οποίες βασίζονται στην κατάσταση των κόμβων γειτόνων που βρίσκονται στην τοπική γειτονιά μονάχα και σε καμία περίπτωση δεν συμπεριλαμβάνεται γνώση που αφορά τον κόμβο αρχηγό. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η ανάπτυξη ομάδων μέσα στο δίκτυο με κόστος σε αριθμό μηνυμάτων σημαντικά μικρότερο όταν συγκρίνεται με παλαιότερες λύσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και είναι ευρύτερα γνωστές (από το 1987), όπως η μέθοδος του «δευρυνόμενου δαχτυλιδιού» [46].

Οι δύο αλγόριθμοι που έχουν ήδη προταθεί και περιγραφεί στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι ο αλγόριθμος Rapid και ο αλγόριθμος Persistent. Ο πρώτος αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα γρήγορος (περιλαμβάνει μικρό πλήθος μηνυμάτων ή αλλιώς ολοκληρώνεται σε μικρό πλήθος διαδοχικά εκτελούμενων κύκλων) και καταλήγει σε ομάδες στο δίκτυο με μέγιστο πλήθος κόμβων. Ο δεύτερος αλγόριθμος, Persistent, αποτελεί την επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου Rapid, καθώς στοχεύει στη βελτίωση των κακών αποτελεσμάτων ομαδοποίησης του Rapid. Το βασικό χαρακτηριστικό των δυο αλγορίθμων είναι η διαδικασία διαμοιρασμού κουπονιών, έτσι ώστε να σχηματίζεται η ομάδα κόμβων εντός του δικτύου. Και οι δυο αλγόριθμοι εκτελούνται εξ αρχής από έναν τυχαίο κόμβο, ο οποίος ονομάζεται κόμβος αρχηγός.

Ο αλγόριθμος Rapid ξεκινά με ένα αρχικό πλήθος κουπονιών B , τα οποία πρέπει να γίνουν ανάθεση στους κόμβους γείτονες του κόμβου αρχηγού. Ο κόμβος αρχηγός καταναλώνει ένα κουπόνι για να εισέλθει στην ομάδα και διαμοιράζει ομοιόμορφα τα $B-1$

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
κουπόνια που έχουν περισσέψει μεταξύ των πρώτων γειτόνων. Στη συνέχεια ακολουθεί η ίδια διαδικασία από τους κόμβους παιδιά στο υπο-δέντρο του κόμβου αρχηγού, οπότε στο τέλος το αρχικό πλήθος κουπονιών έχει εξαντληθεί. Οι κόμβοι που λαμβάνουν κουπόνια στέλνουν μηνύματα acknowledgement όταν (α) εξαντλείται το πλήθος κουπονιών ή (β) όταν λάβουν μηνύματα acknowledgements από όλα τα παιδιά γείτονές τους. Ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται όταν ο κόμβος αρχηγός λάβει μηνύματα acknowledgement από όλους τους αρχικώς ειδοποιημένους κόμβους.

Ο αλγόριθμος Persistent αντίθετα, δεν στέλνει αμέσως acknowledgement στον κόμβο γονέα όταν λαμβάνει acknowledgement από όλους τους ερχόμενους σε επαφή με κόμβους. Αντ' αυτού, υπολογίζει το έλλειμμα μεταξύ του πλήθους κουπονιών που ανατέθηκαν και τα μεγέθη των υπο δέντρων που αναφέρθηκαν από subtree όλους τους κόμβους που ήρθαν αρχικά σε επαφή. Εάν το έλλειμμα είναι διάφορο του μηδενός, τότε ο αλγόριθμος προσπαθεί να ανακατανεμίσει το έλλειμμα ομοιόμορφα μεταξύ των κόμβων που κατόρθωσαν αρχικώς να διανείμουν/ αναθέσουν επιτυχώς τους προηγούμενους προϋπολογισμούς τους. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν τα κουπόνια έχουν εξαντληθεί πλήρως ή δεν γίνεται άλλη ανάπτυξη ομάδων μέσα στο δίκτυο.

Ένα σημαντικό τμήμα μεθοδολογιών για ομαδοποίηση στο δίκτυο μέσω κουπονιών είναι ο μηχανισμός εκλογής των κόμβων αρχηγών μέσα στο δίκτυο. Ένας τυχαίοποιημένος μηχανισμός για την εκλογή των κόμβων αυτών έχει προταθεί στο [3], όπου οι κόμβοι αποφασίζουν κατανεμημένα να εκλεγούν σε κόμβους αρχηγούς εφόσον έχει παρέλθει ένας προσεκτικά διαλεγμένος εκθετικά κατανεμημένος κόμβος. Πρέπει οι χρόνοι που διαλέγονται από τους κόμβους να είναι με προσοχή διαλεγμένοι έτσι ώστε οποιεσδήποτε δυο ομάδες να αναπτύσσονται στο δίκτυο με αρκετή απόσταση μεταξύ τους τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Αυτό είναι το θεωρητικό μοντέλο για την επιλογή κόμβων αρχηγών, στις προσομοιώσεις μας όμως ακολουθούμε άλλη διαδικασία, όπου οι κόμβοι αρχηγοί για κάθε ομάδα εκλέγονται «σε σειρά», δηλαδή φροντίζουμε στο πρόγραμμα, ο επόμενος κόμβος αρχηγός για ομαδοποίηση στο δίκτυο να εκλεγεί μόνον εφόσον ο αμέσως προηγούμενος κόμβος αρχηγός έχει ολοκληρώσει τη δική του διαδικασία ομαδοποίησης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση της κατανεμημένης ομαδοποίησης σε ομάδες στο δίκτυο θεωρούμε ότι είναι αρκετά καλή προκειμένου να μετρηθούν οι αποδόσεις των αλγορίθμων ομαδοποίησης και επιπλέον θεωρούμε ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα θα συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τα αποτελέσματα μιας πραγματικής διαδικασίας σε ένα δίκτυο που διαθέτει έναν έξυπνο και αποδοτικό μηχανισμό κατανεμημένης ενεργοποίησης των κόμβων αρχηγών.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ο αλγόριθμος Rapid διαθέτει χαμηλή πολυπλοκότητα μηνυμάτων $O(B)$ αλλά έχει πολύ κακή απόδοση στη χειρότερη περίπτωση (σε σχέση με το τελικό πλήθος των κόμβων που σχηματίζονται στο δίκτυο). Ο αλγόριθμος Persistent, από την άλλη μεριά, είναι η επαναληπτική έκδοση του αλγορίθμου Rapid, και για αυτό το λόγο αποδίδει εξαιρετικά ως προς το τελικό πλήθος των ομάδων που σχηματίζονται στο δίκτυο, αλλά η απόδοση του ως προς την πολυπλοκότητα σε αριθμό ανταλλασσόμενων μηνυμάτων είναι περιορισμένη, $O(B^2)$ και αντίστοιχα είναι αργός στο χρόνο που απαιτείται για πλήρη ομαδοποίηση του δικτύου.

Τέλος, ένα σημαντικό μειονέκτημα και για τους δυο παραπάνω αναφερθέντες αλγόριθμους είναι ότι αποστέλλουν κουπόνια διαμοιρασμού «τυφλά» στους γείτονές τους, συμπεριλαμβάνοντας έτσι κόμβους γείτονες που είναι πιθανό να μην χρησιμοποιήσουν τελικά τα κουπόνια (Rapid) ή να τα επιστρέψουν στον κόμβο αρχηγό στην περίπτωση του αλγορίθμου (Persistent). Το συγκεκριμένο μειονέκτημα μπορεί να επιφέρει σημαντικά αρνητικά αποτελέσματα στο τελικό πλήθος κόμβων των ομάδων που σχηματίζονται στο δίκτυο και στον τελικό απαιτούμενο χρόνο για ομαδοποίηση του δικτύου/ ή αλλιώς στην αποδοτικότητα του αλγορίθμου ως προς την πολυπλοκότητα σε αριθμό ανταλλασσόμενων μηνυμάτων.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω αναφερθέντων προβλημάτων, προτείνουμε σε αυτή τη διατριβή δυο καινούριους, αυστηρά περιορισμένους τοπικά αλγορίθμους ομαδοποίησης κουπονιών: (α) αλγόριθμος κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών και (β) αλγόριθμος κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών και τυχαίων καθυστερήσεων.

2.3.1 Ο αλγόριθμος κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών (DBB algorithm)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι αλγόριθμοι Rapid και Persistent διανείμουν κουπόνια με «τυφλό» τρόπο κατά τον οποίο η κατάσταση του κόμβου γείτονα που θα λάβει κουπόνι (δηλ. αν έχει προηγουμένως εισέλθει σε κάποια ομάδα ή όχι) δε λαμβάνεται υπ' όψιν. Συνεπώς, πολλά κουπόνια πάνε χαμένα (ή επιστρέφουν στον κόμβο αρχηγό) όταν διανέμονται σε κόμβους που έχουν προηγουμένως ενταχθεί στην ομάδα κάποιου

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων άλλου κόμβου αρχηγού. Αυτή η «τυφλή» διανομή κουπονιών αποτελεί αιτία για την κακή απόδοση των αλγορίθμων σε σχέση με τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης (ως προς το πλήθος των κόμβων για τις ομάδες στην περίπτωση του Rapid και ως προς το πλήθος ή πολυπλοκότητα ανταλλασσόμενων μηνυμάτων στην περίπτωση του Persistent).

Η παρούσα διδακτορική διατριβή περιλαμβάνει προτάσεις βελτίωσης της διαδικασίας ομαδοποίησης στο δίκτυο σε σχέση με την κακή επιλογή των κόμβων γειτόνων για την αποστολή κουπονιών ομαδοποίησης. Η προτεινόμενη βελτίωση στη διαδικασία περιλαμβάνει την ενημέρωση μεταξύ κόμβων γειτόνων σχετικά με το αν έχουν ενταχθεί σε κάποια ομάδα ή όχι. Αυτή η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ γειτονικών κόμβων έχει μικρό κόστος επάνω στο δίκτυο και μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη διαδικασία διαμοιρασμού κουπονιών έτσι ώστε οι κόμβοι να μπορούν να συμπεριλάβουν την πληροφορία σχετικά με την κατάσταση ομαδοποίησης των γειτόνων τους και συνεπώς να μπορούν να διαμοιράσουν κουπόνια προς τις περιοχές όπου υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι που δεν είναι ήδη ομαδοποιημένοι. Μια τέτοια διαδικασία έχει το θετικό αποτέλεσμα ότι μειώνει το πλήθος των κουπονιών που καταλήγουν να σπαταλούνται ή να επιστρέφονται κατά το διαμοιρασμό.

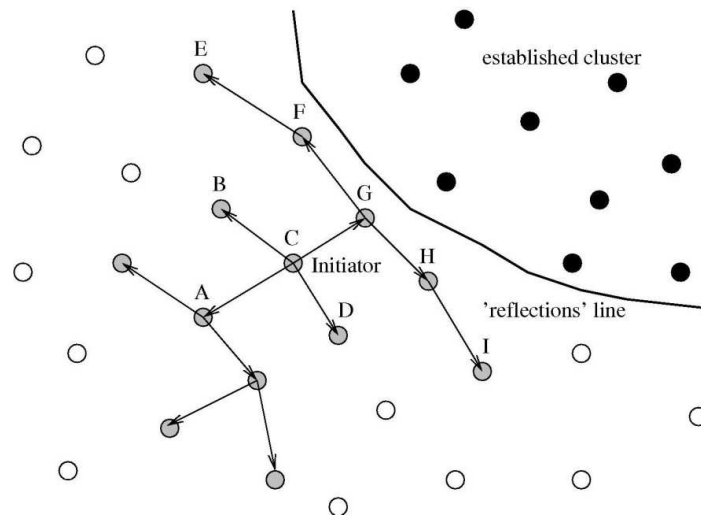
Ο προτεινόμενος αλγόριθμος διαμοιρασμού θα περιγραφεί με τη χρήση βημάτων έτσι ώστε τα βήματα της διαδικασίας να ξεκινούν με την εκλογή ενός κόμβου αρχηγού και να ολοκληρώνονται όταν η εξελισσόμενη ομάδα έχει ολοκληρωθεί στο δίκτυο. Το πλήθος των βημάτων (κύκλων) που απαιτούνται για τον πλήρη σχηματισμό μιας ομάδας μέσα στο δίκτυο θα είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας των προτεινόμενων αλγορίθμων μας. Μια τέτοια μετρική μπορεί επίσης να χαρακτηρίσει το βαθμό πολυπλοκότητας η πλήθους ανταλλασσόμενων μηνυμάτων και επιπρόσθετα μπορεί να χαρακτηρίσει το χρόνο που απαιτείται για πλήρη ομαδοποίηση στο δίκτυο (δεδομένου ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών κύκλων λειτουργίας είναι σταθερό).

Χωρίς να χάνεται το γενικό της υποθέσεως, θα θεωρηθεί στην υπόλοιπη εργασία ότι τα βήματα του αλγόριθμου ομαδοποίησης εκτελούνται ακριβώς μετά την περιοδική ανταλλαγή μηνυμάτων HELLO μεταξύ κόμβων γειτόνων. Έτσι, το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών βημάτων, κύκλων των προτεινόμενων αλγορίθμων θα ορίζεται από την περίοδο μεταξύ δύο ανταλλαγών από HELLO μηνύματα και η πληροφορία σχετικά με την κατάσταση ομαδοποίησης των κόμβων (εάν έχουν εισαχθεί σε κάποια ομάδα ή όχι – μια σημαία 0/1 στο εξερχόμενο HELLO μήνυμα από τον κόμβο) θα είναι εισαγμένη εντός των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων. Το κίνητρο πίσω από αυτή την

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
πρόταση μας είναι να χρησιμοποιήσουμε προς όφελός μας κάποιες ανταλλαγές μηνυμάτων που συμβαίνουν τυπικά σε δίκτυα ΑΔΑ (κυρίως σαν μέρος των απαραίτητων διαδικασιών αναγνώρισης και διαχείρισης της τοπολογίας δικτύου) και έτσι να αποφύγουμε την εισαγωγή επιπλέον μηνυμάτων που θα πρέπει να ανταλλάσσονται μεταξύ των ούτως ή άλλως ενεργειακά περιορισμένων κόμβων του δικτύου ΑΔΑ. Η ανταλλαγή HELLO μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων είναι διαρκώς παρούσα σε ένα δίκτυο ΑΔΑ και τα μηνύματα αυτά χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη και διαχείριση τοπολογίας του δικτύου. Επιπλέον η χρονική στιγμή εφαρμογής της διαδικασίας ομαδοποίησης ή της διαχείρισης ομάδων θα συμπίπτει με τη στιγμή της ανακάλυψης ή διαχείρισης κόμβων του δικτύου και έτσι μπορούμε να χρησιμοποιούμε τα ανταλλασσόμενα μηνύματα HELLO.

Είναι ήδη ευρέως γνωστό ότι τα μηνύματα HELLO αποκαλύπτουν στους κόμβους τη φυσική γειτονιά τους (δηλαδή κάνουν αναγνώριση νέο-εισερχόμενων κόμβων στο δίκτυο) και συνολικά οι γειτονιές αυτές σε κάθε κόμβο αποτελούν την τοπολογία δικτύου. Προσθέτοντας μια σημαία (flag), μεγέθους 1 bit, στο τέλος των HELLO μηνυμάτων, η οποία (σημαία) θα μεταφέρει την πληροφορία σχετικά με το αν ο κόμβος που έστειλε το μήνυμα έχει ήδη ομαδοποιηθεί ή όχι, η μη ομαδοποιημένη φυσική γειτονιά των κόμβων αποκαλύπτεται. Όλες αυτές οι γειτονιές μαζί σχηματίζουν την τοπολογία δικτύου που δεν είναι ομαδοποιημένη. Η τοπολογία δικτύου που δεν είναι ομαδοποιημένη ορίζεται ως το υποσύνολο των φυσικών γειτόνων (του συνόλου των γειτόνων) που δεν έχουν εισαχθεί σε κάποια ομάδα.

Τα μηνύματα HELLO μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μεταφέρουν πληροφορία σχετική με την ομαδοποίηση (μηνύματα που μεταφέρουν κουπόνια για διαμοιρασμό και μηνύματα acknowledgement). Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι οι κόμβοι προσκολλούν / εισάγουν (riggyback) μηνύματα ομαδοποίησης στα κατά τα άλλα φυσιολογικά και ούτως ή άλλως ανταλλασσόμενα από τη διαδικασία αναγνώρισης και διαχείρισης τοπολογίας HELLO μηνύματα. Η εκτέλεση του προτεινόμενου αλγορίθμου DBB μπορεί κατ' αυτόν τον τρόπο να εισαχθεί πλήρως στην περιοδική ανταλλαγή μηνυμάτων για αναγνώριση και διαχείριση της τοπολογίας δικτύου.



Εικόνα 13 Ο αλγόριθμος κατανεμημένης ομαδοποίησης Directed Budget Based (DBB)

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών (DBB), η μη ομαδοποιημένη γειτονιά προσδιορίζεται για κάθε κόμβο μετά το πέρας της ανταλλαγής μηνυμάτων HELLO και τα κουπόνια διαμοιράζονται (εξίσου) σε αυτή τη γειτονιά. Συγκρινόμενος με έναν αλγόριθμο που διανέμει κουπόνια πέρα από τη φυσική τοπολογία δικτύου (π.χ. ο αλγόριθμος Rapid του [41]), ο προτεινόμενος αλγόριθμος DBB κατευθύνει τα διαμοιραζόμενα κουπόνια μακριά από περιοχές με ομάδες και προς περιοχές του δικτύου όπου οι κόμβοι δεν είναι ομαδοποιημένοι, σε αντιδιαστολή με τη φυσική τοπολογία δικτύου. Οι περιοχές με ομαδοποιημένους κόμβους και οι περιοχές με μη ομαδοποιημένους κόμβους αποτελούνται από χαρακτηριστικά πολλαπλά νησιά-περιοχές που είναι διασκορπισμένα σε όλο το δίκτυο. Κάθε νησί-περιοχή ομαδοποιημένων κόμβων μπορεί να θεωρηθεί ότι ορίζει μια επιφάνεια πάνω στην οποία αναπηδούν οποιαδήποτε εισερχόμενα κουπόνια (προοριζόμενα να σπαταληθούν ή να επιστραφούν) με αποτέλεσμα αυτά να κατευθύνονται προς μη ομαδοποιημένες (δηλ. παρθένες) περιοχές του δικτύου.

Η εικόνα 13 απεικονίζει τη χωρική εξέλιξη της διαδικασίας ομαδοποίησης όταν αυτή ξεκινά από τον κόμβο C. Το τμήμα του δικτύου όπου οι κόμβοι δεν είναι ομαδοποιημένοι (περιοχή-νησί) προσδιορίζεται από τους γκρι κόμβους στην εικόνα, ενώ η περιοχή δικτύου όπου οι κόμβοι είναι ομαδοποιημένοι προσδιορίζεται από τους κόμβους με μαύρο χρώμα. Το όριο που φαίνεται στο σχήμα γύρω από την περιοχή-νησί με ομαδοποιημένους κόμβους είναι η επιφάνεια στην οποία τα κουπόνια που διαμοιράζονται από τους κόμβους G, H, F αποτρέπονται από το να περάσουν. Εάν

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
περνούσαν αυτή τη περιοχή θα είχαν αποτέλεσμα να χαθούν κατά το διαμοιρασμό ή να επιστραφούν. Με άλλα λόγια τα κουπόνια που διαμοιράζονται στο δίκτυο με τον αλγόριθμο DBB «κατευθύνονται» μακριά από την περιοχή που είναι ήδη ομαδοποιημένη ή αλλιώς τα κουπόνια «αναπηδούν» πάνω στο όριο της περιοχής κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου.

Στην περίπτωση ανάπτυξης ομάδων με κόμβους αρχηγούς που ξεκινούν τη διαδικασία σε διαδοχικά χρονικά σημεία (όπως εξηγείται παραπάνω), ο αλγόριθμος DBB αποτρέπει ολοκληρωτικά τη διαμάχη κουπονιών μεταξύ των αναπτυσσόμενων ομάδων. Στη γενικότερη περίπτωση στην οποία οι κόμβοι αρχηγοί μπορούν να είναι ταυτόχρονα ενεργοί στο δίκτυο, μερικές περιπτώσεις διαμάχης κουπονιών δεν θα μπορούν να αποφευχθούν, δεδομένου ότι ένας κόμβος μπορεί να λάβει τα κουπόνια δύο ταυτόχρονα αναπτυσσόμενων ομάδων στη γειτονιά του. Σε αυτήν την περίπτωση ο προτεινόμενος αλγόριθμος DBB, ακόμα και αν καταφέρνει να μειώσει σημαντικά τις διαμάχες διαμοιρασμού κουπονιών, δε θα μπορεί να τις μηδενίσει ολοκληρωτικά.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου θα αξιολογηθεί με βάση (α) την απόκλιση του μέσου πλήθους κόμβων στις τελικές ομάδες στο δίκτυο από το στόχο – όριο που είχε τεθεί αρχικά Β και (β) το μέσο όρο του χρόνου που απαιτήθηκε για ολοκλήρωση της διαδικασίας ομαδοποίησης. Η ελλοχέουσα υπόθεση εδώ είναι ότι οι ανταλλαγές HELLO μηνυμάτων υπάρχουν ήδη στα πραγματικά περιβάλλοντα και, επομένως, δεν αποτελούν γενικά έξτρα κόστος που εισάγεται από τον αλγόριθμο ομαδοποίησης (με εξαίρεση την πρόσθετη σημαία 1-bit και την καταγραφή αυτών των πληροφοριών σε έναν πίνακα).

2.3.2 Ο αλγόριθμος κατευθυνόμενης ομαδοποίησης με χρήση κουπονιών και τυχαίων καθυστερήσεων (DBB-RD algorithm)

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος DBB εξοικονομεί κουπόνια διαμοιρασμού και αναμένεται να ενισχύσει τη διαδικασία ομαδοποίησης μέσω της μείωσης ή εξάλειψης της διαμάχης για κουπόνια κατά τη διαμόρφωση διαφορετικών ομάδων εντός του δικτύου. Κουπόνια διαμοιρασμού είναι πιθανό να χαθούν κατά τη διαδικασία λόγω διαμάχης των

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων κουπονιών της ίδιας αναπτυσσόμενης ομάδας στο δίκτυο μεταξύ τους. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί όταν κατά την εξέλιξη της διαδικασίας δύο κόμβοι έχουν κοινούς πρώτους γείτονες στην τοπική γειτονιά τους. Οι υψηλές χωρικές πυκνότητες των κόμβων που παρατηρούνται τυπικά στα δίκτυα ΑΔΑ έχουν σαν αποτέλεσμα πολλοί κόμβοι να έχουν κοινούς πρώτους γείτονες στην τοπική γειτονιά τους. Έτσι όταν δυο τέτοιοι κόμβοι λαμβάνουν μέρος στην ανάπτυξη μιας ομάδας (που ξεκίνησε από έναν κόμβο-αρχηγό) σε μια περιοχή του δικτύου (λαμβάνουν ένα μέρος του αρχικού πλήθους κουπονιών), τότε είναι πιθανό οι κόμβοι αυτοί να διαλέξουν τον ίδιο κοινό γείτονά τους για να προωθήσουν τα κουπόνια τους.

Οι διαμάχες διαμοιρασμού κουπονιών μεταξύ διαφορετικών ομάδων που αναπτύσσονται μέσα στο δίκτυο (στους αλγόριθμους Rapid, Persistent και DBB) οφείλονται στο ότι οι κόμβοι προχωρούν με το διαμοιρασμό των κουπονιών τους αμέσως μόλις λάβουν ένα πλήθος από κουπόνια από κάποιον άλλο γείτονα. Η απόδοση του αλγορίθμου DBB θα ήταν όμως πολύ βελτιωμένη εάν οι κόμβοι θα μπορούσαν κατά το διαμοιρασμό των κουπονιών να έχουν γνώση για την κατάσταση ως προς την ομαδοποίηση μεταξύ των πρώτων γειτόνων τους και αυτό θα είχε ευεργετικά αποτελέσματα ακόμη και αν ήταν υποχρεωμένος ο αλγόριθμος να εισάγει κάποια επιπρόσθετη καθυστέρηση στη διαδικασία. Συνεπώς, εάν εισάγουμε κάποιες τυχαίες καθυστερήσεις κατά το διαμοιρασμό κουπονιών μεταξύ πρώτων γειτόνων τότε θα είναι δυνατό να προωθούνται κουπόνια προς μη ομαδοποιημένους κόμβους ακόμη και αν αυτό απαιτεί ο κόμβος που διαμοιράζει κουπόνια να χρειάζεται να αναμένει για μια πιο αργή στιγμή για την ανταλλαγή ενός γύρου από HELLO μηνύματα και τότε να ολοκληρώσει τη διαδικασία διαμοιρασμού κουπονιών.

Ο αλγόριθμος διαμοιρασμού κουπονιών με τυχαίες καθυστερήσεις (DBB algorithm with Random Delays) παρουσιάζεται εδώ σαν μια μικρή εναλλακτική πρόταση του αλγορίθμου DBB. Η εναλλακτική αυτή πρόταση έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της διαμάχης κουπονιών κατά το διαμοιρασμό, τόσο κατά την ανάπτυξη μιας μονάχα ομάδας όσο και κατά την ανάπτυξη πολλαπλών ομάδων, συγχρόνως, εντός του δικτύου. Η βασική ιδέα και πρόταση του αλγορίθμου είναι η καθυστέρηση των κουπονιών διαμοιρασμού στους πρώτους γείτονες για κάθε κόμβο κατά ένα τυχαίο αριθμό (που αντιστοιχεί σε ένα τυχαίο πλήθος γύρων ανταλλαγής από μηνύματα HELLO) έτσι ώστε να μειώνεται η πιθανότητα της διαμάχης κουπονιών κατά τον διαμοιρασμό. Παρατηρούμε εδώ ότι ο αλγόριθμος DBB είναι η απλούστερη εκδοχή του αλγορίθμου DBB-RD έτσι ώστε οι τυχαίες καθυστερήσεις να είναι μηδέν κατά τους

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
διαμοιρασμούς. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι κόμβοι που διαμοιράζουν κουπόνια για την ανάπτυξη μιας ομάδας εντός του δικτύου, θα μπορούν (μέσω των τυχαίων καθυστερήσεων) να λαμβάνουν γνώση για την πιθανή ομαδοποίηση κάποιων από τους πρώτους γείτονες τους στην ομάδα που κάνει ανάπτυξη στο δίκτυο, μέσω κουπονιών που διαμοιράζονται από άλλους κοντινούς γείτονες και ανήκουν στον ίδιο κόμβο αρχηγό. Έτσι, οι συγκεκριμένοι κόμβοι θα μπορούν να αποστέλλουν τα κουπόνια διαμοιρασμού τους προς τους γείτονες που δεν θα έχουν λάβει κουπόνια με αποτέλεσμα η διανομή τους να είναι πιο αποδοτική. Το κόστος που εισάγετε για αυτήν τη διαδικασία των τυχαίων καθυστερήσεων είναι η καθυστέρηση της ολοκλήρωσης της συνολικής διαδικασίας ομαδοποίησης στο δίκτυο. Οι τυχαίες καθυστερήσεις του αλγόριθμου DBB-RD έχουν την επίδραση του «αποσυγχρονισμού» των διαμοιρασμών κουπονιών μέσα στο δίκτυο από κόμβους γείτονες, έτσι ώστε αυτοί να μην καταλήγουν να στέλνουν τα διαμοιραζόμενα κουπόνια συγχρόνως προς τους κοινούς τους γείτονες και συνεπώς να μειώνονται οι πιθανότητες για διαμάχες κουπονιών. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για το διαμοιρασμό κουπονιών με χρήση των αλγορίθμων DBB και DBB-RD.

Οι τέσσερις αλγόριθμοι Rapid, Persistent, DBB και DBB-RD έγιναν όλοι προσομοίωση σε περιβάλλον C++ με χρήση του εξομοιωτή Omnet++. Το δίκτυο που προσομοιώσαμε έχει πλήθος $n=6000$ κόμβους, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί τυχαία σε ένα τετράγωνο με μήκος πλευράς $l=1000m$. Κάθε κόμβος έχει γεωμετρικές θέσεις (x,y) που είναι τυχαίως κατανεμημένες με μια τυχαία μεταβλητή με ομοιόμορφη κατανομή στο τμήμα $[0,l)$. Η ασύρματη ζεύξη για κάθε κόμβο αισθητήρα στην προσομοίωση μας είναι προσδιορισμένη να έχει μήκος $25m$, μια τιμή που είναι τυπική με βάση τη βιβλιογραφία για τις ζεύξεις χαμηλής ισχύος, όπως αυτές προσδιορίζονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κόμβων αισθητήρων. Ο συνδυασμός των παραμέτρων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οδηγούν σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ένα μέσο όρο της πυκνότητας στο χώρο που ανέρχεται στα $0,006$ κόμβοι/τετρ. μέτρο. Η πυκνότητα κόμβων αυτή, όταν πολλαπλασιάζεται με την περιοχή ασύρματης κάλυψης του κάθε κόμβου αισθητήρα, οδηγεί σε ένα μέσο όρο για το πλήθος πρώτων γειτόνων ανά κόμβο, ίσο με $\rho = 11,781$ κόμβοι. Οι κόμβοι στο δίκτυο ελέγχονται ως προς τη συνδεσιμότητα τους και τα κατάλληλα μέτρα λαμβάνονται (δηλ. τυχαία μετατόπιση του κόμβου) όταν βρίσκεται κάποιος απομονωμένος κόμβος στο δίκτυο, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η συνδεσιμότητα του δικτύου σε όλη την έκταση του.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ο πρωτεύον στόχος για τις προσομοιώσεις μας είναι να μελετηθούν συγκριτικά ως προς την απόδοση ομαδοποίησης οι αλγόριθμοι Rapid, Persistent, DBB και DBB-RD. Ως προς τη μεθοδολογία εκλογής κόμβων αρχηγών στο δίκτυο η επιλογή για τις προσομοιώσεις μας είναι η σειριακή εκλογή κόμβου αρχηγού (όπως αυτή εξηγήθηκε παραπάνω), οπότε θα εξασφαλίσουμε κατά τις προσομοιώσεις ότι μόνο μια ομάδα αναπτύσσεται στο δίκτυο σε κάθε χρονική στιγμή.

Η απόδοση ομαδοποίησης των αλγορίθμων που προγραμματίζονται στον προσομοιωτή είναι μετρημένη με βάση τις παρακάτω μετρικές. (α) Το τελικό πλήθος ομάδων που διαμορφώνονται εντός του δικτύου μετά το πέρας της διαδικασίας. (β) Το μέσο πλήθος κόμβων για όλες τις ομάδες που διαμορφώθηκαν στο δίκτυο. (γ) Το πλήθος των διαδοχικών κύκλων ανταλλαγής μηνυμάτων που απαιτείται έως ότου η ομαδοποίηση να ολοκληρωθεί στο δίκτυο. Το ιδεατό πλήθος ομάδων που θα έπρεπε να σχηματιστεί στο δίκτυο I εξαρτάται άμεσα από το επιθυμητό άνω όριο για την ομαδοποίηση στο δίκτυο B και δίνεται από την εξίσωση $I = \lceil n/B \rceil$. Η απόδοση του αλγορίθμου ομαδοποίησης βελτιώνεται όταν το τελικό πλήθος κόμβων είναι κοντά στην τιμή I , ενώ θα πρέπει το πλήθος των κόμβων ανά ομάδα να πλησιάσει όσο περισσότερο γίνεται το άνω όριο B . Τέλος, είναι επιθυμητό το πλήθος των απαιτούμενων κύκλων λειτουργίας να είναι όσο πιο μικρό γίνεται.

Για κάθε δεδομένο σύνολο τιμών των παραμέτρων για τους αλγορίθμους ομαδοποίησης, προγραμματίζουμε $K=5$ διαδοχικές ανεξάρτητες εκτελέσεις της προσομοίωσης. Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων και η τυπική απόκλιση των μετρήσιμων ποσοτήτων x μετά το πέρας των διαδοχικών εκτελέσεων υπολογίζονται από τους τύπους $\bar{x} = \frac{1}{K} \sum_i^K x_i$ και $s = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_i^K (x_i - \bar{x})^2}$, αντίστοιχα, και δεδομένης της υπόθεσης για κανονικά κατανομημένο μέσο όρο η κάποιας υπολογισμένης μετρικής, μπορεί να δει κανείς στο [9] ότι ισχύει πως $\eta = \bar{x} \pm t_{1-\delta/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$, όπου $t_{1-\delta/2} = t_u$ είναι το u -ποσοστό της t -Student κατανομής με $K - 1 = 4$ βαθμούς ελευθερίας. Τα διαστήματα εμπιστοσύνης που υπολογίζονται και παρουσιάζονται παρακάτω χρησιμοποιούν το συντελεστή εμπιστοσύνης 0,95 ή με άλλα λόγια υπολογίζουμε τα 0,95-διαστήματα εμπιστοσύνης.

Τα αποτελέσματα από τις διαδοχικές εκτελέσεις των προσομοιώσεων μας με τους αλγόριθμους ομαδοποίησης που μελετάμε θα παρουσιαστούν για δυο διαφορετικές τιμές του επιθυμητού άνω ορίου B , δηλαδή για $B=30$ και για $B=60$. Οι συγκεκριμένες

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 επιλογές για το B θεωρούμε ότι είναι στα κατάλληλα πλαίσια για μεγαλο-μεσαίες ομάδες που θα πρέπει να σχηματιστούν στο δίκτυο. Δεδομένου ότι ο μέσος όρος για το πλήθος των πρώτων γειτόνων είναι κοντά στο 11,5, τα κουπόνια διαμοιρασμού θα πρέπει να περνούν τα όρια της γειτονιάς πρώτων γειτόνων του κόμβου αρχηγού και θα αποφεύγεται ο σχηματισμός της εκφυλισμένης περίπτωσης των ομάδων στο δίκτυο αποτελούμενων από κόμβους που βρίσκονται όλοι 1-hop μακριά από τον κόμβο αρχηγό.

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει αποτελέσματα για την ομαδοποίηση του δικτύου με χρήση των αλγορίθμων Rapid και Persistent και με εκλογή των κόμβων αρχηγών που γίνεται με σειριακό τρόπο.

Πίνακας 2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων Rapid/ Persistent

| B / Αλγόριθμος | Μέσος αριθμός ομάδων | Μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα | Μέσος όρος κύκλων |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| B=30 / Rapid | 691 ± 6,9 | 8,69 ± 0,087 | 3258 ± 29,2 |
| B=30 / Persistent | 286 ± 13,3 | 21,03 ± 0,98 | 18992 ± 875,9 |
| B=60 / Rapid | 539 ± 14,3 | 11,13 ± 0,297 | 2610 ± 65,4 |
| B=60 / Persistent | 158 ± 8,8 | 37,99 ± 2,111 | 18548 ± 735,5 |

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ότι το μέσο πλήθος των κόμβων ανά ομάδα που δημιουργείται στο δίκτυο είναι πολύ χαμηλό σε σχέση με το αρχικό πλήθος κουπονιών που είχε ανατεθεί για την ανάπτυξη της ομάδας (ή αντίστοιχα το προτεινόμενο άνω όριο B για τις ομάδες του δικτύου). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνουν μέσο όρο πλήθους κόμβων 8,69 όταν το άνω όριο είναι B = 30 ενώ δίνουν μέσο όρο 11,13 για την περίπτωση του B = 60. Η κακή αυτή απόδοση ομαδοποίησης του αλγορίθμου Rapid σχετίζεται με το ότι πολλά κουπόνια διανομής χάνονται κατά το διαμοιρασμό λόγω της «τυφλής» διανομής κουπονιών στον αλγόριθμο σε σχέση με ήδη ομαδοποιημένους κόμβους στο δίκτυο (τόσο λόγω ομαδοποιήσεων από τον ίδιο κόμβο αρχηγό όσο και λόγω των

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ομαδοποιήσεων από άλλους κόμβους αρχηγούς). Έτσι έχουμε ότι πολλές μικρές ομάδες σχηματίζονται στο δίκτυο, που είναι ξεκάθαρα ένα κακό αποτέλεσμα. Από την άλλη μεριά, ο αλγόριθμος Rapid φαίνεται ξεκάθαρα ότι είναι ένας γρήγορος αλγόριθμος, δηλαδή η ομαδοποίηση δικτύου ολοκληρώνεται σε μικρό αριθμό διαδοχικών κύκλων ανταλλαγής μηνυμάτων, σε αντίθεση ιδιαίτερα με τον αλγόριθμο Persistent ο οποίος είναι εξαντλητικός αλγόριθμος. Για παράδειγμα, βρίσκουμε ότι χρειάζονται - κατά μέσο όρο - 3258 κύκλοι ανταλλαγής μηνυμάτων για να ολοκληρωθεί η ομαδοποίηση από τον αλγόριθμο Rapid, ενώ χρειάζονται 18992 κύκλοι – κατά μέσο όρο - για να ολοκληρωθεί η ομαδοποίηση με τον αλγόριθμο Persistent, όταν θέτουμε όριο ανά ομάδα $B = 30$.

Ο αλγόριθμος Persistent εμφανίζεται ότι είναι εξαιρετικά αργός κατά την εκτέλεση της ομαδοποίησης στο δίκτυο και περιλαμβάνει σημαντικά περισσότερους κύκλους ανταλλαγής μηνυμάτων προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία (έως και 6 φορές παραπάνω κύκλοι που απαιτούνται σε σχέση με τον Rapid). Η αιτία των αυξημένων κύκλων λειτουργίας στον Persistent είναι η επαναληπτική φύση του αλγορίθμου, η οποία επιτρέπει την ανα-διανομή των κουπονιών που δεν έχουν γίνει ανάθεση κατά την πρώτη διανομή. Η ιδιότητα αυτή του αλγορίθμου Persistent επιτρέπει να χρησιμοποιούνται πολλά από τα κουπόνια που αλλιώς θα χάνονταν (όπως στον αλγόριθμο Rapid) και έτσι να έχουμε αυξημένη απόδοση κατά την ομαδοποίηση. Για παράδειγμα, ο μέσος όρος πλήθους κόμβων 21 ανά ομάδα για την περίπτωση που θέτουμε $B = 30$ και ο αντίστοιχος μέσος όρος 38 για την περίπτωση του $B = 60$ είναι δυο ενδεικτικά αποτελέσματα της καλής απόδοσης ως προς την ομαδοποίηση δικτύου. Συνολικά, μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τα αποτελέσματα μας ότι το επιθυμητό άνω όριο ομαδοποίησης απέχει πολύ από το να πραγματοποιείται στον αλγόριθμο Rapid, ενώ ο αλγόριθμος Persistent καταλήγει σε αποτελέσματα πολύ καλύτερα, αλλά με κόστος τον αυξημένο χρόνο για ολοκλήρωση της διαδικασίας ή αλλιώς την αυξημένη πολυπλοκότητα σε μηνύματα.

Πίνακας 3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων DBB/ DBB-RD

| B / Αλγόριθμος | Μέσος αριθμός ομάδων | Μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα | Μέσος όρος κύκλων |
|-----------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|
| B=30 / DBB (No delay) | 539 ± 7,8 | 11,12 ± 0,163 | 2558 ± 22,2 |

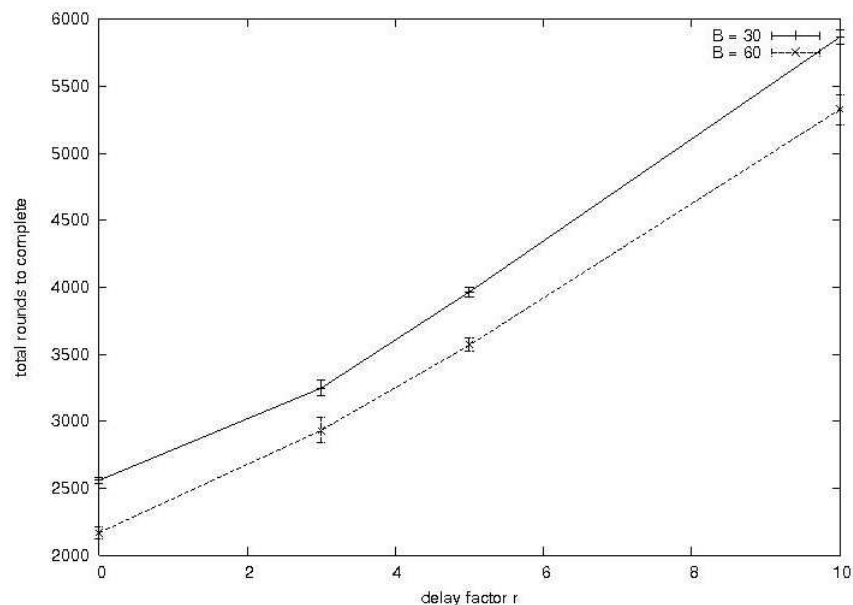
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

| | | | |
|--------------------------|------------|---------------|--------------|
| B=30 / DBB-RD (r=3) | 422 ± 11,2 | 14,22 ± 0,381 | 3247 ± 56,8 |
| B=30 / DBB-RD (r=5) | 402 ± 11,7 | 14,92 ± 0,435 | 3965 ± 33,2 |
| B=30 / DBB-RD (r=10) | 386 ± 2,6 | 15,53 ± 0,1 | 5868 ± 53,7 |
| B=60 / DBB (No delay) | 426 ± 7,3 | 14,1 ± 0,246 | 2167 ± 46 |
| B=60 / DBB-RD (r=3) | 308 ± 11,8 | 19,52 ± 0,728 | 2933 ± 96,8 |
| B=60 / DBB-RD (r=5) | 293 ± 10 | 20,46 ± 0,687 | 3569 ± 49 |
| B=60 / DBB-RD (r=10) | 282 ± 3,9 | 21,31 ± 0,3 | 5329 ± 112,1 |

Ο πίνακας 3 παρουσιάζει αποτελέσματα για τους αλγορίθμους DBB και DBB-RD. Παρατηρήστε ότι τα αποτελέσματα για τον αλγόριθμο DBB παρατίθενται σαν ειδική περίπτωση του αλγορίθμου DBB-RD όταν οι τυχαίες καθυστερήσεις είναι μηδέν. Ο αλγόριθμος DBB είναι πιο αποδοτικός από τον αλγόριθμο Rapid σε σχέση με το μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα (ή το πλήθος των ομάδων που σχηματίζονται στο δίκτυο) και στο συνολικό χρόνο για την ομαδοποίηση του δικτύου. Η αναπήδηση των κουπονιών στα όρια των ήδη διαμορφωμένων ομάδων στο δίκτυο επιφέρει μειωμένη κατασπατάληση κουπονιών και άρα μεγαλύτερα μέσα πλήθη κόμβων ανά ομάδα. Για B = 30 το μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα είναι περίπου 11,1 (μία αύξηση 28% σε σχέση με τον Rapid) ενώ για B = 60 το μέσο πλήθος είναι 14,1 (μία αύξηση 26,6% σε σχέση με τον rapid). Ο τελικός χρόνος για ομαδοποίηση στο δίκτυο μειώνεται σε σχέση με τον rapid κατά ένα σημαντικό ποσό. Είναι αναμενόμενο ότι ο DBB θα είναι ταχύτερος από τον Persistent (λόγω απουσίας επαναληπτικών διαδικασιών) παρόλα αυτά τα αποτελέσματα μας υποδεικνύουν ότι είναι ταχύτερος και από τον Rapid. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην καλύτερη χρησιμοποίηση των διανεμόμενων κουπονιών που οδηγεί

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων σε περισσότερους κόμβους να ομαδοποιούνται ανά κύκλο λειτουργίας. Έτσι έχουμε ταχύτερη ομαδοποίηση στο δίκτυο.

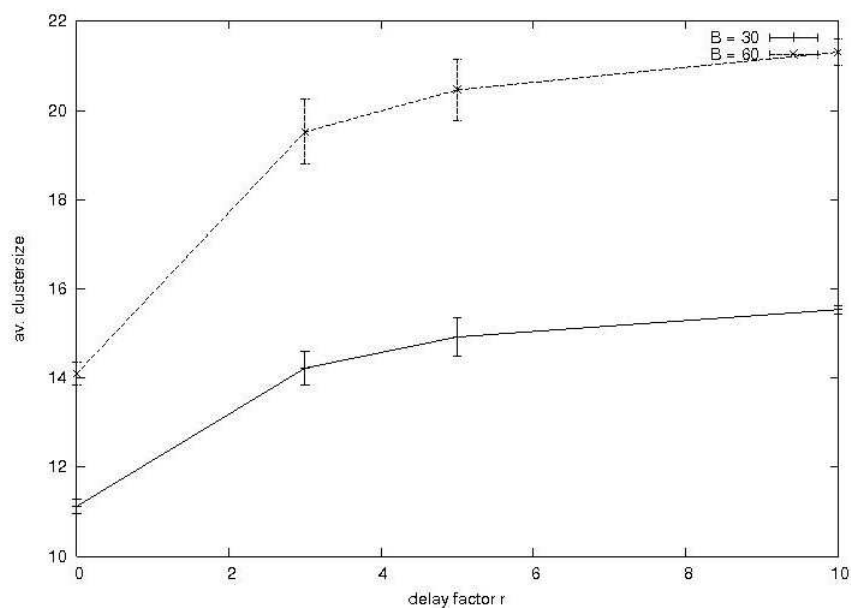
Ο πίνακας 3 παρουσιάζει επίσης αποτελέσματα για τον αλγόριθμο DBB-RD όταν το όριο ομαδοποίησης είναι $B = 30$ ή $B = 60$ και ο παράγοντας τυχαίας καθυστέρησης είναι ένας τυχαίος ακέραιος αριθμός που ανήκει στο διάστημα $[0, r-1]$ με $r = 3$, $r = 5$ και $r = 10$. Όπως μπορεί κανείς να αναμένει τα μεγαλύτερα διαστήματα για τον τυχαίο παράγοντα αναμονής r οδηγούν σε μεγαλύτερο χρονικό όριο (αντίστοιχους κύκλους λειτουργίας) μέχρι την πλήρη ομαδοποίηση του δικτύου. Την ίδια στιγμή ο αλγόριθμος επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ομαδοποίησης (μέσο πλήθος ομάδων, μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα) επειδή οι διαμάχες κουπονιών κατά το διαμοιρασμό είναι λιγότερο πιθανές.



Εικόνα 14 Χρόνος για ομαδοποίηση στο δίκτυο

Η εικόνα 14 παρουσιάζει μια αναπαράσταση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου (ως προς το συνολικό πλήθος κύκλων λειτουργίας απαιτούμενων για την ομαδοποίηση του δικτύου) όταν η παράμετρος των τυχαίων καθυστερήσεων διευρύνεται. Σημειωτέον ότι η περίπτωση $r = 0$ αναπαριστά τον αλγόριθμο DBB. Μπορεί κανείς να διακρίνει στο γράφημα ότι μεγαλύτερες τυχαίες καθυστερήσεις στον αλγόριθμο DBB-RD επηρεάζουν αρνητικά τον συνολικό χρόνο για πλήρη ομαδοποίηση του δικτύου. Ωστόσο μεγαλύτερες τυχαίες καθυστερήσεις αποτελούν ένα ισοζύγιο για καλύτερη απόδοση

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων στην ομαδοποίηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 15. Μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι η αύξηση στο χρόνο που απαιτείται για ομαδοποίηση του δικτύου είναι γραμμική ως προς το r , ενώ η αύξηση στο μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα που επιτυγχάνεται δεν έχει την ίδια γραμμική συμπεριφορά. Αντίθετα υπάρχει μια απότομη αύξηση στην απόδοση ομαδοποίησης αμέσως μετά την εισαγωγή της τυχαίας παραμέτρου (για $r = 3$ η σχετική αύξηση στο μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα είναι 27,85% για $B = 30$ και 38,44% για $B = 60$ σε σχέση με τη περίπτωση $r=0$) ενώ η αύξηση σε απόδοση ομαδοποίησης για μεγαλύτερες τιμές της τυχαίας παραμέτρου r δεν είναι τόσο οξεία (μόνο 4,88% σχετική αύξηση για $B = 30$ και 4,82% για $B = 60$, όταν η παράμετρος r αυξάνεται από $r = 3$ σε $r = 5$). Η συμπεριφορά του αλγόριθμου DBB-RD υποδεικνύει ότι η εισαγωγή της τυχαίας παραμέτρου βελτιώνει την ποιότητα ομαδοποίησης στο δίκτυο (μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα), ωστόσο πρέπει κανείς να αναλογίζεται το κόστος που εισάγεται έτσι ώστε να επιτυγχάνει το καλύτερο ισοζύγιο μεταξύ βελτίωσης στην απόδοση ομαδοποίησης και αύξησης της συνολικής καθυστέρησης.



Εικόνα 15 Μέσος όρος πλήθους ομάδων

Συγκρίνοντας τις αποδόσεις των αλγορίθμων DBB-RD και rapid παρατηρούμε την περίπτωση $B = 30$ για τον αλγόριθμο rapid και $B = 30$, $r = 3$ για τον αλγόριθμο DBB-RD. Παρατηρούμε ότι οι δύο αλγόριθμοι χρειάζονται περίπου τον ίδιο αριθμό κύκλων λειτουργίας (ανταλλαγή HELLO μηνυμάτων) για να ολοκληρωθούν. Ο Rapid χρειάζεται

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
3258 κύκλους ενώ ο DBB-RD χρειάζεται 3246,8 κύκλους. Οι μέσες τιμές των κόμβων ανά ομάδα στο δίκτυο είναι 8,6878 για τον rapid ενώ είναι 14,2228 για τον DBB-RD. Η διαφορά αυτή στο μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα μετράται σε 63,71% υπέρ του αλγορίθμου DBB-RD. Η εξαιρετική αυτή απόδοση στην ομαδοποίηση του δικτύου από τον DBB-RD οφείλεται στο ότι επιτυγχάνει να διαχειριστεί κατάλληλα τις διαμάχες κουπονιών που συμβαίνουν κατά τον διαμοιρασμό στο δίκτυο ενώ παράλληλα περιλαμβάνει μικρό επί πλέον κόστος (μόνο πληροφορία μήκους 1bit στα HELLO μηνύματα) για όλο το δίκτυο. Παρόμοια θετική απόδοση υπάρχει στην περίπτωση του B = 60 όπου ο μέσος αριθμός κύκλων λειτουργίας είναι 2609,9 για τον Rapid και 2933 για τον DBB-RD ενώ το μέσο πλήθος κόμβων ανά ομάδα αυξάνεται κατά 75,29%.

Ολοκληρώνοντας, σε αυτό το κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής προτείνουμε δύο καινούργιους, αυστηρά περιορισμένους αλγόριθμους για την κατανεμημένη, κατευθυνόμενη ομαδοποίηση με χρήση κουπονιών σε ADA μεγάλου πλήθους κόμβων. Οι αλγόριθμοι ονομάζονται κατευθυνόμενος αλγόριθμος με χρήση κουπονιών (DBB) και κατευθυνόμενος αλγόριθμος με χρήση κουπονιών και τυχαίων καθυστερήσεων (DBB-RD). Η βασική, καινοτόμα ιδέα είναι η χρησιμοποίηση πληροφορίας για την κατάσταση ομαδοποίησης, η οποία μπορεί να εξαχθεί εύκολα από τους κόμβους του δικτύου. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται προκειμένου να μειώνονται η και να μηδενίζονται οι διαμάχες κουπονιών κατά τη διανομή τους τόσο εντός της αναπτυσσόμενης ομάδας όσο και μεταξύ διαφορετικών, παράλληλα αναπτυσσόμενων ομάδων. Τέτοιες διαμάχες περιόριζαν κατά πολύ την αποτελεσματικότητα παλαιότερων αλγορίθμων που έκαναν χρήση κουπονιών. Οι δύο αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται τις περιοδικές ανταλλαγές μηνυμάτων HELLO μεταξύ κόμβων γειτόνων, που κατά τα άλλα ανταλλάσσονται συστηματικά για να γίνεται ανανέωση η ενημέρωση της φυσικής (και της μη ομαδοποιημένης) τοπολογίας δικτύου. Οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν την ανανεωμένη τοπολογία προκειμένου να κατευθύνουν τα διανεμόμενα κουπόνια μακριά από τους ομαδοποιημένους κόμβους (είτε από την ίδια ομάδα είτε από άλλη ομάδα) και έτσι επιτυγχάνουν σημαντική βελτίωση στην απόδοση της διαδικασίας ομαδοποίησης. Επί πλέον οι αλγόριθμοι περιλαμβάνουν πολύ μικρό επί πλέον κόστος για το δίκτυο (μόνο μια σημαία μήκους 1bit στα HELLO μηνύματα). Οι προσομοιώσεις που κάναμε για να ελέγξουμε τους αλγορίθμους έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση σε σχέση με παλαιότερες λύσεις για το ίδιο πρόβλημα τόσο ως προς τα πλήθη κόμβων ανά ομάδα όσο και για το χρόνο που απαιτείται (κύκλοι ανταλλαγής HELLO μηνυμάτων) για την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

3. ΤΥΧΑΙΟΙ ΠΕΡΙΠΑΤΟΙ ΜΕ ΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥΣ ΓΡΑΦΟΥΣ

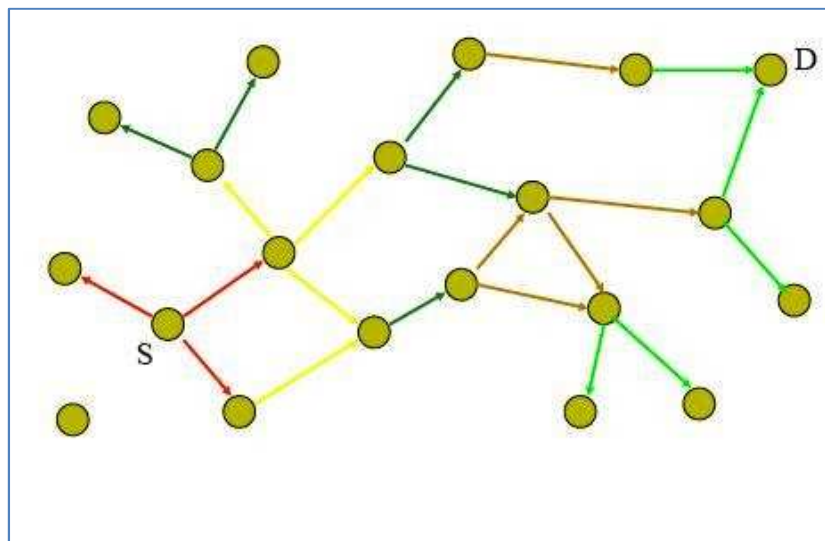
Ορισμένες δικτυακές λειτουργίες είναι απαιτητικές ενεργειακά και ως προς τους πόρους του συστήματος για δικτυακά περιβάλλοντα μεγάλο πλήθος κόμβων, ασύρματα ή ενσύρματα και αδόμητα - δυναμικά από τη φύση τους, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ή τα δίκτυα ομότιμων χρηστών. Μια λειτουργία που μπορεί να εξαντλήσει τους πόρους του συστήματος και αποτελεί γενικότερα αιτία αυξημένης σπατάλης πόρων (ενεργειακά ή ως προς το εύρος ζώνης) στο σύστημα είναι η προώθηση πληροφοριών – πακέτων δεδομένων σε ευρεία κλίμακα στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα η προώθηση των δεδομένων που προέρχονται από τους αισθητήρες των κόμβων προς την καταβόθρα (sink) και τον τελικό χρήστη του δικτύου αισθητήρων στη συνέχεια.

Η εξάντληση των πόρων του συστήματος μπορεί να αφορά στο πλήθος των μηνυμάτων που μετακινούνται εντός του δικτύου, στο χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία και, συνολικότερα, στις απαιτήσεις σε ενεργειακά αποθέματα που απαιτούνται από το δίκτυο. Τέτοια, ευρείας κλίμακας διάχυση πληροφοριών στο δίκτυο μπορεί να απαιτηθεί προκειμένου το σύνολο ή ένα μέρος των κόμβων του δικτύου να ενημερωθεί για κάποια καινούρια λειτουργία ή προκειμένου ο τελικός χρήστης να προγραμματίσει το δίκτυο με κάποιο καινούριο αίτημα. Το εξαιρετικά ευρύ πλήθος κόμβων, οι ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και οι δυναμικές εναλλαγές στην τοπολογία του δικτύου οδηγούν στην ανάγκη σχεδιασμού λύσεων που είναι καταμεμημένες, ενεργειακά αποδοτικές και αυτόνομες για τη διάχυση πληροφορίας, όπως άλλωστε επισημαίνεται και στα [58], [59], [60].

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής μελετώνται/ προτείνονται λύσεις για το πρόβλημα της διάχυσης πληροφορίας με αποτελεσματικό (ενεργειακά ή για τους πόρους του συστήματος) τρόπο και κατάλληλες για χρήση σε ασύρματα δίκτυα μεγάλο πλήθος κόμβων, με χαμηλά ενεργειακά αποθέματα και με τοπολογία που αντιστοιχεί σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους.

3.1 Διάχυση πληροφορίας μέσω πλημμυρίδας σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους μεγάλου πλήθους κόμβων

Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές για τη διάχυση πληροφοριών στην ευρύτερη γνωστική περιοχή των δικτύων υπολογιστών, η πιο απλή από τις οποίες είναι η τεχνική της **πλημμυρίδας (flooding)**. Κατά την πλημμυρίδα [52], [53], [54], [56] κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει για πρώτη φορά ένα μήνυμα στο δίκτυο, επιλέγει να το εκπέμψει σε όλους τους υπόλοιπους γείτονές του εκτός του κόμβου από τον οποίο προηγουμένως το έλαβε. Η εικόνα 16 παρουσιάζει την προώθηση πληροφορίας μέσω πλημμυρίδας από τον κόμβο πηγή S στον κόμβο προορισμό D. Κάθε βέλος στο σχήμα συμβολίζει την προώθηση ενός αντίγραφου του πακέτου δεδομένων. Κάποιοι κόμβοι λαμβάνουν πολλαπλά αντίγραφα του πακέτου που διαδίδεται στο δίκτυο, όπως γίνεται φανερό από την εικόνα 16. Παρότι υπάρχει πληθώρα στις επιμέρους παραδόσεις των πακέτων, γίνεται φανερό από το σχήμα ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι δυνατό να καλυφθούν από την πλημμυρίδα με τουλάχιστον ένα πακέτο πληροφορίας ανά κόμβο.



Εικόνα 16 Ο αλγόριθμος της πλημμυρίδας σε ένα δίκτυο αισθητήρων

Παρά την απλότητα και την ταχύτητα της διαδικασίας (η μέθοδος πλημμυρίδας επιτυγχάνει το μικρότερο χρόνο κάλυψης σε σχέση με άλλες μεθοδολογίες διάχυσης πληροφορίας), η μέθοδος αυτή συσχετίζεται με πολύ μεγάλο κόστος σε αποστολή μηνυμάτων εντός του δικτύου, που είναι και το μεγάλο μειονέκτημα της διαδικασίας.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Προκειμένου να μειωθεί το κόστος σε πλήθος μηνυμάτων που ανταλλάσσονται (το οποίο παρεπιπτόντως είναι απαγορευτικά μεγάλο για δίκτυα ΑΔΑ), μια διαφορετική, λίγο προσαρμοσμένη μεθοδολογία έχει προταθεί που ονομάζεται «πιθανοτική πλημμυρίδα» (probabilistic flooding) [54], [55], [56]. Σε αυτό το μοντέλο προώθησης πληροφορίας το πακέτο πλημμυρίδας που καταφτάνει σε έναν κόμβο θα προωθηθεί κατά τρόπο τέτοιο ώστε να εισάγεται μια πιθανότητα προώθησης $P\{\text{forward}\} < 1$. Η πιθανοτική προώθηση των πακέτων πλημμυρίδας είναι εφαρμόσιμη σε κάθε κόμβο του δικτύου και αφορά όλους τους πρώτους γείτονες των αντίστοιχων κόμβων. Αν και η πιθανοτική προώθηση πακέτων κατορθώνει να μειώσει το απαράδεκτα υψηλό κόστος σε αριθμό μηνυμάτων που επιφέρει ο κλασικός αλγόριθμος πλημμυρίδας, αυτό συμβαίνει με αρνητική επίπτωση στην αύξηση του χρόνου που απαιτείται για κάλυψη 100% του δικτύου ή αλλιώς επιφέρει αύξηση στο χρόνο κάλυψης του δικτύου. Η μέθοδος της ελεγχόμενης πλημμυρίδας μπορεί επίσης να εφαρμοστεί προκειμένου να μειωθεί το απαράδεκτα μεγάλο κόστος της κλασικής πλημμυρίδας. Σε αυτήν την περίπτωση η πλημμυρίδα στο δίκτυο περιορίζεται από τη διαδικασία σε ένα προκαθορισμένο μέγιστο μήκος από διαδοχικές μεταβάσεις (hops), ή αλλιώς περιορίζεται στο πλήθος των K μέγιστων διαδοχικών μεταβιβάσεων αφότου φύγει από τον αρχικό κόμβο. Τόσο το σχετιζόμενο κόστος όσο και ο χρόνος κάλυψης αυξάνονται με την αύξηση του K . Όταν η παράμετρος K είναι αρκετά μεγάλη τότε το σχήμα της ελεγχόμενης πλημμυρίδας με μέγιστο τις K διαδοχικές μεταβάσεις τείνει να προσεγγίσει την κλασική πλημμυρίδα.

3.2 Διάχυση πληροφορίας μέσω τυχαίων περιπάτων σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους

Η μεθοδολογία των τυχαίων περιπάτων (Random Walks) έχει προταθεί στη βιβλιογραφία σαν ένας εναλλακτικός τρόπος λειτουργίας των δικτύων υπολογιστών (ασύρματων ή ενσύρματων). Οι τυχαίοι περίπατοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα μεγάλου πλήθους κόμβων για διαφορετικές λειτουργίες όπως είναι η επεξεργασία ζητημάτων του χρήστη (query processing) [48], η συγκομιδή των δεδομένων του δικτύου αισθητήρων [49], ή και η δειγματοληψία δεδομένων του δικτύου [50]. Οι λόγοι για τους οποίους οι Τυχαίοι Περίπατοι (ΤΠ) ενδείκνυνται για χρήση σε

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
τέτοια δίκτυα είναι η απλότητα της διαδικασίας, η χρήση περιορισμένων τοπικά (στους κόμβους-αισθητήρες) αλγορίθμων και η αντοχή των διαδικασιών αυτών σε περιπτώσεις σφαλμάτων, ατελειών του δικτύου (δηλαδή μολονότι η τοπολογία του δικτύου είναι δυναμική, οι μεθοδολογίες συνεχίζουν τη λειτουργία τους). Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των λύσεων βασισμένων σε ΤΠ (όπως αυτά περιγράφηκαν προηγουμένως) εφαρμόζουν καλά στα ιδιαίτερα μεγάλου πλήθους και δυναμικά δίκτυα που σχηματίζονται όταν έχουμε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ή Δίκτυα Ομότιμων Χρηστών.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία της πλημμυρίδας σε ένα δίκτυο μεγάλου πλήθους κόμβων μπορεί να αντικατασταθεί από έναν ΤΠ, όταν η διαδικασία αυτή είναι προορισμένη να διανείμει πληροφορία σε ένα αδόμητο δίκτυο μεγάλου πλήθους κόμβων. Σε έναν απλό ΤΠ σε γράφο, η διαδικασία ενημέρωσης του δικτύου ξεκινά από τον κόμβο που εισάγει το πακέτο πληροφορίας (αντίστοιχα τον πράκτορα ενημέρωσης) στο δίκτυο και στη συνέχεια το πακέτο θα μεταβιβάζεται εντός του δικτύου μια ακμή ή hop την φορά, ενημερώνοντας παράλληλα όλους τους κόμβους που συναντά στο διάβα του. Ο ΤΠ που κινείται μέσα στο δίκτυο από κόμβο σε κόμβο με τυχαίο τρόπο μπορεί να συναντά κόμβους τους οποίους είχε επισκεφθεί προηγουμένως κατά την μετακίνηση του μέσα στο δίκτυο. Τέτοιου είδους επανεπισκέψεις κόμβων μπορεί να πραγματοποιούνται λόγω της τυχαιότητας της διαδικασίας και μπορούν να περιγραφούν ως μία κυκλική κίνηση του ΤΠ (δηλαδή ο ΤΠ πολύ συχνά επανεπισκέπτεται κόμβους εκτελώντας κυκλικές κινήσεις μέσα στο δίκτυο). Ακόμη και αν η οπισθοχώρηση (backtracking) απαγορευτεί για τον ΤΠ, δηλαδή απαγορεύεται η επιλογή του αμέσως προηγούμενου επισκεπτόμενου κόμβου, κάποιες κυκλικές κινήσεις κατά τη διαδικασία του ΤΠ είναι πιθανό να εμφανισθούν. Αυτές οι επανεπισκέψεις προκαλούν κατασπατάληση πόρων και επιδρούν αρνητικά στον χρόνο κάλυψης της διαδικασίας [48]. Τέτοια κακή συμπεριφορά του ΤΠ οφείλεται στην τυχαιότητα των κινήσεων σε συνδυασμό με ορισμένα προβληματικά χαρακτηριστικά των τοπολογιών που εμφανίζονται σε ασύρματα, μεγάλου πλήθους, κατά περίπτωση δίκτυα. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των τοπολογιών ως κλίκες (cliques) και στενώσεις (bottlenecks).

Τυχαίοι γεωμετρικοί γράφοι μεγάλου εύρους έχουν μελετηθεί στο παρελθόν σε σχέση με την θεωρία διεισδύσεων, τη στατιστική φυσική και τη θεωρία υποθέσεων στη στατιστική [61]. Πιο πρόσφατα, ο $G(N, r_c)$ τυχαίος γεωμετρικός γράφος έτυχε ιδιαίτερης προσοχής από τους ερευνητές λόγω της καταλληλότητάς του για εφαρμογή σε μοντέλα ασύρματων κατά περίπτωση δικτύων και δικτύων ΑΔΑ. Η παράμετρος N είναι ο

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

αριθμός των κόμβων του δικτύου και r_c είναι η παράμετρος που σχετίζεται με την ακτίνα συνδεσιμότητας των κόμβων (connectivity radius). Η συνδεσιμότητα του δικτύου στους τυχαίους γεωμετρικούς γράφους εξαρτάται από (α) την ακτίνα συνδεσιμότητας r_c και (β) την γεωμετρική θέση των κόμβων. Συγκεκριμένα όσοι κόμβοι έχουν γεωμετρική (ευκλείδεια) απόσταση μικρότερη της ακτίνας συνδεσιμότητας r_c θεωρείται ότι είναι αμφίπλευρα συνδεδεμένοι. Λογικά η ακτίνα συνδεσιμότητας του δικτύου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε το δίκτυο να είναι συνδεδεμένο παντού, δηλαδή να μην υπάρχουν κόμβοι που είναι αποκομμένοι. Αυτό το μοντέλο συνδεσιμότητας του δικτύου διαφέρει σημαντικά από το γνωστότερο μοντέλο του δικτύου ελευθέρου βαθμού (scale free network) που εμφανίζεται σε πολλά φυσικά και τεχνητά συστήματα, όπως το internet, το World Wide Web, δίκτυα αναφορών και ορισμένα κοινωνικά δίκτυα. Πολλά τέτοια δίκτυα ανήκουν στη κλάση των δικτύων ελευθέρου βαθμού που σημαίνει ότι ο βαθμός συνδεσιμότητας των κόμβων του δικτύου ακολουθεί εκθετική κατανομή. Το μοντέλο Barabasi-Albert είναι ένα από τα διάφορα προτεινόμενα μοντέλα που παράγουν δίκτυα ελευθέρου βαθμού [62]. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο νόμο ανάπτυξης και στο νόμο επιλεκτικής σύνδεσης για το σχηματισμό του δικτύου και έτσι επιλέγοντας δύο τυχαίους κόμβους στο δίκτυο έχουμε μη μηδενική πιθανότητα οι κόμβοι αυτοί να είναι συνδεδεμένοι. Στα δίκτυα ελεύθερου βαθμού δύο κόμβοι που βρίσκονται σε μακρινή φυσική απόσταση μεταξύ τους είναι πιθανό να είναι συνδεδεμένοι (δημιουργώντας έτσι μία ζεύξη μακρινής απόστασης), ενώ οι τυχαίοι γεωμετρικοί γράφοι διαθέτουν ζεύξεις μικρού μήκους μόνο λόγω των φυσικών περιορισμών που σχετίζονται με την ακτίνα συνδεσιμότητας r_c .

Μία προταθείσα εναλλακτική τεχνική για το πρόβλημα της διάδοσης πληροφορίας σε ένα αδόμητο δικτυακό περιβάλλον είναι η διάχυση πληροφοριών με χρήση τυχαίων περιπάτων. Κατά τη χρήση ΤΠ για διάχυση πληροφοριών ένας κόμβος που ξεκινά τη διαδικασία (αντιπροσωπεύει κάποιο τελικό χρήστη σε δίκτυα ΔΟΧ ή ένα κόμβο συλλογής πληροφοριών σε δίκτυα ΑΔΑ) εισάγει τον πράκτορα τυχαίου περιπάτου στο δίκτυο. Ο πράκτορας θα κινείται τυχαία από κόμβο σε κόμβο ενημερώνοντας όλους τους κόμβους που συναντά στο διάβα του. Οι τυχαίοι περίπατοι για μεγάλα δίκτυα ΔΟΧ αποδεικνύεται ότι διαθέτουν καλά χαρακτηριστικά για ανεύρεση ή διάχυση πληροφοριών. Οι συγγραφείς στο [63] απέδειξαν ότι οι τυχαίοι περίπατοι είναι μία εξαιρετική μεθοδολογία για χρήση σε δίκτυα ΔΟΧ προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για ομοιόμορφη δειγματοληψία από το σύνολο των κόμβων. Ακριβέστερα, ο ΤΠ είναι ιδανικός για την προσομοίωση ομοιόμορφης δειγματοληψίας και επί πλέον ο αριθμός

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων των βημάτων προσομοίωσης που απαιτούνται είναι κατά προσέγγιση ίσος με το πλήθος των δειγμάτων που θα παίρναμε αν είχαμε ανεξάρτητη ομοιόμορφη δειγματοληψία. Σε μια άλλη εργασία [64] οι συγγραφείς προτείνουν ένα πρωτόκολλο ανεύρεσης πληροφοριών βασισμένο σε ΤΠ και προσαρμοσμένο για χρήση σε μεγάλα δίκτυα ΔΟΧ που μοιάζουν στα συστήματα Gnutella. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί προκατειλημμένους τυχαίους περιπάτους έτσι ώστε τα πακέτα αναζήτησης πληροφοριών να κατευθύνονται προς κόμβους υψηλής χωρητικότητας οι οποίοι είναι και πιο κατάλληλοι για την απάντηση των ερωτημάτων. Οι τυχαίοι περίπατοι έχουν εισαχθεί εδώ για λόγους επεκτασιμότητας του δικτύου σε αντίθεση με τη πλημμυρίδα η οποία είναι εύκολο να υπερφορτώσει το δίκτυο όταν εμφανίζονται συγχρόνως πολλαπλά αιτήματα. Στην εργασία μας διαφέρουμε γιατί ασχολούμαστε αποκλειστικά με χρήση ΤΠ σε δίκτυα ΑΔΑ μεγάλου πλήθους κόμβων.

Τυχαίοι περίπατοι για χρήση σε δίκτυα ΑΔΑ προτείνονται και στην εργασία [65] όπου τα πακέτα ΤΠ εφαρμόζονται για συλλογή πληροφοριών σε δομημένα δίκτυα ΑΔΑ όπου οι θέσεις των ασύρματων αισθητήρων σχηματίζουν ένα τετραγωνικό πλέγμα ή ένα εξαγωνικό πλέγμα. Οι συγγραφείς βρίσκουν αναλυτικά αποτελέσματα για τη πιθανότητα κάλυψης κόμβου και την πιθανότητα της αρχικής κάλυψης κόμβου και μέσω αυτών υπολογίζουν την ολική καθυστέρηση και ενέργεια που απαιτείται στο σύστημα έτσι ώστε N κόμβοι να επικοινωνήσουν με \sqrt{N} σημεία συλλογής πληροφοριών μέσω N ΤΠ. Η εργασία που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής διαφέρει στο ότι οι θέσεις των ασύρματων αισθητήρων θεωρούνται τυχαίες και το δίκτυο σχηματίζει ένα τυχαίο γεωμετρικό γράφο. Επίσης εμείς χρησιμοποιούμε-μελετάμε τη συμπεριφορά ενός ΤΠ που κυκλοφορεί στο δίκτυο για τη διάχυση πληροφοριών. Επί πλέον ένα πρόσφατο θεωρητικό αποτέλεσμα για την επιτάχυνση αλγορίθμων που βασίζονται σε ΤΠ παρουσιάστηκε στο [65]. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα αλγόριθμο ο οποίος δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού ενός δείγματος μήκους l σε $\tilde{O}(l^{\frac{2}{3}}D^{\frac{2}{3}})$ κύκλους λειτουργίας σε ένα μη κατευθυνόμενο γράφο χωρίς βάρη. Δείναι η διάμετρος του δικτύου και το σύμβολο \tilde{O} εμπεριέχει τον παράγοντα $\frac{\log n}{\delta}$ όπου το n συμβολίζει το πλήθος των κόμβων και το δ συμβολίζει τον ελάχιστο βαθμό συνδεσιμότητας στο δίκτυο. Παλαιότεροι αλγόριθμοι υπολογισμού δειγμάτων μήκους l με χρήση ΤΠ απαιτούσαν όχι λιγότερο από $O(l)$ κύκλους λειτουργίας. Η εργασία μας διαφέρει σημαντικά από την παραπάνω δουλειά δεδομένου ότι οι συγγραφείς χρησιμοποιούν πολλαπλούς ΤΠ για την επιτάχυνση της διαδικασίας της δειγματοληψίας στο δίκτυο ενώ

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
εμείς χρησιμοποιούμε μόνον έναν πράκτορα ΤΠ και έτσι αποφεύγεται η πιθανότητα υπερφόρτωσης του δικτύου λόγω υπερβολικά μεγάλου μεγέθους ΤΠ που κυκλοφορούν συγχρόνως στο δίκτυο.

Η επιβάρυνση στο δίκτυο σε αριθμό μηνυμάτων είναι πολύ μικρότερη όταν χρησιμοποιούνται λύσεις βασισμένες σε ΤΠ σε σχέση με τις λύσεις που βασίζονται στην τεχνική της πλημμυρίδας. Από την άλλη μεριά υπάρχει επί πλέον κόστος ως προς τον χρόνο κάλυψης του δικτύου. Ο χρόνος κάλυψης (μερικός χρόνος κάλυψης) ορίζεται ως το αναμενόμενο πλήθος κύκλων λειτουργίας ή ο αναμενόμενος χρόνος ούτως ώστε ο ΤΠ να επισκεφθεί το σύνολο (ένα μερικό σύνολο) των κόμβων του δικτύου. Ο σχετικά μεγάλος χρόνος κάλυψης (συγκριτικά με την πλημμυρίδα) που επιτυγχάνεται στις τεχνικές βασισμένες σε ΤΠ εξαρτάται από την τοπολογία του δικτύου. Έτσι ισχύει για παράδειγμα ότι ο χρόνος κάλυψης είναι $O(N \ln N)$ για τον πλήρη γράφο (βέλτιστο σενάριο), ενώ είναι $O(N^3)$ για τοπολογίες με κλίκες (χειρίστο σενάριο) [48], [67]. Οι τυχαίοι περίπατοι σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους $G(N, r_c)$ έχουν αποδειχθεί ότι διαθέτουν βέλτιστο χρόνο κάλυψης $O(N \ln N)$ και βέλτιστο χρόνο μερικής κάλυψης $O(N)$ με μεγάλη πιθανότητα δεδομένου ότι η ακτίνα συνδεσιμότητας κάθε κόμβου r_c ικανοποιεί το κριτήριο $r_c^2 \geq \frac{c \ln(N)}{N}$ [68]. Γενικά έχει αποδειχθεί ότι ο χρόνος κάλυψης για ΤΠ είναι μικρότερος σε δίκτυα υψηλής συνδεσιμότητας όπως είναι οι πλήρεις γράφοι, ενώ μεγαλώνει για τοπολογίες δικτύου που εμφανίζουν στενώσεις. Στην περίπτωση αυτή το πλήθος των επανεπισκέψεων σε κόμβους που έχουν ήδη καλυφθεί γίνεται πολύ μεγάλο και επηρεάζει αρνητικά το πλήθος μηνυμάτων και το χρόνο κάλυψης της διαδικασίας.

Με βάση τον κλασικό ορισμό του απλού ΤΠ, όταν αυτός χρησιμοποιείται για διάχυση πληροφοριών στο δίκτυο, η διαδικασία ξεκινά πάντοτε από έναν τυχαίο κόμβο $v \in V$ του γράφου $G(V, E)$ και σε κάθε βήμα της το πακέτο προωθείται σε ένα τυχαίο γείτονα που επιλέγεται με την ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ όλων των γειτόνων του κόμβου στον οποίο το πακέτο βρίσκεται τη τωρινή χρονική στιγμή. Έτσι, για παράδειγμα, εάν $\delta(v)$ είναι ο βαθμός πρώτων γειτόνων του τωρινού κόμβου v τότε ο γείτονας u θα επιλέγεται με πιθανότητα $P_u = 1/\delta(v)$ τότε και μόνον τότε εάν $(v, u) \in E$ και με πιθανότητα $P_u = 0$ για όλους τους υπόλοιπους κόμβους $u \in V$. Μια σημαντική παραλλαγή του απλού ΤΠ, και η βασική παραλλαγή ΤΠ που εμείς χρησιμοποιούμε στις μελέτες μέσω ανάλυσης και προσομοιώσεων, είναι ο τυχαίος περίπατος χωρίς οπισθοδρόμηση (RW without backtracking). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θεωρείται ότι ένας πράκτορας ΤΠ

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 εκτελεί πάντοτε τον τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση. Σε αυτή τη διαδικασία ένας πράκτορας ΤΠ θα επισκέπτεται κάποιον κόμβο $v \in V$ και η προώθησή του στον κόμβο $u \in V$ θα είναι τυχαία ανάμεσα στους πρώτους γείτονές του με πιθανότητα $P_u = 1/(\delta(v) - 1)$ τότε και μόνον τότε εάν $(v, u) \in E$, όπου u είναι οποιοσδήποτε πρώτος γείτονας του v εκτός από εκείνον από τον οποίο προήλθε ο πράκτορας ΤΠ και $P_u = 0$ για όλους τους υπόλοιπους κόμβους $u \in V$ στο δίκτυο. Είναι φανερό ότι ένας τυχαίος περίπατος χωρίς οπισθοδρόμηση αποτελεί ένα ελαφρά βελτιωμένο σχήμα σε σχέση με τον απλό τυχαίο περίπατο όπου ο επόμενος κόμβος του περιπάτου επιλέγεται με ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ όλων των πρώτων γειτόνων του τωρινού κόμβου.

Ο πράκτορας ΤΠ που κινείται στο δίκτυο με βάση το παραπάνω περιγραφέν σχήμα (τυχαίος περίπατος χωρίς οπισθοδρόμηση) θα καλύψει κάποια χρονική στιγμή το σύνολο των κόμβων του δικτύου (στο χρόνο κάλυψης). Έστω ότι $C_r(t)$ είναι ο λόγος των κόμβων του δικτύου που έχουν καλυφθεί από τον πράκτορα ΤΠ στο χρόνο t (θεωρώντας ότι η διαδικασία ξεκίνησε τη χρονική στιγμή $t=0$) προς το συνολικό πλήθος κόμβων του δικτύου για μια μοναδική πραγματοποίηση της τυχαίας διαδικασίας και για κάποιο συγκεκριμένο κόμβο έναρξης της διαδικασίας. Το $C_r(t)$ θα αναφέρεται από εδώ και στο εξής ως η κάλυψη δικτύου στο χρόνο t . Προφανώς το $C_r(t)$ είναι εξαρτημένο τόσο από το πλήθος κόμβων του δικτύου, όσο και από την τοπολογία του και τον κόμβο έναρξης της διαδικασίας. Άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με το δίκτυο θα επηρεάζουν την κάλυψη του δικτύου επίσης. Θεωρώντας ότι το T_r συμβολίζει το χρόνο κάλυψης στο δίκτυο, τότε $C_r(T_r) = 1$ και $C_r(0) = 0$. Καθώς ο χρόνος t αυξάνει είναι αναμενόμενο ότι ο πράκτορας ΤΠ είτε θα μετακινηθεί σε κάποιο κόμβο του δικτύου που δεν είχε επισκεφθεί στις προηγούμενες μεταβάσεις του (και τότε το $C_r(t)$ μεγαλώνει) είτε θα μετακινείται προς κόμβους που είναι ήδη καλυμμένοι από τη διαδικασία σε προηγούμενα βήματα (και έτσι το $C_r(t)$ θα παραμένει σταθερό). Συμπεραίνεται έτσι ότι το $C_r(t)$ είναι μια αύξουσα συνάρτηση, δηλαδή $C_r(t_1) \leq C_r(t_2)$ για $t_1 < t_2$.

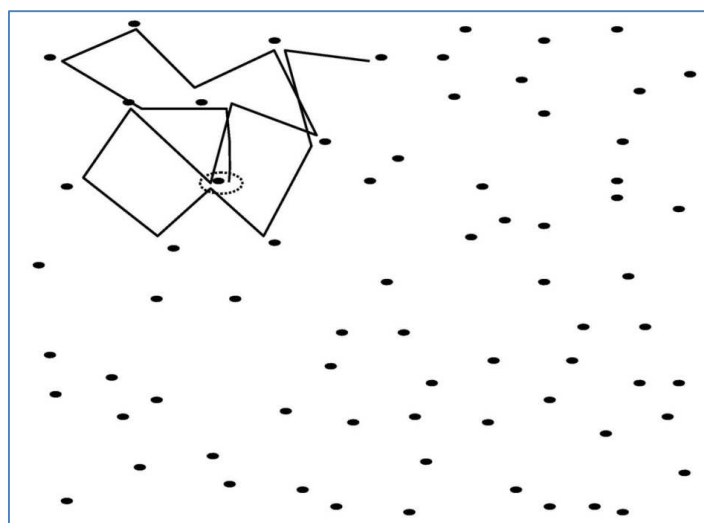
Το κόστος σε ανταλλασσόμενα μηνύματα για τεχνικές που βασίζονται σε ΤΠ είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος για τεχνικές που βασίζονται στην πλημμυρίδα (κάβε μετακίνηση του πράκτορα ΤΠ αντιστοιχεί σε ένα ανταλλασσόμενο μήνυμα). Το κόστος που εισάγεται αντί της μείωσης είναι η αύξηση στο χρόνο κάλυψης του δικτύου. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση του απλού τυχαίου περιπάτου σε ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο (πλήρης γράφος), το πλήθος των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων είναι $O(N \ln N)$ [67] ενώ στην πλημμυρίδα το αντίστοιχο κόστος είναι $O(N^2)$. Από την άλλη μεριά ο χρόνος κάλυψης για τον απλό τυχαίο περίπατο είναι $O(N \ln N)$ ενώ στην

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Τεχνική της πλημμυρίδας, ο χρόνος κάλυψης είναι φραγμένος από τη διάμετρο του δικτύου D . Σημειώνεται εδώ ότι το πλήθος των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων στο δίκτυο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας κάλυψης δικτύου είναι μια σημαντική μετρική της απόδοσης της τεχνικής γιατί αντιπροσωπεύει την κατανάλωση πολύτιμων πόρων ενέργειας στο δίκτυο και καθυστερήσεις στη διαδικασία.

3.3 Διάχυση πληροφορίας μέσω τυχαίων περιπάτων με άλματα σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους

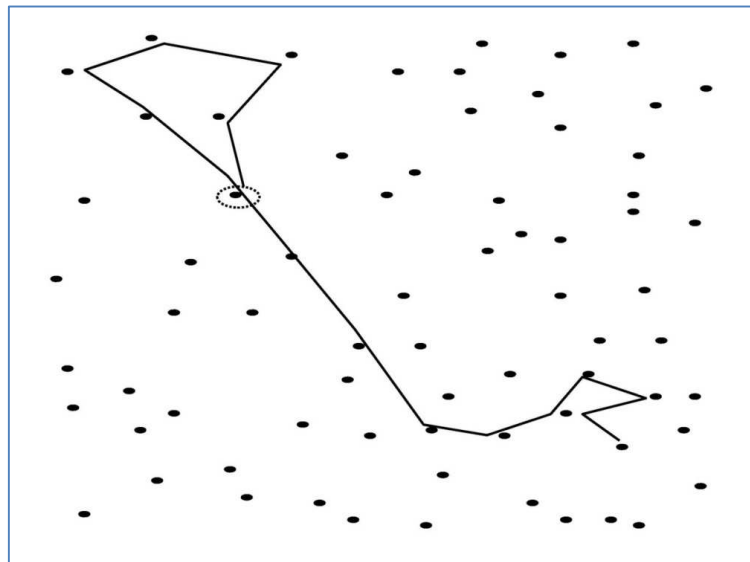
3.3.1 Εισαγωγή

Η εικόνα 17 παρουσιάζει ένα πράκτορα ΤΠ που κινείται στο δίκτυο (μοντελοποιείται ως τυχαίος γεωμετρικός γράφος) αφού έχει εισαχθεί αρχικά από τον κόμβο αρχηγό που σημειώνεται με την διακεκομμένη έλλειψη στο σχήμα. Ο πράκτορας ΤΠ (σημειωτέον ότι εκτελεί την παραλλαγή ΤΠ χωρίς οπισθοδρόμηση) σπαταλά κάποιον αριθμό βημάτων (χρόνο) επισκεπτόμενος επαναληπτικά τους κόμβους που βρίσκονται στο πάνω-αριστερά τμήμα του γράφου όπως αυτός φαίνεται στο σχήμα. Επιπλέον είναι φανερό ότι για τον ίδιο αριθμό βημάτων (χρόνο) υπάρχουν πολλοί κόμβοι που παραμένουν ακάλυπτοι από τη διαδικασία στο δίκτυο.



Εικόνα 17 Ο πράκτορας ΤΠ κατά την κίνηση στον τυχαίο γεωμετρικό γράφο

Έστω τώρα ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (δηλαδή αρκετό αριθμό βημάτων του πράκτορα ΤΠ) ο πράκτορας θεωρείται ότι έχει καλύψει επαρκώς τη συγκεκριμένη γειτονιά κόμβων που επισκέπτεται προσωρινά και στη συνέχεια αναγκάζεται να απομακρυνθεί από αυτήν και να μετακινηθεί προς τη γειτονιά που βρίσκεται στο κάτω δεξιό τμήμα του δικτύου όπως μπορεί να φανεί στην εικόνα 18. Η μακρινή αυτή μετάβαση του πράκτορα ΤΠ μπορεί να θεωρηθεί σαν την υλοποίηση ενός «άλματος» μέσα στο δίκτυο.



Εικόνα 18 Ο πράκτορας ΤΠΑ κατά την κίνηση στον τυχαίο γεωμετρικό γράφο

Είναι προφανές ότι λόγω της εκτέλεσης του «άλματος» εντός του δικτύου ο πράκτορας ΤΠ αυξάνει την πιθανότητα να επισκεφτεί (δηλαδή να καλύψει) καινούριους, μη καλυμμένους σε παλαιότερα βήματα της διαδικασίας κόμβους. Έτσι μπορεί κανείς να διακρίνει τη δυνητική αύξηση της απόδοσης της διαδικασίας κάλυψης των κόμβων του δικτύου, δεδομένου ότι μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (ή μέγιστο πλήθος βημάτων του ΤΠ πράκτορα) ο καινούριος, τροποποιημένος ΤΠ πράκτορας μπορεί να καλύψει μεγαλύτερο πλήθος κόμβων στο δίκτυο και άρα να επιταχύνει τη συνολική διαδικασία κάλυψης του δικτύου.

Ένας πιθανός τρόπος για τον πράκτορα ΤΠ να κινηθεί μακριά από μια περιοχή που καλύπτει προσωρινά είναι να εκτελέσει ένα πεπερασμένο πλήθος διαδοχικών

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων μεταβάσεων στο δίκτυο με προκαθορισμένη γεωμετρική διεύθυνση. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη τεχνική περιλαμβάνει τον καθορισμό μιας γεωμετρικής διεύθυνσης εντός του γεωμετρικού πεδίου των κόμβων του δικτύου και τη διεξαγωγή βημάτων όσο το δυνατόν πιο κοντινών στην ακριβή διεύθυνση, όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως, κατά την εκτέλεση των μεταβάσεων που υλοποιούν το άλμα εντός του δικτύου. Η τεχνική αυτή προτάθηκε αρχικά και δημοσιεύτηκε στην εργασία [69] όπου προτείνουμε ο πράκτορας ΤΠ να μεταβάλλει σποραδικά την κατάσταση λειτουργίας του από την απλή εκτελώντας τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση στην τροποποιημένη όπου θα εκτελεί τα άλματα στο δίκτυο. Ένας τέτοιος τροποποιημένος πράκτορας τυχαίου περιπάτου (που θα ονομάζεται στο εξής ως πράκτορας ΤΠΑ) θα υλοποιείται πρακτικά μέσω της εναλλαγής μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας: την **κατάσταση 0**, όπου ο πράκτορας ΤΠ εκτελεί την απλή κίνηση τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση και την **κατάσταση 1**, όπου ο τροποποιημένος πράκτορας εκτελεί την συγκεκριμένα, κατευθυνόμενη κίνηση καλύπτοντας τα αντίστοιχα βήματα για το άλμα. Οι αντίστοιχες χρονικές διάρκειες για τις οποίες ο πράκτορας βρίσκεται στην **κατάσταση 1** ονομάζεται ως «διάρκεια παγώματος» λόγω της παγωμένης, συγκεκριμένης διεύθυνσης που ακολουθεί ο πράκτορας στο γεωμετρικό γράφο.

Ο μηχανισμός λειτουργίας του πράκτορα ΤΠΑ μετακινεί τον πράκτορα στο τέλος της διάρκειας «παγώματος» σε τμήματα του δικτύου τα οποία είναι αναμενόμενο να βρίσκονται σε μακρινή γεωγραφική απόσταση (λόγω της διαδικασίας παγώματος της διεύθυνσης του ΤΠ πράκτορα) σε σχέση με τα τμήματα δικτύου που θα επισκεπτόταν ο ΤΠ πράκτορας στο ίδιο χρονικό διάστημα (για τον ίδιο αριθμό βημάτων).

Έτσι η εισαγωγή της διαδικασίας παγώματος του ΤΠΑ πράκτορα επιφέρει ουσιαστικά άλματα ή μακρινές μεταβάσεις που ορίζονται ως η γεωγραφική απόσταση μεταξύ των κόμβων που επισκέπτονταν ο ΤΠΑ πράκτορας στην αρχή της περιόδου παγώματος και των κόμβων που επισκέπτεται στο τέλος της αντίστοιχης περιόδου.

Η βελτίωση στο χρόνο κάλυψης δικτύου μπορεί να εμφανιστεί σαν συνέπεια της ικανότητας ομοιόμορφης δειγματοληψίας δικτύου από τον ΤΠΑ πράκτορα η οποία οφείλεται στη δυνατότητα μετακίνησης του πράκτορα που κάνει δειγματοληψία προς περιοχές που είναι μακρινές και πολύ πιθανά καινούργιες (δεν έχουν δεχθεί κάποια επίσκεψη από τον πράκτορα) σε αντίθεση με τον απλό μηχανισμό του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση κατά τον οποίο ο πράκτορας περιτριγυρίζει για μεγάλα χρονικά διαστήματα (μεγάλο πλήθος βημάτων) την ίδια γειτονιά δικτύου με αποτέλεσμα να γίνεται υπέρ-δειγματοληψία. Αντίθετα στη περίπτωση όπου ο γράφος

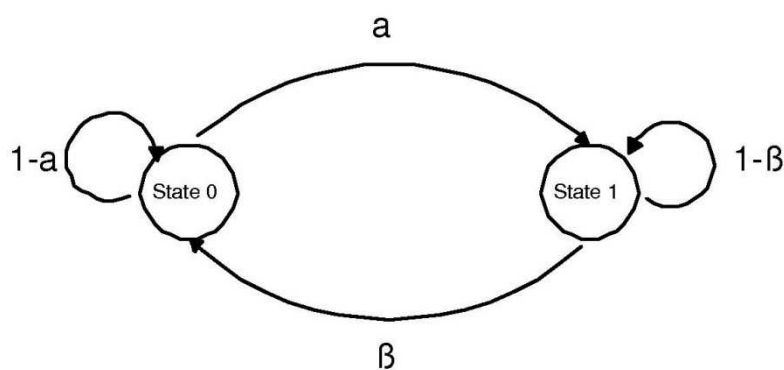
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων του δικτύου εμπεριέχει ζεύξεις μακρινών μεταβάσεων που μπορούν να οδηγήσουν τον ΤΠ πράκτορα σε μακρινές περιοχές δικτύου με τη τοπολογική έννοια τότε έχει φανεί στο [50] ότι ο απλός ΤΠ πράκτορας πραγματοποιεί ομοιόμορφη δειγματοληψία των κόμβων του δικτύου.

Σε ασύρματα δικτυακά περιβάλλοντα όπως τα δίκτυα ΑΔΑ η φυσική-γεωγραφική τοπολογία και η τοπολογία δικτύου είναι πάντοτε συσχετισμένες. Μία μακρινή ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων στην τοπολογία δικτύου αντιστοιχεί σε μία μακρινή φυσική-γεωγραφική απόσταση των κόμβων. Επί της ουσίας ο προτεινόμενος μηχανισμός του ΤΠΑ πράκτορα εφαρμοζόμενος σε ένα δίκτυο που απουσιάζουν οι μακρινές (φυσικές-γεωγραφικές ζεύξεις), όπως είναι τα δίκτυα ΑΔΑ προκαλεί την εμφάνιση ιδεατών μακρινών ζεύξεων στο δίκτυο και έχει τα αποτελέσματα για τη διαδικασία κάλυψης που θα είχε η εφαρμογή του απλού ΤΠ πράκτορα σε ένα δίκτυο που εμπεριέχει μακρινές ζεύξεις. Έτσι, η εφαρμογή του προτεινόμενου μηχανισμού του ΤΠΑ πράκτορα αναμένεται να οδηγήσει σε πιο ομοιόμορφη δειγματοληψία των κόμβων του δικτύου και επομένως σε βελτιωμένο χρόνο κάλυψης.

Πέραν του χρόνου κάλυψης η δυνατότητα του ΤΠΑ μηχανισμού να επιφέρει ομοιόμορφη δειγματοληψία των κόμβων του δικτύου είναι από μόνη της ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου σχήματος διάχυσης πληροφοριών ιδιαίτερα σε σχέση με τις τυπικές, συχνότερες εφαρμογές των δικτύων ΑΔΑ (εφαρμογές παρακολούθησης περιβαλλοντικών δεδομένων). Σε τέτοιου είδους εφαρμογές η διάχυση κάποιας πληροφορίας ή κάποιου αιτήματος στο δίκτυο είναι πιθανό να έχει στόχο μόνο τη κάλυψη ενός υποσυνόλου του κόμβου του δικτύου για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας και με δεδομένο την υψηλή χωρική συσχέτιση μεταξύ γειτονικών κόμβων σε δίκτυα ΑΔΑ [48]. Δεδομένου ότι ο μηχανισμός ΤΠΑ επιφέρει ομοιόμορφη δειγματοληψία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αναμένεται ότι η διάχυση αιτημάτων και οι συγκεντρωμένες απαντήσεις από το δίκτυο θα αντιπροσωπεύουν καλύτερα τη κατάσταση του πεδίου αισθητήρων και θα περιέχουν λίγη πλεονάζουσα πληροφορία. Σε τέτοια περιβάλλοντα είναι πολύ λογικό να υπολογίζεται η απόδοση των τεχνικών διάχυσης πληροφοριών με βάση το μερικό χρόνο κάλυψης σε αντίθεση με το χρόνο κάλυψης 100% του δικτύου.

3.3.2 Αναλυτική περιγραφή

Ο μηχανισμός ΤΠΑ προτείνεται να βασίζεται σε δύο πιθανές καταστάσεις λειτουργίας. Οι μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων ΤΠΑ πράκτορα θεωρούμε ότι συμβαίνουν σε διακριτές χρονικές στιγμές και προηγούνται των αποφάσεων για μετάβαση στον επόμενο κόμβο του ΤΠΑ πράκτορα. Η απλή αλυσίδα Markov 2 καταστάσεων, όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα 19, καθορίζει τον τρόπο κίνησης του πράκτορα μέσα στο δίκτυο. Όταν βρίσκεται στη κατάσταση 0 ο πράκτορας ΤΠΑ λειτουργεί όμοια με τον απλό ΤΠ όπως αυτός έχει ήδη περιγραφεί. Κάθε φορά που η αλυσίδα Markov μεταβαίνει στη κατάσταση 1 η γεωγραφική διεύθυνση του αμέσως επόμενου άλματος μέσα στο δίκτυο γίνεται καθορισμένη. Η διεύθυνση μπορεί να υπολογισθεί σαν ένα διάνυσμα του οποίου η κατεύθυνση συμπίπτει με την κατεύθυνση της ευθείας που ενώνει τον τωρινό κόμβο του πράκτορα με το κόμβο που είχε επισκεφθεί την αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή. Ο ΤΠΑ πράκτορας υλοποιεί μία κατευθυνόμενη κίνηση για όλες τις επόμενες χρονικές στιγμές (για όσο χρόνο η Markov αλυσίδα παραμένει στη κατάσταση 1) διαλέγοντας τον επόμενο κόμβο που πρόκειται να επισκεφθεί ως το γείτονα εκείνο του τωρινού κόμβου που βρίσκεται κοντύτερα σε διεύθυνση με το προκαθορισμένο διάνυσμα. Ο ΤΠΑ πράκτορας ολοκληρώνει τα βήματα άλματος μέσα στο δίκτυο όταν η αλυσίδα Markov επιστρέφει στη κατάσταση 0.



Εικόνα 19 Μηχανισμός εφαρμογής αλμάτων στο δίκτυο

Η κατευθυνόμενη σε γεωγραφική διεύθυνση μέσα στο δίκτυο μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενός απλού πίνακα αναζήτησης που περιλαμβάνει τις γεωγραφικές θέσεις των κόμβων γειτόνων του κάθε κόμβου. Ένας τέτοιος πίνακας αναζήτησης βοηθά στον

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 καθορισμό του επόμενου κόμβου τον οποίο ο ΤΠΑ πράκτορας διαλέγει να επισκεφθεί εφόσον βρίσκεται στη κατάσταση λειτουργίας 1 και υλοποιεί ένα άλμα στο δίκτυο. Η απόφαση της επιλογής του επόμενου κόμβου προς επίσκεψη γίνεται με βάση την προκαθορισμένη διεύθυνση του άλματος. Οι γεωγραφικές θέσεις των κόμβων γειτόνων μπορεί να εισαχθούν στον πίνακα αναζήτησης είτε τη στιγμή της τοποθέτησης του δικτύου αισθητήρων στο πεδίο (στατικό πεδίο αισθητήρων) ή αλλιώς σε αργότερες χρονικές στιγμές της τοποθέτησης με τη βοήθεια ενός περιορισμένου εύρους πρωτοκόλλου υπολογισμού θέσης.

Έστω ότι α (β) είναι οι πιθανότητες μετάβασης της αλυσίδας Markov από τη κατάσταση 0 στη κατάσταση 1 (από κατάσταση 1 στη κατάσταση 0) και έστω ότι $T_0 = \frac{1}{\alpha}$ ($T_1 = \frac{1}{\beta}$) είναι οι μέσοι χρόνοι (σε διακριτές χρονικές στιγμές ή σε πλήθος επισκέψεων των κόμβων) που ο πράκτορας περνάει στη κατάσταση 0 (κατάσταση 1). Προφανώς το β (T_1) καθορίζει το χρονικό διάστημα για το οποίο η κατευθυνόμενη κίνηση στο δίκτυο είναι συνεχώς ενεργή και έτσι καθορίζει το μέσο μήκος του επικείμενου άλματος. Παρομοίως το α (T_0) καθορίζει το μέσο χρόνο κατά τον οποίο ο μηχανισμός του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση βρίσκεται εν ενεργεία. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα α και β πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας να είναι ικανοποιητικά καταμερισμένες. Το β πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή ώστε το εφαρμοζόμενο άλμα στο δίκτυο να είναι αρκετά μεγάλο ώστε ο ΤΠΑ πράκτορας να μετακινείται αρκετά μακριά από την τωρινή περιοχή επισκέψεως κόμβων. Από την άλλη μεριά δεν θα πρέπει να έχει τιμή τέτοια ώστε τα άλματα στο δίκτυο να είναι υπερβολικά μεγάλα με αποτέλεσμα κάποιες περιοχές του δικτύου να παραμένουν ανεξερεύνητες από τον ΤΠΑ πράκτορα. Κατά τον ίδιο τρόπο θα πρέπει η τιμή της παραμέτρου α να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τη παραμονή του ΤΠΑ πράκτορα στη κατάσταση 0 για τέτοια χρονικά διαστήματα ώστε ο ΤΠΑ πράκτορας να καλύπτει επαρκώς τις γειτονιές κόμβων του δικτύου που επισκέπτεται (δεν πρέπει να υπερκαλύπτει, ούτε να υπο-καλύπτει τη γειτονιά).

Όπως και παραπάνω για τον ΤΠ πράκτορα, η κάλυψη δικτύου και ο χρόνος κάλυψης για τον ΤΠΑ πράκτορα μπορούν να οριστούν κατά τον ίδιο τρόπο και αναφέρονται ως $C_j(t)$ και T_j αντίστοιχα. Το $C_j(t)$ είναι μια αύξουσα συνάρτηση του t και παίρνει τιμές μεταξύ 0 (για $t = 0$) και 1 (για $t \geq T_j$).

3.4 Αναλυτικά αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα και του ΤΠΑ πράκτορα σε τυχαίους γεωμετρικούς γράφους

Στο τμήμα αυτό της διδακτορικής διατριβής θα παρουσιαστούν αναλυτικά αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου σε μεγάλο μεγέθους ΑΔΑ που μοντελοποιούνται ως τυχαίοι γεωμετρικοί γράφοι. Παρουσιάζονται αποτελέσματα για τους τυχαίους περίπατους χωρίς οπισθοδρόμηση ώστε να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα για τον ΤΠ πράκτορα, και επίσης το ίδιο συμβαίνει και για τον ΤΠΑ πράκτορα, ώστε να μπορεί κανείς να κατανοήσει τις ιδιαιτερότητές του και τα χαρακτηριστικά του. Η ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτό το τμήμα της διατριβής είναι πρωτότυπη στη βιβλιογραφία.

3.4.1 Αναλυτικά αποτελέσματα για τον ΤΠ πράκτορα

Ο κύριος στόχος σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής είναι να βρεθεί μια αναλυτική έκφραση για την ποσότητα $C_r(t)$, η οποία θα μας εξυπηρετεί σαν μέσο για την κατανόηση της διαδικασίας διάχυσης πληροφορίας βάση των τυχαίων περιπάτων στο δίκτυο. Αν θεωρηθεί ότι μελετάμε το πρόβλημα σε τοπολογίες δικτύου που είναι πλήρως συνδεδεμένες (πλήρης γράφος), τότε αυτό θα προκύπτει στους τυχαίους γεωμετρικούς γράφους (ΤΓΓ) όταν η ακτίνα συνδεσιμότητας r_c είναι αρκετά μεγάλη. Για παράδειγμα, για ένα πλήθος κόμβων που είναι διασκορπισμένοι στο δι-διάστατο τετράγωνο $[0,1] \times [0,1]$, τότε οποιαδήποτε τιμή για την ακτίνα συνδεσιμότητας $r_c \geq \sqrt{2}$ εξασφαλίζει ότι θα υπάρχει μια ζεύξη μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων.

Σε ένα τέτοιο δίκτυο, κάθε φορά που ο ΤΠ πράκτορας μετακινείται σε έναν καινούριο κόμβο του δικτύου τη χρονική στιγμή t (και επομένως φτάνει τη χρονική στιγμή $t+1$), η κάλυψη δικτύου $C_r(t)$ μπορεί: (α) να μεγαλώνει ($C_r(t+1) = C_r(t) + \frac{1}{N}$ δεδομένου ότι ο καινούριος κόμβος δεν έχει καλυφθεί προηγουμένως, ή (β) να παραμένει ίση ($C_r(t+1) = C_r(t)$), δεδομένου ότι ο καινούριος κόμβος έχει καλυφθεί παλαιότερα από τη διαδικασία. Θεωρείται εδώ ότι τη χρονική στιγμή t , σε ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο ο ΤΠ πράκτορας μπορεί να διαλέξει έναν από τους $N-2$ κόμβους του δικτύου (δηλ. έναν κόμβο από όλους τους κόμβους εκτός από εκείνον που ο κόμβος προήλθε και τον

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων τωρινό κόμβο στη διαδικασία). Δεδομένου ότι $1/N$ αντιστοιχεί στην κάλυψη δικτύου του κόμβου που η διαδικασία είχε επισκεφθεί την αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή και $1/N$ είναι το μέρος της κάλυψης δικτύου που αντιστοιχεί στον κόμβο που ο τυχαίος περίπατος επισκέπτεται τώρα, τότε $C_r(t) - \frac{2}{N}$ η κάλυψη δικτύου που αντιστοιχεί στους υπόλοιπους $N - 2$ κόμβους και, τελικά, $(N - 2) \times (C_r(t) - \frac{2}{N})$ θα είναι το πλήθος των κόμβων που έχουν ήδη καλυφθεί από τον ΤΠ πράκτορα (εκτός του κόμβου που είχε επισκεφθεί η διαδικασία την προηγούμενη χρονική στιγμή και του κόμβου που επισκέπτεται την τωρινή χρονική στιγμή). Για μεγάλες τιμές του N (που είναι ως επί το πλείστον η συχνότερα εμφανιζόμενη περίπτωση στην εργασία αυτή), θα ισχύει ότι $(N - 2) \times (C_r(t) - \frac{2}{N}) \approx NC_r(t)$. Συνεπώς, η πιθανότητα να επιλεγεί από τη διαδικασία ένας κόμβος που δεν έχει καλυφθεί στο παρελθόν (και επομένως να αυξηθεί η κάλυψη δικτύου) θα είναι ίση με την πιθανότητα να επιλεγεί ένας κόμβος από τους $N - NC_r(t)$ κόμβους που δεν έχουν καλυφθεί από τη διαδικασία σε παλαιότερες χρονικές στιγμές, ή αλλιώς θα είναι $\frac{N(1-C_r(t))}{N} = 1 - C_r(t)$. Μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει τώρα ότι (κατά μέσο όρο) η αύξηση στην κάλυψη δικτύου αφότου ο ΤΠ πράκτορας έχει κινηθεί τη χρονική στιγμή t , δίνεται από την πιθανότητα $1 - C_r(t)$ να κινηθεί σε έναν κόμβο που δεν είχε επισκεφθεί στο παρελθόν πολλαπλασιασμένο επί το $1/N$ το οποίο είναι η συνεισφορά στην κάλυψη δικτύου από κάθε κόμβο ο οποίος γίνεται καλυμμένος από τη διαδικασία για πρώτη φορά. Έτσι θα έχουμε ότι

$$C_r(t + 1) - C_r(t) = \frac{1}{N}(1 - C_r(t)) \quad (3.1)$$

Η εξίσωση (1) μπορεί να εκφραστεί σε πιο βολική για ανάλυση μορφή μέσω της αλλαγής από διακριτό χρόνο σε συνεχές χρόνο. Έστω ότι t είναι ο συνεχής χρόνος και έστω ότι $\tilde{C}_r(t)$ είναι η αντίστοιχη συνάρτηση κάλυψης δικτύου για συνεχή χρόνο του $C_r(t)$, που είναι επίσης αύξουσα συνάρτηση. Η διαφορά $C_r(t + 1) - C_r(t)$ μπορεί να προσεγγιστεί τώρα από το $\frac{\tilde{C}_r(t_1) - \tilde{C}_r(t_0)}{t_1 - t_0} = \frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt}$, όταν $t_0 < t_1$. Με βάση την εξίσωση (3.1) θα έχουμε στο συνεχή χρόνο ότι

$$\frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt} = \frac{1}{N}(1 - \tilde{C}_r(t)) \quad (3.2)$$

Η παράγωγος $\frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt}$ αντιστοιχεί στο ρυθμό με τον οποίο η ποσότητα $\tilde{C}_r(t)$ αυξάνεται. Προφανώς θα ισχύει ότι για $t=0$ (δηλ. για τη χρονική στιγμή που ο ΤΠ πράκτορας ξεκινά την κίνηση του στο δίκτυο) $\frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt} = 1$, εφόσον εκείνη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ο

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 ΤΠ πράκτορας θα μετακινηθεί με βεβαιότητα προς έναν καινούριο, ακάλυπτο από τη διαδικασία κόμβο. Το $\frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt}$ θα μηδενιστεί σταδιακά κατά την εξέλιξη της διαδικασίας δεδομένου ότι όταν όλοι οι κόμβοι θα έχουν καλυφθεί, θα ισχύει ότι $\tilde{C}_r(t) = 1$.

Η εξίσωση (3.2) είναι μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης και η λύση της θα πρέπει να ικανοποιεί τις ιδιότητες του $\tilde{C}_r(t)$, δηλαδή να είναι αύξουσα στο t με συνθήκες $0 \leq \tilde{C}_r(t) \leq 1$, έτσι έχουμε ότι

$$\tilde{C}_r(t) = 1 - e^{-\frac{t}{N}} \quad (3.3)$$

Για λόγους ευκολίας στην παρουσίαση θα χρησιμοποιήσουμε στο παρακάτω κείμενο την κανονικοποιημένη μορφή της συνάρτησης $\tilde{C}_r(t)$, δηλαδή $\tilde{C}_r(t/N) = 1 - e^{-t}$.

Η βιβλιογραφία περιέχει αναλυτικά αποτελέσματα για την περίπτωση του πλήρους γράφου, όπου ο χρόνος κάλυψης T_r είναι της τάξης του $N \ln(N)$ [20]. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.3) μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι $\tilde{C}_r(N \ln(N)) = 1 - e^{-\frac{N \ln(N)}{N}} = 1 - \frac{1}{N}$. Για μεγάλες τιμές του N είναι φανερό ότι θα ισχύει $\tilde{C}_r(N \ln(N)) \rightarrow 1$. Ένα ακόμη ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ότι για $t=N$, $\tilde{C}_r(N) = 1 - e^{-\frac{N}{N}} = 1 - e^{-1} = 0.632$, το οποίο κατά βάση σημαίνει ότι όταν το πλήθος των μεταβάσεων του ΤΠ πράκτορα είναι ίσο με το πλήθος των κόμβων του δικτύου, τότε κατά μέσο όρο το 63.2% των κόμβων του δικτύου έχουν καλυφθεί από τη διαδικασία. Αυτά τα αναλυτικά αποτελέσματα μπορούν να επιβεβαιωθούν στη συνέχεια από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας στο επόμενο τμήμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Η εξίσωση (3.3) προέκυψε με βάση την ανάλυση της διαδικασίας κάλυψης δικτύου σε ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο (πλήρη γράφο). Μειώνοντας την ακτίνα συνδεσιμότητας r_c σε ένα ΤΓΓ, το πλήθος των άμεσων γειτόνων για κάθε κόμβο του δικτύου μειώνεται και έτσι ο ΤΠ πράκτορας έχει μικρότερες επιλογές μετακίνησης σε σχέση με πρωτύτερα. Επομένως, το μέρος του συνολικού πλήθους κόμβων που (δεν) έχουν καλυφθεί σε προηγούμενα βήματα της διαδικασίας είναι αναμενόμενο να απέχει από την κάλυψη δικτύου $C_r(t)$ ή $(1-C_r(t))$. Όσο το r_c μειώνεται κι άλλο από την τιμή που είχε για να προκύπτει πλήρης γράφος, η μετακίνηση του ΤΠ πράκτορα προς κόμβους που δεν έχουν καλυφθεί στο παρελθόν από τη διαδικασία γίνεται ολοένα και πιο δύσκολη, μειώνοντας έτσι κι άλλο το ρυθμό με τον οποίο το $C_r(t)$ θα αυξάνει. Έτσι, θα εμφανίζονται τοπολογίες δικτύου όπου υπάρχουν «στενώσεις» στο δίκτυο, οι οποίες

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι ικανές να αναγκάσουν τον ΤΠ πράκτορα να επαν-επισκέπτεται μια μικρή ομάδα από κόμβους του δικτύου για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Προκειμένου να εκφραστεί αναλυτικά ο περιορισμένος ρυθμός αύξησης του $\tilde{C}_r(t)$ όπως εξηγήθηκε παραπάνω, θεωρείται στο εξής ότι η παράγωγος $\frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt}$ δίνεται από τη σχέση (3.4), όπως αυτή φαίνεται παρακάτω

$$\frac{d\tilde{C}_r(t)}{dt} = \frac{k}{N} (1 - \tilde{C}_r(t)) \quad (3.4)$$

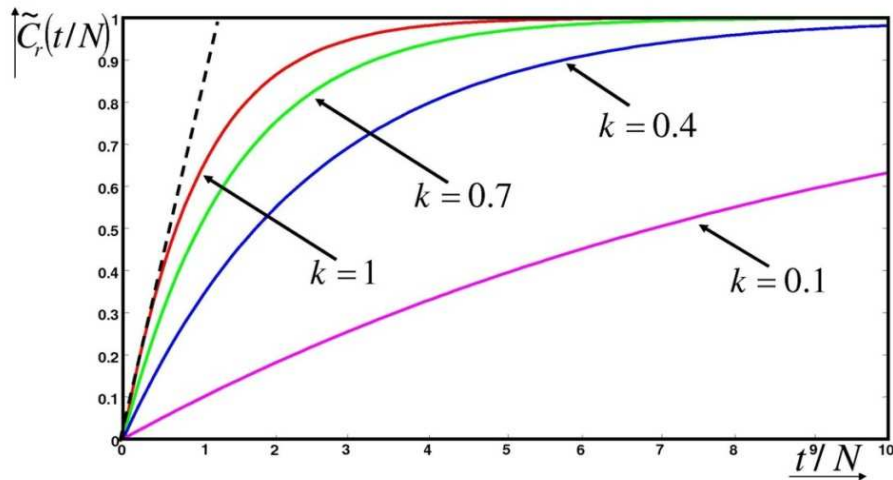
όπου $k \leq 1$ είναι μια θετική σταθερά που σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της τοπολογίας δικτύου (ακτίνα συνδεσιμότητας r_c και πλήθος κόμβων N). Η λύση της εξίσωσης (3.4) θα δίνεται από τον τύπο

$$\tilde{C}_r(t) = 1 - e^{-\frac{k}{N}t} \quad (3.5)$$

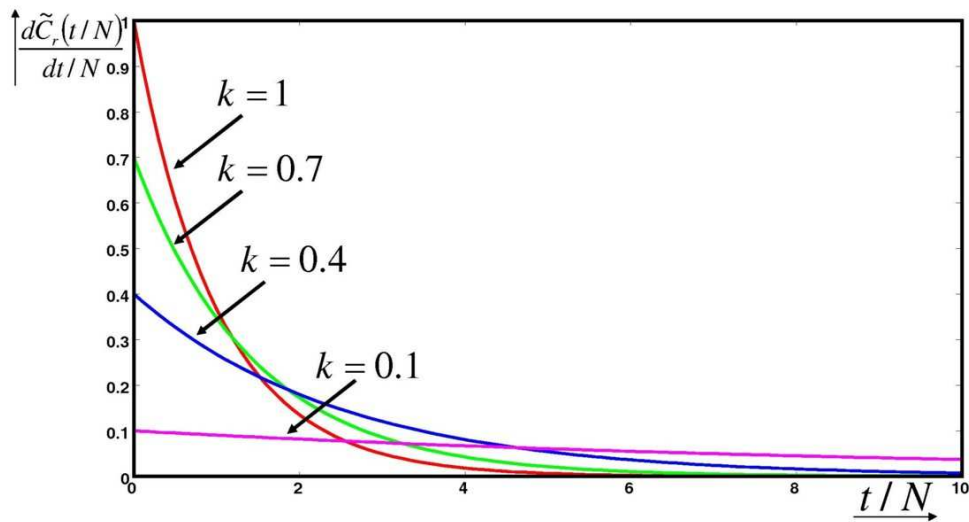
Η περίπτωση όπου ισχύει για τη σταθερά $k = 1$ θα αντιστοιχεί σε ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο, με τιμές για το r_c πολύ μεγάλες. Αυτό μπορεί να επαληθευθεί και από τη μορφή της εξίσωσης (3.3). Κατά τον ίδιο τρόπο, μικρότερες τιμές του r_c (ωστόσο αρκετά μεγάλες ώστε το δίκτυο να παραμένει συνδεδεμένο) θα πρέπει να καταλήγουν σε μικρότερες τιμές για το k . Αυτό θα εξηγηθεί περαιτέρω στο τμήμα με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που ακολουθεί παρακάτω.

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται το γράφημα του $\tilde{C}_r(t/N)$ με βάση την εξίσωση (3.5) σαν συνάρτηση του t/N για διάφορες τιμές της παραμέτρου k . Είναι πολύ ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι όσο οι τιμές της παραμέτρου k μικραίνουν, τόσο ο απαιτούμενος χρόνος για κάλυψη του δικτύου γίνεται μεγαλύτερος. Έτσι, για παράδειγμα, όταν $t = \frac{N}{k} \ln(N)$, τότε $\tilde{C}_r(\frac{N}{k} \ln(N)) = 1 - \frac{1}{N}$, το οποίο $(1/N)$ τείνει στο μηδέν για μεγάλο πλήθος γράφους (N μεγάλο). Έστω ότι $\tilde{T}_r = \frac{N}{k} \ln(N)$ ονομάζεται στο παρακάτω τμήμα της ανάλυσης ο ασυμπτωτικός χρόνος κάλυψης της δικτύου για τον ΤΠ πράκτορα (δηλαδή εάν ισχύει ότι $\lim_{N \rightarrow +\infty} \tilde{C}_r(\tilde{T}_r) = 1$). Δεδομένου ότι $k < 1$, είναι προφανές ότι όσο το r_c μειώνεται (το δίκτυο έχει όλο και λιγότερες ζεύξεις), το k θα μειώνεται και επομένως ο ασυμπτωτικός χρόνος κάλυψης \tilde{T}_r αυξάνει κατά έναν παράγοντα της τάξης του $\frac{1}{k}$.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 Η ανωτέρω παρατήρηση μπορεί να εξακριβωθεί και πειραματικά από τις καμπύλες των εικόνων 20 και 21. Γίνεται προφανές από αυτές τις καμπύλες ότι η παράγωγος της



Εικόνα 20 Η εξέλιξη της κάλυψης στο δίκτυο για την κανονικοποιημένη κάλυψη δικτύου.



Εικόνα 21 Παράγωγος της συνάρτησης κάλυψης δικτύου.

κανονικοποιημένης συνάρτησης κάλυψης δικτύου $\tilde{C}_r(t/N)$ είναι πολύ υψηλή για τα πρώτα βήματα της διαδικασίας και σταδιακά μικραίνει. Η συμπεριφορά αυτή είναι ιδιαίτερα προφανής όταν η παράμετρος k βρίσκεται κοντά στο 1. Στην εικόνα 20 μπορεί

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 κανείς να δει μαζί με την αναπαράσταση του $\tilde{C}_r(t/N)$ μια διακεκομμένη γραμμή που αντιστοιχεί στο $\tilde{C}_r(t/N) = t/N$. Η ευθεία αυτή είναι το βέλτιστο σενάριο (αν και συνήθως μη ρεαλιστικό) για διάχυση πληροφορίας, όπου με κάποιο τεχνητό τρόπο ένας κόμβος που δεν είναι πρωτύτερα καλυμμένος θα μπορεί να βρίσκεται για κάθε καινούριο βήμα της διαδικασίας. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι η ειδική περίπτωση με $k=1$ θα είναι η πιο κοντινή περίπτωση για αυτό το σενάριο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με βάση την εκτίμηση ότι για κάποιο χρονικό διάστημα στην αρχή της διαδικασίας (πολύ μικρές τιμές του k/N) το $\frac{d\tilde{C}_r(t/N)}{dt/N}$ έχει τιμή κοντά στη μονάδα, για $k=1$, όπως μπορεί να φανεί και στην εικόνα 21. Στα αμέσως επόμενα βήματα της διαδικασίας, το $\frac{d\tilde{C}_r(t/N)}{dt/N}$ μειώνεται (ταχύτερα από όταν έχουμε τιμές μικρές για το k) λόγω των πολλών επανεπισκέψεων του ΤΠ πράκτορα. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο τμήμα της διδακτορικής διατριβής επιβεβαιώνουν τα αναλυτικά ευρήματα όπως αυτά παρουσιάστηκαν σε αυτό το τμήμα.

3.4.2 Αναλυτικά αποτελέσματα για τον ΤΠΑ πράκτορα

Υπάρχουν δύο υπο-θέματα για ανάλυση σε σχέση με τον ΤΠΑ πράκτορα που παρουσιάστηκε σε παραπάνω κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής: (α) για πόσο χρόνο ο ΤΠΑ πράκτορας θα επιτρέπεται να παραμείνει στην κατάσταση 0 (που καθορίζεται από την πιθανότητα μετάβασης α) και (β) για πόσο χρόνο ο ΤΠΑ πράκτορας θα επιτρέπεται να παραμείνει στην κατάσταση 1 (που καθορίζεται από την πιθανότητα μετάβασης β).

Ας υποθέσουμε ότι η πιθανότητα μετάβασης α είναι κοντά στο μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε την τετριμμένη λύση όπου η συμπεριφορά του ΤΠΑ πράκτορα εκφυλίζεται στη συμπεριφορά του ΤΠ πράκτορα. Αυτή η επιλογή είναι αναμενόμενο να είναι καλή σε τοπολογίες δικτύων με υψηλή συνδεσιμότητα (μεγάλα πλήθη πρώτων γειτόνων ανά κόμβο του δικτύου) έτσι ώστε ο πράκτορας να μπορεί να κινηθεί εύκολα μακριά από τα ήδη καλυμμένα τμήματα του δικτύου. Αυτό θα συμβεί λόγω της πιθανοτικής κίνησης του πράκτορα στο δίκτυο. Ένα προφανές παράδειγμα για την κίνηση αυτή θα είναι η πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία δικτύου, αλλά όπως θα φανεί και στη συνέχεια με χρήση προσομοιώσεων κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί και σε

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
τοπολογίες μικρότερης συνδεσιμότητας (μικρές τιμές της ακτίνας συνδεσιμότητας r_c) από ότι όταν έχουμε πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία δικτύου.

Από την άλλη μεριά, για τιμές του α κοντά στο 1, ο ΤΠΑ πράκτορας δε θα μένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα κοντά στην κατάσταση 0. Αυτό θα σημαίνει πρακτικά ότι ο πράκτορας δεν θα επιτρέπεται να καλύψει για μεγάλα χρονικά διαστήματα υποπεριοχές του δικτύου. Αντίθετα, αυτό που θα συμβαίνει είναι ότι ο ΤΠΑ πράκτορας θα βρίσκεται τον περισσότερο χρόνο στην κατάσταση 1 (την κατάσταση αλμάτων, αναλόγως και με την τιμή του β) και έτσι θα μετακινείται εντός του δικτύου σε μεγάλες αποστάσεις (με μεγάλα άλματα κάθε φορά) μη καταφέροντας να καλύψει επαρκώς υποπεριοχές του δικτύου. Μια τέτοια κίνηση του πράκτορα στο δίκτυο παρομοιάζει με την κίνηση του ΤΠ πράκτορα εάν αυτός κινούνταν σε ένα υπερκείμενο δίκτυο με πολλές μακρινές ζεύξεις μεταξύ κόμβων.

Η συνδεσιμότητα της τοπολογίας (που στην περίπτωση των ΤΓΓ είναι εξαρτώμενη από την ακτίνα συνδεσιμότητας r_c) παίζει σημαντικό ρόλο στην αναζήτηση για κατάλληλες τιμές της παραμέτρου β σε σχέση με τη διαδικασία κάλυψης για τον ΤΠΑ πράκτορα. Τοπολογίες με υψηλή συνδεσιμότητα (δηλαδή για τιμές του r_c που είναι μεγάλες αλλά όχι όσο απαιτείται για πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία) χαρακτηρίζονται από την πολύ μικρή διάμετρο του δικτύου [14]. Σε τέτοια δίκτυα ο ΤΠ πράκτορας δεν αναμένεται να είναι περιορισμένος σε μια περιοχή του δικτύου οπότε η προσθήκη των αλμάτων στην κίνηση του ΤΠ πράκτορα δεν αναμένεται να προσδώσει κάποια βελτίωση ως προς τη διαδικασία κάλυψης. Σε τοπολογίες που προκύπτουν από μικρότερες τιμές του r_c (οι οποίες είναι όμως επάρκεις ώστε να υπάρχει συνδεσιμότητα στο δίκτυο) είναι αναμενόμενο ο ΤΠ πράκτορας να επανεπισκέπτεται πολύ συχνά ήδη καλυμμένους κόμβους από τη διαδικασία λόγω της παρουσίας «στενώσεων» στην τοπολογία δικτύου. Σε τέτοιες περιπτώσεις τοπολογιών δικτύου η τιμή της πιθανότητας β θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε ο ΤΠΑ πράκτορας να μπορεί να μετακινηθεί κάνοντας άλματα σε διαφορετικές περιοχές του δικτύου. Βέβαια, απαιτείται προσοχή έτσι ώστε πολύ μικρές τιμές του β (τιμές κοντά στο 0) να αποφεύγονται λόγω του ότι θα οδηγήσουν τον ΤΠΑ πράκτορα να λειτουργεί περισσότερο στην κατάσταση 1 (δηλ. στην κατάσταση όπου διεξάγει άλμα) εμποδίζοντας έτσι τη διαδικασία από το να μπορεί να εξερευνήσει διεξοδικά ένα τμήμα του δικτύου.

Όπως έχει γίνει φανερό από την παραπάνω συζήτηση, η κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα είναι άμεσα σχετισμένη με τις τιμές των παραμέτρων r_c , α και β . Ωστόσο, μια

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 αναλυτική περιγραφή για την κάλυψη δικτύου με χρήση όλων των παραμέτρων r_c , α και β είναι πολύ δύσκολο να διεξαχθεί, αντ' αυτού θα προτιμηθεί η διερεύνηση των σχέσεων μέσω προσομοιώσεων. Έστω ότι το $C_j(t)$ ($\tilde{C}_j(t)$) αντιστοιχεί στην κάλυψη δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα κατά τον ίδιο τρόπο που το $C_r(t)$ ($\tilde{C}_r(t)$) αντιστοιχεί στην κάλυψη δικτύου για τον ΤΠ πράκτορα. Μετά από το κατάλληλο χρονικό διάστημα είναι αναμενόμενο ότι ο ΤΠΑ πράκτορας θα έχει μετακινηθεί σε όλα τα υπο-τμήματα του δικτύου και θα έχει καλύψει κατά μέσο όρο το ίδιο ποσοστό κόμβων σε κάθε υπο-τμήμα του δικτύου. Έτσι, σε χρόνο t είναι αναμενόμενο ότι κατά μέσο όρο το τμήμα των μη καλυμμένων κόμβων γειτόνων από τον τωρινό κόμβο του ΤΠΑ πράκτορα θα είναι $N \times (1 - C_j(t))$. Ακολουθώντας ένα αντίστοιχο σκεπτικό με το σκεπτικό που παρουσιάστηκε παραπάνω για την κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα, μια αναλυτική περιγραφή για την κάλυψη δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα θα μπορεί να δοθεί από την έκφραση

$$\tilde{C}_j(t) = 1 - e^{-\frac{k't}{N}} \quad (3.6)$$

όπου k' είναι μια θετική σταθερά εξαρτώμενη από τις ιδιαιτερότητες της τοπολογίας δικτύου (δηλαδή του r_c) και τις τιμές στις παραμέτρους α και β (όπως θα δειχθεί παρακάτω στο τμήμα με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων).

3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Παρουσιάζουμε σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον Omnet++ [23]. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων θα έχει δύο στόχους σε αυτό το τμήμα, (α) να ισχυροποιηθούν τα αναλυτικά ευρήματα του προηγούμενου τμήματος που παρουσιάστηκε και (β) να εξερευνηθεί περαιτέρω ο μηχανισμός που λειτουργεί για τον ΤΠΑ πράκτορα (κυρίως σε σχέση με τον ΤΠ πράκτορα) για τις περιπτώσεις που δεν έχουν αναλυτικά περιγραφεί.

Διεξάγονται πολλές επαναλήψεις της προσομοιωθείσας διαδικασίας, προκειμένου να μπορεί να βγει ένα ασφαλές συμπέρασμα για τις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων του

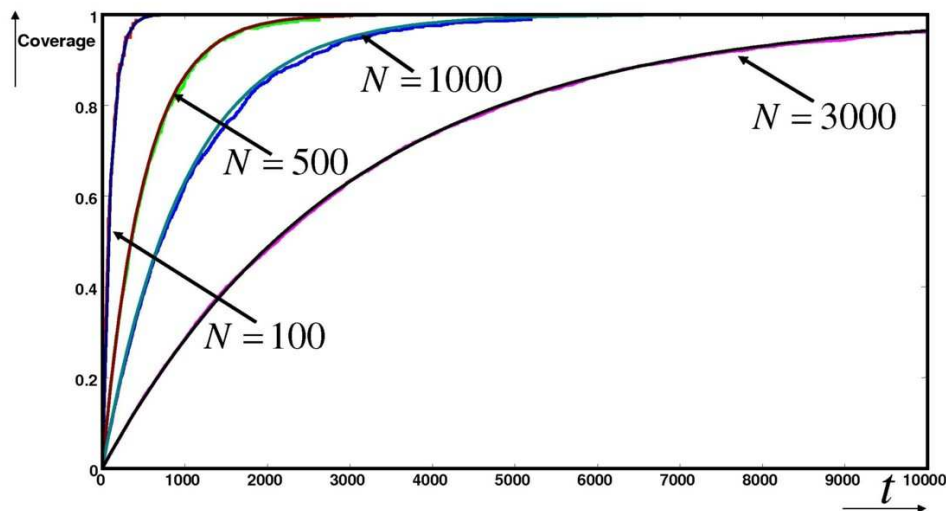
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων προσομοιωτή. Σε κάθε επανάληψη του προγράμματος, γίνεται οργάνωση του δικτύου εξ' αρχής με πλήθος κόμβων να βρίσκεται μεταξύ των τιμών 100 και 3000, ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται κάθε φορά. Οι κόμβοι τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις σε ένα τετραγωνικό πεδίο με μήκος και πλάτος που βρίσκονται μεταξύ των τιμών $[0,1] \times [0,1]$. Οι τυχαίες τιμές (x_u, y_u) για κάθε κόμβο $u \in V$ επιλέγονται με τυχαίο ομοιόμορφο τρόπο μεταξύ των τιμών $[0,1]$. Κάθε κόμβος του δικτύου $u \in V$ είναι γνώστης των συντεταγμένων θέσης του (x_u, y_u) . Δύο κόμβοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με μια ζεύξη τότε και μόνον τότε όταν η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη ή ίση με την ακτίνα συνδεσιμότητας r_c . Προφανώς για $r_c \geq \sqrt{2}$ η τοπολογία δικτύου που προκύπτει είναι πλήρως ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο. Αναλόγως με την τιμή του N (το μέγεθος του δικτύου), το κάτω όριο της ακτίνας συνδεσιμότητας r_c για την οποία το δίκτυο είναι συνδεδεμένο μεταβάλλεται (είναι μικρότερο όταν η τιμή του N μεγαλώνει). Τέσσερις τιμές του r_c (0.05, 0.1, 0.5, 1.0) θα χρησιμοποιηθούν στο αμέσως επόμενο τμήμα των προσομοιώσεων για να μετρηθούν αποτελέσματα σε τοπολογίες δικτύου που έχουν $N=1000$. Οι τιμές για την ακτίνα συνδεσιμότητας είναι όλες μικρότερες του $\sqrt{2} \approx 1.4$, και ο συγκεκριμένος λόγος για αυτό είναι ότι ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο δεν είναι απαραίτητα ο πιο χαρακτηριστικός τύπος δικτύου για τα δίκτυα ΑΔΑ που ενδιαφερόμαστε σε αυτήν την εργασία. Προσομοιώσεις με δίκτυα που έχουν πλήθος κόμβων που είναι $N \geq 10^4$ δεν μπόρεσαν να εκτελεστούν λόγω των περιορισμών που είχαμε από το υπολογιστικό σύστημα του προσομοιωτή μας και τις απαιτούμενες θέσεις μνήμης.

Η κάλυψη δικτύου είναι το κύριο μέγεθος που μας ενδιαφέρει στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο τμήμα της διδακτορικής διατριβής. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε μια επανάληψη της διαδικασίας που εκτελείται ώστε να έχουμε μια μικροσκοπική οπτική των αποτελεσμάτων και όχι μέσες τιμές που θα έδιναν μια πιο μακροσκοπική οπτική των αποτελεσμάτων μας.

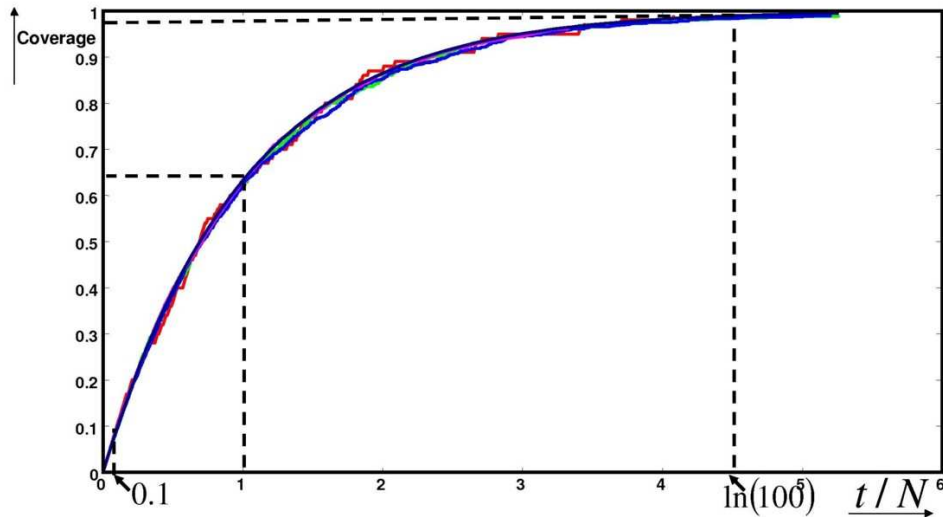
3.5.1 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα

Μια σημαντική συνεισφορά που κάναμε σε αυτήν την εργασία της διδακτορικής διατριβής μας είναι η αναλυτική συμπεριφορά της κάλυψης δικτύου σε ένα πλήρως

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων συνδεδεμένο δίκτυο (δηλαδή για $r_c \geq \sqrt{2}$), όπως αποτυπώθηκε στην εξίσωση (3.3). Η εικόνα 22 παρουσιάζει την κάλυψη δικτύου σαν συνάρτηση του συνεχούς χρόνου t (που αντιστοιχεί στον αριθμό κινήσεων που έχει κάνει ο ΤΠ πράκτορας στο δίκτυο) σε πλήρως συνδεδεμένες τοπολογίες που αποτελούνται από 100, 500, 1000 ή 3000 κόμβους. Για κάθε τοπολογία δικτύου, η κάλυψη δικτύου από την προσομοίωση και η αναλυτικά υπολογισμένη τιμή της κάλυψης δικτύου $\tilde{C}_r(t)$ εμφανίζονται στην εικόνα. Όπως φαίνεται εύκολα από την εικόνα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα αναλυτικά υπολογισμένα αποτελέσματα από την εξίσωση (3.3) είναι ταυτόσημα. Στην εικόνα 23 εμφανίζονται τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα της κάλυψης δικτύου σαν συνάρτηση του t/N . Είναι φανερό και πάλι ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα αναλυτικά υπολογισμένα αποτελέσματα είναι ταυτόσημα σε πλήρως συνδεδεμένες τοπολογίες στον κανονικοποιημένο χρόνο t/N .

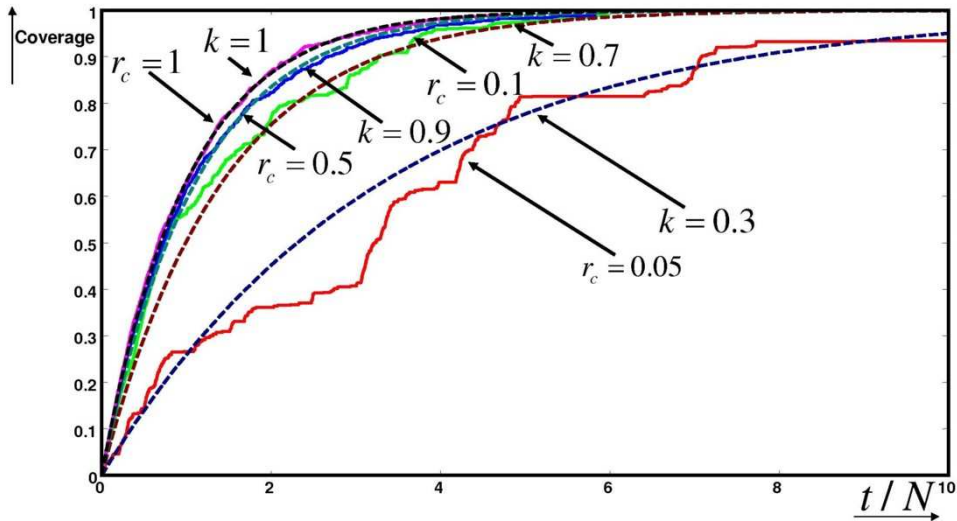


Εικόνα 22 Αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοιώσεων της κάλυψης δικτύου για πλήρως συνδεδεμένους γράφους



Εικόνα 23 Κανονικοποιημένα αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοιώσεων της κάλυψης δικτύου για πλήρως συνδεδεμένους γράφους

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει για τις εικόνες 22 και 23 ότι οι καμπύλες ακολουθούν όλες το ίδιο σχήμα. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ακόμη ότι για πλήθος κινήσεων $0.1N$ του ΤΠ πράκτορα (δείτε την διακεκομμένη γραμμή στο σημείο $t/N=0.1$ από την εικόνα 8) ο ΤΠ πράκτορας επιδεικνύει πολύ καλή συμπεριφορά (ο αριθμός των επανεπισκέψεων είναι μικρός και η κάλυψη δικτύου αυξάνεται γρήγορα) δηλαδή υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα ο ΤΠ πράκτορας να επισκεφθεί έναν καινούρια κόμβο στη διαδικασία αντί του να επισκεφθεί έναν ήδη καλυμμένο κόμβο. Στο χρόνο $t=N$, μπορεί κανείς να δει ότι σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, 63.2% των κόμβων του δικτύου (N κόμβοι) έχει ήδη καλυφθεί από τη διαδικασία. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο και από τα αναλυτικά αποτελέσματα όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο τμήμα. Για την ειδική περίπτωση όπου $N=100$, θα ισχύει ότι τη χρονική στιγμή με $t=N\ln N$ θα έχουμε $t/N=\ln(100)\approx 4.6$ και από την εικόνα 23 (και το ίδιο από τα αναλυτικά αποτελέσματα) μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η κάλυψη δικτύου θα είναι $1-1/N=99\%$. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζουμε.



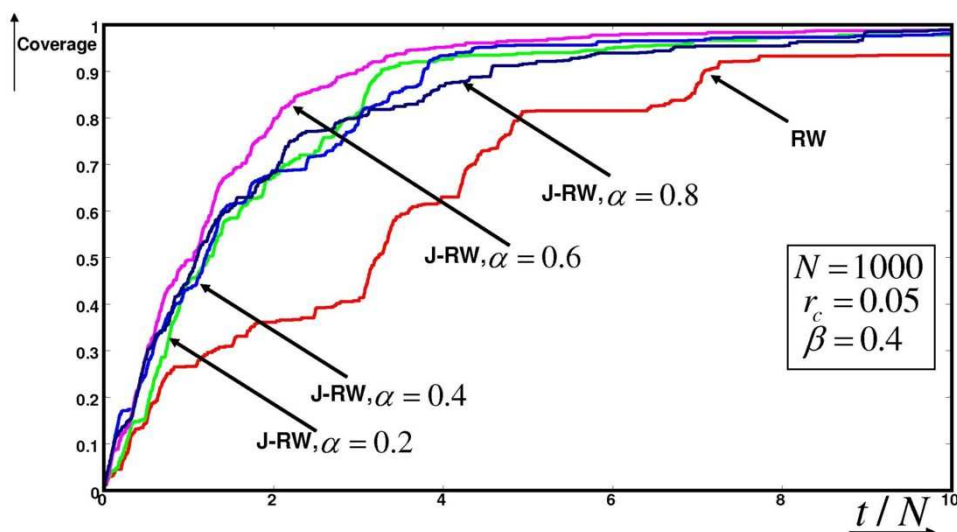
Εικόνα 24 Κάλυψη δικτύου αναλυτικής και πειραματικής μεθόδου για τοπολογίες δικτύου με χαμηλή ακτίνα συνδεσιμότητας σε συνάρτηση με κανονικοποιημένο χρόνο

Η εικόνα 24 αναδεικνύει αποτελέσματα προσομοιώσεων για την κάλυψη δικτύου σε τοπολογίες δικτύου που είναι διάφορες από τον πλήρως συνδεδεμένο γράφο και προκύπτουν όταν οι τιμές για την ακτίνα συνδεσιμότητας r_c είναι μικρότερες από την τιμή για πλήρως συνδεδεμένο γράφο και παίρνει τιμές που είναι $r_c = 0.05, 0.1, 0.5$ και 1.0 . Μια πρώτη παρατήρηση από το γράφημα της εικόνας 9 είναι ότι για κατάλληλες τιμές του k (δηλαδή $k=0.3$ όταν $r_c = 0.05$, $k=0.7$ όταν $r_c = 0.1$, $k=0.9$ όταν $r_c = 0.5$ και $k=1.0$ όταν $r_c = 1.0$) η αναλυτική περιγραφή για την κάλυψη δικτύου, όπως δώθηκε από την εξίσωση 3.5 (δηλαδή $\tilde{C}_r(t) = 1 - e^{-\frac{k}{N}t}$) προσομοιάζει επακριβώς τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Μια ακόμη παρατήρηση που έχει ενδιαφέρον είναι ότι για $r_c > 0.1$ η κατάλληλη τιμή του k για να έχουμε κοντινά αποτελέσματα μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής προσέγγισης είναι $k \approx 1$. Αυτό έχει να κάνει κατά βάση με το γεγονός ότι το πλήθος των πρώτων γειτόνων (κατά μέσο όρο) αυξάνεται πολύ γρηγορότερα από ότι αυξάνεται η ακτίνα συνδεσιμότητας r_c (ο βαθμός συνδεσιμότητας ή το πλήθος των πρώτων γειτόνων θα είναι $\pi r_c^2 N$ κατά μέσο όρο). Έτσι μια μικρή αύξηση στην ακτίνα συνδεσιμότητας r_c προκαλεί μεγάλη μεταβολή στο πλήθος των πρώτων γειτόνων που είναι και ο βαθμός γειτνίασης των κόμβων. Για τιμές του $N = 1000$ και $r_c = 0.1$ υπολογίζεται ότι κατά μέσο όρο υπάρχουν 31 πρώτοι γείτονες κόμβοι για κάθε κόμβο του δικτύου, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι η τοπολογία δικτύου που

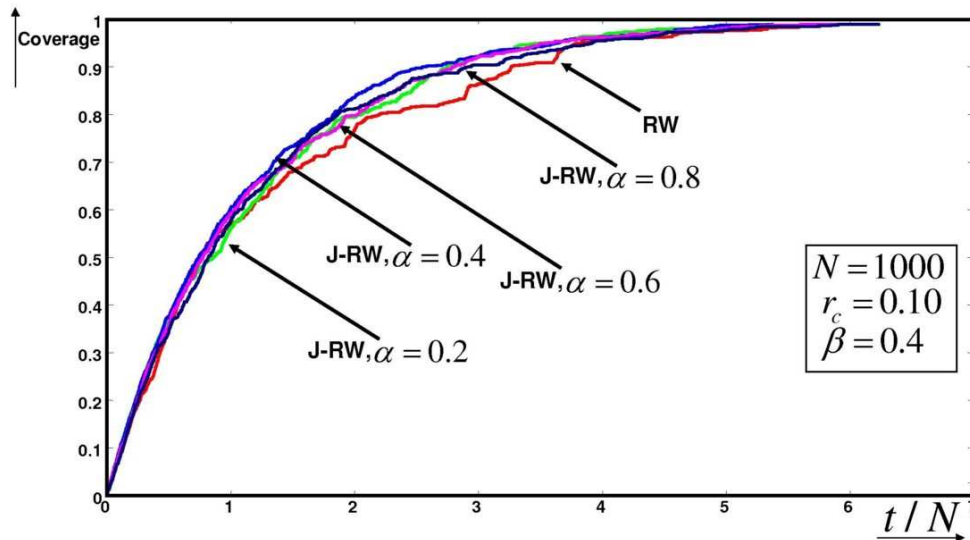
Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων προκύπτει έχει υψηλή συνδεσιμότητα. Εάν το r_c γίνει επιπλέον μεγαλύτερο, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η κάλυψη δικτύου θα είναι πολύ κοντά στο $1 - e^{-t}$, ακόμη και για τιμές του r_c που απέχουν σημαντικά από το $\sqrt{2} \approx 1.4$.

3.5.2 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα

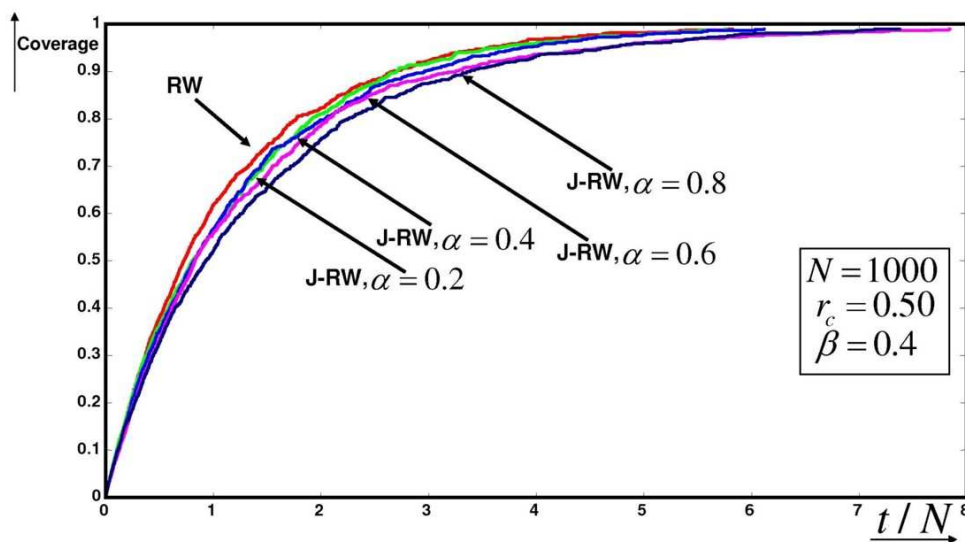
Οι εικόνες 25, 26, 27 και 28 παρουσιάζουν αποτελέσματα προσομοιώσεων για τον ΤΠΑ πράκτορα σε ένα δίκτυο από $N=1000$ κόμβους και διάφορες τιμές των r_c και α . Το β παραμένει σταθερό και ίσο με 0.4, για το λόγο ότι μόλις η κατάσταση 1 έχει γίνει ενεργή στην αλυσίδα Markov που καθορίζει την κίνηση του ΤΠΑ πράκτορα (δηλαδή μόλις ο ΤΠΑ πράκτορας έχει ξεκινήσει την κατευθυνόμενη κίνηση), ο πράκτορας θα κινηθεί για ένα πλήθος 2-3 διαδοχικών κατευθυνόμενων προωθήσεων κατά μέσο όρο έως ότου η κατάσταση 0 επανέλθει σαν ενεργή κατάσταση της αλυσίδας Markov. Η εικόνα 25 παρουσιάζει την κάλυψη δικτύου για τον ΤΠ πράκτορα, η οποία είναι όπως φαίνεται αρκετά χαμηλότερη από την κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα σε όλες τις τιμές της παραμέτρου α (το α παίρνει τιμές 0.2, 0.4, 0.6 και 0.8). Η τοπολογία δικτύου που αντιστοιχεί στην εικόνα 25, είναι χαμηλής συνδεσιμότητας ($r_c = 0.05$), έτσι ακόμη και για κάπως μικρές τιμές του $\beta = 0.4$, ο ΤΠΑ πράκτορας μπορεί να πραγματοποιεί αρκετά μεγάλες μακρινές μεταβάσεις μέσα στο δίκτυο.



Εικόνα 25 Κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα σε δίκτυο περιορισμένης συνδεσιμότητας σε συνάρτηση με τον κανονικοποιημένο χρόνο

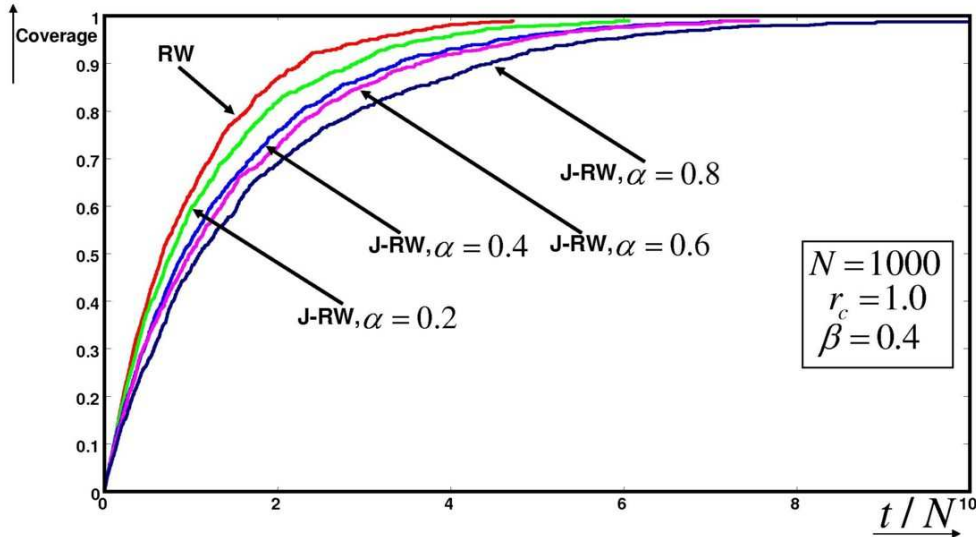


Εικόνα 26 Κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα σε δίκτυο μεσαίας συνδεσιμότητας σε συνάρτηση με τον κανονικοποιημένο χρόνο



Εικόνα 27 Κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα σε δίκτυο υψηλότερης συνδεσιμότητας σε συνάρτηση με τον κανονικοποιημένο χρόνο

Καθώς η τοπολογία δικτύου μεταβάλλεται σε όλο και πιο πολύ συνδεδεμένη, (η τιμή του r_c μεγαλώνει), η βελτίωση που επιφέρει ο μηχανισμός των αλμάτων στο δίκτυο γίνεται όλο και πιο δυσδιάκριτος. Έτσι, για παράδειγμα στην εικόνα 26 (με $r_c = 0.1$), η κάλυψη δικτύου για τον μηχανισμό του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση είναι αρκετά μικρότερη από την κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα (με οποιαδήποτε τιμή του β), αν και δεν τόσο μικρότερη όσο προηγουμένως. Στην περίπτωση της εικόνας 27 (με $r_c = 0.5$) η κάλυψη δικτύου για τον τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση είναι μεγαλύτερη από την κάλυψη δικτύου για τον μηχανισμό του ΤΠΑ πράκτορα (για οποιαδήποτε τιμή του α). Καθώς η ακτίνα συνδεσιμότητας r_c μεγαλώνει κι άλλο η κάλυψη δικτύου για το μηχανισμό του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση είναι φανερά μεγαλύτερη από την κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα για τις συγκεκριμένες τιμές των α και β) που έχουμε διαλέξει. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται με καθαρότητα στην εικόνα 28 ($r_c = 1.0$), όπου είναι ξεκάθαρο πως η συμπεριφορά οφείλεται στη δυνατότητα που έχει ο μηχανισμός του ΤΠ πράκτορα να εκμεταλεύεται αποτελεσματικά τις μακρινές μεταβάσεις που εμφανίζεται στις τοπολογίες δικτύου όταν αυτές είναι υψηλής συνδεσιμότητας τοπολογίες. Για την ακρίβεια, εξακριβώνουμε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα ότι διαδοχικές μεταβάσεις του ΤΠ πράκτορα σε τοπολογίες υψηλής συνδεσιμότητας είναι πανομοιότυπες με μεταβάσεις του ΤΠΑ πράκτορα σε τοπολογίες χαμηλής συνδεσιμότητας (ως προς τη φυσική απόσταση που καλύπτουν οι πράκτορες κατά τις διαδοχικές μεταβάσεις τους μέσα στο δίκτυο).

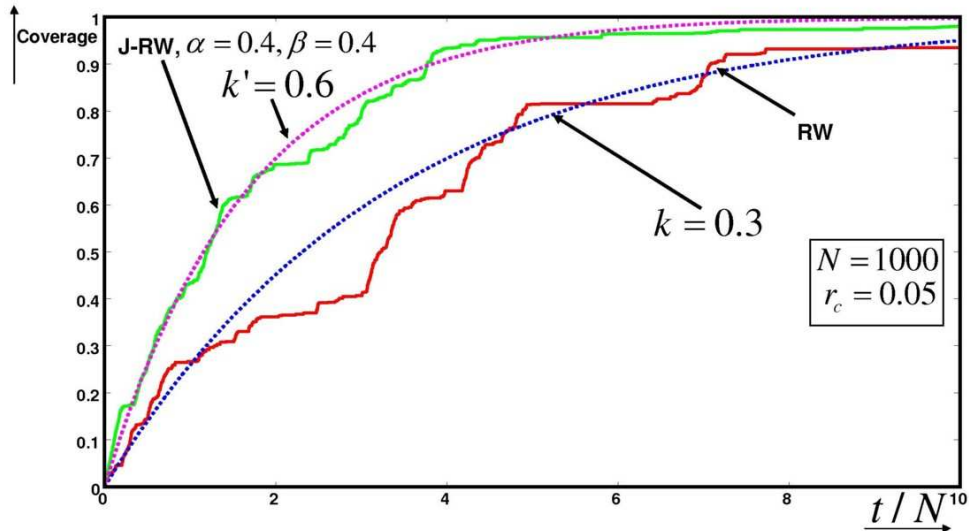


Εικόνα 28 Κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα σε δίκτυο υψηλής συνδεσιμότητας σε συνάρτηση με τον κανονικοποιημένο χρόνο

Είναι ένα ασφαλές συμπέρασμα να διατυπωθεί ότι δεν υπάρχει βελτίωση στη διαδικασία κάλυψης δικτύου όταν εισάγουμε τον ΤΠΑ πράκτορα σε τοπολογίες υψηλής συνδεσιμότητας (σε σχέση με τη διαδικασία κάλυψης δικτύου του ΤΠ πράκτορα). Αντίθετα είναι πιθανό ο μηχανισμός του ΤΠΑ πράκτορα να προκαλεί (μέσω της διαδικασίας «κλειδώματος» της αλυσίδας Markov στην κατάσταση 1) την προώθηση του πράκτορα προς περιοχές του εξεταζόμενου δικτύου που είναι ακριανές ή περιφερειακές στο δίκτυο, και έτσι η συνολική κάλυψη του δικτύου από τη διαδικασία του ΤΠΑ γείτονα μειώνεται. Η μεθοδολογία «κλειδώματος» είναι δηλαδή αρνητική στην απόδοση της διαδικασίας σε τοπολογίες δικτύου υψηλής συνδεσιμότητας.

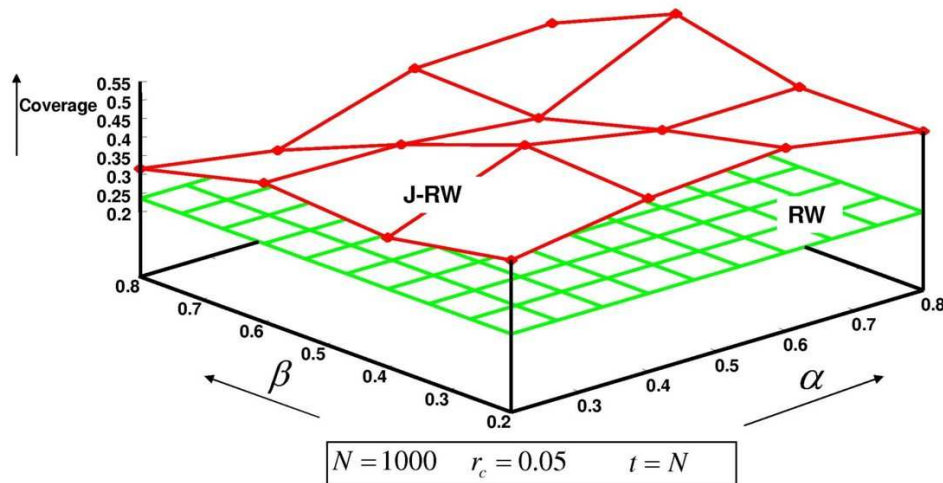
Μια περαιτέρω ενδιαφέρουσα παράμετρος των παρατηρήσεών μας είναι η μορφή της καμπύλης κάλυψης δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα σαν συνάρτηση του κανονικοποιημένου χρόνου t/N . Όπως μπορεί να φανεί και στην εικόνα 29, η καμπύλη της κάλυψης δικτύου ακολουθεί την αναλυτική περιγραφή όπως την δώσαμε στο προηγούμενο τμήμα της διδακτορικής διατριβής μας $1 - e^{-\frac{k'}{N}t}$, για κατάλληλες τιμές της σταθεράς k' . Οι συγκεκριμένες καμπύλες που φαίνονται παρακάτω στην εικόνα 29 είναι παρουσιασμένες συγχρόνως με κατάλληλες καμπύλες για τα αναλυτικά αποτελέσματα των $\tilde{C}_r(t)$ και $\tilde{C}_j(t)$. Γίνεται φανερό στην εικόνα αυτή ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν επακριβώς τις αναλυτικές καμπύλες κάλυψης δικτύου του

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση και του ΤΠΑ πράκτορα. Η κατάλληλες τιμές για τις σταθερές k και k' εμφανίζονται στο σχήμα.



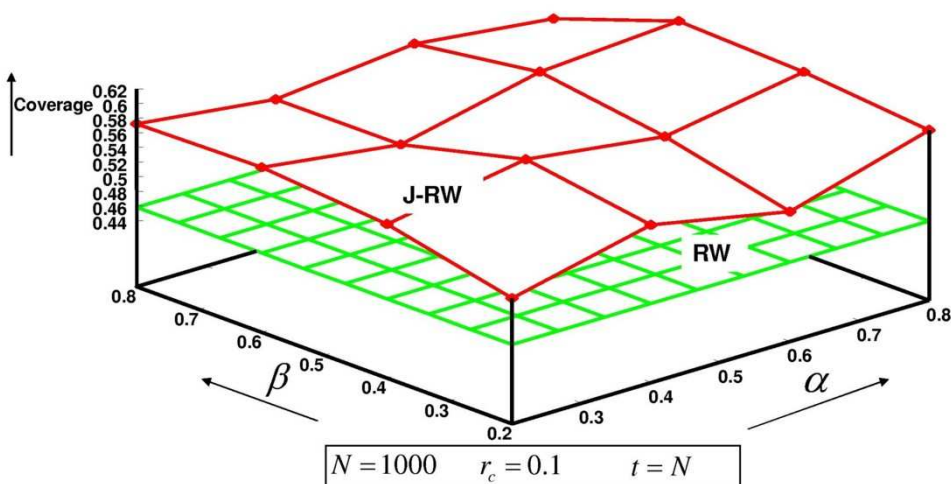
Εικόνα 29 Κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα σε δίκτυο περιορισμένης συνδεσιμότητας σε συνάρτηση με τον κανονικοποιημένο χρόνο

Οι εικόνες 30, 31, 32, 33 και μετά οι εικόνες 34, 35, 36, 37 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας για την κάλυψη δικτύου σαν συνάρτηση του α και β (οι τιμές τους μεταβάλλονται στα διαστήματα $[0.2, 0.8]$) και για διάρκεια προσομοιώσεων που περιορίζονται από το $t=N$ στις εικόνες 30 - 33 και από το $t=N \ln(N)$ στις εικόνες 34 - 37.



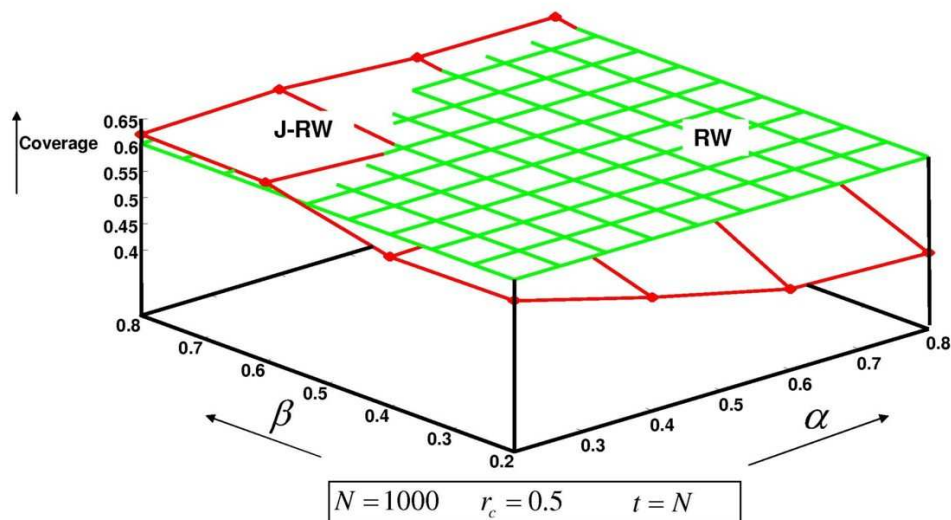
Εικόνα 30 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στην εικόνα 15 αντιστοιχούν στην ακτίνα συνδεσιμότητας $r_c = 0.05$. Περίπου το 25% των κόμβων του δικτύου είναι καλυμμένο όταν ο τυχαίος περίπατος χωρίς οπισθοδρόμηση έχει χρησιμοποιηθεί, ενώ η κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα είναι μεταξύ του 30% και του 55%, ανάλογα με τις συγκεκριμένες τιμές των α και β . Για την ακτίνα συνδεσιμότητας $r_c = 0.1$ μπορούμε να δούμε από την εικόνα 16 ότι ο μηχανισμός του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση δίνει πάλι κάλυψη δικτύου που είναι σημαντικά μικρότερη από την κάλυψη του ΤΠΑ πράκτορα για όλες τις επιλογές τιμών των α και β .

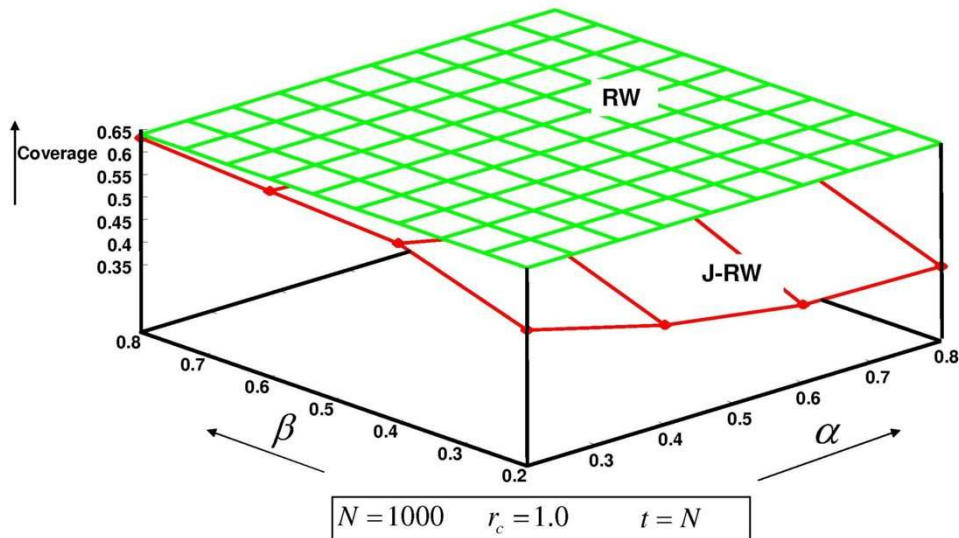


Εικόνα 31 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες

Η εικόνα 32 (με $r_c = 0.5$) έχει πιο πολύ ενδιαφέρον καθότι μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η κάλυψη δικτύου για το ΤΠ πράκτορα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα, εκτός από εκείνες τις τιμές των α και β όπου το β είναι υψηλό (δηλαδή για $\beta = 0.8$) και το α είναι χαμηλό (δηλαδή για $\alpha = 0.2$). Για αυτό το συνδυασμό τιμών των παραμέτρων α και β ισχύει ότι θα γίνονται σχετικά μικρά άλματα (σε απόσταση κόμβων για κάθε άλμα) στο δίκτυο, ενώ παράλληλα ο ΤΠΑ πράκτορας θα μπορεί να μείνει για πολλά βήματα της διαδικασίας στην κατάσταση 0, ώστε να εξερευνήσει πλήρως την περιοχή δικτύου που βρίσκεται. Δεδομένου ότι έχουμε υψηλής συνδεσιμότητας τοπολογία δικτύου, μικρότερες τιμές της παραμέτρου β θα οδηγούν σε μεγαλύτερου μήκους άλματα στο δίκτυο, τα οποία θα ωθούν τον πράκτορα στα άκρα της τοπολογίας του δικτύου και συνεπώς θα έχουμε μειώσεις στην απόδοση της κάλυψης δικτύου.

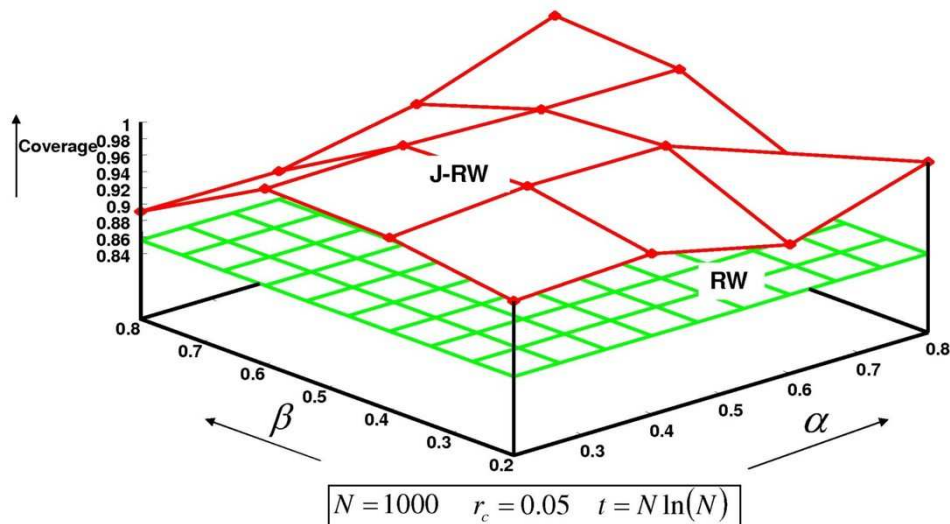


Εικόνα 32 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες



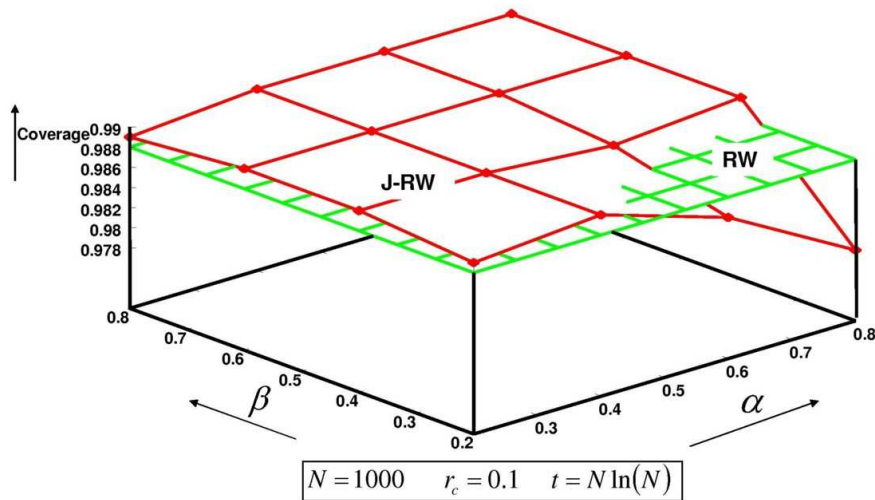
Εικόνα 33 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες

Για μεγαλύτερη τιμή της ακτίνας συνδεσιμότητας ($r_c = 1$) θα μελετήσουμε την απόδοση κάλυψης δικτύου των πρακτόρων ΤΠ και ΤΠΑ όπως αυτές φαίνονται από την εικόνα 18. Ξανά για τον αριθμό διαδοχικών βημάτων $t=N$, βλέπουμε ότι δεν υπάρχει κανένας συνδυασμός των παραμέτρων α και β ώστε η απόδοση στην κάλυψη δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα να υπερβαίνει την αντίστοιχη απόδοση στην κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα. Αυτό θα συμβαίνει λόγω της υψηλής συνδεσιμότητας που έχουμε στο δίκτυο, και η οποία δίνει τη δυνατότητα στον ΤΠ πράκτορα να κινείται πολύ αποτελεσματικά στο δίκτυο. Αντίθετα, όπως έχει εξηγηθεί επανηλλειμένα παραπάνω, ο μηχανισμός του ΤΠΑ πράκτορα με τα κατευθυνόμενα άλματα στο δίκτυο, μπορεί να είναι αποδοτικός ως προς την κάλυψη του δικτύου μόνο για περιβάλλοντα χαμηλής συνδεσιμότητας, ή αλλιώς δικτυακά περιβάλλοντα που καθορίζονται από την ύπαρξη πολύ μεγάλου πλήθους ζεύξεων μικρής απόστασης και απουσία ζεύξεων μακρινής απόστασης. Επιπλέον παρατηρεί κανείς από την εικόνα 33, ότι ο μηχανισμός κάλυψης δικτύου του ΤΠΑ πράκτορα έχει πανομοιότυπα αποτελέσματα με τον μηχανισμό κάλυψης δικτύου του ΤΠ πράκτορα, όταν οι τιμές των α και β γίνονται $\alpha = 0$ και $\beta = 1$ (δηλαδή το ΤΠΑ πράκτορας μένει συνεχώς στην κατάσταση 0).



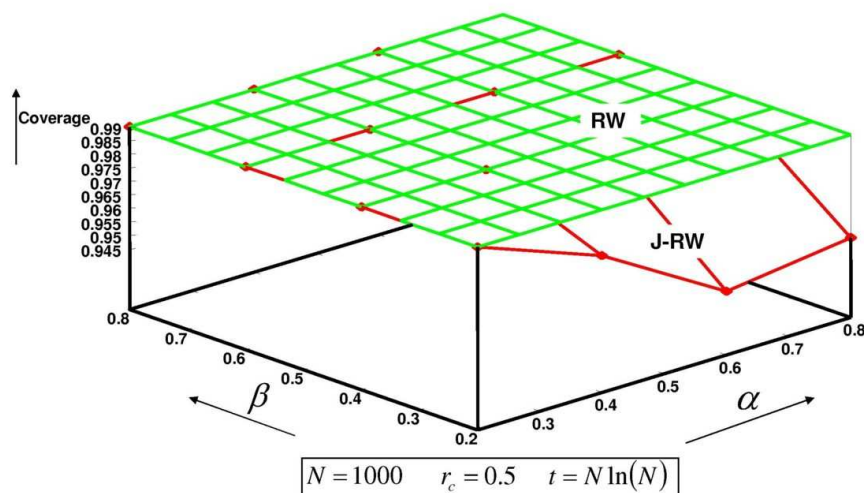
Εικόνα 34 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες

Οι εικόνες 34 – 37 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον ΤΠ πράκτορα και τον ΤΠΑ πράκτορα όταν οι διαδικασίες αφήνονται να τρέξουν για πλήθος μηνυμάτων που είναι $t=N \ln(N)$. Οι παρατηρήσεις που σχετίζονται με αυτό το σύνολο αποτελεσμάτων προσομοιώσεων είναι πανομοιότυπες με τις παρατηρήσεις που έγιναν για το σύνολο αποτελεσμάτων που περιγράψαμε παραπάνω στις εικόνες 30 – 33 εκτός από το γεγονός ότι η κάλυψη δικτύου πλησιάζει στην ανώτατη κάλυψη δικτύου που είναι 1 ή 100%. Επιπλέον, ένα τέτοιο αποτέλεσμα για την κάλυψη δικτύου είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η τιμή $N \ln(N)$ πλησιάζει στον χρόνο κάλυψης δικτύου που έχει υπολογισθεί θεωρητικά για πλήρως συνδεδεμένα δίκτυα και για κάλυψη δικτύου με χρήση τυχαίων περιπάτων. Αντιστοίχως με τα αποτελέσματα για πλήθος βημάτων $t=N$, η κάλυψη δικτύου για $t=N \ln(N)$ με χρήση του ΤΠΑ πράκτορα είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την κάλυψη δικτύου για τον τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση, όταν οι τιμές της ακτίνας συνδεσιμότητας είναι μικρές. Μπορεί κανείς να δει στην εικόνα 34 ότι για μεγάλες τιμές των α και β (για παράδειγμα 0.8) η κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα μπορεί να φτάσει το 98% που είναι μια πολύ σημαντική αύξηση σε σχέση με τον τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση, ο οποίος μπορεί να φτάσει το 86% στο μέγιστο. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στις εικόνες παρακάτω και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η κάλυψη δικτύου για τον ΤΠ πράκτορα πλησιάζει το 100%, η κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα πλησιάζει το 100%

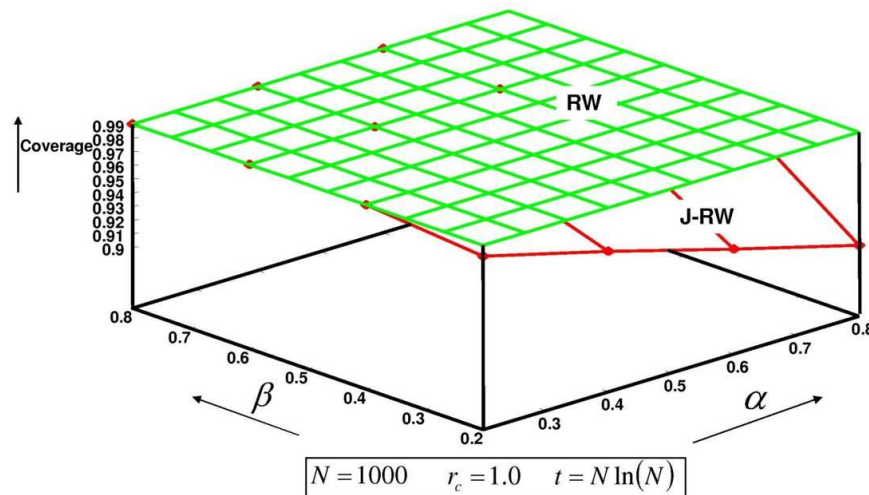


Εικόνα 35 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες

για τιμές των α και β που δεν είναι μικρές (τα μακρινά άλματα θα πρέπει να αποφεύγονται σε τοπολογίες υψηλής συνδεσιμότητας). Αντίθετα οι τιμές των α και β που θα είναι κοντά στο 0.5 φαίνεται καθαρά ότι είναι ένα κατάλληλο ζεύγος τιμών (από τις εικόνες 30 – 33 και 34 – 37). Για αυτό το ζεύγος τιμών ισχύει ότι (α) όταν η ακτίνα συνδεσιμότητας r_c είναι μικρή, τότε η κάλυψη δικτύου για τον ΤΠΑ πράκτορα είναι μέγιστη και βέβαια μεγαλύτερη από την κάλυψη δικτύου του ΤΠ πράκτορα, ενώ (β) για όλες τις άλλες τιμές της ακτίνας συνδεσιμότητας η κάλυψη δικτύου είναι περίπου ίδια και για τους δύο μηχανισμούς κάλυψης δικτύου.



Εικόνα 36 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες



Εικόνα 37 3-d αναπαράσταση της κάλυψης δικτύου για τους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες

3.5.3 Αποτελέσματα για L-κάλυψη δικτύου στους ΤΠ και ΤΠΑ πράκτορες όταν $L=0, 1, 2, 3$

Η διαδικασία κάλυψης δικτύου με τυχαίο περίπατο ποσοτικοποιείται συνήθως μέσω του ποσοστού κόμβων δικτύου που έχουν γίνει επισκέψιμοι από τον πράκτορα ΤΠ. Αυτός ο ορισμός όμως μπορεί – σε κάποιες περιπτώσεις – να είναι ιδιαίτερα περιοριστικός και μη ικανοποιητικός για την μέτρηση της αποτελεσματικότητας ενός μηχανισμού διάδοσης πληροφοριών σε μεγάλης κλίμακας δίκτυο, που αναπαρίσταται από έναν ΤΓΓ. Για παράδειγμα, όταν η μεθοδολογία διάδοσης πληροφοριών χρησιμοποιείται προκειμένου να φέρνει πακέτα διαφήμισης για κάποια νέα υπηρεσία στους κόμβους του δικτύου, ένας αποτελεσματικός τρόπος διαφήμισης (σε αυτήν την περίπτωση) μπορεί να οριστεί ως αυτός που φέρνει την ανακοίνωση μέσα σε μια απόσταση L (βήματα, hops) από κάθε κόμβο του δικτύου, σε αντιδιαστολή με τη μεθοδολογία όπου το πακέτο διαφήμισης “ακουμπά” κάθε έναν ξεχωριστό κόμβο [71]. Μια αναζήτηση χαμηλής

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έντασης (εύρους L βημάτων) που θα αρχικοποιείται στους κόμβους του δικτύου θα μπορεί τότε με επιτυχία να ανακαλύψει τα πακέτα διαφήμισης. Σε αυτήν την περίπτωση, μηχανισμοί που παράγουν υψηλό L -cover (L -κάλυψη) στο δίκτυο (όπως καθορίστηκε ανωτέρω), για $L > 0$, (σε αντιδιαστολή με την 0-κάλυψη που είναι η γνωστή κάλυψη δικτύου) θεωρούνται αποτελεσματικοί.

Η έννοια της L -κάλυψης μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε ένα δίκτυο WSN στο οποίο η διάχυση πληροφοριών δεν γίνεται για λόγους διαφήμισης / προώθησης πληροφορίας αλλά για να διαχέεται ένα ερώτημα στο δίκτυο από τον τελικό χρήστη και το δίκτυο να απαντάει με βάση την κατάσταση την οποία βρίσκεται. Δεδομένου ότι στα δίκτυα αισθητήρων υπάρχει μεγάλος βαθμός επικάλυψης πληροφορίας μεταξύ γειτονικών κόμβων είναι λογικό να γίνεται στόχος το ερώτημα για πληροφορίες ενός υπο-συνόλου των κόμβων του δικτύου και όχι του συνόλου των κόμβων για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας. Το υποσύνολο των κόμβων που τίθενται ερωτήματα είναι προτιμότερο να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο δίκτυο αισθητήρων. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να εξασφαλίζεται από τη διαδικασία κάλυψης ότι τουλάχιστον ένας κόμβος από κάθε γειτονιά κόμβων θα ερωτάται. Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, μια αποτελεσματική διαδικασία θα ήταν αυτή που επιφέρει υψηλή L -κάλυψη στο δίκτυο, καθώς μια τέτοια υψηλή τιμή θα είναι ενδεικτική της ομοιομορφίας της κατανομής των επισκεφθέντων κόμβων στο δίκτυο (σε σχέση ιδιαίτερα με την L -κάλυψη όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω).

Εκτός από την ύπαρξη συγκεκριμένων εφαρμογών κατάλληλων για χρήση σε δίκτυα ΑΔΑ που θα επωφελούνταν από τη μέτρηση της κάλυψης δικτύου με χρήση της έννοιας της L -κάλυψης για $L > 0$, είναι σημαντικό να επισημάνει κανείς και έναν ακόμη παράγοντα για τον οποίο η έννοια της L -κάλυψης είναι σχετική και επωφελής. Είναι ευρύτερα γνωστό και αποδεκτό ότι μια από τις βασικές τεχνικές λειτουργίας των δικτύων ΑΔΑ για τη διαχείριση της κατανεμημένης τοπολογίας δικτύου είναι η χρήση των πακέτων hello που ανταλλάσσονται μεταξύ των πρώτων γειτόνων-κόμβων. Μια έξυπνη και χαμηλού κόστους τεχνική ανταλλαγής πληροφοριών είναι η προσθήκη πληροφοριών για την κατάσταση του κάθε κόμβου στο τέλος του κάθε μηνύματος hello (piggybacking). Έτσι είναι δυνατόν οι πρώτοι κόμβοι γείτονες να έχουν διαρκή ενημέρωση για την κατάσταση και τις μετρήσεις όλων των πρώτων γειτόνων τους με μηδενικό κόστος όσον αφορά τη δικτυακή υποδομή (αφού τα hello μηνύματα ανταλλάσσονται περιοδικά για τη διατήρηση της τοπολογίας και η έξτρα προσθήκη έχει όγκο μερικών μόνο bits στα πακέτα hello). Σε μια τέτοια περίπτωση χρησιμοποίησης του συστήματος η 0-κάλυψη

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων δικτύου θα μπορεί να αντικατασταθεί με την 1-κάλυψη δικτύου χωρίς έξτρα κατασπατάληση ενεργειακών πόρων του συστήματος. Αυτή η παρατήρηση είναι πολύ σημαντική γιατί η 1-κάλυψη δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί με σημαντικά μικρότερο κόστος σε αριθμό μηνυμάτων και άρα σε χρόνο κάλυψης (πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι για κάθε κόμβο του δικτύου που λαμβάνει το μήνυμα διάδοσης πληροφορίας όλοι οι πρώτοι γείτονές του είναι ενημερωμένοι επίσης). Μια περαιτέρω διεύρυνση αυτού του σκεπτικού θα περιλαμβάνει τη μεταφορά πληροφοριών κατάστασης με χρήση hello μηνυμάτων σε απόσταση L βημάτων μακριά από κάθε κόμβο. Κατ' αυτό το σκεπτικό θα ισχύει ότι υπάρχει αναλογία μεταξύ της 0-κάλυψης και της L -κάλυψης εν γένει, με $L > 0$.

Η μέτρηση της L -κάλυψης (επονομαζόμενη $C(L)$, για $L=0, 1, 2, 3$) θα γίνει με τη βοήθεια προσομοιώσεων πάνω σε ένα μεγάλης κλίμακας ΑΔΑ, που μοντελοποιείται ως ΤΓΓ. Οι πράκτορες ΤΠ και ΤΠΑ επιλέγονται να διατρέξουν το δίκτυο της προσομοίωσης για ένα δεδομένο μέγιστο πλήθος βημάτων ή αλλιώς για ένα μέγιστο "ποσό" (budget H) που ανατίθεται στην αρχή της διαδικασίας στον πράκτορα. Οι παράμετροι του ΤΓΓ είναι $N=6000$ κόμβοι, με ομοιόμορφα κατανεμημένες θέσεις x, y των κόμβων μέσα σε ένα επίπεδο τετράγωνο με πλευρά 1000 μονάδες. Η ακτίνα συνδεσιμότητας για κάθε κόμβο υπολογίζεται έτσι ώστε οι κόμβοι του δικτύου να έχουν κατά μέσο όρο βαθμό συνδεσιμότητας που είναι $\delta(u)_{mean} = 11.78$. Τα αποτελέσματα που συλλέγουμε για τα $C(L)$ είναι οι μέσοι όροι 8 διαδοχικών ανεξάρτητων επαναλήψεων και επιπλέον παρουσιάζουμε και τις τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων. Προφανώς, προτιμητέο είναι το σχήμα εκείνο διάδοσης πληροφορίας που θα καταφέρει μεγαλύτερο $C(L)$ για δεδομένο μέγιστο ποσό βημάτων H .

Ο πράκτορας ΤΠΑ επιλέγεται να καλύψει το δίκτυο της προσομοίωσης με τιμές των α και β τέτοιες ώστε να εμφανίζεται η συμπεριφορά του προτεινόμενου σχήματος όταν η σχέση μεταξύ του χρόνου που μένει στην κατάσταση 0 και του χρόνου που παραμένει στην κατάσταση 1 να είναι μεταβαλλόμενη. Για την ακρίβεια γνωρίζουμε ότι η πιθανότητα μετάβασης στην κατάσταση 1 (πιθανότητα α όπως φαίνεται στην εικόνα 4) καθορίζει και το μέσο χρόνο που σπαταλάται από τον ΤΠΑ πράκτορα στην κατάσταση 0, δηλαδή $E\{stay\ in\ state\ 0\} = T_0 = 1/\alpha$ ενώ το ίδιο ισχύει και για το μέσο χρόνο να μείνει ο ΤΠΑ πράκτορας στην κατάσταση 1, δηλαδή $E\{stay\ in\ state\ 1\} = T_1 = 1/\beta$. Ο χρόνος που χρησιμοποιούμε εδώ είναι ο διακριτός χρόνος που συμπίπτει με το χρόνο αναφοράς της προσομοίωσης ή τα διαδοχικά βήματα της διαδικασίας.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται οι ονοματολογία και οι τιμές των παραμέτρων α και β για τις παραλλαγές του ΤΠΑ πράκτορα που μελετάμε στις προσομοιώσεις. Οι στήλες 3 και 4 αποτελούν ενδεικτικά του μέσου χρόνου που οι παραλλαγές του ΤΠΑ πράκτορα παραμένουν στις αντίστοιχες καταστάσεις. Η παραλλαγή με όνομα $jrw-1$ είναι αυτή όπου ο ΤΠΑ πράκτορας διαγράφει τα μακρύτερα άλματα κατά μέσο όρο εντός του δικτύου αισθητήρων και κάνει το μικρότερο χρόνο σε συνεχή λειτουργία στην κατάσταση 0 που είναι η κατάσταση του απλού τυχαίου περιπάτου. Η αντίθετη σχέση ισχύει για τη διάρκεια στις δυο καταστάσεις ισχύει για την παραμετροποίηση του $jrw-3$, ενώ το $jrw-2$ είναι η παραμετροποίηση εκείνη όπου οι δυο καταστάσεις παραμένουν κατά το ίδιο χρονικό διάστημα κατά μέσο όρο στις δυο καταστάσεις. Τα αποτελέσματα για τον ΤΠ πράκτορα αναφέρονται στη συνέχεια με τη χρήση του $rwhb$ ως ακρωνύμιο για τον τυχαίο πράκτορα χωρίς οπισθοδρόμηση.

Πίνακας 4 Επιλογές τιμών του ΤΠΑ πράκτορα για τις παραμέτρους α και β

| Παραλλαγή ΤΠΑ | α | β | $E\{stay\ in\ state\ 0\}$ | $E\{stay\ in\ state\ 1\}$ |
|---------------|----------|---------|---------------------------|---------------------------|
| $Jrw-1$ | 0.6 | 0.3 | 1.67 | 3.34 |
| $Jrw-2$ | 0.5 | 0.5 | 2 | 2 |
| $Jrw-3$ | 0.3 | 0.6 | 3.34 | 1.67 |

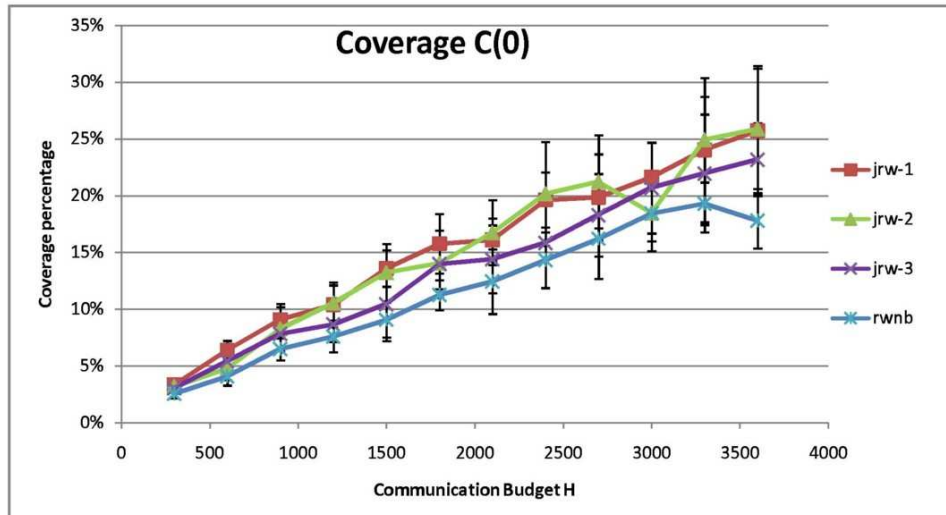
Η βασική κάλυψη δικτύου $C(0)$ (για ένα συγκεκριμένο προϋπολογισμό βημάτων H των πρακτόρων) μπορεί να μετρηθεί υπολογίζοντας το συνολικό αριθμό των ξεχωριστών κόμβων που επισκέπτονται ένας τυχαίος περίπατος χωρίς οπισθοδρόμηση ή ένας πράκτορας ΤΠΑ τον οποίο κατόπιν διαιρούμε με το σύνολο των κόμβων του δικτύου. Τα συγκριτικά αποτελέσματα του $C(0)$ για τις τρεις περιπτώσεις του πράκτορα ΤΠΑ ($jrw-1$, $jrw-2$, $jrw-3$) και του πράκτορα ΤΠ παρουσιάζονται στον πίνακα 5 για τις διάφορες τιμές του διαθέσιμου χρόνου ή προϋπολογισμού βημάτων H .

Πίνακας 5 Αποτελέσματα της διευρυμένης κάλυψης δικτύου για μεγάλες τιμές του H

| Πλήθος βημάτων H | 2000 | 8000 | 10000 | 16000 | 18000 |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $C(0)_{rwnb}$ | 0.1037± 0.0263 | 0.3566± 0.0502 | 0.4385± 0.0385 | 0.5883± 0.0602 | 0.6106± 0.0666 |
| $C(0)_{jrw-1}$ | 0.1843± 0.0166 | 0.4254± 0.0414 | 0.4885± 0.0526 | 0.5229± 0.0825 | 0.5768± 0.0571 |
| $C(0)_{jrw-2}$ | 0.1547± 0.0247 | 0.4357± 0.0351 | 0.5119± 0.0615 | 0.6467± 0.0861 | 0.6301± 0.0953 |
| $C(0)_{jrw-3}$ | 0.1601± 0.0276 | 0.4265± 0.0464 | 0.4649± 0.0834 | 0.5832± 0.0945 | 0.6548± 0.1082 |

Προφανώς, οι επιδόσεις του πράκτορα ΤΠΑ ξεπερνούν την επίδοση του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση δεδομένου ότι παράγει υψηλότερη 0-κάλυψη για την πλειοψηφία των τιμών του H που παρουσιάζονται. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του χρόνου κάλυψης ή προϋπολογισμού H=2000 η προκύπτουσα 0-κάλυψη αυξάνεται κατά 78% για jrw-1, κατά 49% για jrw-2 και κατά 54% για jrw-3, έναντι αυτής κάτω από το τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση, για το ίδιο H. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για μια σχετικά μεγάλη τιμή του H (π.χ., 10000 στον πίνακα 2), η βελτίωση απόδοσης είναι σχετικά μικρότερη (11% για jrw-1, 16% για jrw-2 και 6% για jrw-3), υπονοώντας ότι το προτεινόμενο σχήμα κάλυψης δικτύου με χρήση του πράκτορα ΤΠΑ παρουσιάζει τα μέγιστα πλεονεκτήματά του για τους χαμηλούς έως μέσους χρόνους κάλυψης H. Αυτή η μείωση του οφέλους που επιτυγχάνεται από τον πράκτορα ΤΠΑ (για ένα μεγαλύτερο H) μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα άλματα που εφαρμόζονται από τον πράκτορα ΤΠΑ είναι όλο και περισσότερο πιθανό να φέρουν τον περίπατο σε μια περιοχή που καλύπτεται ήδη ως ένα ορισμένο βαθμό. Αποτελέσματα της 0-κάλυψης για τον ΤΠΑ πράκτορα και τον ΤΠ πράκτορα παρουσιάζονται στην εικόνα 38 για τιμές του H μέχρι 3500. Σε αυτήν την εικόνα μπορεί να υποστηριχθεί κανείς ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ του C(0) και του H για τέτοιες χαμηλές τιμές του H, ή όταν η κάλυψη δικτύων είναι χαμηλή. Οι παραλλαγές του ΤΠΑ πράκτορα ξεπερνούν τον τυχαίο

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση στις περισσότερες τιμές του H, με το jrw-1 να αποδίδει καλύτερα σε σύγκριση με τα jrw-2, jrw-3



Εικόνα 38 Αποτελέσματα διευρυμένης κάλυψης δικτύου (L=0)

Τα αποτελέσματα για το C(1) για μεγάλες τιμές του H παρουσιάζονται στον πίνακα 6. Είναι σαφές ότι τα συμπεράσματα που συνάγονται για το C(0) ισχύουν ακόμα και περαιτέρω υπογραμμισμένα. Για παράδειγμα, για H= 2000, το C(1) αυξάνεται κατά 122% για jrw-1, κατά 57% για jrw-2 και κατά 70% για jrw-3 έναντι αυτού που επιτυγχάνεται κάτω από τον τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση.

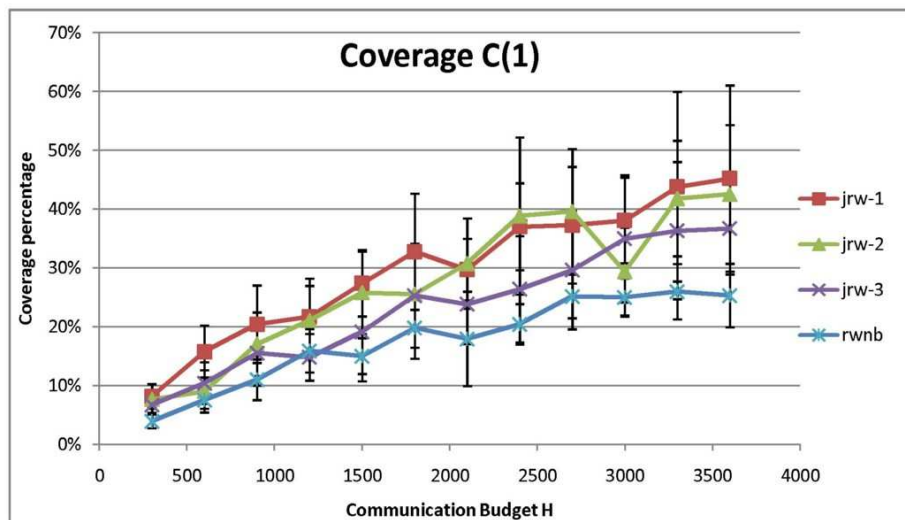
Πίνακας 6 Αποτελέσματα διευρυμένης κάλυψης δικτύου για μεγάλες τιμές του H (L=1)

| Πλήθος βημάτων H | 2000 | 8000 | 10000 | 16000 | 18000 |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $C(1)_{rwnb}$ | 0.1711± 0.0621 | 0.4697± 0.1087 | 0.5411± 0.0796 | 0.7481± 0.0686 | 0.7924± 0.0977 |
| $C(1)_{jrw-1}$ | 0.3807± 0.0522 | 0.6613± 0.0783 | 0.7315± 0.1046 | 0.7119± 0.1302 | 0.7683± 0.0897 |

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

| | | | | | |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $C(1)_{jrw-2}$ | 0.2689± 0.0874 | 0.6721± 0.0778 | 0.6871± 0.1158 | 0.8450± 0.1175 | 0.8013± 0.124 |
| $C(1)_{jrw-3}$ | 0.2908± 0.0861 | 0.6047± 0.1035 | 0.6302± 0.1405 | 0.7215± 0.1369 | 0.8141± 0.1383 |

Για χαμηλές τιμές του H (όπως φαίνεται στην εικόνα 39) κάποιος μπορεί σαφώς να παρατηρήσει μια γραμμική εξάρτηση του $C(1)$ στο H , όπως για την περίπτωση του $C(0)$. Όπως αναμένεται, κάποιος μπορεί σαφώς να παρατηρήσει ότι το $C(1) > C(0)$. Υπάρχει μια αύξηση σχεδόν 100% στη μερική κάλυψη που - όπως υποστηρίζεται στην εισαγωγή - θα μπορούσε να κερδηθεί με σχεδόν κανένα κόστος, με την προσθήκη μερικών περισσότερων bit στο τέλος κάθε τομέα των πακέτων hello. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί δίνει τη δυνατότητα στο προτεινόμενο σχήμα για διάδοση πληροφορίας να υπάρχει 100% αύξηση στην απόδοση χωρίς κανένα ιδιαίτερο κόστος όσον αφορά την ενεργειακή σπατάλη στο δίκτυο.



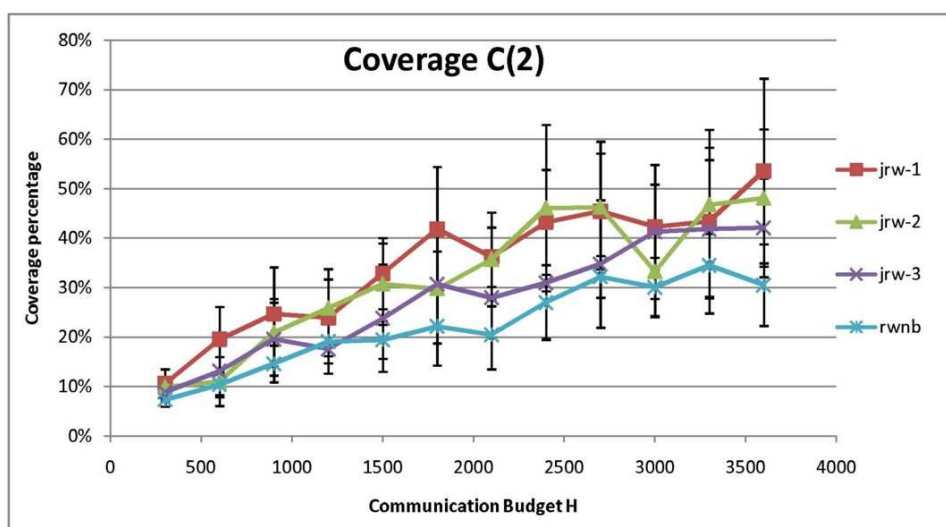
Εικόνα 39 Αποτελέσματα διευρυμένης κάλυψης δικτύου ($L=1$)

Τα αποτελέσματα για το $C(2)$ και το $C(3)$ παρουσιάζονται για χαμηλούς προϋπολογισμούς H , στην εικόνα 40 και στην εικόνα 41. Όπως αναμένεται, η πραγματοποιημένη κάλυψη είναι υψηλότερη απ' ό, τι για χαμηλότερες τιμές του L .

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 Ακόμα το προτεινόμενο σχήμα του ΤΠΑ πράκτορα ξεπερνά πολύ τον αντίστοιχο τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση. Τέλος, τα αποτελέσματα κάλυψης για $L > 0$ που παρουσιάζονται στις εικόνες 40, 41 και στους πίνακες 7, 8 που παρουσιάζονται δείχνουν ως ένα ορισμένο βαθμό την ομοιομορφία της κάλυψης που επιτυγχάνεται από τους πράκτορες ΤΠ και ΤΠΑ. Για παράδειγμα, ένα σχέδιο που οδηγεί σε μια μεγαλύτερη 3-κάλυψη υπονοεί ότι οι ενημερωμένοι κόμβοι από τον πράκτορα διαδίδονται πιο ομοιόμορφα στο δίκτυο δεδομένου ότι η επικάλυψη των κύκλων της ακτίνας 3 γύρω από κάθε ενημερωμένο κόμβο είναι μικρότερη.

Πίνακας 7 Αποτελέσματα κάλυψης δικτύου

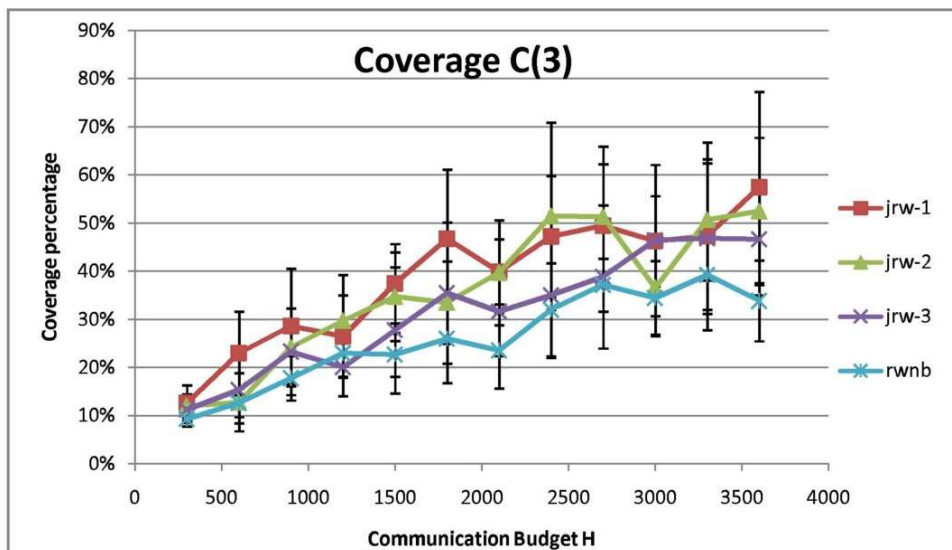
| Πλήθος βημάτων H | 2000 | 8000 | 10000 | 16000 | 18000 |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $C(2)_{rwnb}$ | 0.2334± 0.0388 | 0.4860± 0.1226 | 0.6023± 0.08 | 0.8273± 0.0419 | 0.8743± 0.0687 |
| $C(2)_{jrw-1}$ | 0.4521± 0.0667 | 0.7268± 0.0875 | 0.7934± 0.1186 | 0.7672± 0.1343 | 0.8205± 0.0915 |



Εικόνα 40 Αποτελέσματα διευρυμένης κάλυψης δικτύου (L=2)

Πίνακας 8 Αποτελέσματα διευρυμένης κάλυψης δικτύου (L=3)

| Πλήθος βημάτων H | 2000 | 8000 | 10000 | 16000 | 18000 |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $C(3)_{rwnb}$ | 0.2736± 0.0439 | 0.5314± 0.1303 | 0.6551± 0.0805 | 0.8646± 0.0475 | 0.9053± 0.0629 |
| $C(3)_{jrw-1}$ | 0.5017± 0.0747 | 0.7709± 0.0920 | 0.8322± 0.1218 | 0.8074± 0.1331 | 0.8554± 0.089 |



Εικόνα 41 Αποτελέσματα διευρυμένης κάλυψης δικτύου (L=3)

4.1 Εισαγωγή

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) αποτελούν μεγάλες συλλογές κόμβων αισθητήρων, που τυπικά ξεπερνούν σε πλήθος τις εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους. Οι κόμβοι αισθητήρες συνεργάζονται μέσω ασύρματης επικοινωνίας, έτσι ώστε να μπορεί να διεξαχθεί η απαραίτητη εξαγωγή δεδομένων από το προς παρακολούθηση πεδίο μέσω των κόμβων αισθητήρων που είναι προσαρτημένοι στις ηλεκτρονικές πλακέτες. Η προγραμματισμένη λειτουργία ενός δικτύου ΑΔΑ είναι να διαταχθεί στο πεδίο προς παρακολούθηση και στη συνέχεια να δημιουργήσει ένα συνδεδεμένο, ασύρματο δίκτυο. Η χρησιμότητα της ύπαρξης ενός συνδεδεμένου δικτύου στο χώρο προς παρακολούθηση είναι να μπορεί ο τελικός χρήστης να έχει πρόσβαση σε όλο το πλήθος των κόμβων του δικτύου προκειμένου να είναι εφικτός ένας πιθανός επαναπρογραμματισμός/ αναζήτηση στο δίκτυο αισθητήρων. Ένα κλασικό παράδειγμα που αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία είναι η αναζήτηση πληροφοριών από μεριάς χρήστη που να συμπίπτουν με την τιμή κάποιας συγκεκριμένης φυσικής ποσότητας, όπως είναι π.χ. «Ποια είναι τα σημεία του δωματίου, όπου η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 40 βαθμούς Κελσίου;». Αφότου ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση του δικτύου (τοποθέτηση κόμβων αισθητήρων και σύναψη βασικού συνδεδεμένου δικτύου στο χώρο), η κατά κύριο ρόλο λειτουργία του δικτύου είναι να εξάγει πληροφορίες από το χώρο που έχει διαταχθεί και να προωθεί τα αντίστοιχα δεδομένα προς τον τελικό χρήστη. Λόγω των αυστηρών ενεργειακά περιορισμών που σχετίζονται με τους κόμβους αισθητήρες, υπάρχει η ανάγκη προώθησης των δεδομένων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην κατασπαταλώνονται οι ενεργειακοί πόροι του συστήματος.

Η ερευνητική κοινότητα έχει κάνει ήδη προσπάθεια και έχει προτείνει διάφορα σχήματα για ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι διάφορες προσεγγίσεις για συλλογή δεδομένων σε μεγάλου πλήθους ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που έχουν ήδη προταθεί στη βιβλιογραφία είναι σε γενικές γραμμές κατηγοριοποιημένες ως προς (α) τη δυνατότητα πολύ-αλματικής προώθησης

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
δεδομένων εντός του δικτύου, (β) την προσάρτηση των κόμβων αισθητήρων του δικτύου σε ιεραρχικές ομάδες, όπου η ομαδοποίηση αποτελεί ουσιαστικά μια μεθοδολογία εξυπηρέτησης της διαδικασίας συλλογής δεδομένων στους αρχηγούς των ομάδων του δικτύου και (γ) τεχνικές που βασίζονται στην κινητικότητα του κόμβου συλλογής δεδομένων, που κινείται εντός του δικτύου και συλλέγει τα δεδομένα με βάση πρωτόκολλα ανταλλαγής δεδομένων μέσω μετάδοσης δεδομένων σε κοντινές αποστάσεις. Τέλος έχουν υπάρξει και λύσεις που βασίζονται στον επιτυχή συνδυασμό των τεχνικών όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Για παράδειγμα, έχουν προταθεί λύσεις που σχετίζονται με τεχνικές συνδυασμένης ομαδοποίησης κόμβων και πολύ αλματικής μετακίνησης δεδομένων ή τεχνικές πολύ αλματικής μετακίνησης δεδομένων σε συνδυασμό με κινητικότητα του κόμβου συλλογής δεδομένων στο δίκτυο.

Στα πλαίσια των προτάσεων για ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων από ασύρματο δίκτυο αισθητήρων έχουν προταθεί τα παρακάτω σχήματα που θα περιγράψουμε επακριβώς στη συνέχεια. Υπάρχουν τα σχήματα πιθανοτικής προώθησης δεδομένων [72]. [73], έτσι ώστε να συνδυάζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα με την αντοχή των σχημάτων σε σφάλματα του δικτύου κόμβων. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι ότι απαιτείται η κατανάλωση υπερβολικά μεγάλης ενέργειας όταν το δίκτυο αισθητήρων γίνεται πολύ πυκνό (ο αριθμός κόμβων του δικτύου αυξάνεται). Άλλοι αλγόριθμοι έχουν προταθεί που είναι προσαρμοστικοί και τυχαιοποιημένοι, έτσι ώστε να μπορεί να εξισορροπηθεί η κατανάλωση ενέργειας και στους κόμβους αισθητήρες, καθότι εμφανίζεται πολύ συχνά το φαινόμενο της ανισόρροπης κατανομής πόρων εντός του δικτύου, λόγω του ότι οι κόμβοι αισθητήρες που βρίσκονται γεωγραφικά κοντά στον κόμβο συλλογής πληροφοριών (sink) έχουν τη τάση να μεταβιβάζουν το πολύ μεγάλο πλήθος των δεδομένων που παράγεται στο δίκτυο, συνεπώς το αποτέλεσμα είναι ότι οι ενεργειακοί πόροι τους κατασπαταλώνονται πολύ γρηγορότερα από όλων των άλλων [74], [75]. Μια τεχνική αυξημένης επίγνωσης για προώθηση πληροφορίας [76] έχει προταθεί προκειμένου να συμπεριληφθούν στη διαδικασία αποφάσεων προώθησης πακέτων παράγοντες όπως ο καταμερισμός πόρων ισοδύναμα στους κόμβους, ο πλεονασμός δεδομένων σε μια περιοχή κόμβων και τα διάφορα μοντέλα χρονισμού που διεξάγονται για τη λειτουργία των κόμβων αισθητήρων. Όλα τα μοντέλα ασύρματης προώθησης δεδομένων με διαδοχικές μεταβιβάσεις συμπεριλαμβάνουν μια εσωτερική δυσλειτουργία που είναι το γεγονός ότι όλη κίνηση των πακέτων δεδομένων πρέπει να μεταφερθεί προς τον κόμβο καταβόθρα μέσω των κόμβων αισθητήρων που βρίσκονται

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων γεωγραφικά κοντά στον κόμβο καταβόθρα. Ένα τέτοιο σημαντικό πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί κατά ένα μέρος μόνον με την εισαγωγή περισσότερων κόμβων συλλογής πληροφοριών στο δίκτυο, έτσι ώστε να γίνεται καταμερισμός της πλεονάζουσας κίνησης στο δίκτυο προς τους περισσότερους από έναν κόμβο συλλογής πληροφοριών που βρίσκονται στο δίκτυο.

Η τεχνική της ομαδοποίησης έχει προταθεί σαν μια ικανή τεχνική για την αύξηση της τελικής ικανότητας διαβίβασης δεδομένων και παράλληλα είναι ικανή για μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και της συνολικής καθυστέρησης στο δίκτυο αισθητήρων [77]. Οι κόμβοι αισθητήρες οργανώνονται σε ομάδες και οι εκλεγμένοι κόμβοι αρχηγοί αναλαμβάνουν το βάρος της διεξαγωγής του αντικειμένου της συλλογής των πακέτων δεδομένων προς μεταφορά στον τελικό χρήστη (από τους κόμβους αισθητήρες που υπάρχουν στην ομάδα τους). Αν και η τεχνική της ομαδοποίησης είναι χρήσιμη όταν οι κόμβοι αισθητήρες σχηματίζουν μεγάλο εύρος ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, υπάρχει κόστος σε ενέργεια για την ομαδοποίηση του δικτύου και το σχηματισμό/ συντονισμό όλων των επιμέρους δομών και μονάδων χρονισμού για τη λειτουργία των ομάδων (ιδιαίτερα στη περίπτωση που η ομαδοποίηση διεξάγεται στο δίκτυο με καταμερισμένο τρόπο).

Τέλος, μια τακτική ευρέως γνωστή για τη συλλογή δεδομένων και τη μετακίνησή τους προς το τελικό χρήστη με παράλληλη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τους κόμβους αισθητήρες είναι η συλλογή δεδομένων μέσω κινητικότητας του κόμβου συλλογής δεδομένων. Κατά την εκτέλεση μιας τέτοιας διαδικασίας, ένας κινούμενος πράκτορας στο δίκτυο (κινητός κόμβος συλλογής δεδομένων) αναλαμβάνει το ρόλο του να συλλέγει τα δεδομένα των κόμβων μέσω της μετακίνησής του στην ευρύτερη, κοντινή περιοχή του εκάστοτε κόμβου. Έτσι, είναι δυνατόν να μειωθεί κατά πολύ η απαίτηση σε καταναλισκόμενη ενέργεια από πλευράς των κόμβων αισθητήρων προκειμένου να προωθούνται τα δεδομένα του ΑΔΑ στον εκάστοτε τελικό χρήστη.

Έχουν ήδη προταθεί αρκετά σχήματα στη βιβλιογραφία σχετιζόμενα με μετακινούμενους κόμβους που συλλέγουν δεδομένα από κόμβους σε ένα ΑΔΑ. Στο [78] οι συγγραφείς αναφέρονται σε ένα πλήθος από σχήματα κίνησης για τον κόμβο που είναι κινούμενος και συλλέγει δεδομένα στο δίκτυο. Το σχήμα κινητικότητας που μελετάται είναι ένας κινούμενος κόμβος σε ευθεία γραμμή που μετακινείται με επαναλαμβανόμενη κίνηση, εμπρός – πίσω, προκειμένου να διεξάγει τη συλλογή των δεδομένων στο δίκτυο. Μια παρόμοια ιδέα ως προς το σκεπτικό της επεκτείνεται από

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων τους συγγραφείς στο [79], όπου πολλαπλοί κινούμενοι κόμβοι συλλογής δεδομένων μετακινούνται στο πεδίο σε παράλληλες, ευθύγραμμες τροχιές, διεξάγοντας παλινδρομική κίνηση εμπρός – πίσω. Η κινητικότητα των κόμβων συλλογής δεδομένων συνοδεύεται από αλγόριθμο που κατανέμει τον όγκο δεδομένων καθώς αυτά μετακινούνται προς τους κόμβους συλλογής κατά τρόπο ώστε να είναι επωφελής για το δίκτυο αισθητήρων. Μετακινούμενοι κόμβοι συλλογής πληροφοριών με χρησιμότητα στην μετακίνηση των δεδομένων μακριά από τους κόμβους αισθητήρες έχουν προταθεί ανεξάρτητα και στο [80]. Οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση κινούμενων μονάδων που ονομάζουν η-όνους (data mules) με κινητικότητα τυχαίου περιπάτου ή κινητικότητα ευθύγραμμη πάνω σε τροχιές που είναι παράλληλες και ευθύγραμμες εντός του δικτύου. Οι η-όνοι παραλαμβάνουν τα πακέτα δεδομένων μέσα από το δίκτυο αισθητήρων (καθώς αυτά δρομολογούνται προς τους η-όνους) και στη συνέχεια παραδίδουν όλη τη συλλεγμένη πληροφορία σε ένα ενσύρματο σημείο συλλογής πληροφορίας (wired access point), ούτως ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας από πλευράς των κόμβων αισθητήρων. Σε άλλες περιπτώσεις μελέτης που έχει γίνει, με τα ΑΔΑ να είναι εφαρμοσμένα σε περιοχές αστικού ενδιαφέροντος, έχει προταθεί να χρησιμοποιηθεί η κινητικότητα των δημόσιων μέσων μεταφοράς (όπως είναι τα δημοτικά λεωφορεία ή τα υπεραστικά τρένα/ λεωφορεία) μέσω της μετατροπής των λεωφορείων σε κινούμενους κόμβους συλλογής πληροφοριών (mobile base station) [81]. Περαιτέρω έρευνα που έχει διεξαχθεί σε αυτόν τον κλάδο, συμπεριλαμβάνει προσαρμοστικούς αλγόριθμους για τις τροχιές των κινούμενων κόμβων συλλογής πληροφοριών [82], όπου οι τροχιές οφείλουν να προσδιορίζουν τα σημεία αλλαγής της διεύθυνσης της ευθύγραμμης τροχιάς με βάση την προοδευτικά μεταβαλλόμενη κατανομή του πλήθους κόμβων εντός του δικτύου αισθητήρων και κατά τρόπο τέτοιο ώστε να αποφεύγονται τα σημεία εμποδίων που εμφανίζονται στο δρόμο τους. Το [83] προτείνει ένα εναλλακτικό σχήμα μοναδιαίου βήματος με το σκεπτικό εφαρμογής στους κόμβους αισθητήρες ομοιόμορφης κατανάλωσης ενέργειας ανά κόμβο. Ένας κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων είναι τότε προγραμματισμένος να σταματάει σε τέτοια σημεία στο δίκτυο ώστε να μπορεί να συλλέξει τα δεδομένα μέσω της ασύρματης μετακίνησης τους σε μοναδιαία απόσταση – άλμα στο δίκτυο. Οι θέσεις στάσης του κινούμενου κόμβου είναι προσαρμοσμένες όσο το δυνατόν καλύτερα προκειμένου να συλλεχθούν τα πακέτα δεδομένων.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Στο παρών κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής εφαρμόζουμε το μοντέλο κινούμενης συλλογής δεδομένων από μοναδικό κινούμενο κόμβο στο δίκτυο ΑΔΑ και μελετάμε την αποδοτικότητα διάφορων μοντέλων κίνησης και συλλογής πληροφοριών, όπου όλες έχουν ως κοινό τόπο την παρουσία ενός μόνο κινούμενου κόμβου. Ο στόχος της εργασίας είναι κατά βάση να μελετηθεί η αποδοτικότητα του σχήματος συλλογής δεδομένων όταν η τροχιά του κινούμενου κόμβου μπορεί να επηρεαστεί από τη γνώση για τις θέσεις των κόμβων αισθητήρων εντός τους δικτύου και για την ευρύτερη γεωγραφία του πεδίου αισθητήρων. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να προσδιορίσουμε μια τροχιά για τον μετα-κινούμενο κόμβο ώστε η τροχιά να είναι επακριβώς καθορισμένη από το σχήμα μας (ντετερμινιστική τροχιά). Σε αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή, δεν υπάρχει γνώση για τις θέσεις των κόμβων αισθητήρων ούτε γνώση της ευρύτερης γεωγραφίας του πεδίου, είναι δυνατό να σχεδιαστεί μια τυχαία τροχιά (πλήρως τυχαία ή τυχαία με κάποιους περιορισμούς ως προς την τυχειότητα) και η εργασία που παρουσιάζεται σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής περιλαμβάνει μελέτη τέτοιων περιπτώσεων για το κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων. Συνοπτικά, ισχυριζόμαστε ότι η εργασία σε αυτό το τμήμα αποπειράται να διαφωτίσει τον αναγνώστη ως προς τα θετικά και αρνητικά σημεία που προέρχονται από την εναλλαγή της τροχιάς του κόμβου συλλογής δεδομένων μεταξύ του ντετερμινιστικού και του τυχαίου μοντέλου κίνησης. Επιπλέον, τα μοντέλα κίνησης που παρουσιάζονται σχετίζονται με βασική ανταλλαγή/ προώθηση δεδομένων σε απόσταση ενός βήματος/ άλματος ή σχεδόν μηδενικού βήματος/ άλματος από τον κόμβο δημιουργίας του πακέτου. Ανάλογα με τον τύπο του μοντέλου κίνησης μελετάται στο παρών κείμενο η σχέση μεταξύ κόστους σε ενέργεια για την προώθηση δεδομένων και κέρδους που ενυπάρχει στο μοντέλο κίνησης όταν η επικοινωνία/ προώθηση πακέτων δεδομένων γίνεται σε απόσταση ενός άλματος ή σχεδόν μηδενικού άλματος από τον κόμβο αισθητήρα όπου το πακέτο δημιουργείται.

Πιο συγκεκριμένα, δυο ευρείες κλάσεις συλλογής δεδομένων από κινούμενο κόμβο στο δίκτυο ορίζονται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, έτσι ώστε τα αντίστοιχα σχήματα συλλογής δεδομένων στο δίκτυο ΑΔΑ να είναι ανάλογα του επιθυμητού επιπέδου κατανάλωσης ενέργειας από πλευράς των κόμβων αισθητήρων. Για την πρώτη κλάση σχημάτων κινητικότητας κόμβου συλλογής δεδομένων θεωρείται ότι η βασική ασύρματη επικοινωνία μοναδιαίου άλματος είναι δυνατή μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και του κινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων (1-hop data collection schemes). Το αντίστοιχο ποσό ενέργειας (για κάλυψη της περιοχής γύρω από τον

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (κόμβο αισθητήρα με βασική συνδεσιμότητα) καταναλώνεται έτσι ώστε τα πακέτα δεδομένων να μεταφέρονται μέσω ασύρματης επικοινωνίας στον κινούμενο κόμβο. Ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων απαιτείται μονάχα να μετακινηθεί σε απόσταση της τάξης του ενός βήματος μακριά από τον κόμβο αισθητήρα που διαθέτει ένα πακέτο δεδομένων για παράδοση και τότε είναι δυνατή η παράδοση του πακέτου δεδομένων μέσω ασύρματης ζεύξης (βασική συνδεσιμότητα στο δίκτυο).

Για τη δεύτερη ευρεία κλάση μοντέλων κινητικότητας του κόμβου συλλογής δεδομένων έχει επιλεγεί οι κόμβοι αισθητήρες (που είναι και παραγωγοί των πακέτων δεδομένων) να μην εκπέμπουν ασύρματα τα πακέτα δεδομένων, συνεπώς το μοντέλο κίνησης πρέπει να συμπεριλαμβάνει τη δυνατότητα του κινούμενου κόμβου να πλησιάζει όσο το δυνατόν κοντύτερα στους εκάστοτε κόμβους αισθητήρες. Η μεταφορά δεδομένων από το κόμβο αισθητήρα μπορεί να διεξαχθεί μέσω ενός πρωτοκόλλου χαμηλής ενεργειακής στάθμης που βασίζεται στην κοντινή φυσική απόσταση μεταξύ των δυο κόμβων, όπως είναι το πρωτόκολλο Bluetooth ή επικοινωνία μέσω υπέρυθρου φωτός. Για σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας προκειμένου να γίνει η μεταφορά δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς και ενσύρματη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δυο κόμβων (δεδομένου ότι οι δυο κόμβοι έχουν έρθει τόσο κοντά ώστε να μπορούν να διασυνδεθούν μέσω καλωδίου). Συνεπώς θεωρείται ότι η κλάση αυτή συλλογής δεδομένων από το δίκτυο αισθητήρων αφορά τη (σχεδόν) μηδενική ενεργειακή κατανάλωση στους κόμβους αισθητήρες (ή τουλάχιστον πολύ μικρότερη ενεργειακή σπατάλη σε σχέση με την προηγούμενη κλάση σχημάτων συλλογής δεδομένων) για τη προώθηση των δεδομένων που προκύπτουν από τον αισθητήρα μέσω της γεωγραφικής προσέγγισης που υλοποιείται μεταξύ κινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων και κόμβου αισθητήρα. Η κλάση αυτή, που θα εξηγηθεί με λεπτομέρειες παρακάτω, ονομάζεται η κλάση των σχημάτων συλλογής δεδομένων για προώθηση πακέτων δεδομένων μηδενικού άλματος (σχεδόν). Η έννοια του μηδενικού άλματος για την προώθηση των δεδομένων (0-hop data collection schemes) υπονοεί την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από πλευράς κόμβων αισθητήρων, ιδιαίτερα σε σύγκριση με την προηγούμενη κλάση σχημάτων που αφορά την προώθηση πακέτων δεδομένων μοναδιαίου άλματος.

Με βάση τις παραπάνω περιγραφές γίνεται φανερό ότι τα σχήματα συλλογής δεδομένων κλάσης μοναδιαίου βήματος προώθησης ή μηδενικού βήματος προώθησης μπορούν να προσδιορίσουν επιπλέον πόσο κοντά ή μακριά ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων πρέπει να πλησιάσει στην πηγή δεδομένων προκειμένου να

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων εκτελέσει το στόχο του (συλλογή δεδομένων). Η φυσική προσέγγιση του κόμβου συλλογής δεδομένων επηρεάζει άμεσα την τελική τροχιά του κινούμενου κόμβου κατά τρόπο ώστε η τροχιά του να αναμένεται κατά πολύ μεγαλύτερη όταν πρέπει ο κόμβος να επισκεφθεί όλους τους κόμβους αισθητήρες του δικτύου ξεχωριστά ή αλλιώς η τροχιά θα είναι συντομότερη όταν γίνεται προώθηση δεδομένων μοναδιαίου άλματος στο δίκτυο (καθότι οι στάσεις του κινούμενου κόμβου θα πρέπει να είναι κατά πολύ μικρότερες σε αριθμό σε σχέση με το άλλο σχήμα).

Σε συνδυασμό με τις τελικές ανάγκες εγγύτητας στους επιμέρους κόμβους αισθητήρες του δικτύου, ένας παράγοντας επηρεασμού της τελικής τροχιάς του κινούμενου κόμβου στο πεδίο του ΑΔΑ είναι το «πρόγραμμα» του κινούμενου κόμβου που δημιουργείται για την επίσκεψη του κινούμενου κόμβου στους επιμέρους κόμβους αισθητήρες ή στις ευρύτερες γειτονίες που σχετίζονται με τη συλλογή πακέτων δεδομένων από επιμέρους κόμβους αισθητήρες. Εάν θεωρείται ότι υπάρχει γνώση για τη θέση των κόμβων αισθητήρων μέσα στο ευρύτερο πεδίο και επιπλέον εάν γνωρίζουμε την ευρύτερη γεωγραφία του πεδίου, τότε ένα καλό ή βέλτιστο για συγκεκριμένη μετρική «πρόγραμμα» θα μπορούσε να προσδιοριστεί για την επίσκεψη του κινούμενου κόμβου στις ευρύτερες γειτονίες των κόμβων αισθητήρων. Ειδάλλως, ο κινούμενος κόμβος συλλογής πληροφοριών θα πρέπει να ακολουθήσει ένα «πρόγραμμα» που είναι κατά βάση τυχαίο ως προς τις θέσεις που επισκέπτεται διαδοχικά, με πιθανότατα παράλληλη χρησιμότητα της ιστορίας της τροχιάς του κόμβου προκειμένου να αποφεύγεται η επανάληψη της επίσκεψης των ίδιων θέσεων (και αντίστοιχα των ευρύτερων περιοχών γύρω από αυτές) που έχουν καλυφθεί προηγουμένως. Ορμώμενοι από αυτές τις παρατηρήσεις, προτείνονται στη συνέχεια δυο παραλλαγές του προγράμματος για την συλλογή δεδομένων όταν υπάρχει προώθηση δεδομένων είτε μοναδιαίου είτε μηδενικού άλματος: την ντετερμινιστική παραλλαγή και την παραλλαγή τυχαίας κίνησης του κόμβου συλλογής δεδομένων. Η ντετερμινιστική παραλλαγή κίνησης του κόμβου συλλογής δεδομένων βασίζεται στην αυξημένη γνώση για τη γεωγραφία του πεδίου και τις θέσεις των κόμβων αισθητήρων, συνεπώς είναι αναμενόμενο ότι η διαδικασία συλλογής των κόμβων θα είναι συντομότερη σε αριθμό βημάτων ή και συνολικό μήκος της απαιτούμενης τροχιάς. Αντίθετα, η τυχαία κίνηση του μετακινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων ενδέχεται να απαιτεί αυξημένες τιμές για τον αριθμό βημάτων που απαιτούνται για τη διαδικασία και μεγάλη τελική τροχιά στο πεδίο.

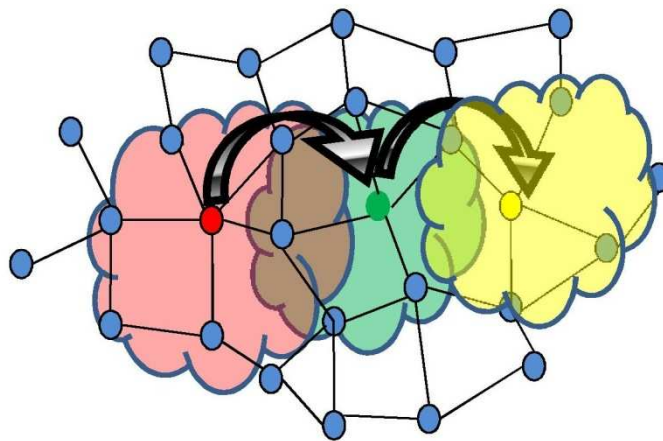
4.2 Συλλογή πακέτων δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου άλματος

Σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής θα περιγράψουμε τις διαδικασίες συλλογής δεδομένων όταν ο κόμβος συλλογής δεδομένων λειτουργεί σε συμφωνία με την προώθηση των πακέτων δεδομένων σε απόσταση μοναδιαίου άλματος από τον κόμβο αισθητήρα (αντιπροσωπεύει την πηγή). Ο στόχος της μελέτης σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής είναι να βρεθεί το τελικό μήκος της τροχιάς του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν αυτός προωθείται στο δίκτυο με στόχο να καλύψει όλα (ή ένα μέρος) των δεδομένων που είναι διαθέσιμα από το δίκτυο, ή αλλιώς να καλύψει το 100% (ή ένα υποσύνολο) των κόμβων αισθητήρων με μεγάλη πιθανότητα. Η κάλυψη του δικτύου αισθητήρων μπορεί να γίνει με μια τροχιά του κινούμενου κόμβου που βασίζεται σε τυχαία κίνηση (με χρήση ενός σχήματος ψευδο-τυχαίου περιπάτου) ή εναλλακτικά με ένα (βελτιστοποιημένο) πλήρως προδιαγεγραμμένο σχήμα μετακίνησης του κινούμενου κόμβου (καθορίζει πλήρως όλα τα σημεία στάσης του κινούμενου κόμβου στο δίκτυο). Το τελικό, συνολικό μήκος της τροχιάς του κόμβου συλλογής δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εύρεση/ υπολογισμό της καθυστέρησης για τη συλλογή δεδομένων στο πεδίο αισθητήρων.

Το δίκτυο ΑΔΑ σε αυτό το τμήμα της εργασίας μοντελοποιείται ως ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος με N κόμβους αισθητήρες στο δίκτυο, που έχουν τοποθετηθεί ομοιόμορφα κατανεμημένα σε τυχαίες θέσεις εντός του σχήματος. Στο σύνολο των κόμβων V θα πρέπει να προσαρτηθεί ένα σύνολο από πλευρές E , έτσι ώστε για οποιουδήποτε δύο κόμβους $(u, v) \in E$ να υπάρχει μια πλευρά (ή αλλιώς ζεύξη) εάν και μόνο αν $\|u - v\| \leq r_c$, με r_c να δηλώνει την ακτίνα συνδεσιμότητας για κάθε κόμβο. Εάν το $G(N, r_c)$ υποδηλώνει έναν τυχαίο γεωμετρικό γράφο, έχειδειχθεί από το [13] ότι οι κόμβοι αισθητήρες είναι σε θέση να προσδιορίσουν ένα συνδεδεμένο γράφο, εφόσον η ακτίνα συνδεσιμότητας καλύπτει το βασικό κριτήριο συνδεσιμότητας. Για ένα σύνολο κόμβων $u \in V$ που είναι ομοιόμορφα τοποθετημένοι σε τετράγωνο πεδίο μοναδιαίας επιφάνειας ισχύει (ασυμπτωτικά) ότι η ακτίνα συνδεσιμότητας θα πρέπει να είναι (σε σχέση με το πλήθος N των κόμβων του δικτύου) $r_c = \theta(\sqrt{\log N/N})$, έτσι ώστε να ισχύει η βασική συνδεσιμότητα στο δίκτυο.

4.2.1 Συλλογή δεδομένων με κίνηση τυχαία του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος

Ένα ελαφρύ σχήμα (ως προς την πολυπλοκότητα), που απαιτεί μονάχα τοπική γνώση για τους κόμβους αισθητήρες που βρίσκονται στη γειτονιά του κινούμενου κόμβου στο δίκτυο παρουσιάζεται σε αυτό το τμήμα της διδακτορικής διατριβής. Το προταθέν σχήμα έχει καλές ιδιότητες κλιμάκωσης και είναι ικανό να αντιπαρέλθει μικρές ή μεγάλες αλλαγές στην τοπολογία δικτύου, μια και βασίζεται στους τυχαίους περιπάτους για τη συλλογή πληροφορίας στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων εκτελεί ένα ψευδο-τυχαίο περίπατο στο δίκτυο αισθητήρων, τροποποιημένο όπως θα εξηγηθεί παρακάτω και εμφανίζεται επίσης σχηματικά στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42 Διαδικασία συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων ξεκινά με την τυχαία επιλογή ενός κόμβου αισθητήρα, στην τοποθεσία του οποίου θα βρεθεί ο κινούμενος κόμβος στο δίκτυο. Στη συνέχεια, ο κόμβος συλλογής δεδομένων θα λάβει τα δεδομένα από το κόμβο αισθητήρα που έχει επισκεφθεί (τον τωρινό κόμβο) και θα ζητήσει ή παραλάβει απευθείας όλα τα δεδομένα των πρώτων γειτόνων του κόμβου που έχει τωρινά δεχθεί επίσκεψη. Μια τέτοια πολιτική κάλυψης κόμβων (επισκεπτόμενων και των πρώτων γειτόνων τους) μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι είναι μια πιο αποδοτική διαδικασία (σε σχέση με τη μη παραλαβή των δεδομένων της γειτονιάς κόμβων μοναδιαίου βήματος) και επιπλέον είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με ελάχιστο επιπλέον κόστος σε ενέργεια από πλευράς του δικτύου ΑΔΑ. Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατό οι πληροφορίες για μεταφορά προς τον τελικό χρήστη να επικοινωνούνται μεταξύ των κόμβων πρώτων γειτόνων, έτσι ώστε να μπορεί να διεξαχθεί η διαδικασία όπως περιγράφηκε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατό να συμπεριλαμβάνονται τα δεδομένα προς τον τελικό χρήστη σαν ένα επιπλέον πεδίο στην ουρά των πεδίων των μηνυμάτων HELLO τα οποία ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων αισθητήρων που είναι πρώτοι γείτονες σε περιοδική βάση, προκειμένου να υπάρχει συντήρηση της γνώσης της γειτονιάς μοναδιαίου άλματος και να μπορεί να υλοποιηθεί επιπλέον η τυχαία αναγνώριση των οποιονδήποτε νεοεισαχθέντων κόμβων στο δίκτυο, καθώς και η αναγνώριση των κόμβων που απομακρύνονται από αυτό (αλλαγές στην τοπολογία, εξοικονόμηση ενέργειας από πλευράς κόμβων αισθητήρων κλπ). Η συλλογή των δεδομένων των κόμβων πρώτων γειτόνων στο δίκτυο μπορεί να γίνεται έτσι αυτόματα με την άφιξη του κινητού κόμβου στην τοποθεσία του πρώτου κόμβου αισθητήρα. Το ίδιο μπορεί να γίνεται κατά τις επόμενες επισκέψεις του κινούμενου κόμβου στους κόμβους αισθητήρες του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας από πλευράς των κόμβων αισθητήρων στο δίκτυο είναι της τάξης του μοναδιαίου άλματος, μια σημαντική παραμετροποίηση ως προς την συνολική κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς την αποδοτικότητα του δικτύου (χρόνος ζωής του δικτύου).

Για την κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων στο δίκτυο ΑΔΑ, θεωρείται ότι ο κινούμενος κόμβος λαμβάνει πληροφορίες που είναι σχετικές με τους δεύτερους γείτονες του επισκεπτόμενου κόμβου, δηλαδή είναι σε θέση να φτιάξει μια λίστα με όλους τους κόμβους (και τη συλλογή των γεωγραφικών θέσεων) που αποτελούν όλους τους γείτονες διπλάσιου βήματος (2-hop neighbors) από τον τωρινά επισκεπτόμενο κόμβο αισθητήρα. Διαθέτοντας το σύνολο των κόμβων που βρίσκονται δυο άλματα μακριά ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων διαλέγει τυχαία με την ομοιόμορφη

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

κατανομή έναν από τους κόμβους που είναι δυο άλματα μακριά από την τωρινή θέση του κινούμενου κόμβου. Είναι κατανοητό ότι οι κόμβοι που βρίσκονται ένα άλμα μακριά από τη θέση που είναι καλυμμένη αυτή τη χρονική στιγμή δεν θεωρούνται ως υποψήφιοι για επίσκεψη, δεδομένου ότι όλα τα πακέτα δεδομένων (η πληροφορία που προωθείται για τον τελικό χρήστη) είναι καλυμμένη ήδη από την μεταφορά πληροφορίας των HELLO μηνυμάτων. Η μετακίνηση του κινητού κόμβου προς έναν από τους γείτονες μοναδιαίου άλματος στο δίκτυο θα συνιστούσε υπερβολική σπατάλη πόρων από πλευράς του δικτύου αισθητήρων. Η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως επαναλαμβάνεται κατά την άφιξη του κινούμενου κόμβου στην τοποθεσία του επόμενου κόμβου προς επίσκεψη. Ο κόμβος συλλογής δεδομένων θα συλλέξει όλα τα πακέτα δεδομένων από τον τωρινά επισκεπτόμενο κόμβο και όλους τους πρώτους του γείτονες και επίσης θα φτιάξει μια λίστα με όλους τους κόμβους που είναι γείτονες δυο αλμάτων μακριά από τον επισκεπτόμενο κόμβο. Η όλη διαδικασία ορίζεται να επαναληφθεί σαν ένας αλγόριθμος εκτέλεσης του ψευδο-τυχαίου περιπάτου με συλλογή δεδομένων κάτω από την προώθηση των πακέτων δεδομένων μοναδιαίου άλματος εντός του δικτύου. Η Εικόνα 1 δείχνει μια πιθανή υλοποίηση του περιγραφέντος σχήματος συλλογής δεδομένων. Μιας και η κίνηση του κινούμενου κόμβου είναι εκ φύσεως τυχαίοποιημένη, υπάρχει η πιθανότητα να επανεπισκεφθεί ο κινούμενος κόμβος τους κόμβους του δικτύου που είχαν καλυφθεί στο παρελθόν [84]. Τέτοιες κυκλικές κινήσεις του κόμβου συλλογής δεδομένων (με επανεπισκέψεις κόμβων) είναι δυνατόν να επηρεάσουν πολύ αρνητικά το σχήμα συλλογής δεδομένων ως προς την ενεργειακή του απόδοση και αντίστοιχα το μήκος της τροχιάς του κινούμενου κόμβου και την καθυστέρηση για ολοκλήρωση της διαδικασίας από τον κινούμενο κόμβο. Μολονότι υπάρχουν πιθανές επανεπισκέψεις κόμβων στο σχήμα που περιγράφουμε και επίσης είναι δυνατό η συνολική καθυστέρηση στον κινούμενο κόμβο να είναι μεγάλη, το προταθέν σχήμα έχει καλά χαρακτηριστικά κάλυψης δικτύου (όπως θα δούμε παρακάτω) και επιπλέον αποτελεί μια αυτόνομη, μη κεντροποιημένη διαδικασία βασιζόμενη μονάχα σε τοπικές πληροφορίες για τις περιοχές γύρω από τον εκάστοτε επισκεπτόμενο κόμβο αισθητήρα.

4.2.2 Συλλογή δεδομένων με κίνηση ντετερμινιστική του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
υποσύνολο του τετράγωνου μοναδιαίου πεδίου θα εμπεριέχει τουλάχιστον έναν κόμβο αισθητήρα. Μια τέτοια διαμέριση του πεδίου αισθητήρων χρησιμοποιείται από το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής κόμβων που προτείνουμε σε αυτό το τμήμα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η στάση του κινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων σε κάθε μια από τις υπό περιοχές του πεδίου αισθητήρων θα είναι ωφέλιμη και ουσιαστική (δηλαδή θα συναντά τουλάχιστον έναν κόμβο του δικτύου ανά στάση). Δεδομένης της διαμέρισης του πεδίου αισθητήρων σε τετράγωνα υποσύνολα του πεδίου με μήκος πλευράς $A(N)$, βασίζουμε την πρόταση του αλγόριθμου μετακίνησης του κινούμενου κόμβου για συλλογή δεδομένων στην ύπαρξη Χαμιλτονιανών μονοπατιών σε πλέγμα, όπως έχει προταθεί στο [86]. Με βάση την ύπαρξη ενός Χαμιλτονιανού μονοπατιού θα υπάρχει μια πορεία κίνησης του κινούμενου κόμβου που περνάει μια μοναδική φορά από κάθε τετράγωνη υποπεριοχή του πεδίου αισθητήρων. Θεωρούμε μια τέτοια Χαμιλτονιανή πορεία στο πεδίο, η οποία (χωρίς να χάνεται η γενικότητα) ξεκινά από την τετράγωνη υποπεριοχή που βρίσκεται στην πάν αριστερή γωνία του πεδίου και τελειώνει στην τετράγωνη υποπεριοχή που βρίσκεται στην κάτω δεξιά γωνία του πεδίου (όπως φαίνεται στην Εικόνα 43). Χρησιμοποιούμε τον όρο Χαμιλτονιανό φιδάκι για να οριστεί το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων που παρουσιάζουμε

Ο κινούμενος κόμβος συλλογής πληροφοριών κινείται διαδοχικά μεταξύ του κέντρου της μιας τετράγωνης υποπεριοχής προς το κέντρο της επόμενης τετράγωνης υποπεριοχής (σύμφωνα με το Χαμιλτονιανό φιδάκι), καθότι έχει πλήρη γνώση της γεωγραφίας του πεδίου και των τετράγωνων υποπεριοχών. Όταν βρίσκεται στο κέντρο της κάθε μιας από τις τετράγωνες υποπεριοχές, ο κινούμενος κόμβος σχηματίζει την τετράδα μεταβλητών (x_l, y_l, x_u, y_u) των πάνω και κάτω ορίων των συντεταγμένων του υποσυνόλου και συλλέγει τα δεδομένα όλων των κόμβων που είναι μοναδιαίο βήμα μακριά σε ακτίνα συνδεσιμότητας από αυτόν. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, όλοι οι κόμβοι αισθητήρες που βρίσκονται εντός της τετράγωνης υποπεριοχής βρίσκονται σε απόσταση ενός μοναδιαίου βήματος συνδεσιμότητας από τον κινούμενο κόμβο (από κατασκευής της διαμέρισης του πεδίου). Αφότου λάβει την πληροφορία των κόμβων αισθητήρων στην τωρινά επισκεπτόμενη υποπεριοχή, ο κινούμενος κόμβος θα υπολογίσει τις γεωγραφικές συντεταγμένες του κέντρου της επόμενης τετράγωνης υποπεριοχής σύμφωνα με το Χαμιλτονιανό φιδάκι και θα κινηθεί προς τα εκεί. Η μετρική που εισάγεται σε αυτό το τμήμα της διατριβής σχετίζεται με το πλήθος των στάσεων/ τοποθεσιών που επισκέπτεται ο κινούμενος κόμβος προκειμένου να ολοκληρώσει τον

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 αλγόριθμο Χαμιλτονιανής κίνησης εντός του πεδίου αισθητήρων. Εν προκειμένω, το πλήθος των στάσεων του κινούμενου κόμβου πάνω στη Χαμιλτονιανή πορεία θα ισούται με το πλήθος των τετράγωνων υπο περιοχών του πεδίου, ποσότητα που μπορεί να υπολογισθεί απευθείας από τη σχέση $B = \frac{1}{A^2(N)} = \frac{N}{2 \log N}$.

Μια κρίσιμη ποσότητα για τη μετάδοση πληροφορίας σε απόσταση ενός βήματος προς το κόμβο συλλογής δεδομένων θα είναι η ακτίνα εκπομπής r_c των κόμβων αισθητήρων, καθότι αυτοί θα επηρεάζουν τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στο δίκτυο αισθητήρων. Θέτουμε εδώ την προσοχή του αναγνώστη στο γεγονός ότι θα πρέπει η ακτίνα συνδεσιμότητας να ικανοποιεί τη σχέση $r_c \geq \sqrt{\log N / N}$ προκειμένου να υφίσταται (με μεγάλη πιθανότητα) βασική συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Επιπροσθέτως, θα πρέπει η ακτίνα συνδεσιμότητας r_c να σχετίζεται και με το μήκος της πλευράς της τετράγωνης υπο περιοχής που ορίζεται στο ντετερμινιστικό μοντέλο συλλογής δεδομένων κάτω από μοναδιαία προώθηση δεδομένων στο δίκτυο. Για την ακρίβεια, πρέπει να ισχύει ότι ο κινούμενος κόμβος που έχει κάνει στάση στο κέντρο της τετράγωνης υπο περιοχής συλλογής δεδομένων είναι σε θέση να επικοινωνήσει με όλους τους κόμβους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε αυτό το υπο σύνολο του χώρου, δηλαδή θα πρέπει η θέση του κέντρου κάθε υπο περιοχής του πεδίου να βρίσκεται εντός της ραδιοφωνικής εμβέλειας των κόμβων αισθητήρων (ή αλλιώς να βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη ή ίση από την ακτίνα συνδεσιμότητας). Προκειμένου να ισχύει η παραπάνω πρόταση θα πρέπει η ακτίνα συνδεσιμότητας r_c να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το μισό μήκος της διαγωνίου της τετράγωνης υπο περιοχής, ή αλλιώς θα πρέπει να ισχύει ότι $r_c = \frac{1}{2}D = \frac{\sqrt{2}}{2}A(N) = \sqrt{\log N / N}$. Η τελευταία σχέση εξασφαλίζει ότι ο κινούμενος κόμβος που σταματά στο κέντρο της τετράγωνης υπο περιοχής είναι σε θέση να ζητήσει/ επικοινωνήσει τα πακέτα δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρες. Παράλληλα ισχύει το βασικό κριτήριο συνδεσιμότητας στο δίκτυο, δηλαδή $r_c = \theta(\sqrt{\frac{\log N}{N}})$, άρα το δίκτυο αισθητήρων είναι με μεγάλη πιθανότητα συνδεδεμένο. Συγκεντρωτικά, μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων βασισμένο στο Χαμιλτονιανό φιδάκι (με τον κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων να σταματά στο εκάστοτε κέντρο της τετράγωνης υπο περιοχής και την ακτίνα συνδεσιμότητας και την πλευρά της τετράγωνης υπο περιοχής να δίνονται από τους παραπάνω τύπους) μπορεί να συλλέξει όλα τα δεδομένα του δικτύου με προώθηση πακέτων δεδομένων μοναδιαίου βήματος στο δίκτυο.

4.3 Συλλογή δεδομένων δικτύου κάτω από προώθηση δεδομένων μηδενικού βήματος

Είναι ευρέως γνωστό στα δίκτυα ΑΔΑ ότι οι ενεργειακοί πόροι των κόμβων αισθητήρων είναι πολύ περιορισμένοι και έτσι είναι επιθυμητός στόχος μια μείωση του επιπέδου κατανάλωσης ενέργειας που σχετίζεται με τη διαδικασία κάλυψης του δικτύου αισθητήρων από τον κινητό κόμβο συλλογής δεδομένων. Εφόσον μια τέτοια μείωση του συνολικού ποσού καταναλισκόμενης ενέργειας θα ήταν εφικτή, θα μπορούσε να «ελευθερωθεί» το δίκτυο αισθητήρων από τα ενεργειακά βάρη που σχετίζονται με τη μεταφορά των παραγόμενων δεδομένων από το δίκτυο και παραπέρα να δωθούν κάποιο από αυτούς τους πόρους προκειμένου να επιμηκυνθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου ΑΔΑ ή να γίνουν διαθέσιμοι οι πόροι για άλλες σημαντικές λειτουργίες, όπως η οργάνωση δικτύου (network coordination) ή επεξεργασία δεδομένων.

Σε αυτό το τμήμα της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται ένα σχήμα συλλογής δεδομένων από το δίκτυο ΑΔΑ, το οποίο προσεγγίζει την απόλυτα μηδενική ενεργειακή ανάγκη από πλευράς των κόμβων αισθητήρων προκειμένου εκείνοι να μεταβιβάσουν τα δεδομένα τους στον κινούμενο κόμβο για συλλογή δεδομένων από το δίκτυο. Συνεπώς, οι κόμβοι αισθητήρες δεν πληρώνουν το ενεργειακό κόστος της προώθησης δεδομένων μοναδιαίου βήματος στο δίκτυο, αλλά εναλλακτικά ο κινούμενος κόμβος πλησιάζει όσο το δυνατόν κοντύτερα τον εκάστοτε κόμβο αισθητήρα προκειμένου να παραλάβει τα δεδομένα του με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος (ως προς την ασύρματη επικοινωνία).

4.3.1 Συλλογή δεδομένων κάτω από τυχαία κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος

Το σχήμα προώθησης δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος με τυχαία κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων βασίζεται – όπως αναφέρθηκε παραπάνω – στην προσέγγιση του κινούμενου κόμβου σε απόσταση σχεδόν μηδενική από τον εκάστοτε

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
κόμβο αισθητήρα του δικτύου ΑΔΑ. Το δίκτυο ΑΔΑ μοντελοποιείται και πάλι σαν ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος $G(N, r_c)$ με ακτίνα συνδεσιμότητας που σχετίζεται με τη βασική συνδεσιμότητα στο δίκτυο $r_c = \sqrt{\log N/N}$, δεδομένου ότι N κόμβοι βρίσκονται τοποθετημένοι με τυχαίο τρόπο (σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή) σε ένα τετράγωνο πεδίο μοναδιαίας πλευράς. Οι επισκέψεις του κινούμενου κόμβου στους κόμβους αισθητήρες ξεκινούν από την τυχαία επιλογή του πρώτου κόμβου αισθητήρα και συνεχίζονται, σύμφωνα με το μοντέλο του τυχαίου περιπάτου χωρίς οπισθοδρόμηση, με τυχαίες επιλογές μεταξύ των πρώτων γειτόνων του εκάστοτε επισκεπτόμενου κόμβου. Η τελική διαδικασία επίσκεψης κόμβων ενδέχεται να ακολουθεί μια μεγάλη τροχιά (σε πλήθος βημάτων) ή αλλιώς να απαιτεί πολύ χρόνο για ολοκλήρωση (πολυωνυμικός χρόνος στο N), όπως έχει δειχθεί στο [87], δεδομένου ότι ο τυχαίος γεωμετρικός γράφος μπορεί να εμπεριέχει «στενώσεις», οι οποίες έχουν την τάση να εγκλωβίζουν τον τυχαίο περίπατο, αναγκάζοντας τον να σπαταλά χρόνο σε επανεισκέψεις τοπικά γειτονικών, ήδη καλυμμένων κόμβων.

4.3.2 Συλλογή δεδομένων κάτω από ντετερμινιστική κίνηση του κόμβου συλλογής δεδομένων όταν γίνεται προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος

Όπως και με τον τυχαίο τρόπο συλλογής δεδομένων με (σχεδόν) μηδενική προώθηση δεδομένων όπως περιγράφηκε στο παραπάνω τμήμα της διδακτορικής διατριβής το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων με κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων όταν γίνεται (σχεδόν) μηδενική προώθηση δεδομένων στο δίκτυο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους στους κόμβους αισθητήρες για την παράδοση των δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την σχεδόν μηδενική απόσταση μεταξύ κινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων και κόμβου αισθητήρα. Η ντετερμινιστική διάσταση του σχήματος συλλογής δεδομένων, όπως αυτό περιγράφεται στο παρόν τμήμα της διατριβής, έγκειται στην επιτάχυνση της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων (συγκριτικά με τον τυχαίο τρόπο συλλογής δεδομένων όταν γίνεται σχεδόν μηδενική προώθηση δεδομένων) μέσω της κατάλληλης χρησιμοποίησης της γνώσης της τοπολογίας (ή γεωγραφίας) του πεδίου. Σχεδιάζεται και προτείνεται προς αυτό το

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
στόχο ένας κατάλληλος αλγόριθμος σταδιακής επίσκεψης υπο περιοχών του πεδίου αισθητήρων.

Σε αντίθεση, με το ντετερμινιστικό σχήμα για συλλογή δεδομένων στον κινούμενο κόμβο κάτω από μοναδιαία προώθηση δεδομένων, όπου ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων αρκούσε να σταθεί στο κέντρο της κάθε μιας τετράγωνης υπο περιοχής της διαμέρισης του πεδίου αίσθησης, ο κινούμενος κόμβος θα πρέπει να επισκεφθεί τον κάθε έναν κόμβο αισθητήρα ξεχωριστά (προκειμένου να είναι σε απόσταση σχεδόν μηδενική από τον εκάστοτε κόμβο) και να παραλάβει τα δεδομένα του με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας για ασύρματη επικοινωνία από πλευράς του κόμβου αισθητήρα. Έτσι, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η διαμέριση του πεδίου αισθητήρων σε τετράγωνα υπο περιοχές δεν είναι επακριβώς αυτό που χρειάζεται για το σχήμα της σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης για την παράδοση των δεδομένων. Είναι αδύνατον ο κόμβος συλλογής δεδομένων να παραλάβει πολλά δεδομένα (από πολλούς κόμβους αισθητήρες) με μια μόνο στάση σε αυτό το σχήμα.

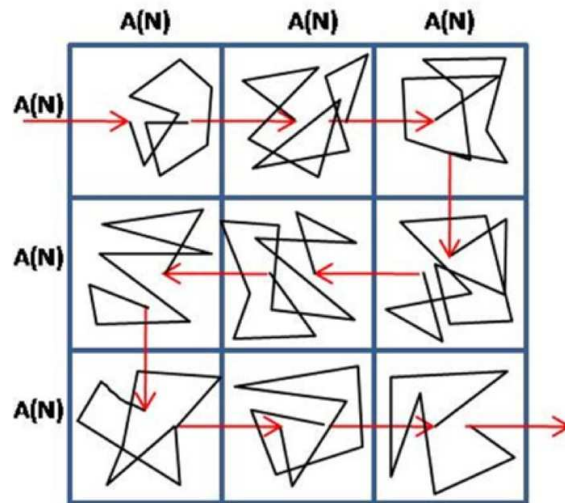
Ένα ακριβές ανάλογο της ντετερμινιστικής διαδικασίας συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος θα είναι ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου που θα καθορίζει επακριβώς το ελάχιστο μονοπάτι έτσι ώστε ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων να επισκέπτεται όλους τους τυχαία τοποθετημένους κόμβους αισθητήρες στο πεδίο. Όμως η λύση ενός τέτοιου αλγορίθμου συμπίπτει με τη λύση για το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (travelling salesman problem), το οποίο είναι ένα ευρέως διαδεδομένο πρόβλημα στους τομείς της θεωρητικής πληροφορικής και της επιχειρησιακής έρευνας, που όμως δεν μπορεί να προσεγγιστεί όταν το πλήθος των κόμβων του γράφου (κόμβων αισθητήρων στην περίπτωση μας) γίνει μεγάλο (για μεγάλα N).

Με βάση τα παραπάνω, το σχήμα συλλογής δεδομένων με (σχεδόν) μηδενική κατανάλωση ενέργειας από πλευράς των κόμβων αισθητήρων που προτείνουμε θα είναι μια ευριστική/ προσεγγιστική λύση που βασίζεται στα δυο παρακάτω επιθυμητά αποτελέσματα ή παρατηρήσεις.

Η πρώτη παρατήρηση έχει σχέση με πρόσφατη δουλειά που ολοκληρώθηκε πάνω σε τυχαίους περιπάτους σε μεγάλους τυχαίους γεωμετρικούς γράφους. Έχει φανεί από αυτήν την εργασία [84] ότι όταν ένας τυχαίος περίπατος εκτελέσει ένα μακρύ άλμα εντός του δικτύου, τότε είναι δυνατόν το άλμα αυτό να έχει ευεργετική επίδραση για τον τυχαίο περίπατο, δεδομένου ότι ενδέχεται να απομακρύνει τον πράκτορα τυχαίου περιπάτου

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων από μια περιοχή που παρακολουθεί την τωρινή χρονική στιγμή και να τον μεταφέρει σε μια περιοχή που θα είναι μη καλλυμένη προηγούμενα από τον πράκτορα. Τέτοιες διαδοχικές μακρινές μεταβάσεις του τυχαίου περιπάτου μπορούν να αποβούν σημαντικά επωφελής για την ολική κάλυψη του δικτύου από τον τυχαίο περίπατο. Έτσι, εικάζουμε ότι η προσθήκη μακρινών μεταβάσεων του τυχαίου περιπάτου στο σχήμα της συλλογής δεδομένων με κινούμενο κόμβο, ο οποίος είναι σε (σχεδόν) μηδενική απόσταση από τον εκάστοτε κόμβο αισθητήρα, μπορεί να επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα ως προς την κάλυψη του συνολικού δικτύου ΑΔΑ.

Η δεύτερη επιθυμητή ιδιότητα για το σχήμα συλλογής δεδομένων με ντετερμινιστικό τρόπο και (σχεδόν) μηδενική απόσταση από τους κόμβους αισθητήρες, σχετίζεται με τη διαμέριση σε τετράγωνα υπο σύνολα πλευράς $A(N)$ του πεδίου αισθητήρων (τυχαίος γεωμετρικός γράφος σε τετράγωνο μοναδιαίας πλευράς). Η διαμέριση έχει την ιδιότητα να εμπεριέχει με μεγάλη πιθανότητα τουλάχιστον έναν κόμβο αισθητήρα σε κάθε υπο σύνολο του πεδίου. Τέλος, το ντετερμινιστικό σχήμα κάλυψης του γράφου των κόμβων αισθητήρων που προτείνουμε σε αυτό το τμήμα της διατριβής εφαρμόζει τα τετράγωνα υπο σύνολα του πεδίου σαν τις υπο περιοχές του πεδίου, όπου ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων θα πρέπει να καταλήγει μετά από κάθε μακρινή του μετάβαση (άλμα). Προτού ο κινούμενος κόμβος εκτελέσει την επόμενη μακρινή μετάβαση (άλμα) κατά τον σειριακό και πλήρως προκαθορισμένο τρόπο (ντετερμινιστικό τρόπο) του σχήματος κίνησης Χαμιλτονιανό φιδάκι (όπως φαίνεται στην Εικόνα 44) ο κινούμενος κόμβος εκτελεί έναν κλασσικό τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση εντός της τετράγωνης περιοχής για ένα προκαθορισμένο μέγιστο αριθμό βημάτων, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.



Εικόνα 44 Ντετερμινιστική κίνηση κόμβου συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μηδενικού βήματος

Βασισμένοι στις παραπάνω παρατηρήσεις/ σχεδιαστικούς στόχους αναλύουμε σε αυτό το σημείο το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων κινούμενου κόμβου κάτω από (σχεδόν) μηδενική προώθηση δεδομένων από κάθε κόμβο αισθητήρα του δικτύου. Η συγκεκριμένη πρόταση αποτελεί ένα αποτελεσματικό ευριστικό/ προσεγγιστικό σχήμα για την επιτάχυνση του απλού τυχαίου περιπάτου που περνάει από κάθε έναν κόμβο του δικτύου αισθητήρων ξεχωριστά (με στόχο πάντα τη συλλογή των δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρες με μηδενικό κόστος σε ενέργεια για την αποστολή δεδομένων) χωρίς την ανάγκη επίλυσης του προβλήματος υψηλής πολυπλοκότητας (και χωρίς την επακριβή γνώση της τοπολογίας του δικτύου) που έχει σχέση με τον περιπλανώμενο πωλητή (travelling salesman). Αντίθετα, μπορεί να δει κανείς πως η πρότασή μας αποτελεί ένα σχήμα μικτό με τυχαίους περιπάτους εντός των υπο περιοχών της διαμέρισης και ντετερμινιστικά καθορισμένα (από το Χαμιλτονιανό φιδάκι) άλματα του κινούμενου κόμβου μεταξύ των υπο –περιοχών της διαμέρισης έτσι ώστε να επιταχύνεται η διαδικασία κάλυψης.

Κατά την επίσκεψη του κινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων σε κάθε υπο περιοχή της διαμέρισης του πεδίου με μήκος πλευράς $A(N)$, ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων εκτελεί έναν τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση στις θέσεις (συντεταγμένες) του συνόλου των κόμβων αισθητήρων που βρίσκονται τοποθετημένοι εντός του τετράγωνου υποσυνόλου. Το πλήθος των στάσεων/ μεταβάσεων/

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 επισκέψεων στους κόμβους αισθητήρες του υπο συνόλου είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με α) το συνολικό πλήθος βημάτων/ επισκέψεων που επιτρέπεται να εκτελέσει ο κινούμενος κόμβος συλλογής δεδομένων πάνω στην ολόκληρη του δικτύου αισθητήρων (ή αλλιώς το προσφερόμενο κόστος βημάτων – budget H) και β) το πλήθος των τετράγωνων υπο περιοχών του πεδίου που ορίζει η διαμέριση. Το προσφερόμενο κόστος βημάτων θα χωρίζεται πάντοτε σε τόσα ίσα μέρη όσα είναι τα τετράγωνα υπο σύνολα του πεδίου αισθητήρων. Συνεπώς, εάν τα υποσύνολα του προσφερόμενου αριθμού βημάτων σε κάθε υπο περιοχή της διαμέρισης του πεδίου ονομάζονται H_S , τότε θα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής $H_S = \left\lfloor \frac{H}{B} \right\rfloor$ με B να είναι το πλήθος των τετράγωνων υπο συνόλων της διαμέρισης του πεδίου.

4.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

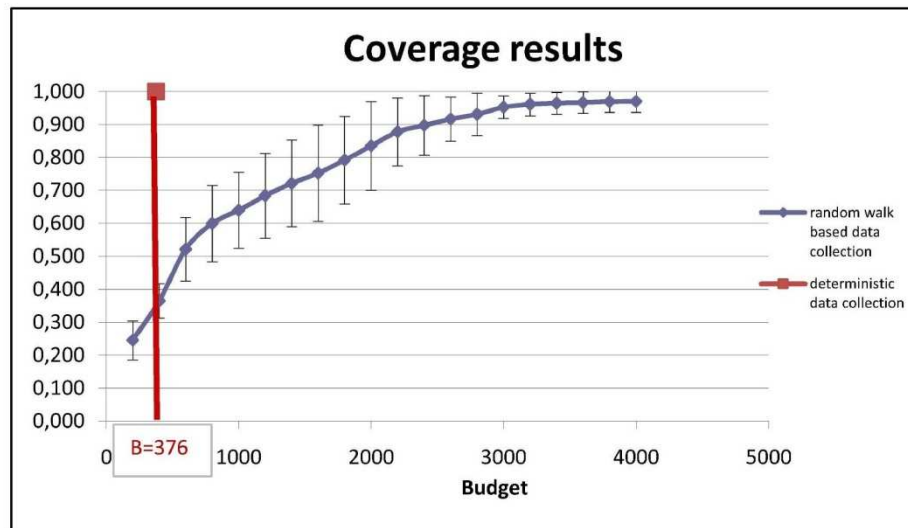
Το τυχαίο σχήμα συλλογής δεδομένων με κινούμενο κόμβο κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος και τα δύο σχήματα (τυχαίο και ντετερμινιστικό) κάτω από προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος εκτελούνται σε προσομοίωση με χρήση του περιβάλλοντος προσομοίωσης Omnet++. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναφέρονται στο βαθμό κάλυψης του δικτύου αισθητήρων με μεγάλο πλήθος κόμβων όταν το προσφερόμενο πλήθος βημάτων/ στάσεων/ επισκέψεων (available budget H) για τον κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων μεταβάλλεται μέσα σε κάποιο εύρος τιμών. Επίσης, τα αποτελέσματα για το βαθμό κάλυψης του δικτύου αισθητήρων στο σχήμα συλλογής δεδομένων που είναι ντετερμινιστικό κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος προκύπτουν από την ανάλυση, όπως αυτή παρουσιάστηκε σε παραπάνω τμήματα της εργασίας.

Η μοντελοποίηση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων για όλες τις προσομοιώσεις που εμφανίζονται στη συνέχεια της εργασίας είναι η ίδια, δηλαδή θεωρείται ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος $G(N, r_c)$ με $N=10000$ κόμβους και $r_c=0.3645$ (ακτίνα συνδεσιμότητας που εξασφαλίζει ότι ο γράφος είναι συνδεδεμένος με μεγάλη πιθανότητα). Οι κόμβοι του δικτύου είναι τοποθετημένοι σε τετράγωνο πεδίο μοναδιαίας έκτασης και οι συντεταγμένες των κόμβων x_u, y_u είναι ομοιόμορφα κατανομημένες για κάθε κόμβο $u \in V$. Οι τιμές των παραμέτρων, όπως εξηγήθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιούνται για τα δυο μοντέλα που είναι βασισμένα σε τυχαία κίνηση του

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
κινούμενου κόμβου συλλογής δεδομένων. Μια μικρή τροποποίηση πρέπει να γίνει για τα σχήματα ντετερμινιστικής κίνησης του κόμβου συλλογής δεδομένων, όπου η σχετική διαμέριση του μοναδιαίου τετράγωνου πεδίου επιβάλλει να προκύπτει ακέραιος αριθμός για το πλήθος των τετράγωνων υπο περιοχών της διαμέρισης. Έτσι, θα πρέπει να γίνεται χρήση αποκοπής του ακέραιου μέρους του αποτελέσματος για το πλήθος των τετράγωνων υπο περιοχών, που θα δίνεται από το $B = \lfloor 1/A^2(N) \rfloor$. Εκτελώντας τον ανάποδο υπολογισμό για το τελικό πλήθος κόμβων του δικτύου στα σχήματα που υπάρχει διαμέριση θα έχουμε ότι $N_{det} = 10152$.

4.4.1 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου με τυχαίο/ ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων κινούμενου κόμβου κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας γίνονται εμφανίσιμα στην Εικόνα 4 για τα δύο σχήματα συλλογής δεδομένων κάτω από μοναδιαία προώθηση δεδομένων στο δίκτυο. Τα δίκτυα που προσομοιώνονται αποτελούνται από $N=10000$ κόμβους και στο σχήμα αναδεικνύεται η επιτυχανόμενη κάλυψη του δικτύου. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι για ένα προσφερόμενο αριθμό βημάτων (budget) που είναι της τάξης του $1/3$ του πλήθους των κόμβων του δικτύου το σχήμα συλλογής δεδομένων με τυχαία κινούμενο κόμβο επιτυγχάνει σχεδόν 100% κάλυψη του δικτύου. Το κόστος σε ενέργεια που σχετίζεται με τη προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος στο δίκτυο αισθητήρων είναι σημαντικά μικρό, λόγω του ότι η προώθηση μοναδιαίου βήματος γίνεται για τη μικρότερη δυνατή ακτίνα συνδεσιμότητας (σχετιζόμενη με το κριτήριο βασικής συνδεσιμότητας).



Εικόνα 45 Κάλυψη δικτύου από κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος

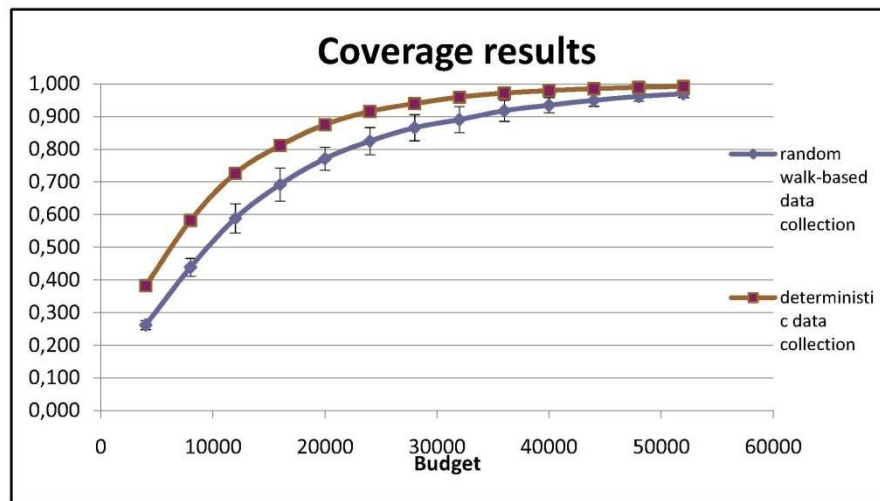
Η απόδοση του ντετερμινιστικού σχήματος συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων μοναδιαίου βήματος μπορεί να εκτιμηθεί κάνοντας χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Ολική κάλυψη (100%) του δικτύου μπορεί να γίνει από τον κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων εφόσον αυτός κάνει στάση σε κάθε μια υπο περιοχή του πεδίου αισθητήρων καθώς ακολουθεί την κίνηση με βάση το Χαμιλτονιανό φιδάκι. Με βάση την ανάλυση που παρουσιάστηκε και μετά την αποκοπή του δεκαδικού μέρους, το πλήθος των υπο περιοχών στη διαμέριση του πεδίου θα είναι $B=376$. Συνεπώς ένα πλήθος στάσεων/ επισκέψεων με τιμή $H=376$ απαιτείται για το ντετερμινιστικό σχήμα προκειμένου να καλύψει πλήρως το δίκτυο αισθητήρων. Συγκρίνοντας αυτή τη τιμή – αποτέλεσμα με το αποτέλεσμα κάλυψης δικτύου που προκύπτει από τη συλλογή δεδομένων με τυχαίο τρόπο συμπεραίνει κανείς ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση στο απαιτούμενο πλήθος βημάτων/ στάσεων προκειμένου να γίνεται ολική κάλυψη στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, το τυχαίο σχήμα συλλογής δεδομένων από κινούμενο κόμβο δεν επιτυγχάνει κάλυψη δικτύου που θα είναι μεγαλύτερη από 30% των κόμβων αισθητήρων για προσφερόμενο αριθμό βημάτων/ στάσεων που δεν ξεπερνά το όριο των 400 βημάτων. Δεδομένου ότι ένα βήμα για το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων αντιστοιχεί σε φυσική απόσταση που είναι ίση με $A(N) = \sqrt{2\log N/N} = O\left(\sqrt{\frac{2\log N}{N}}\right) = O(r_c)$ και ένα βήμα του τυχαίου σχήματος συλλογής δεδομένων είναι ίσο με μια ποσότητα μεγαλύτερη του r_c και

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
μικρότερη του $2r_c$, δηλαδή $O(r_c)$, είναι εύκολα αντιληπτό ότι το μικρότερο κόστος σε αναγκαίο αριθμό βημάτων/ στάσεων που σχετίζεται με το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων θα οδηγεί σε μικρότερο τελικό μήκος τροχιάς για τον κινούμενο κόμβο και ακολούθως χαμηλότερο χρόνο απόκρισης για την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

4.4.2 Αποτελέσματα για την κάλυψη δικτύου με τυχαίο/ ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος

Η εικόνα 46 παρουσιάζει τα αποτελέσματα τόσο του τυχαίου όσο και του ντετερμινιστικού σχήματος συλλογής δεδομένων κινούμενου κόμβου στο δίκτυο αισθητήρων. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς άμεσα από τα αποτελέσματα ότι το απαιτούμενο κόστος σε πλήθος βημάτων/ στάσεων/ θέσεων στο δίκτυο είναι δραστικά μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο απαιτούμενο κόστος σε πλήθος βημάτων της διαδικασίας συλλογής δεδομένων με προώθηση μοναδιαίου βήματος (τυχαίο ή ντετερμινιστικό). Οι απαιτήσεις σε πλήθος βημάτων στην περίπτωση των αποτελεσμάτων που εξετάζουμε τώρα είναι της τάξης των δεκάδων χιλιάδων βημάτων/ στάσεων/ θέσεων (10000-40000). Αντίθετα, οι αντίστοιχες απαιτήσεις σε πλήθος βημάτων κάτω από μοναδιαία προώθηση δεδομένων στο δίκτυο ήταν της τάξης των χιλιάδων βημάτων/ στάσεων/ θέσεων (1000-4000).

Περαιτέρω μπορεί να αναλυθεί από την Εικόνα 46 ότι το τυχαίο σχήμα κίνησης στο δίκτυο οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα κάλυψης του δικτύου αισθητήρων για συγκριτικά ίδια ποσά του προσφερόμενου πληθους βημάτων/ στάσεων/ θέσεων με το ντετερμινιστικό σχήμα. Η κάλυψη δικτύου στην Εικόνα 46 για το τυχαίο σχήμα κίνησης του κόμβου συλλογής δεδομένων είναι το τυπικό, αναμενόμενο αποτέλεσμα για την κάλυψη δικτύου όταν γίνεται προώθηση στον τυχαίο γεωμετρικό γράφο από έναν τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση. Μπορεί κανείς να δει ότι γίνεται μερική κάλυψη του γράφου για αριθμό βημάτων/ στάσεων/ θέσεων που είναι $O(N)$, ενώ πλήρης κάλυψη στο γράφο γίνεται όταν το πλήθος των βημάτων/ στάσεων/ θέσεων γίνεται $O(N \log N)$ στην καλύτερη περίπτωση ενώ είναι πολυωνυμικό στο N σε άλλες περιπτώσεις τυχαίων γεωμετρικών γράφων. Τα ίδια αποτελέσματα έχουν επιβεβαιωθεί ανεξάρτητα και από άλλες εργασίες που αφορούν τους τυχαίους γεωμετρικούς γράφους, όπως είναι το [88].



Εικόνα 46 Κάλυψη δικτύου από κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων κάτω από προώθηση δεδομένων (σχεδόν) μηδενικού βήματος

Το δεύτερο γράφημα που εμφανίζεται στην Εικόνα 46 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το ντετερμινιστικό σχήμα συλλογής δεδομένων κάτω από (σχεδόν) μηδενική προώθηση δεδομένων. Η παρουσία των τετράγωνων υπο περιοχών της διαμέρισης του πεδίου και η δυνατότητα που δίνεται στον κινούμενο κόμβο συλλογής δεδομένων να αποχωρεί από την εκάστοτε περιοχή που είναι τωρινά επισκεπτόμενος (δεδομένου ότι έχει μείνει για αρκετό αριθμό βημάτων ώστε να εξερευνήσει αυτή την υπο περιοχή) και να μεταφέρεται στην επόμενη τετράγωνη υπο περιοχή, όπου ξεκινά έναν καινούριο σύντομο τυχαίο περίπατο χωρίς οπισθοδρόμηση (η μετακίνηση μεταξύ των διάφορων υπο περιοχών γίνεται σύμφωνα με το Χαμιλτονιανό φιδάκι όπως παρουσιάστηκε προηγούμενα) οφελεί σημαντικά την τελική κάλυψη δικτύου, ιδιαίτερα για τις περιοχές του γραφήματος όπου είναι τα χαμηλά προσφερόμενα πλήθη βημάτων/ στάσεων/ θέσεων (για μικρά budget).

Ένα πιο συγκεκριμένο αποτέλεσμα που υποδεικνύει τη βελτίωση στα αποτελέσματα κάλυψης δικτύου όταν γίνεται εισαγωγή του ντετερμινιστικού σχήματος συλλογής δεδομένων κάτω από (σχεδόν) μηδενική προώθηση δεδομένων μπορεί κανείς να

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
παρατηρήσει όταν κοιτά το απαραίτητο πλήθος βημάτων/ στάσεων/ θέσεων (budget) για 95% κάλυψη δικτύου με τα δύο σχήματα. Στο σχήμα με το ντετερμινιστικό προσδιορισμό της κίνησης του κόμβου συλλογής δεδομένων απαιτείται ένα πλήθος προσφερόμενων βημάτων που προσεγγίζει το $H=28000$, σε αντίθεση με το σχήμα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιεί τυχαία κίνηση και απαιτεί ένα πλήθος βημάτων της τάξης του $H=50000$. Η βελτίωση σε απαιτούμενο πλήθος βημάτων για σχεδόν πλήρη κάλυψη του δικτύου αισθητήρων είναι της τάξης του 44% (αντιστοιχεί τόσο σε μείωση του πλήθους βημάτων όσο και σε μείωση της συνολικής απόστασης που καλύπτει ο κινούμενος κόμβος και σε καθυστέρηση για την επίτευξη του στόχου συλλογής δεδομένων). Η βελτίωση στα απαιτούμενα βήματα για κάλυψη δικτύου επιτυγχάνεται με κόστος την αύξηση της πολυπλοκότητας της προτεινόμενης μεθόδου συλλογής δεδομένων (η πολυπλοκότητα σχετίζεται με την ύπαρξη των αυστηρά καθορισμένων υπο περιοχών και της καθοδήγησης του κινούμενου κόμβου από το Χαμιλτονιανό φιδάκι).

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε
μεγάλου εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

| | |
|-----|----------------------------|
| ΑΔΑ | Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων |
| ΤΟ | Τυχαίος Περίπατος |
| ΔΟΧ | Δίκτυο Ομότιμων Χρηστών |
| ΤΓΓ | Τυχαίος Γεωμετρικός Γράφος |

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, “Wireless Integrated Network Sensors,” In Communications of the ACM, 2000.
- [2] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, M. Srivastava, “Instrumenting the World with Wireless Sensor Networks,” In Intern. Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001), 2001
- [3] R. Govindan, T. Faber, J. Heidemann, D. Estrin, “Ad-Hoc Smart Environments”, USC Technical Report 99-692, In Proceedings of the DARPA/NIST Workshop on Smart Environments, Atlanta, June 1999
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey”, Elsevier Computer Networks, 2002
- [5] S. Tilak, N. Abu-Ghazaleh, W. Heinzelman, “A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models”, ACM Mobile Computing and Communications Review, April 2002
- [6] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann and S. Kumar, “Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks“, In Proceedings of the Fifth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM '99), August 1999, Seattle, Washington
- [7] Asada, G., Dong, M., Lin, T., Newberg, F., Pottie, G., Marcy, H., and Kaiser, W. Wireless integrated network sensors: Low-power systems on a chip. In Proceedings of the 24th IEEE European Solid-State Circuits Conference (Den Hague, The Netherlands, Sept. 21–25). Elsevier, 1998, 9–12.
- [8] Bult, K., Burstein, A., Chang, D., Dong, M., Fielding, M., Kruglick, E., Ho, J., Lin, F., Lin, T.-H., Kaiser, W., Marcy, H., Mukai, R., Nelson, P., Newberg, F., Pister, K., Pottie, G., Sanchez, H., Stafsudd, O., Tan, K., Ward, C., Xue, S., and Yao, J. Low-power systems for wireless microsensors. In Proceedings of the International Symposium on Low- Power Electronics and Design (Monterey, Calif., Aug. 12–14). IEEE, New York, 1996, 17–21
- [9] Dong, M., Yung, G., and Kaiser, W. Low-power signal processing architectures for network microsensors. In Proceedings of the 1997 International Symposium on Low-

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Power Electronics and Design (Monterey, Calif., Aug. 18–20). IEEE, New York, 1997, 173–177.

[10] Lin, T.-H., Sanchez, H., Rofougaran, R., and Kaiser, W. CMOS frontend components for micropower RF wireless systems. In Proceedings of the 1998 International Symposium on Low-Power Electronics and Design (Monterey, Calif., Aug. 10–12). IEEE, New York, 1998, 11–15.

[11] G. Hoblos, M. Staroswiecki, A. Aitouche, Optimal design of fault tolerant sensor networks, IEEE International Conference on Control Applications, Anchorage, AK, September 2000, pp. 467–472.

[12] D. Nadig, S.S. Iyengar, A new architecture for distributed sensor integration, Proceedings of IEEE Southeastcon'93, Charlotte, NC, April 1993.

[13] C. Shen, C. Srisathapornphat, C. Jaikaeo, Sensor information networking architecture and applications, IEEE Personal Communications, August 2001, pp. 52–59.

[14] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton and J. Zhao, “Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology”, ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, Costa Rica, April 2001

[15] S. Cho, A. Chandrakasan, Energy-efficient protocols for low duty cycle wireless microsensors, Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI Vol. 2 (2000), p. 10.

[16] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, J. Heidemann, Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems, International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001), Ambleside, UK, July 2001.

[17] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 272–286.

[18] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis, V.Z. Groza, Sensor-based information appliances, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine (December 2000) 31–35.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

[19] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", In Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), August 2000, Boston, Massachusetts

[20] Yan Yu, Ramesh Govindan and Deborah Estrin, "Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks ", UCLA Computer Science Department Technical Report UCLA/CSD-TR-01-0023, May 2001

[21] S. Singh, C.S. Raghavendra, "PAMAS – Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks", ACM Computer Communication Review, July 1999

[22] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan and R. Morris, "Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers, Wireless Networks, 2002

[23] J. Chang and L. 55, "Energy conserving routing in wireless ad hoc networks", in Proc. Of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Network (MobiCom), Dallas, Texas, August 1998

[24] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", Proc. of the Hawaii International Conference on System Sciences, Jan 2000

[25] X. Cheng, B. Narahari, R. Simha, and D .Liu, "Strong Minimum Energy Topology in Wireless Sensor Networks: NP-Completeness and Heuristics", IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 2, No.3, July-September 2003

[26] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl and Y. Wang, "Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks", Proc. INFOCOM 2001

[27] D. Braginsky and D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm For Sensor Networks", In Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), September 28 2002, Atlanta, GA

[28] W. Rabiner Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the Fifth

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε
μεγάλου εύρους Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking
(MobiCom '99), Seattle, Washington, August 15-20, 1999, pp. 174-185.

[29] A. 57, S. Ganeriwal and M. Srivastava, “Aggregation in Sensor Networks: A Energy-Accuracy Trade-off”, Elsevier, Ad Hoc Networks, 2003

[30] R. Ramanathan, R. Rosales-Hain, “Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment”, Proc. INFOCOM 2000

[31] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, and D. Ganesan, “Building efficient wireless sensor networks with lowlevel naming,” in Proceedings of the Eighteenth ACM Symp. on Operating Systems Principles [21], Oct. 2001, pp. 146–159.

[32] D. Johnson, D. Maltz, Y-C. Hu, and J. Jetcheva, “The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks,” Internet Draft, Internet Engineering Task Force, Mar. 2001, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-05.txt>

[33] C. Perkins, E. Royer, and S. Das, “Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing,” Internet Draft, Internet Engineering Task Force, Mar. 2001, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draftietf-manet-aodv-08.txt>.

[34] W. Heinzelman, Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[35] Charles Perkins and Pravin Bhagwat, “Highly dynamic destination-sequenced distance-vec Volume 33, Issue 1 (January 2003) for routing (DSDV) for mobile computers,” in ACM SIGCOMM'94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, Aug.1994, pp. 234–244.

[36] Hector Garcia-Molina Yongqiang Huang, “Publish/ Subscribe in a mobile enviroment,” in International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access, 2001, pp. 27–34.

[37] Sylvia Ratnasamy, Deborah Estrin, Ramesh Govindan, Brad Karp, Scott Shenker, Li Yin, and Fang Yu, “Data-centric storage in Sensornets,” ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 33 , Issue 1 (January 2003)

[38] S. Hedetniemi, A. Liestman, A survey of gossiping and broadcasting in communication networks, Networks 18 (4) (1988) 319–349.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

- [39] J. S. Liu and C. H. Liu, "Energy efficiency clustering protocol in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, 3(3), 371-388, May 2005
- [40] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed clustering for ad hoc sensor networks, A hybrid, energy-efficient approach," In *Proc. of IEEE Infocom'04*, Hong Kong, Mar. 2004.
- [41] R. Krishnan and D. Starobinsky, "Efficient clustering algorithms for self-organizing wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, 2005.
- [42] Omnetpp Discrete Event Simulator System, <http://www.omnetpp.org>
- [43] S. Bandyopadhyay and E. Coyle, "An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM'03*, 2003.
- [44] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann and S. Kumar, "Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks," in *Proc. Of ACM MobiCom'99*, August 1999, pp. 263-270.
- [45] H. Chan and A. Perrig, "Ace: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation," in *Proc. of IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'04)*, Springer Verlag, January 2004, pp. 154--171.
- [46] C. V. Ramamoorthy, A. Bhide, and J. Srivastava, "Reliable clustering techniques for large, mobile packet radio networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM'87*, San Francisco, USA, March 1987.
- [47] A. Papoulis and S. U. Pillai, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes," 4th. Edition, Mc Graw Hill, 2002.
- [48] C. Avin and C. Brito, "Efficient and robust query processing in dynamic environments using random walk techniques," in *Proc. the Third IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004)*, Berkeley, California, April 2004
- [49] L. Lima and J. Barros, "Random walks on sensor networks," in *Proc. 5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks (WiOpt 2007)*, Limassol, Cyprus, April 2007.
- [50] M. Mihail, C. Gkantsidis and A. Saberi, "Random walks in peer-to-peer networks," in *Proc. of INFOCOM'04*, Hong Kong, 2004.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

[51] C. Avin and G. Ergal, “Bounds on the mixing time and partial cover of ad-hoc and sensor networks,” in Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN), Istanbul, Turkey, 2005.

[52] A. Segal, “Distributed network protocols,” IEEE Trans. On Information Theory, IT(29): 23–35, 1983.

[53] B. Williams and T. Camp, “Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks,” In MOBIHOC 2002, pages 194–205, 2002.

[54] K. Oikonomou and I. Stavrakakis, “Performance analysis of probabilistic flooding using random graphs,” In Proc. 1st Workshop on Autonomic and Opportunistic Networking (AOC), Helsinki, Finland, June 2007.

[55] D. Tsoumakos and N. Roussopoulos “Adaptive probabilistic search for peer-to-peer networks,” In 3rd IEEE Intern. Conference in Peer-to-Peer Computing (P2P 2003), Loping, Sweden, 1-3 September, 2003.

[56] M. B. Yassein, M. Ould-Khaoua and S.Papanastasiou, “On the performance of probabilistic flooding in mobile ad hoc networks,” In 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPAD’05), 20-22 July, Fukuoka, Japan, 2005

[57] S. D. Servetto, “Constrained random walks on random graphs: routing algorithms for large scale wireless sensor networks,” In Proc. of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pages 12–21, 2002.

[58] S. Dolev, E. Schiller, J. Welch, Random walk for self-stabilizing group communication in ad hoc networks, IEEE Trans. on Mobile Computing 5 (7).

[59] C. Avin, B. Krishnamachari, The power of choice in random walks: An empirical study, in: Proc. 9th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, (MSWiM), Malaga, Spain, 2006.

[60] D. Braginsky, Rumor routing algorithm for sensor networks, in: WSNA '02: 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, Georgia, 2002.

[61] M. Penrose, Random Geometric Graphs, Oxford Studies in probability, Oxford University Press, 2003.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

[62] R. Albert, A.-L. Barabasi, Statistical mechanics of complex networks, Rev.Mod. Phys. 74 (1) (2002) 47{97. doi:10.1103/RevModPhys.74.47.

[63] C. Gkantsidis, M. Mihail, A. Saberi, Random walks in peer-to-peer networks, in: Proc. of INFOCOM'04, Hong Kong, 2004.

[64] Y. Chawathe, S. Ratnasamy, L. Breslau, N. Lanham, S. Shenker, Making gnutella-like p2p systems scalable, in: SIGCOMM '03: Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, ACM, New York, NY, USA, 2003, pp. 407-418.

[65] I. Mabrouki, X. Lagrange, G. Froc, Random walk based routing protocol for wireless sensor networks, in: Proc. of 2nd int. conference on performance evaluation methodologies and tools (ValueTools'07), Nantes, France, 2007

[66] A. D. Sarma, D. Nanongkai, G. Pandurangan, Fast distributed random walks in: Proc. of the 28th ACM symposium on Principles of distributed computing (PODC), Alberta, Canada, 2009.

[67] L. Lov'asz, Random walks on graphs: a survey, Combinatorics, Paul Erdos is Eighty, J. Bolyai Math. Soc., Vol. II 2 (1996) 353-397.

[68] C. Avin, G. Ercal, On the cover time of random geometric graphs, in: ICALP 2005, 2005, pp. 677-689.

[69] L. Tzevelekas, I. Stavrakakis, Improving partial cover of random walks in large scale wireless sensor networks, in: 3rd IEEE WoWMoM Workshop on Autonomic and Opportunistic Communications (AOC'09), Kos, Greece, 2009.

[70] <http://www.omnetpp.org>

[71] D. Kogias, K. Oikonomou and I. Stavrakakis. Study of randomly replicated random walks for information dissemination over various network topologies. In Proc. Sixth Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services, IFIP/IEEE WONS 2009, Feb. 2-4, 2009. Snowbird, Utah, USA

[72] I. Chatzigiannakis, T. Dimitriou, S. Nikolettseas, and P. Spirakis. A probabilistic forwarding protocol for efficient data propagation in sensor networks. Ad Hoc Networks Journal, 4:344–350, 2005.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

[73] K. Oikonomou and I. Stavrakakis. Performance analysis of probabilistic flooding using random graphs. In 1st IEEE Workshop on Autonomic and Opportunistic Communications (AOC), Helsinki, Finland, June 2007

[74] P. Leone, J. Rolin, and S. Nikolettseas. An adaptive blind algorithm for energy balanced data propagation in wireless sensor networks, IEEE DCOSS, LNCS 3267:60–69, 2005.

[75] X. Tang and J. Xu. Adaptive data collection strategies for lifetime constraint wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 19:721–734, June 2008.

[76] W. Cheng, C.Chou, L.Golubchik, S.Kuller, and Y.C.Wan. A coordinated data collection approach: design, evaluation and comparison. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on), 22, December 2004

[77] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy efficient communication protocol for wireless micro sensor networks. In 33rd IEEE HICSS, 2000.

[78] A. Kansal, A. A. Somasundara, D. D. Jea, M. B. Srivastava, and D. Estrin. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks. In MobiSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services, pages 111–124, New York, NY, USA, 2004.

[79] D. Jea, A. Somasundara, and M. Srivastava. Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks. In DCOSS 2005, pages 244–257. Springer Verlag, 2005.

[80] R. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data mules: modeling a three tier architecture for sparse networks. Ad hoc Networks, 1(2-3):215–233, September 2005.

[81] A. Chakrabarty, A. Sabharwal, and B. Aazhang. Using predictable observer mobility for power efficient design of a sensor network. In 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), April 2003.

[82] M. Ma and Y. Yang. Sencar: an energy efficient data gathering mechanism for large scale multi-hop sensor networks. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, 18(10), October 2007.

Μελέτη αποδοτικών αλγορίθμων για τον έλεγχο τοπολογίας και τη διάχυση/ συλλογή πληροφοριών σε μεγάλο εύρος Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

[83] M. Ma and Y. Yang. Data gathering in wireless sensor networks with mobile collectors. In IEEE International Parallel Distributed Processing Symposium (IPDPS), Miami, Florida, USA, April 14-18, 2008.

[84] P. Gupta and P. Kumar. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications, 1998

[85] L. Tzevelekas and I. Stavrakakis. Improving partial cover of random walks in large scale wireless sensor networks. In 3rd IEEE WoWMoM Workshop on Autonomic and Opportunistic Communications (AOC), Kos Island, Greece, June 15 2009

[86] A. G. Dimakis, A. D. Sarwate, and M. J. Wainwright. Geographic gossip: efficient aggregation for sensor networks. In Proc. 5th International ACM/IEEE Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Nashville, TN, April 2006

[87] A. Giannakos, G. Karagiorgos, and I. Stavrakakis. A message-optimal sink mobility model for wireless sensor networks. In 8th Int. Conf. on Networks (ICN'09), Cancun, Mexico, March 1-9 2009

[88] L. Lov'asz. Random walks on graphs: a survey. Combinatorics, Paul Erdos is Eighty, J. Bolyai Math. Soc., Vol. II, 2:353–397, 1996

[89] C. Avin, G. Ercal, On the cover time of random geometric graphs, in: ICALP. (2005), pp. 677–689.