



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΤΜΗΜΑ

Μεταπτυχιακή διατριβή

Energy – Aware Scoping Algorithm and Energy Saving Techniques for Wireless Sensor Networks

Καλογερίνης Π. Νικόλαος

Εργαστήριο Πληροφορίας και Δικτύων

E-mail: nickkal@telecom.tuc.gr

Επιτροπή: Καθ. Μ. Πατεράκης (επιβλέπων)

Καθ. Β. Διγαλάκης

Καθ. Ν. Σιδηρόπουλος

Χανιά, Ιούλιος 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 Εφαρμογές και λειτουργία δικτύων αισθητήρων	3
1.1 Γενικά περί δικτύων αισθητήρων	3
1.2 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων	5
1.2.1 Στρατιωτικές εφαρμογές	6
1.2.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές	7
1.2.3 Εφαρμογές στην υγεία	8
1.2.4 Οικιακές εφαρμογές	8
1.2.5 Άλλες εμπορικές εφαρμογές	9
1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων	10
1.3.1 Ανοχή σε σφάλματα	10
1.3.2 Scalability	11
1.3.3 Κόστος παραγωγής	11
1.3.4 Περιορισμοί από το hardware	11
1.3.5 Τοπολογία δικτύου αισθητήρων	14
1.3.6 Περιβάλλον	16
1.3.7 Μέσο μετάδοσης	16
1.3.8 Κατανάλωση ενέργειας	17
1.4 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας δικτύων αισθητήρων	18
1.4.1 Επίπεδο εφαρμογής (Application layer)	20
1.4.2 Επίπεδο μεταφοράς (Transportation layer)	22
1.4.3 Επίπεδο δικτύου (Network layer)	22
1.4.4 Επίπεδο διαμεταγωγής δεδομένων (Data link layer)	24
1.4.5 Επίπεδο φυσικής ζεύξης (Physical layer)	26
1.5 Επίλογος	27
2 Διαχείριση ενέργειας και scoring σε δίκτυα αισθητήρων	28
2.1 Διαχείριση ενέργειας μέσω του πρωτόκολλου SMAC (Sensor MAC)	29
2.1.1 Σχετική έρευνα	31
2.1.2 Αρχιτεκτονική του SMAC	33
2.1.3 Coordinated Sleeping	35
2.1.4 Τεχνικές overhearing avoidance και message passing	38
2.1.5 Επίλογος	41
2.2 Scoring σε δίκτυα αισθητήρων με τη χρήση του αλγόριθμου Voronoi	42
2.2.1 Εισαγωγή	42
2.2.2 Μοντέλο scoring	44
2.2.3 Ο αλγόριθμος Voronoi	45

2.2.4	Παράδειγμα εφαρμογής	47
2.2.5	Ιδιότητες του αλγορίθμου Voronoi	48
2.2.6	Υψηλότερης τάξης Voronoi scoring	49
2.2.7	Εναλλακτικές τεχνικές scoring σε δίκτυα αισθητήρων	50
2.2.8	Επίλογος	51
3	Εφαρμογή και μελέτη απόδοσης δικτύου αισθητήρων	52
3.1	Επεκτάσεις προς μελέτη	52
3.2	Η εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων	54
3.3	Σενάρια προσομοιώσεων	59
3.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	64
3.4.1	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 1	65
3.4.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 2	66
3.4.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 3	67
3.4.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 4	75
4	Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	83
4.1	Συμπεράσματα	83
4.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	85
4.3	Επίλογος	89
	References	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή – Εφαρμογές και λειτουργία δικτύων αισθητήρων

Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στους τομείς των μικρό-ηλεκτρονικών και μικρό-μηχανικών συστημάτων, των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και των ψηφιακών ηλεκτρονικών συστημάτων επέτρεψαν την ανάπτυξη χαμηλού κόστους και κατανάλωσης ενέργειας, πολύ-λειτουργικών αισθητήρων με μικρό μέγεθος, ικανών να επικοινωνούν με αυτονομία σε μικρές αποστάσεις. Αυτοί οι μικροί αισθητήρες, αποτελούμενοι από ειδικά τμήματα συλλογής δεδομένων από το περιβάλλον, επεξεργασίας των δεδομένων και επικοινωνίας, εισάγουν την ιδέα δικτύων αισθητήρων βασισμένων στην συνεργασία και το συντονισμό ενός μεγάλου αριθμού κόμβων (αισθητήρων). Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια σημαντική πρόοδο σε σχέση με τους παραδοσιακούς αισθητήρες όπως τους γνωρίζαμε μέχρι πρότινος, κυρίως με τους δύο παρακάτω τρόπους [1]:

- Οι αισθητήρες μπορεί να είναι τοποθετημένοι μακριά από το προς μελέτη *φαινόμενο* (συμβάν, ένα γεγονός που μπορεί να μετρηθεί). Δεδομένου αυτού, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση μηχανισμών ικανών να ξεχωρίζουν την μετρούμενη ποσότητα σε σχέση με τον θόρυβο του περιβάλλοντος.
- Οι αισθητήρες μπορεί να είναι αυτόνομοι με την έννοια ότι μπορεί να εκτελούν μόνο την λειτουργία της *αίσθησης* (συλλογής δεδομένων από το περιβάλλον). Η θέση των αισθητήρων καθώς και ο τρόπος μεταξύ τους επικοινωνίας πρέπει να μελετηθούν διεξοδικά. Σε αυτή την περίπτωση οι αισθητήρες μεταδίδουν τις ακολουθίες από δεδομένα που συλλέγουν σε κεντρικούς κόμβους, οι οποίοι τα επεξεργάζονται και τα προωθούν εκεί όπου χρειάζονται.

1.1 Γενικά περί δικτύων αισθητήρων

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό αισθητήρων οι οποίοι είναι διάσπαρτα τοποθετημένοι είτε μέσα στην περιοχή του φαινομένου προς παρακολούθηση είτε πολύ κοντά σε αυτό. Γενικά, η θέση του κάθε αισθητήρα δεν θα πρέπει να είναι προμελετημένη ή προκαθορισμένη. Αυτό επιτρέπει τυχαία τοποθέτηση σε δύσβατες περιοχές ή επιχειρήσεις άμεσης παροχής βοήθειας λόγω καταστροφών για παράδειγμα. Από την άλλη πλευρά, το ίδιο αυτό γεγονός προϋποθέτει την υλοποίηση και ενσωμάτωση στο δίκτυο αλγορίθμων αυτόματης οργάνωσης και λειτουργίας. Επιπλέον ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των δικτύων αισθητήρων είναι η δυνατότητα που έχουν οι κόμβοι να συνεργάζονται και να συντονίζονται με τους γειτονικούς τους. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι

κόμβοι (σαν κόμβους θα ονομάζουμε στο εξής τα στοιχεία ενός δικτύου αισθητήρων ακριβώς γιατί δεν είναι μόνο αισθητήρες αλλά σύνθετοι μηχανισμοί που εμπεριέχουν και άλλες λειτουργικές μονάδες) είναι εξοπλισμένοι και με έναν μικροεπεξεργαστή. Έτσι, αντί για να μεταδίδουν άμεσα τα δεδομένα που συλλέγουν, χρησιμοποιούν τις υπολογιστικές τους δυνατότητες για να διεκπεραιώσουν απλούς υπολογισμούς και συνεπώς να μεταδώσουν μόνο το χρήσιμο και απαραίτητο μέρος της πληροφορίας που έχει συλλεχθεί.

Τα χαρακτηριστικά που μόλις περιγράψαμε δημιουργούν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών για τα δίκτυα αισθητήρων. Μερικές από τις εφαρμογές είναι στρατιωτικές, υγείας και ασφάλειας. Για παράδειγμα, τα δεδομένα παρακολούθησης ενός ασθενή όσον αφορά την πορεία της υγείας του μπορούν να παρακολουθούνται εξ' αποστάσεως από τον υπεύθυνο γιατρό. Αυτό είναι πιο χρήσιμο και για τον ασθενή αλλά και για τον γιατρό καθώς αυτός μπορεί να έχει μια πιο συνεχή και ολοκληρωμένη εικόνα για τον ασθενή του. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για την ανίχνευση ξένων στοιχείων στη θάλασσα ή στον αέρα. Ένα τέτοιο δίκτυο θα βοηθούσε στην εξακρίβωση του τύπου, της συγκέντρωσης και της τοποθεσίας της μόλυνσης. Σε κάθε περίπτωση, τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να παρέχουν στον τελικό χρήστη συνεχή γνώση και καλύτερη κατανόηση του περιβάλλοντος. Προβλέπεται ότι στο μέλλον, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα γίνουν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής των ανθρώπων όπως και οι προσωπικοί υπολογιστές στις μέρες μας.

Η υλοποίηση των παραπάνω αλλά και άλλων δικτύων αισθητήρων απαιτεί τεχνικές ασύρματης *ad hoc* δικτύωσης. Παρόλο που έχουν προταθεί πολλά πρωτόκολλα και αλγόριθμοι για τα παραδοσιακά *ad hoc* δίκτυα, αυτά δεν συμβαδίζουν με τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις των εφαρμογών των δικτύων αισθητήρων. Πιο αναλυτικά, οι διαφορές μεταξύ παραδοσιακών *ad hoc* δικτύων και των δικτύων αισθητήρων συνοψίζονται ως εξής (Perkins [2000]):

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων σε ένα παραδοσιακό *ad hoc* δίκτυο.
- Οι κόμβοι αισθητήρων τοποθετούνται με μεγάλη πυκνότητα στην περιοχή κάλυψης.
- Οι κόμβοι αισθητήρων είναι πιθανόν να παρουσιάσουν αστοχίες.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων μπορεί να αλλάζει διαρκώς.
- Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν μοντέλο επικοινωνίας *broadcast* τη στιγμή που τα περισσότερα *ad hoc* δίκτυα βασίζονται στην *point-to-point* επικοινωνία.

- Οι κόμβοι αισθητήρων έχουν περιορισμένους πόρους σε ενέργεια, επεξεργαστικές δυνατότητες και μνήμη.
- Είναι πιθανόν οι κόμβοι αισθητήρων να μην έχουν χαρακτηριστικό αναγνώρισης (global identification ID) λόγω του μεγάλου αριθμού και του μεγάλου overhead που δημιουργεί στην επικοινωνία.

Από τη στιγμή που οι κόμβοι τοποθετούνται με μεγάλη πυκνότητα, οι γειτονικοί κόμβοι μπορεί να είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο. Συνεπώς, η επικοινωνία multi hop στα δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την παραδοσιακή single hop επικοινωνία. Επιπλέον, τα επίπεδα ισχύος στις μεταδόσεις μπορούν να κρατηθούν χαμηλά, γεγονός που είναι πολλές φορές ιδιαίτερα επιθυμητό σε στρατιωτικές εφαρμογές. Η επικοινωνία multi hop επίσης μπορεί να εξαλείψει σημαντικά μερικά ανεπιθύμητα φαινόμενα που εμφανίζονται σε ασύρματες διαδόσεις σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, όπως για παράδειγμα multipath fading κ.α.

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι η ανάγκη για χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Οι κόμβοι είναι εφοδιασμένοι με περιορισμένης χωρητικότητας, συνήθως μη αντικαταστάσιμες πηγές ενέργειας. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα που στοχεύουν κυρίως στην επίτευξη υψηλού επιπέδου παροχής υπηρεσιών (QoS), τα πρωτόκολλα δικτύων αισθητήρων στοχεύουν πρωτίστως στην μειωμένη κατανάλωση ισχύος. Κατά συνέπεια τα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να εμπεριέχουν μηχανισμούς που θα επιτρέπουν την επιμήκυνση της βιωσιμότητας του δικτύου με κόστος χαμηλότερο throughput ή υψηλότερη καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων.

Στις μέρες μας γίνεται πολλή έρευνα πάνω στην ανάπτυξη σχημάτων που θα πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μερικά από τα πρωτόκολλα και τους αλγόριθμους που έχουν σχεδιαστεί για τα δίκτυα αισθητήρων, καθώς και εφαρμογές και περιορισμούς που θέτει η κάθε εφαρμογή.

1.2 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων

Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς τύπους αισθητήρων όπως για παράδειγμα σεισμικών, μαγνητικών, θερμικών, οπτικών, υπέρυθρων, ακουστικών ή και radar, ικανών να καταγράφουν ένα μεγάλο εύρος από τις συνθήκες του περιβάλλοντος όπως οι παρακάτω (Estrin, Govindan et al. [1999]):

- Θερμοκρασία
- Σχετική υγρασία

- Κίνηση οχημάτων
- Συνθήκες φωτισμού
- Πίεση
- Επίπεδα θορύβου
- Παρουσία ή απουσία συγκεκριμένων αντικειμένων
- Επίπεδα μηχανικής πίεσης που ασκείται στα αντικείμενα στα οποία είναι προσκολλημένος ο αισθητήρας
- Στιγμιαία χαρακτηριστικά όπως η ταχύτητα, η κατεύθυνση και το μέγεθος ενός αντικειμένου

Οι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή συλλογή πληροφορίας, ανίχνευση συμβάντων, και μερικό έλεγχο μηχανικών συστημάτων. Η ιδέα της μικρό-αίσθησης και της ασύρματης δικτύωσης αυτών των κόμβων υπόσχεται πολλά νέα πεδία εφαρμογών. Θα μπορούσαμε να κατηγοριοποιήσουμε αυτές τις εφαρμογές σε στρατιωτικές, περιβαλλοντικές, εφαρμογές υγείας, οικιακές και άλλες εμπορικές εφαρμογές. Επίσης μπορούμε να επεκτείνουμε αυτή την κατηγοριοποίηση με περισσότερες κατηγορίες όπως εξερεύνηση διαστήματος, χημικές διεργασίες και ανακούφιση από καταστροφικά γεγονότα.

1.2.1 Στρατιωτικές εφαρμογές

Οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων μπορεί να είναι τμήματα συστημάτων καθοδήγησης, ελέγχου, επικοινωνιών, υπολογισμού, παρακολούθησης, ανίχνευσης, αναγνώρισης και στόχευσης (C4ISRT Systems). Η γρήγορη ανάπτυξη, η αυτό-οργάνωση, και η ανοχή σε σφάλματα είναι χαρακτηριστικά τα οποία καθιστούν τα δίκτυα αισθητήρων πολλά υποσχόμενα για στρατιωτικές εφαρμογές. Από τη στιγμή που τα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην πυκνή ανάπτυξη αναλώσιμων, χαμηλού κόστους κόμβων, η καταστροφή από τον εχθρό μερικών κόμβων δεν επηρεάζει μια στρατιωτική εφαρμογή τόσο όσο η καταστροφή ενός παραδοσιακού κόμβου, γεγονός που καθιστά μια στρατιωτική εφαρμογή δικτύου αισθητήρων ιδανική για πεδία μαχών. Μερικές από τις στρατιωτικές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων αναλαμβάνουν την παρακολούθηση φιλικών δυνάμεων, εξοπλισμού και πυρομαχικών, παρακολούθηση του πεδίου μάχης, αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων και του πεδίου, στόχευση, αξιολόγηση απωλειών ή και αναγνώριση και ανίχνευση πυρηνικών, βιολογικών και χημικών όπλων.

Παρακολούθηση φιλικών δυνάμεων, εξοπλισμού και πυρομαχικών. Οι στρατιωτικοί και οι συντονιστές μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση των στρατευμάτων τους, την διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και των πυρομαχικών σε

ένα πεδίο μάχης με τη χρήση ενός δικτύου αισθητήρων. Σε κάθε στρατιώτη, όχημα, όπλο ή ειδικής σημασίας απόθεμα πυρομαχικών μπορεί να προσαρτηθεί ένας ειδικός αισθητήρας ο οποίος θα αναφέρει την κατάσταση του αντικειμένου. Αυτές οι αναφορές συλλέγονται από τους ειδικούς κόμβους συλλογής δεδομένων (sinks) και αποστέλλονται στους στρατιωτικούς συντονιστές. Τα ίδια δεδομένα μπορεί να προωθούνται στις ανώτερες τάξεις της ιεραρχίας και να συνδυάζονται με δεδομένα από άλλα πεδία μάχης.

Παρακολούθηση πεδίου μάχης. Στρατηγικής σημασίας περιοχές, διαδρομές προσέγγισης, μονοπάτια και δίοδοι μπορούν να καλυφθούν γρήγορα με κόμβους και να παρακολουθούνται στενά για μετακινήσεις των εχθρικών δυνάμεων. Καθώς οι επιχειρήσεις εξελίσσονται και νέα επιχειρησιακά πλάνα ετοιμάζονται, νέα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αναπτυχθούν για παρακολούθηση μιας νέας περιοχής.

Αναγνώριση εχθρικών δυνάμεων και πεδίου μάχης. Δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αναπτυχθούν σε ζωτικής σημασίας περιοχές και κατά συνέπεια πολύτιμες, λεπτομερείς και άμεσες πληροφορίες για τις εχθρικές δυνάμεις μπορούν να συλλεχθούν μέσα σε ελάχιστο χρόνο.

1.2.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Μερικές περιβαλλοντικές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν καταγραφή της κίνησης πουλιών, μικρών ζώων και εντόμων, παρακολούθηση περιβαλλοντολογικών συνθηκών που επηρεάζουν τους σπόρους και το απόθεμα γεωργικών εκμεταλλεύσεων, μακρο-εξαρτήματα για μεγάλης κλίμακας παρακολούθηση περιοχών της Γης, ανίχνευση χημικών / βιολογικών ουσιών, ελεγχόμενες βιολογικές καλλιέργειες, περιβαλλοντική παρακολούθηση λιμανιών, κτημάτων και ατμοσφαιρικών περιοχών, ανίχνευση φωτιάς σε δασικές περιοχές, μετεωρολογική και γεωφυσική έρευνα, ανίχνευση πλημμυρών, βιολογική καταγραφή του περιβάλλοντος και μελέτη περιβαλλοντικής μόλυνσης (Cerpa et al. [2001], Cho & Chandrakasan [2000], Kahn, Katz & Pister [1999]).

Ανίχνευση φωτιάς σε δασικές περιοχές. Εφόσον οι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν τυχαία και με πυκνή κατανομή σε ένα δάσος, μπορούν να ανιχνεύσουν την ακριβή εστία της φωτιάς και να αποστείλουν την πληροφορία στους δασικούς παρατηρητές πριν η φωτιά γίνει ανεξέλεγκτη. Χιλιάδες κόμβοι μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα δάσος χρησιμοποιώντας ραδιοσυχνότητες, οπτικά ή θερμικά συστήματα ανίχνευσης. Επίσης, μπορούν να εξοπλιστούν με αποδοτικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας (Chandrakasan, Amirtharajah et al. [1999]) όπως για παράδειγμα ηλιακές κυψέλες, επειδή οι κόμβοι μπορεί να αφεθούν χωρίς παρακολούθηση για μήνες ή ακόμη και χρόνια. Οι κόμβοι επικοινωνούν με τους

γειτονικούς τους ώστε να διεκπεραιώνουν κατανεμημένη καταγραφή και να παρακάμπτουν εμπόδια όπως βράχοι ή δέντρα που πιθανόν να εμποδίζουν το οπτικό πεδίο των αισθητήρων. Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, οι κόμβοι δεν είναι απαραίτητο να συλλέγουν διαρκώς πληροφορία αλλά μπορούν να κλείνουν τον πομποδέκτη τους και να πραγματοποιούν μέτρηση σε τακτά αλλά αραιά χρονικά διαστήματα (αρκετά συχνά όμως ώστε να προλάβουν οι υπεύθυνοι δασικής παρακολούθησης να αντιδράσουν σε ένα έκτακτο γεγονός). Επίσης, μια ομάδα κόμβων μπορεί να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε ένας κόμβος κάθε φορά να εκπέμπει, δεδομένου ότι το συμβάν μπορεί να ανιχνευτεί από όλη την ομάδα.

Ανίχνευση πλημμυρών. Ένα παράδειγμα εφαρμογής για ανίχνευση πλημμυρών είναι το σύστημα ALERT (Bonnet et al. [2000]) που αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες. Διάφοροι τύποι αισθητήρων περιλαμβάνονται στο σύστημα μεταξύ των οποίων αισθητήρες που μετρούν βροχόπτωση, επίπεδο νερού και κατάσταση καιρικών συνθηκών. Οι αισθητήρες αυτοί τροφοδοτούν με δεδομένα μια κεντρική βάση δεδομένων. Ειδικά ερευνητικά προγράμματα εκτελούνται σε σχέση με το σύστημα ALERT ώστε να μελετηθεί η συλλογή πληροφοριών μέσω long-term ερωτημάτων στο δίκτυο, κυρίως στατιστικής φύσεως και μακρόχρονης καταγραφής των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Ελεγχόμενες βιολογικές καλλιέργειες. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής δικτύων αισθητήρων στην συγκεκριμένη περιοχή είναι η δυνατότητα να παρακολουθείται η συγκέντρωση εντομοκτόνων και λιπασμάτων στο νερό που καταλήγει στον υδάτινο ορίζοντα από τις καλλιέργειες, ο βαθμός διάβρωσης του εδάφους και τα επίπεδα μόλυνσης του αέρα σε πραγματικό χρόνο.

1.2.3 Εφαρμογές στην υγεία

Μερικές από τις εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων στον τομέα της υγείας περιλαμβάνουν την παροχή διευκολύνσεων για τους ανάπηρους, παρακολούθηση ασθενών, άμεση διάγνωση, διαχείριση αποθηκών φαρμάκων στα νοσοκομεία, παρακολούθηση εξ' αποστάσεως των βιολογικών λειτουργιών ενός ασθενή και καταγραφή και παρακολούθηση γιατρών και ασθενών μέσα σε ένα νοσοκομείο (Noury, Herve et al. [2000], Warneke, Liebowitz et al. [2001]).

1.2.4 Οικιακές εφαρμογές

Οικιακός αυτοματισμός. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, έξυπνοι κόμβοι αισθητήρων αλλά και κόμβοι που πέρα από την μέτρηση μπορούν να αναλάβουν και δράση (actuators) μπορούν να ενσωματωθούν σε συσκευές όπως ηλεκτρικές

σκούπες, ψυγεία, φούρνους μικροκυμάτων, και βίντεο. Αυτοί οι μικροί κόμβοι μέσα στις οικιακές συσκευές μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με εξωτερικό δίκτυο όπως το Internet ή άλλο δίκτυο επικοινωνίας και να επιτρέπουν στους τελικούς χρήστες να διαχειρίζονται τις συσκευές τους εξ' αποστάσεως.

Έξυπνα περιβάλλοντα. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να τεθούν στην υπηρεσία του ανθρώπου για τη δημιουργία των λεγόμενων έξυπνων χώρων, είτε σπιτιών είτε χώρων εργασίας, με απώτερο σκοπό τη διευκόλυνση του σε καθημερινές ανάγκες (Abowd & Sterbenz [2000]). Οι κόμβοι προσαρμόζονται στις ανάγκες του ανθρώπου όσον αφορά τις απαιτήσεις του από το περιβάλλον. Διάφοροι κόμβοι σε ξεχωριστά δωμάτια ενός χώρου μπορούν να εξυπηρετούν συγκεκριμένες ανάγκες, ακόμα και να επικοινωνούν μεταξύ τους ώστε να παρέχουν υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης στον άνθρωπό (Herring & Kaplan [2000]). Ακόμη οι κόμβοι μπορούν να λειτουργούν με αυτό-οργάνωση, και να αναλαμβάνουν πρωτοβουλίες με βάση τα δεδομένα που συλλέγουν αν μπορούν να αναλάβουν δράση (αν δηλαδή βρίσκονται προσαρτημένοι και συνδεδεμένοι σε συσκευές).

1.2.5 Άλλες εμπορικές εφαρμογές

Μερικές άλλες εμπορικές εφαρμογές είναι η μέτρηση κόπωσης βιομηχανικών εξαρτημάτων, έλεγχος ποιότητας προϊόντων σε μια γραμμή παραγωγής, ρομποτικός έλεγχος και καθοδήγηση σε κατασκευαστικά περιβάλλοντα, διαδραστικά παιχνίδια, διαδραστικά μουσεία, έξυπνες κατασκευές με ενσωματωμένο δίκτυο αισθητήρων, παρακολούθηση περιοχών που υπέστησαν φυσική καταστροφή, μηχανική διάγνωση, μεταφορά, ανίχνευση και παρακολούθηση κλεμμένων οχημάτων κ.α.

Περιβαλλοντικός έλεγχος σε κτίρια γραφείων. Ο κλιματισμός και η θέρμανση των περισσότερων κτιρίων είναι κεντρικά ελεγχόμενα. Επομένως, η θερμοκρασία μέσα σε ένα δωμάτιο μπορεί να αποκλίνει κατά μερικούς βαθμούς καθώς η μία πλευρά μπορεί να είναι θερμότερη από την άλλη και υπάρχει μόνο μια συσκευή ελέγχου στο δωμάτιο. Αν η ροή αέρα δεν είναι ομαλά κατανεμημένη μέσα στο δωμάτιο, τότε είναι δύσκολο να ρυθμιστεί σωστά η θερμοκρασία. Ένα κατανεμημένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα χώρο ώστε να ελέγχει την ροή αέρα και την θερμοκρασία στις διάφορες περιοχές του χώρου. Έχει υπολογιστεί ότι μια τέτοια κατανεμημένη τεχνολογία μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά δύο τετράκις εκατομμύρια BTUs (British Thermal Units) στις Ηνωμένες Πολιτείες, ποσότητα ικανή να εξοικονομήσει 55 δισεκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο και να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 35 εκατομμύρια τόνους (Rabaey et al. [2000]).

Διαδραστικά μουσεία. Στο μέλλον, τα παιδιά θα μπορούν να αλληλεπιδρούν με αντικείμενα σε μουσεία ώστε να μάθουν περισσότερα από αυτά. Αυτά τα αντικείμενα θα είναι ικανά να αντιδρούν στο άγγιγμα και την ομιλία των παιδιών. Επιπρόσθετα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες εξυπηρέτησης πελατών, ειδοποίησης και εντοπισμού μέσα στο μουσείο. Ένα τέτοιο παράδειγμα μουσείου είναι το San Francisco Exploratorium που περιλαμβάνει συστήματα επεξήγησης στους επισκέπτες και μέτρησης δεδομένων.

Ανίχνευση και παρακολούθηση ληστειών αυτοκινήτων. Κόμβοι αισθητήρων μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να μπορούν να ανιχνεύουν, να αναγνωρίζουν τέτοια περιστατικά και να τα αναφέρουν στη συνέχεια στον ιδιοκτήτη του οχήματος και στις αρχές ασφαλείας.

1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η ανοχή σε σφάλματα, η δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability), το κόστος παραγωγής, το περιβάλλον λειτουργίας, η τοπολογία του δικτύου αισθητήρων, οι περιορισμοί λόγω hardware, το μέσο μετάδοσης και η κατανάλωση ισχύος. Αυτοί οι παράγοντες έχουν γίνει αντικείμενο έρευνας από ερευνητές τα τελευταία χρόνια ώστε να βρεθεί η χρυσή τομή ανάλογα με την εφαρμογή, και είναι σημαντικοί καθώς ορίζουν τη βασική γραμμή για το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου για δίκτυα αισθητήρων.

1.3.1 Ανοχή σε σφάλματα

Μερικοί κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αστοχήσουν, να σταματήσουν να λειτουργούν λόγω έλλειψης ενέργειας ή να μην προσφέρουν στο δίκτυο λόγω παρεμβολών από το περιβάλλον. Η αστοχία ενός κόμβου δεν θα πρέπει να επηρεάσει το συνολικό σκοπό ενός δικτύου αισθητήρων. Αυτό αποτελεί το θέμα της αξιοπιστίας ή αλλιώς της ανοχής σε σφάλματα ενός δικτύου αισθητήρων.

Σημειώνεται εδώ πως τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι που σχεδιάζονται προκειμένου να υλοποιηθούν σε ένα δίκτυο αισθητήρων επιβάλλεται να εμπεριέχουν μηχανισμούς αντιμετώπισης / αποκατάστασης λαθών και αστοχιών των κόμβων που το αποτελούν. Εάν το περιβάλλον όπου θα τοποθετηθούν οι κόμβοι δεν επηρεάζει τη λειτουργία των κόμβων, τότε τα πρωτόκολλα μπορεί να είναι λιγότερο αυστηρά. Για παράδειγμα, εάν οι κόμβοι τοποθετηθούν σε ένα σπίτι για να μετρούν τα επίπεδα σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας, οι απαιτήσεις για ανοχή σε σφάλματα μπορεί να είναι χαμηλές καθώς αυτού του είδους οι αισθητήρες δεν καταστρέφονται εύκολα

ούτε επηρεάζονται από παρεμβολές του περιβάλλοντός (θόρυβος). Από την άλλη, αν οι κόμβοι τοποθετηθούν σε ένα πεδίο μάχης για ανίχνευση και παρακολούθηση, τότε η ανοχή σε σφάλματα θα πρέπει να είναι πολύ υψηλή διότι τα δεδομένα που συλλέγονται είναι ζωτικής σημασίας και κάποιοι κόμβοι μπορεί να καταστραφούν από τον εχθρό. Σαν αποτέλεσμα, τα επίπεδα ανοχής σε σφάλματα εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων, και οι αλγόριθμοι και πρωτόκολλα θα πρέπει να αναπτυχθούν με βάση αυτά.

1.3.2 Δυνατότητα κλιμάκωσης (Scalability)

Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να ανέρχεται σε εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες. Σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, ο αριθμός των κόμβων μπορεί να ανέρθει και σε εκατομμύρια. Τα νέα σχήματα, πρωτόκολλα και αλγόριθμοι, θα πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν όταν εφαρμοστούν σε έναν τόσο μεγάλο αριθμό κόμβων. Θα πρέπει επίσης να εκμεταλλεύονται την υψηλή πυκνότητα σε κόμβους ανά μονάδα επιφάνειας αυτών των δικτύων.

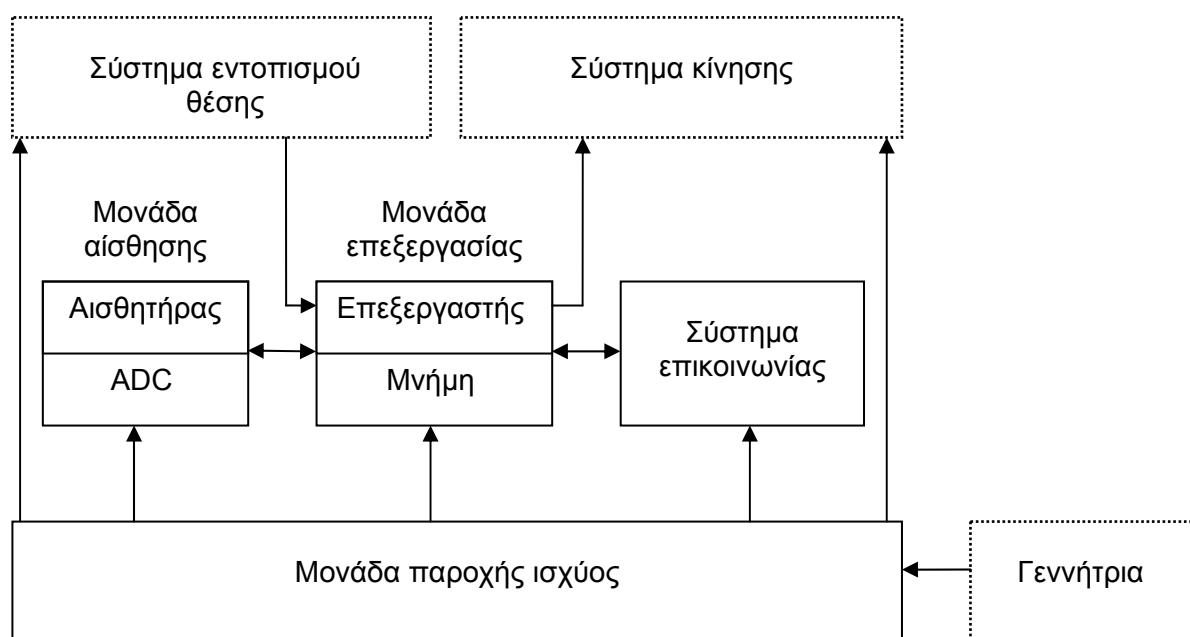
1.3.3 Κόστος παραγωγής

Εφόσον ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων, το κόστος παραγωγής του κάθε κόμβου είναι σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το συνολικό κόστος του δικτύου. Εάν το συνολικό κόστος του δικτύου είναι μεγαλύτερο σε σχέση με ένα μοντέλο υλοποίησης με παραδοσιακούς αισθητήρες, τότε το δίκτυο αισθητήρων δεν μπορεί να δικαιολογήσει το κόστος του. Σαν αποτέλεσμα, το κόστος κατασκευής του κάθε κόμβου θα πρέπει να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα. Η τεχνολογία στις μέρες μας επιτρέπει ένα ασύρματο Bluetooth σύστημα με κόστος χαμηλότερο από 10\$ ανά κόμβο (Rabaey, Ammer et al [2000]). Επίσης, η τιμή ενός PicoNode κυμαίνεται κάτω από 1\$.

Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο κόμβος είναι μια σύνθετη κατασκευή που εμπεριέχει και άλλες λειτουργικές μονάδες πέρα από το σύστημα μετάδοσης, όπως υποσύστημα κίνησης, υποσύστημα ανίχνευσης θέσης ή γεννήτρια ενέργειας, ανάλογα με την εφαρμογή. Έτσι, το κόστος κατασκευής ενός κόμβου είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα δεδομένου του αριθμού των λειτουργιών που θα πρέπει να ενσωματώσει μια πολύ μικρή συσκευή με κόστος κάτω από 1\$.

1.3.4 Περιορισμοί λόγω hardware

Όπως δείχνει και το Σχήμα 1 ένας κόμβος αποτελείται από τέσσερα βασικά λειτουργικά τμήματα: μια μονάδα αίσθησης, μια μονάδα επεξεργασίας, μια μονάδα επικοινωνίας και μια μονάδα παροχής ισχύος. Επίσης, μπορεί να εμπεριέχει επιπλέον στοιχεία όπως για παράδειγμα ένα υποσύστημα εντοπισμού θέσης, μια γεννήτρια ισχύος ή και μονάδα κίνησης. Οι μονάδες αίσθησης συνήθως αποτελούνται από δύο τμήματα, τον αισθητήρα και τον μετατροπέα αναλογικού – ψηφιακού (analog to digital converter, ADC). Τα αναλογικά σήματα των αισθητήρων προερχόμενα από το φαινόμενο υπό παρατήρηση, μετατρέπονται σε ψηφιακά μέσω του ADC και στη συνέχεια τροφοδοτούν την μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα αυτή, που συνήθως συνοδεύεται από μια μικρή αποθηκευτική μονάδα (μνήμη), διαχειρίζεται τις διαδικασίες που απαιτούνται ώστε ο κόμβος να συνεργαστεί με τους υπόλοιπους κόμβους και να διεκπεραιώσει το έργο του. Η μονάδα επικοινωνίας αναλαμβάνει τη σύνδεση του κόμβου με το δίκτυο. Επίσης, ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι η μονάδα παροχής ισχύος. Αυτή η μονάδα μπορεί να συνδυάζεται με ένα υποσύστημα εξοικονόμησης ή παραγωγής ενέργειας, όπως για παράδειγμα ηλιακές κυψέλες. Τέλος, ανάλογα με την εφαρμογή, ο κόμβος μπορεί να περιλαμβάνει και άλλες λειτουργικές μονάδες.



Σχήμα 1. Τα στοιχεία ενός κόμβου αισθητήρα

Οι περισσότερες τεχνικές δρομολόγησης (routing) για δίκτυα αισθητήρων απαιτούν γνώση της τοποθεσίας του κάθε κόμβου με μεγάλη ακρίβεια. Πολλές φορές ο κόμβος είναι εξοπλισμένος με σύστημα εντοπισμού θέσης. Επιπλέον ένα σύστημα

κίνησης είναι πολλές φορές απαραίτητο ώστε να μετακινηθεί ο κόμβος και έτσι να διεκπεραιώσει την αποστολή του.

Πολλά από τα παραπάνω στοιχεία και μερικές φορές όλα θα πρέπει να χωρέσουν σε ένα κόμβο με μέγεθος σπιρτόκουτου. Το απαιτούμενο μέγεθος μπορεί να είναι μικρότερο ακόμα και από ένα κυβικό εκατοστό ανάλογα με την εφαρμογή, και ελαφρύ ώστε να ταξιδεύει μαζί με τη ροή του αέρα (Pottie & Kaiser [2000]). Πέρα από το μέγεθος, υπάρχουν και άλλοι περιοριστικοί παράγοντες για τους κόμβους. Με βάση αυτό, οι κόμβοι θα πρέπει να:

- Καταναλώνουν πολύ λίγη ισχύ
- Λειτουργούν σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας κόμβων
- Έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής και να είναι αναλώσιμοι
- Είναι αυτόνομοι και να λειτουργούν χωρίς καθοδήγηση
- Προσαρμόζονται με το περιβάλλον.

Από τη στιγμή που πολλές φορές οι κόμβοι από τη στιγμή που τοποθετηθούν παύουν να είναι προσβάσιμοι, η διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής των μονάδων ενέργειας των κόμβων. Η ισχύς επιπλέον είναι ένας ανεπαρκής πόρος λόγω των περιορισμών στο μέγεθος. Για παράδειγμα, η συνολική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη σε ένα smart dust mote (Pottie & Kaiser [2000]) ανέρχεται στο 1 J. Για ασύρματους αισθητήρες το συνολικό ρεύμα τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι μικρότερο από 30 μ A ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικός χρόνος ζωής του δικτύου. Αυτοί οι κόμβοι συνήθως τροφοδοτούνται από τυπικές μπαταρίες λιθίου μεγέθους κέρματος ή από τύπου AA ή AAA Ni-MH μπαταρίες. Είναι δυνατόν να επιμηκύνουμε τη διάρκεια ζωής του κάθε αισθητήρα και κατ' επέκταση του δικτύου μέσω απόσπασης ενέργειας από το περιβάλλον. Οι ηλιακές κυψέλες είναι από τις πλέον διαδεδομένες μέθοδοι για το σκοπό αυτό.

Η μονάδα επικοινωνίας μπορεί να είναι μια ενεργητική ή παθητική συσκευή όπως στην περίπτωση των smart dust motes ή συσκευές RF. Οι RF επικοινωνίες απαιτούν διαμόρφωση, φιλτράρισμα, αποδιαμόρφωση και πολυπλεξία, γεγονός που τις καθιστά πιο σύνθετες και ακριβές. Επίσης, η απώλεια μονοπατιού του μεταδιδόμενου σήματος μπορεί να είναι υψηλή (fourth order exponent της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων), επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις οι κεραίες των κόμβων είναι πολύ κοντά στο έδαφος. Ωστόσο, στην πλειοψηφία των ερευνητικών προγραμμάτων και εφαρμογών προτιμώνται περισσότερο οι RF επικοινωνίες επειδή τα πακέτα δεδομένων που ανταλλάσσονται σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι μικρά σε μέγεθος, οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι χαμηλοί και η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας είναι υψηλή λόγω της μικρής απόστασης επικοινωνίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν επιπλέον τη χρήση low duty cycle

radio ηλεκτρονικών στοιχείων για τους κόμβους αισθητήρων. Όμως, ο σχεδιασμός χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και low duty cycle radio κυκλωμάτων είναι τεχνολογικά πολύπλοκος, και οι σημερινές τεχνολογίες εμπορικών ραδιοσυσκευών όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε συσκευές Bluetooth δεν είναι αρκετά αποδοτικές για δίκτυα αισθητήρων γιατί οι διαδικασίες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης καταναλώνουν σημαντική ενέργεια (Shih, Cho et al [2001]).

Παρόλο που στις μέρες μας είναι συνεχώς διαθέσιμοι επεξεργαστές με ολοένα και μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ, οι μονάδες επεξεργασίας και μνήμης είναι και αυτές περιορισμένες λόγω του μεγέθους. Για παράδειγμα, η επεξεργαστική μονάδα ενός πρωτότυπου κόμβου smart dust είναι ένας επεξεργαστής ATMEL 4 MHz AVR 8535 μικρό-ελεγκτής με 8 KB instruction flash μνήμη, 512 bytes RAM και 512 bytes EEPROM (Perrig, Szewczyk et al. [2001]). Το λειτουργικό σύστημα TinyOS που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύστημα έχει 3500 bytes code space και 4500 bytes διαθέσιμο code space. Η επεξεργαστική μονάδα ενός άλλου πρωτότυπου κόμβου αισθητήρα, του μAMPS ασύρματου κόμβου, εμπεριέχει έναν μικρό-ελεγκτή SA-1110 στα 59 – 206 MHz, με λειτουργικό σύστημα multi-threaded TinyOS.

Πολλές από τις εφαρμογές δικτύων αισθητήρων απαιτούν τη γνώση της τοποθεσίας του κάθε κόμβου. Από τη στιγμή που οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία και λειτουργούν χωρίς άλλη καθοδήγηση, θα πρέπει να ενσωματώσουν ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Τα συστήματα εντοπισμού θέσης επίσης είναι απαραίτητα σε πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια. Συχνά μπορεί οι κόμβοι να ενσωματώνουν ένα σύστημα παγκόσμιου εντοπισμού θέσης (GPS) με ακρίβεια τουλάχιστον 5 μέτρων. Ωστόσο έχει αποδειχθεί (Savvides, Han et al. [2001]) ότι η λύση με ενσωμάτωση συστήματος GPS σε κάθε κόμβο δεν είναι βιώσιμη. Εναλλακτικές λύσεις έχουν προταθεί όπου ένας περιορισμένος αριθμός κόμβων εμπεριέχει σύστημα GPS και βοηθά τους υπόλοιπους κόμβους να υπολογίσουν τη θέση τους στην περιοχή λειτουργίας.

1.3.5 Τοπολογία δικτύου αισθητήρων

Ένας μεγάλος αριθμός από μη προσβάσιμους και ανεξάρτητους κόμβους αισθητήρων, ευάλωτους σε συχνές βλάβες, καθιστούν την διαχείριση ενός δικτύου αισθητήρων μια πολύπλοκη υπόθεση. Εκατοντάδες ή και χιλιάδες κόμβοι τοποθετούνται σε μια περιοχή, με απόσταση μερικών μέτρων μεταξύ τους. Η τοποθεσία ενός υψηλού αριθμού κόμβων απαιτεί προσεκτικό υπολογισμό και σωστή διαχείριση της τοπολογίας του δικτύου. Στη συνέχεια εξετάζουμε θέματα διαχείρισης και αλλαγής τοπολογίας σε τρεις φάσεις.

1. Φάση προ-τοποθέτησης και τοποθέτησης

Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να τοποθετηθούν είτε μαζικά είτε ένας-ένας στο πεδίο που απαιτείται. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει:

- Πετώντας τους από αεροπλάνο
- Εκτοξεύοντας τους με τη βοήθεια πυραύλου ή βολής πυροβολικού
- Τοποθετώντας τους με το χέρι (π.χ. σε ένα εργοστάσιο) από άνθρωπο ή από εξειδικευμένο ρομπότ.

Παρόλο που ο μεγάλος αριθμός κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων και η δυνατότητα λειτουργίας τους χωρίς καθοδήγηση δεν απαιτούν ύπαρξη προσεκτικά μελετημένου σχεδίου τοποθέτησης, τα σχέδια για αρχική τοποθέτηση θα πρέπει να:

- Ελαχιστοποιούν το κόστος εγκατάστασης
- Εξαλείφουν την ανάγκη για εκ των προτέρων οργάνωση και σχεδιασμό
- Προωθούν τις δυνατότητες αυτό-οργάνωσης και ανοχής σε σφάλματα.

2. Φάση μετά-τοποθέτησης

Μετά την τοποθέτηση, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάξει λόγω αλλαγών στους κόμβους όσον αφορά:

- Τη θέση
- Πρόσβαση (λόγω εμπλοκής, θορύβου, κινούμενων εμποδίων)
- Διαθέσιμης ενέργειας
- Δυσλειτουργίας
- Λεπτομερειών στόχου εφαρμογής

Οι κόμβοι μπορεί να τοποθετηθούν ομοιόμορφα στο πεδίο. Ωστόσο, η αστοχία λειτουργίας είναι αναμενόμενο φαινόμενο λόγω καταστροφής ή λόγω εξάντλησης της ενέργειάς τους. Επίσης είναι δυνατόν να έχουμε δίκτυο αισθητήρων με κόμβους υψηλής κινητικότητας. Άλλωστε, σπανίως η περιοχή κάλυψης είναι επίπεδη και χωρίς εμπόδια, οπότε η αλλαγή της τοπολογίας ενός δικτύου αισθητήρων είναι ένα συχνό και υπολογίσιμο θέμα.

3. Φάση επανατοποθέτησης επιπρόσθετων κόμβων

Επιπλέον κόμβοι μπορεί ανά πάσα στιγμή να τοποθετηθούν σε ένα δίκτυο αισθητήρων για να αντικαταστήσουν τους κόμβους που τέθηκαν εκτός λειτουργίας ή λόγω αλλαγής στο σχεδιασμό της εφαρμογής (επέκταση, περισσότερες μετρήσεις

κ.α.). Η πρόσθεση επιπλέον κόμβων εισάγει ανάγκη για επανα-οργάνωση του δικτύου. Η διαχείριση συχνών αλλαγών στην τοποθεσία σε ένα ad hoc δίκτυο με χιλιάδες στοιχεία και περιορισμένους πόρους ενέργειας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που προϋποθέτει ειδικούς αλγόριθμους. Θα αναφερθούμε σε αυτό το θέμα στη συνέχεια.

1.3.6 Περιβάλλον

Οι κόμβοι αισθητήρων τοποθετούνται με μεγάλη πυκνότητα είτε μέσα στο φαινόμενο παρατήρησης είτε πολύ κοντά σε αυτό. Συνεπώς, αυτοί λειτουργούν όπως αναφέραμε χωρίς καθοδήγηση σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Για παράδειγμα, οι κόμβοι μπορεί να λειτουργούν:

- Σε πολυσύχναστες διασταυρώσεις
- Στο εσωτερικό μεγάλης κλίμακας μηχανικού συστήματος
- Στον βυθό ή στην επιφάνεια της θάλασσας
- Μέσα σε έναν ανεμοστρόβιλο
- Σε ένα βιολογικά ή χημικά μολυσμένο πεδίο
- Σε ένα πεδίο μάχης πέρα από την εχθρική γραμμή
- Σε ένα σπίτι, μεγάλο κτίριο ή αποθήκη
- Προσαρτημένοι σε ζώα
- Προσαρτημένοι σε κινούμενα οχήματα
- Σε ένα κατευθυνόμενο υδάτινο ρεύμα ή ποτάμι.

Ο παραπάνω κατάλογος δίνει μια πρώτη ιδέα για τις συνθήκες στις οποίες καλούνται να λειτουργήσουν οι κόμβοι ενός δικτύου αισθητήρων. Μπορεί να λειτουργούν σε εξαιρετικά υψηλή πίεση στο βυθό ενός ωκεανού, σε ένα δριμύ περιβάλλον όπως αυτό του πεδίου μάχης, κάτω από υπερβολική ζέστη ή και κρύο όταν είναι προσαρτημένοι στην μύτη ενός αεροσκάφους ή σε πολικές περιοχές και σε εξαιρετικά θορυβώδη περιβάλλοντα όπως σε αυτοκινητοδρόμους ή αποθήκες.

1.3.7 Μέσο μετάδοσης

Σε ένα multi hop δίκτυο αισθητήρων οι κόμβοι που επικοινωνούν συνδέονται με ένα ασύρματο μέσο. Αυτές οι επικοινωνίες μπορεί να γίνουν μέσω ραδιοσημάτων, υπέρυθρων ακτινών ή οπτικών μέσων (ακτινών laser κ.α.). Για να εξασφαλιστεί δυνατότητα λειτουργίας των δικτύων αυτών σε όλο τον κόσμο, το επιλεγόμενο μέσο μετάδοσης θα πρέπει να είναι διαθέσιμο παγκοσμίως.

Μια επιλογή για RF ζεύξεις είναι η χρήση βιομηχανικών, επιστημονικών και ιατρικών ζωνών συχνοτήτων (industrial, scientific and medical bands, ISM) οι οποίες προσφέρουν επικοινωνία άνευ αδείας στις περισσότερες χώρες (unregulated bands). Ο διεθνής πίνακας ανάθεσης συχνοτήτων (International Table of Frequency Allocations, που περιέχεται στο άρθρο S5 των κανονισμών περί ραδιοσυχνοτήτων) καθορίζει ζώνες συχνοτήτων που μπορεί να είναι διαθέσιμες για ISM εφαρμογές.

Μερικές από τις ζώνες συχνοτήτων ήδη χρησιμοποιούνται για ασύρματες τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις και ασύρματα τοπικά δίκτυα. Για τα δίκτυα αισθητήρων απαιτείται ένας μικρός, χαμηλού κόστους και κατανάλωσης ισχύος πομποδέκτης. Σύμφωνα με μελέτες (Porret, Melly et al. [2000]) μερικοί περιορισμοί λόγω hardware και το ισοζύγιο μεταξύ απόδοσης κεραίας και κατανάλωσης ισχύος, περιορίζουν την επιλογή συχνότητας φέροντος για τέτοιου είδους πομποδέκτες σε πολύ υψηλές ζώνες συχνοτήτων. Οι μελέτες αυτές προτείνουν τη χρήση της μπάντας των 433 MHz ISM για την Ευρώπη και των 915 MHz ISM για την Β. Αμερική. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης των ζωνών ISM είναι η δωρεάν χρήση, η τεράστια ανάθεση φάσματος και η παγκόσμια διαθεσιμότητα. Οι συχνότητες αυτές δεν περιορίζονται από συγκεκριμένα πρότυπα, συνεπώς δίνουν περισσότερη ελευθερία για υλοποίηση στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν διάφοροι κανόνες και περιορισμοί, όπως περιορισμοί ισχύος και αποφυγή παρεμβολών με τις ισχύουσες εφαρμογές επικοινωνιών.

Ένας άλλος δυνητικός τρόπος επικοινωνίας κόμβων αισθητήρων είναι η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η υπέρυθρη επικοινωνία δεν απαιτεί άδεια μετάδοσης και είναι ανθεκτική σε παρεμβολές από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Οι υπέρυθροι πομποδέκτες είναι φθηνότεροι και πιο εύκολοι να κατασκευαστούν. Η απαίτηση όμως για οπτική επαφή μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη καθιστά αμφίβολη τη χρήση υπέρυθρης επικοινωνίας στα δίκτυα αισθητήρων.

Οι ιδιαίτερες απαιτήσεις μερικών εφαρμογών καθιστούν την επικοινωνία πιο δύσκολη. Για παράδειγμα, θαλάσσιες εφαρμογές μπορεί να απαιτούν τη χρήση του νερού σαν επικοινωνιακό μέσο. Στην περίπτωση αυτή, συνήθως απαιτείται η χρήση ακτινοβολίας με μεγάλο μήκος κύματος ώστε να μπορεί να διαπεράσει την επιφάνεια του νερού. Εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε πεδία μαχών απαιτούν επικοινωνία μέσω θορυβωδών καναλιών με υψηλή παρεμβολή. Τέλος, η κεραία ενός αισθητήρα μπορεί να μην έχει την ακτίνα και την ισχύ εκπομπής άλλων παρεμφερών συσκευών. Συνεπώς, η επικοινωνία θα πρέπει να θωρακιστεί με ισχυρούς κώδικες και με κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης ώστε να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω εμπόδια στην επικοινωνία.

1.3.8 Κατανάλωση ισχύος

Ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρα, όντας μια μικρό-ηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να εξοπλιστεί μόνο με πηγή ισχύος περιορισμένων δυνατοτήτων. Σε μερικές εφαρμογές η αντικατάσταση των πηγών ενέργειας των κόμβων είναι αδύνατη. Συνεπώς η διάρκεια ζωής των κόμβων και κατ' επέκταση του δικτύου εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας που φέρουν. Σε ένα multihop ad hoc δίκτυο αισθητήρων κάθε κόμβος παίζει διπλό ρόλο, αυτό του δημιουργού δεδομένων και αυτόν του δρομολογητή δεδομένων. Η αστοχία μερικών κόμβων μπορεί να επιφέρει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές στο δίκτυο και να απαιτήσει επαναδρομολόγηση των πακέτων δεδομένων ή εκ νέου οργάνωση του δικτύου. Ως εκ τούτου, η εξοικονόμηση ενέργειας και η σωστή διαχείρισή της παίζουν σημαντικό ρόλο. Για αυτό το λόγο οι ερευνητές σήμερα επικεντρώνονται στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγορίθμων με βάση την καταναλισκόμενη ενέργεια για τα δίκτυα αισθητήρων.

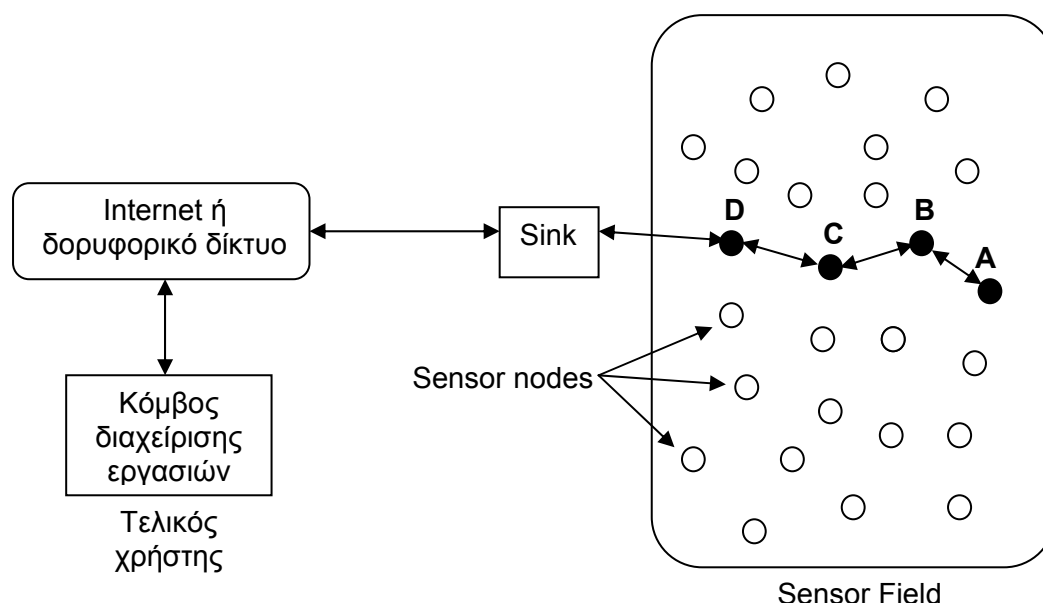
Σε άλλα κινητά και ad hoc δίκτυα, η κατανάλωση ισχύος έχει αποτελέσει σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού αλλά όχι τον πρωτεύοντα, απλά επειδή οι πηγές ισχύος μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν ή να επαναφορτιστούν από τους χρήστες. Η έμφαση σε αυτή την περίπτωση δίδεται στην παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Στα δίκτυα αισθητήρων όμως η κατανάλωση ισχύος είναι μια σημαντική μετρική απόδοσης άμεσα συνδεδεμένη με τη βιωσιμότητα του δικτύου. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας μπορούν να σχεδιαστούν ανταλλάσσοντας άλλες μετρικές απόδοσης όπως καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων και το throughput με την βιωσιμότητα του δικτύου.

Ο κύριος σκοπός ενός κόμβου μέσα σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι να ανιχνεύει γεγονότα, να εκτελεί γρήγορους υπολογισμούς δεδομένων και τέλος να μεταδίδει τα δεδομένα. Συνεπώς η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε τρεις τομείς: αίσθηση, επικοινωνία και επεξεργασία δεδομένων.

Η ενέργεια που καταναλώνεται για την αίσθηση του φαινομένου ποικίλλει ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής. Η σποραδική αίσθηση μπορεί να καταναλώσει λιγότερη ισχύ σε σχέση με την διαρκή αίσθηση. Η πολυπλοκότητα της αίσθησης ενός φαινομένου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση ισχύος.

1.4 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας δικτύων αισθητήρων

Οι κόμβοι αισθητήρων συνήθως απλώνονται σε μια περιοχή αίσθησης (sensor field) όπως δείχνει το Σχήμα 2. Καθένας από τους κόμβους έχει δυνατότητες συλλογής και αποστολής δεδομένων στον *συλλέκτη* (sink) και από εκεί στον τελικό χρήστη. Τα δεδομένα δρομολογούνται στο χρήστη από μια multihop μη δομημένη αρχιτεκτονική προς τον συλλέκτη όπως δείχνει το σχήμα. Ο συλλέκτης μπορεί να

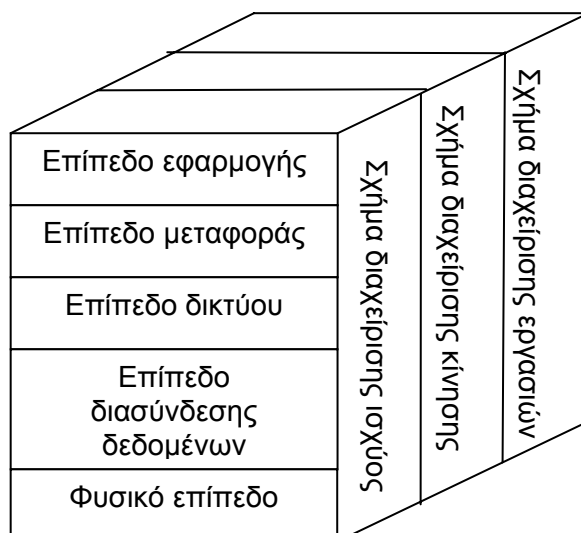


Σχήμα 2. Επικοινωνία κόμβων με τον τελικό χρήστη

επικοινωνεί με τον κόμβο συντονισμού (ή κόμβο διαχείρισης εργασιών, task manager node) μέσω του διαδικτύου, μέσω δορυφορικού ή άλλου δικτύου.

Η στοίβα των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από τους κόμβους αλλά και τους συλλέκτες φαίνεται στο Σχήμα 3. Η στοίβα αυτή συνδυάζει διαχείριση ισχύος, δρομολόγηση δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος επικοινωνία μέσω του ασύρματου μέσου και χρησιμοποιεί αρχιτεκτονικές συνεργασίας και συντονισμού μεταξύ των κόμβων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 η στοίβα αποτελείται από τα επίπεδα εφαρμογής, μεταφοράς, δικτύου, διαμεταγωγής δεδομένων, φυσικό, σχήμα διαχείρισης ισχύος και σχήμα διαχείρισης εργασιών. Ανάλογα με την εφαρμογή αίσθησης, διαφορετικού τύπου λογισμικό μπορεί να κατασκευαστεί και να χρησιμοποιηθεί στο επίπεδο εφαρμογής. Το επίπεδο μεταφοράς βοηθά στην διατήρηση της ροής των δεδομένων εάν και όποτε το απαιτεί η εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων. Το επίπεδο δικτύου αναλαμβάνει την δρομολόγηση των δεδομένων που παρέχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Το πρωτόκολλο MAC λαμβάνει υπ' όψη του την κατανάλωση ισχύος και ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις από τις μεταδόσεις γειτονικών κόμβων. Το φυσικό επίπεδο καλύπτει την ανάγκη για απλή και αποδοτική διαμόρφωση, μετάδοση και λήψη σήματος.

Το σχήμα διαχείρισης ισχύος καθορίζει πως ένας κόμβος θα χρησιμοποιεί την διαθέσιμη ισχύ του. Για παράδειγμα, ένας κόμβος μπορεί να κλείνει τον πομποδέκτη του μόλις λάβει ένα σχετικό μήνυμα από κάποιον γείτονα του. Αυτό μπορεί να γίνει προς αποφυγή συγκρούσεων ή αποφυγή μετάδοσης διπλών όμοιων μηνυμάτων. Επίσης, όταν η διαθέσιμη ενέργεια ενός κόμβου είναι χαμηλή, ο κόμβος μπορεί να ενημερώσει τους γείτονες του ότι έχει λίγη ενέργεια και συνεπώς δεν μπορεί πλέον να



Σχήμα 3. Η στοιβα πρωτοκόλλων ενός δικτύου αισθητήρων

δρομολογεί δεδομένα. Το σχήμα διαχείρισης της κίνησης καθορίζει την κίνηση των κόμβων, εάν αυτοί έχουν αυτή τη δυνατότητα, ώστε να υπάρχει αδιάλειπτη ροή δεδομένων προς το συλλέκτη. Το σχήμα διαχείρισης εργασιών καθορίζει και συντονίζει τις διαδικασίες αίσθησης στην συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό γιατί σε ένα δίκτυο αισθητήρων, διαφορετικές περιοχές μπορεί να εκτελούν διαφορετικές εργασίες αίσθησης ακόμα και όταν οι κόμβοι ανήκουν στο ίδιο δίκτυο. Αυτά τα σχήματα χρειάζονται ώστε οι κόμβοι να μπορούν να συνεργαστούν με αποδοτικό τρόπο, να δρομολογούν τα δεδομένα και να μοιράζονται τους πόρους τους ανάλογα με την εφαρμογή. Χωρίς αυτά, κάθε κόμβος θα λειτουργεί απλά αυτόνομα. Γενικά, είναι πιο αποδοτικό οι κόμβοι να συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε να επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου.

1.4.1 Επίπεδο εφαρμογής (Application layer)

Παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχουν μελετηθεί και προταθεί πολλές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων, τα πρωτόκολλα εφαρμογής για τέτοια δίκτυα παραμένουν μια σχετικά ανεξερεύνητη περιοχή. Θα συζητήσουμε τρία από τα πλέον δημοφιλή πρωτόκολλα στο επίπεδο εφαρμογής, το sensor management protocol (SMP), το task assignment and data advertisement protocol (TADAP) και το sensor query and data dissemination protocol (SQDDP). Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα συνεχίζουν να εξελίσσονται.

1. *Sensor management protocol*

Το πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής καθιστά το hardware αλλά και το software των κατωτέρων επιπέδων «διαφανές» (transparent) προς τις εφαρμογές διαχείρισης του δικτύου αισθητήρων.

Οι διαχειριστές συστημάτων επικοινωνούν με τα δίκτυα αισθητήρων με τη χρήση του SMP. Το SMP είναι ένα πρωτόκολλο διαχείρισης το οποίο μπορεί να διεκπεραιώσει τις παρακάτω διαδικασίες διαχείρισης:

- Εισαγωγή κανόνων που αφορούν την ενοποίηση δεδομένων, την ονοματοδοσία κόμβων όπου δεν υπάρχει global identification και clustering σε περιοχές του δικτύου αισθητήρων
- Ανταλλαγή δεδομένων που σχετίζονται με τους αλγόριθμους εντοπισμού θέσης
- Συγχρονισμός κόμβων
- Μετακίνηση κόμβων στο πεδίο
- Άνοιγμα / κλείσιμο του πομποδέκτη των κόμβων
- Ερώτηση του δικτύου αισθητήρων όσον αφορά τους πόρους και επαναοργάνωση του δικτύου όταν η εφαρμογή ή οι συνθήκες το επιβάλλουν
- Εξακρίβωση (authentication), ασφάλεια και κρυπτογράφηση στην επικοινωνία δεδομένων όπου αυτό είναι απαραίτητο.

2. Task assignment and data advertisement protocol

Μια άλλη σημαντική λειτουργία σε πολλές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων είναι κοινοποίηση ενδιαφέροντος. Οι χρήστες στέλνουν στο δίκτυο αισθητήρων ένα ερώτημα ανάλογα με το ενδιαφέρον τους και το δίκτυο συλλέγει την πληροφορία και τους απαντά. Το ερώτημα μπορεί να απευθύνεται σε έναν κόμβο, σε ένα υποσύνολο κόμβων ή σε ολόκληρο το δίκτυο. Το ερώτημα επίσης μπορεί να αφορά κάποιο χαρακτηριστικό του φαινομένου προς παρατήρηση ή για παράδειγμα μια πιο λεπτομερή μέτρηση των ιδιοτήτων του φαινομένου. Ένα πρωτόκολλο εφαρμογής που να επιτρέπει στο χρήστη να υποβάλλει ερωτήματα στο δίκτυο είναι χρήσιμο για λειτουργίες στο κατώτερο επίπεδο, όπως π.χ. στην δρομολόγηση.

3. Sensor query and data dissemination protocol

Το πρωτόκολλο SQDDP παρέχει στον διαχειριστή εφαρμογές με τη δυνατότητα να υποβάλλουν ερωτήματα στο δίκτυο και να συλλέγουν τις απαντήσεις που αυτό επιστρέφει. Η ιδέα διαφέρει σε σχέση με την περίπτωση του TADAP στο ότι το ερώτημα δεν απευθύνεται πλέον σε έναν κόμβο ή μια ομάδα κόμβων αλλά έχει σαν βάση το χαρακτηριστικό μέτρησης. Για παράδειγμα, ένας διαχειριστής μπορεί να

ρωτήσει το δίκτυο το εξής: «Δώσε μου τις τοποθεσίες των κόμβων όπου η θερμοκρασία ξεπερνά τους 30°C», ενώ στην περίπτωση του TADAP η ερώτηση θα μπορούσε να ήταν: «Δώσε μου τις θερμοκρασίες των κόμβων της περιοχής Α». Όπως φαίνεται, στην περίπτωση του SQDDP η εφαρμογή ενδιαφέρεται περισσότερο για τα χαρακτηριστικά του φαινομένου παρά για τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των κόμβων που παρακολουθούν το φαινόμενο.

1.4.2 Επίπεδο μεταφοράς (Transport layer)

Το επίπεδο αυτό είναι ιδιαίτερα απαραίτητο όταν το σύστημα δικτύου αισθητήρων πρέπει να είναι προσβάσιμο από άλλα ετερογενή δίκτυα όπως για παράδειγμα το διαδίκτυο. Ο σχεδιασμός ενός εξειδικευμένου πρωτοκόλλου μεταφοράς για δίκτυα αισθητήρων αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Ωστόσο, το TCP με τους μηχανισμούς μετάδοσης παραθύρων θα μπορούσε να ταιριάζει με τα χαρακτηριστικά ενός δικτύου αισθητήρων. Στην προσέγγιση Bakre & Badrinath [1995], οι συνδέσεις TCP τερματίζονται στους συλλέκτες και ένα ειδικό πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς (συνήθως καθαρό UDP λόγω των περιορισμών μνήμης και ενέργειας των κόμβων) αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και των συλλεκτών.

Αντίθετα με το πρωτόκολλο TCP το οποίο προϋποθέτει global addressing σε όλα τα στοιχεία του, σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογών δικτύων αισθητήρων όπου δεν έχουμε τέτοια δυνατότητα, είναι επιβεβλημένος ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων επιπέδου μεταφοράς που θα παρακάμπτουν αυτή την απαίτηση και θα καταφέρνουν να διανέμουν και να συλλέγουν πληροφορίες από περιοχές κόμβων (clusters) αποδοτικά.

1.4.3 Επίπεδο δικτύου (Network layer)

Όπως δείξαμε και στο Σχήμα 2, οι κόμβοι αισθητήρων μπορεί να είναι τοποθετημένοι (διασκορπισμένοι) είτε κοντά είτε μέσα στην περιοχή του φαινομένου. Επίσης αναφέραμε ότι οι αλγόριθμοι δρομολόγησης των παραδοσιακών ad hoc δικτύων δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα δίκτυα αισθητήρων λόγω σχεδιαστικών περιορισμών. Το επίπεδο δικτύου των δικτύων αισθητήρων σχεδιάζεται ακολουθώντας συνήθως τις ακόλουθες αρχές:

- Η διαχείριση ισχύος είναι πάντα μια σημαντική παράμετρος
- Η ενοποίηση δεδομένων είναι χρήσιμη μόνο όταν δεν εμποδίζει τις προσπάθειες συντονισμού και συνεργασίας των κόμβων
- Ένα ιδανικό δίκτυο αισθητήρων εμπεριέχει ονοματοδοσία και εντοπισμό θέσης

Μια εκ των παρακάτω προσεγγίσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλεγεί η καλύτερη κάθε φορά διαδρομή δρομολόγησης δεδομένων από τους κόμβους προς τον συλλέκτη.

- Διαδρομή ελάχιστων κόμβων (min hop). Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η διαδρομή προς το συλλέκτη που περιλαμβάνει τους λιγότερους δυνατούς κόμβους.
- Διαδρομή μέγιστης διαθέσιμης ισχύος. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται το μονοπάτι που περιλαμβάνει την περισσότερη διαθέσιμη ισχύ στους κόμβους του, με άλλα λόγια επιλέγονται κόμβοι με την μεγαλύτερη δυνατή διαθέσιμη ισχύ. Σημειώνεται ότι στο ξεκίνημα της λειτουργίας ενός δικτύου αισθητήρων τα μονοπάτια αυτά ταυτίζονται με τα μονοπάτια που επιλέγονται από την min hop προσέγγιση επειδή όλοι οι κόμβοι διαθέτουν τη μέγιστη ισχύ.
- Διαδρομή ελάχιστης καταναλισκόμενης ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η διαδρομή στην οποία καταναλώνεται η ελάχιστη δυνατή ενέργεια για την μετάδοση μέχρι το συλλέκτη. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί όμως και υπολογισμό της ακριβούς απόστασης μεταξύ των κόμβων, κάτι που πολλές φορές μπορεί να είναι δύσκολο ή αδύνατο σε κόμβους περιορισμένων δυνατοτήτων και επεξεργαστικής ισχύος.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι αυτή στην οποία η δρομολόγηση μπορεί να είναι data-centric. Στην περίπτωση αυτή, το ενδιαφέρον του διαχειριστή κοινοποιείται στο δίκτυο αισθητήρων ώστε οι κόμβοι του να εκτελέσουν το απαιτούμενο έργο αίσθησης και τις απαραίτητες ενέργειες ώστε τελικά να σταλούν τα δεδομένα στον ενδιαφερόμενο. Υπάρχουν δύο τρόποι για να γίνει αυτό. Οι συλλέκτες κοινοποιούν το ενδιαφέρον ή οι κόμβοι κοινοποιούν μια «διαφήμιση» των διαθέσιμων ή μετρήσιμων δεδομένων και περιμένουν αίτηση για μετάδοση από τους ενδιαφερόμενους συλλέκτες.

Η ενοποίηση δεδομένων (data aggregation) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά για αντιμετώπιση περιπτώσεων επικαλυπτόμενων δεδομένων και μείωσης της περιττής κίνησης στο δίκτυο. Στην τεχνική αυτή, οι κόμβοι που δρομολογούν δεδομένα συνενώνουν τα πακέτα δεδομένων που ταξιδεύουν πάνω στο ίδιο μονοπάτι προς το συλλέκτη εάν αυτά περιέχουν την ίδια η παρόμοια πληροφορία για ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του φαινομένου. Για παράδειγμα, δύο πακέτα που περιέχουν πληροφορία για θερμοκρασία και προέρχονται από δύο κόμβους που βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο πιθανόν να είναι όμοια. Εάν αυτά βρεθούν στην ίδια διαδρομή προς το συλλέκτη θα ενοποιηθούν ώστε ένα πακέτο να ταξιδέψει, εξοικονομώντας κατ' αυτό τον τρόπο ενέργεια.

Τέλος, μια ακόμη σημαντική αποστολή του επιπέδου δικτύου είναι να παρέχει διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα, όπως για παράδειγμα άλλα δίκτυα αισθητήρων, συστήματα εντολών και ελέγχου ή το διαδίκτυο. Σε ένα σενάριο, οι συλλέκτες του δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι η «γέφυρα» προς το εξωτερικό δίκτυο, ενώ σε ένα άλλο σενάριο οι συλλέκτες δημιουργούν ένα δίκτυο κορμού (backbone) προσβάσιμο από άλλα εξωτερικά δίκτυα.

1.4.4 Επίπεδο ζεύξης δεδομένων (Data link layer)

Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία των ροών δεδομένων, ανίχνευση frames δεδομένων, πρόσβαση στο μέσο και έλεγχο λαθών. Διασφαλίζει αξιόπιστη μετάδοση σημείου προς σημείο και σημείου προς πολλαπλά σημεία σε ένα επικοινωνιακό δίκτυο. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε σε συντομία το θέμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο.

- Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο (medium access control, MAC)

Το πρωτόκολλο MAC σε ένα ασύρματο, αυτό-οργανωμένο multihop δίκτυο αισθητήρων θα πρέπει να επιτυγχάνει δύο στόχους. Ο πρώτος είναι η δημιουργία μιας δικτυακής δομής. Τη στιγμή που ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους σε ένα πεδίο, το πρωτόκολλο MAC θα πρέπει να εγκαθιδρύει επικοινωνιακούς συνδέσμους ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους για μεταφορά των δεδομένων. Ο δεύτερος στόχος είναι ο δίκαιος και αποδοτικός διαμοιρασμός του μέσου και των επικοινωνιακών πόρων ώστε να επιτευχθεί αποδοτική επικοινωνία δεδομένων μεταξύ των κόμβων.

Λόγοι για τους οποίους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υπάρχοντα MAC σχήματα. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα, χρειαζόμαστε ειδικά πρωτόκολλα και αλγόριθμους ώστε να αντιμετωπιστούν αποδοτικά οι σχεδιαστικοί περιορισμοί των δικτύων αισθητήρων. Για να εντοπίσουμε τις διαφορές, πρέπει να δούμε πιο εμπεριστατωμένα τα υπάρχοντα MAC πρωτόκολλα και να αναλύσουμε γιατί αυτά δεν μπορούν να ενσωματωθούν σε μια αρχιτεκτονική δικτύου αισθητήρων.

Σε ένα κυψελωτό σύστημα, οι σταθμοί βάσης σχηματίζουν μια ενσύρματη δομή. Κάθε κινητός κόμβος βρίσκεται μόλις ένα hop μακριά από τον κοντινότερο σταθμό βάσης. Ο κύριος στόχος του MAC πρωτοκόλλου στην περίπτωση αυτή είναι η παροχή υψηλού επιπέδου υπηρεσιών (QoS) και η όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης. Η εξοικονόμηση ισχύος τίθεται σε χαμηλότερη προτεραιότητα καθώς οι σταθμοί βάσης τροφοδοτούνται από αδιάλειπτη παροχή ενέργειας ενώ ο χρήστης των κινητών συσκευών μπορεί να επαναφορτίσει ή εύκολα

αντικαταστήσει την πηγή ενέργειας (μπαταρία) όταν αυτή εξαντληθεί. Ένα τέτοιο σχήμα δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δίκτυο αισθητήρων, αφενός γιατί δεν περιλαμβάνει σε πρώτη προτεραιότητα μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας και αφετέρου γιατί στα δίκτυα αισθητήρων δεν υπάρχει κεντρικός σταθμός διαχείρισης όπως ο σταθμός βάσης στα κυψελωτά συστήματα.

Οι τεχνολογίες Bluetooth και MANET (Mobile Ad Hoc Network) είναι οι κοντινότεροι συγγενείς των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Το Bluetooth αποτελεί μια μη δομημένη, μικρής ακτίνας ασύρματη αρχιτεκτονική που στοχεύει στην αντικατάσταση των καλωδίων που συνδέουν ηλεκτρονικές συσκευές με ζεύξεις RF. Η τοπολογία στο Bluetooth είναι ένα δίκτυο αστέρα όπου ο master κόμβος μπορεί να περιλαμβάνει επτά slave κόμβους ασύρματα συνδεδεμένους σε αυτόν. Σε ένα MANET το MAC πρωτόκολλο έχει σαν σκοπό τη διαμόρφωση μιας δικτυακής δομής και τη διατήρησή της στο ενδεχόμενο μετακίνησης των κόμβων. Συνεπώς, πρωτεύοντας στόχος είναι και εδώ η παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών σε συνθήκες κινητικότητας των κόμβων. Και στην περίπτωση αυτή, παρόλο που οι κόμβοι που αποτελούν το δίκτυο είναι φορητές συσκευές τροφοδοτούμενες από μπαταρία, μπορούν να επαναφορτιστούν ή αντικατασταθούν από το χρήστη οπότε και εδώ η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί θέμα δευτερεύουσας σημασίας.

Αντίθετα με τους παραπάνω δύο τύπους δικτύων, τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να έχουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό από κόμβους. Η ισχύς μετάδοσης (~0 dBm) και η ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου αισθητήρων είναι πολύ μικρότερη από αυτή των δικτύων Bluetooth και MANET. Επίσης, οι τοπολογικές αλλαγές ενός δικτύου αισθητήρων είναι διαφορετικής φύσεως, ενώ οι βλάβες και αστοχίες των κόμβων είναι πολύ πιο συχνές από αυτές στα παραπάνω δίκτυα. Σε κάθε περίπτωση, για ένα δίκτυο αισθητήρων η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί θέμα πρωτεύουσας σημασίας ώστε να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Για τους λόγους αυτούς κανένα από τα πρωτόκολλα MAC των Bluetooth και MANET δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα αισθητήρων.

Πρωτόκολλα MAC για δίκτυα αισθητήρων. Γίνεται προφανές από όσα αναφέραμε ότι ένα πρωτόκολλο MAC σχεδιασμένο για δίκτυο αισθητήρων θα πρέπει να ενσωματώνει μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας, διαχείριση κίνησης αν το επιβάλλει η εφαρμογή και στρατηγικές αντιμετώπισης λαθών και αστοχιών κόμβων. Παρόλο που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία διάφορα MAC σχήματα για δίκτυα αισθητήρων, ο σχεδιασμός σχημάτων MAC για δίκτυα αισθητήρων αποτελεί σήμερα ένα ανοιχτό και έντονα ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο. Για την εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως κλείσιμο του πομποδέκτη, περιοδική και συντονισμένη αίσθηση και κεντριοποιημένες λειτουργίες σε ένα cluster κόμβων. Σε κάθε περίπτωση, σημειώνεται ότι ο σχεδιασμός ενός MAC πρωτοκόλλου για δίκτυα

αισθητήρων εξαρτάται πολύ από την εφαρμογή που πρόκειται να εξυπηρετήσει το δίκτυο. Δεν θα επεκταθούμε περισσότερο εδώ στο θέμα καθώς στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζουμε και αναλύουμε το πρωτόκολλο SMAC, ένα από τα πλέον δημοφιλή MAC πρωτόκολλα για δίκτυα αισθητήρων και κατάλληλο για την εφαρμογή που μελετήσαμε σε αυτή την εργασία.

1.4.5 Φυσικό επίπεδο (Physical layer)

Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την επιλογή συχνότητας, δημιουργία φέροντος σήματος, ανίχνευση σήματος και κρυπτογράφηση δεδομένων. Σε προηγούμενη ενότητα μελετήσαμε το θέμα επιλογής συχνότητας. Η δημιουργία φέροντος και η ανίχνευση σήματος εξαρτώνται από το χρησιμοποιούμενο hardware και το σχεδιασμό του πομποδέκτη.

Όπως είναι γνωστό, η ασύρματη επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων μπορεί να είναι ακριβή, τόσο όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος όσο και σε πολυπλοκότητα υλοποίησης. Στο σχεδιασμό του φυσικού επιπέδου για δίκτυα αισθητήρων, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας, περισσότερο και από θέματα decay, scattering, shadowing, reflection, diffraction, multipath και fading. Στην προσπάθεια για αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων είναι σημαντικό για τον σχεδιαστή να λάβει υπ' όψη του τις εγγενείς ιδιαιτερότητες και να τις μελετήσει στο μέγιστο. Για παράδειγμα, η multihop επικοινωνία σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά φαινόμενα shadowing και path loss, εάν η πυκνότητα τοποθέτησης των κόμβων είναι αρκετά μεγάλη. Παρόμοια, καθώς οι απώλειες λόγω μετάδοσης και η χωρητικότητα του καναλιού περιορίζουν την αξιοπιστία των μεταδιδόμενων δεδομένων, αυτό το γεγονός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χωρική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Αποδοτικές λύσεις φυσικού επιπέδου που περιλαμβάνουν εξοικονόμηση ενέργειας μελετώνται στις μέρες μας από τους ερευνητές.

Η κατάλληλη επιλογή σχήματος διαμόρφωσης είναι σημαντική για την αξιόπιστη επικοινωνία σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Δυναμικά και M-ary σχήματα διαμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Shih, Cho et al. [2001]). Παρόλο που ένα M-ary σχήμα μπορεί να μειώσει την μετάδοση on-time στέλνοντας πολλαπλά bits ανά symbol, απαιτεί πολύπλοκο σχεδιασμό κυκλώματος και αυξημένη κατανάλωση ισχύος εκπομπής.

Τα τελευταία χρόνια, σχήματα ultra wideband (UWB) και impulse radio τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να μελετώνται για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων (Cramer & Scholtz [1999]) ειδικά σε περιβάλλοντα κλειστών χώρων (Mireles & Scholtz [1997]). Η τεχνολογία UWB δεν απαιτεί συχνότητες φέροντος, και ένα από τα

κύρια πλεονεκτήματά της είναι η ανθεκτικότητά της σε φαινόμενα multipath. Η χαμηλή κατανάλωση ισχύος καθώς και η απλή υλοποίηση, καθιστούν το UWB ένα σημαντικό υποψήφιο σχήμα για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων.

1.5 Επίλογος

Η ευελιξία, η ανοχή σε βλάβες, η υψηλή πιστότητα αίσθησης, το χαμηλό κόστος και η γρήγορη τοποθέτηση αποτελούν χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων που δημιουργούν πολλές και ενδιαφέρουσες εφαρμογές για απομακρυσμένη αίσθηση. Αναμένεται ότι στο μέλλον, αυτό το ευρύ φάσμα εφαρμογών θα καταστήσει τα δίκτυα αισθητήρων αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Ωστόσο, η υλοποίηση ενός δικτύου αισθητήρων πρέπει να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς που εισάγουν παράγοντες όπως η ανοχή σε σφάλματα, το scalability, το κόστος, το hardware, οι αλλαγές στην τοπολογία, το περιβάλλον και η κατανάλωση ισχύος. Εφόσον αυτοί οι περιορισμοί είναι αρκετά αυστηροί και ειδικοί για τα δίκτυα αισθητήρων, απαιτούνται νέες τεχνικές ασύρματης και ad hoc δικτύωσης. Πολλοί ερευνητές σήμερα ασχολούνται με την ανάπτυξη τεχνολογιών που είναι απαραίτητες για τα διαφορετικά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων που δείξαμε στο Σχήμα 3. Σήμερα, πολλά ερευνητικά προγράμματα βρίσκονται σε εξέλιξη, προσπαθώντας να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων, τόσο σε γενικό επίπεδο αλλά όσο και σε εξειδικευμένο, αφού όπως είπαμε ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή οι απαιτήσεις για το σχεδιασμό δικτύου αισθητήρων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά.

Το υπόλοιπο της εργασίας αυτής είναι οργανωμένο ως εξής: Στο κεφάλαιο 2 αναλύουμε το πρωτόκολλο SMAC, ένα πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο ειδικά σχεδιασμένο για δίκτυα αισθητήρων και ιδιαίτερα αποδοτικό όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύουμε μια μέθοδο για scoring με τη χρήση δέντρων Voronoi. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζουμε μια ενδιαφέρουσα και χρήσιμη εφαρμογή δικτύου αισθητήρων, η οποία χρησιμοποιεί επέκταση του αλγορίθμου scoring συνδυασμένη με το πρωτόκολλο SMAC. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζουμε και συζητάμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4, παραθέτουμε τα κύρια συμπεράσματα της έρευνάς και παρουσιάζουμε πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

Διαχείριση ενέργειας και scoring σε δίκτυα αισθητήρων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε μεταξύ άλλων μερικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων, περιορισμούς που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό των κόμβων και επομένως των δικτύων αυτών και κάποιες βασικές αρχές πάνω στις οποίες πρέπει να κινηθεί ένας σχεδιαστής πρωτοκόλλων για δίκτυα αισθητήρων ώστε να επιτύχει όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση και παράλληλα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση, είδαμε επίσης πως οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στο σχεδιασμό διαφέρουν, μερικές φορές αρκετά, ανάλογα με την εφαρμογή την οποία πρόκειται να εξυπηρετήσει το δίκτυο αισθητήρων. Ωστόσο, κάποιες βασικές αρχές επιβάλλεται να ακολουθηθούν για κάθε είδους δίκτυο αισθητήρων, ανεξαρτήτως του είδους εφαρμογής.

Μια τέτοια βασική αρχή είναι η εξοικονόμηση ενέργειας στους κόμβους του δικτύου. Όπως αναφέραμε, σε κάθε περίπτωση οι κόμβοι φέρουν πηγές ενέργειας που είναι δύσκολο να αντικατασταθούν ή να επαναφορτιστούν όταν εξαντληθούν. Μάλιστα, εάν το κόστος κατασκευής των κόμβων είναι πολύ χαμηλό, πολλές φορές συμφέρει η επανατοποθέτηση νέων κόμβων στην περιοχή μέτρησης παρά η αντικατάσταση ή συλλογή των παλιών. Με βάση αυτό, και δεδομένου ότι συνήθως οι εφαρμογές δικτύων αισθητήρων δεν απαιτούν άμεση απόκριση στο συμβάν οπότε η καθυστέρηση μετάδοσης πληροφορίας δεν αποτελεί την πρωτεύουσα παράμετρο σχεδιασμού, ζωτικής σημασίας παράμετρος αναδεικνύεται η διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων. Για το σκοπό αυτό έχουν μελετηθεί και προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι και πρωτόκολλα που επιχειρούν να επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής των δικτύων αισθητήρων. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιάσουμε το πρωτόκολλο SMAC (Sensor MAC) [2] το οποίο αποτελεί σήμερα ένα από τα πλέον αποδοτικά και εύκολα στην υλοποίηση MAC πρωτόκολλα. Με τεχνικές *αποφυγής συγκρούσεων* και *συντονισμένου ύπνου*, το SMAC καταφέρνει να επιμηκύνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων.

Μια άλλη βασική αρχή που θα πρέπει να ακολουθηθεί στον σχεδιασμό είναι η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης των κόμβων από τη στιγμή που θα τοποθετηθούν. Όπως είδαμε, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι δύσκολη έως αδύνατη η φυσική πρόσβαση στο πεδίο αίσθησης, οπότε η διεκπεραίωση της εργασίας αίσθησης επαφίεται στις δυνατότητες αυτο-οργάνωσης και αυτο-συντονισμού των κόμβων. Με άλλα λόγια, από τη στιγμή που θα τοποθετηθούν οι κόμβοι στο πεδίο, οι ίδιοι θα πρέπει να προσαρμοστούν με το περιβάλλον, να αναγνωρίσουν τους γείτονες τους και να επικοινωνήσουν με αυτούς ώστε να καταφέρουν να μεταδώσουν την πληροφορία που θα αποσπάσουν από το περιβάλλον. Έτσι, με κάποιον τρόπο

θα πρέπει να δημιουργήσουν διαδρομές οι οποίες θα δικτυώνουν κάθε κόμβο στο πεδίο με κάποιον συλλέκτη ο οποίος θα συλλέγει τα δεδομένα που γεννούν οι κόμβοι. Δεδομένων των περιορισμών των κόμβων σε μέγεθος, επεξεργαστικές δυνατότητες ισχύ εκπομπής / μετάδοσης και λόγω του γεγονότος ότι τα δίκτυα αισθητήρων είναι ad hoc και απουσιάζουν σταθμοί βάσης, η διαδικασία αυτή καθίσταται πολύπλοκη. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιάσουμε έναν αλγόριθμο scoring, δηλαδή έναν αλγόριθμο εγκαθίδρυσης δικτύωσης των κόμβων με τους συλλέκτες, ο οποίος χρησιμοποιεί δένδρα Voronoi και αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποδοτικός καθώς είναι πολύ απλός στην υλοποίηση και δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ και μνήμη, ούτε απαιτεί την ύπαρξη υποσυστήματος εντοπισμού θέσης [3]. Με βάση αυτό τον αλγόριθμο, οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν διαδρομές προς το συλλέκτη και έτσι τα δεδομένα καταφέρνουν να φτάσουν στον προορισμό τους.

Το επόμενο κεφάλαιο περιγράφει την εφαρμογή που υλοποιήσαμε ώστε να μελετήσουμε την απόδοση των παραπάνω πρωτοκόλλων σε μια ιδεατή εφαρμογή καθώς και την περαιτέρω βελτίωση στην απόδοση που επιφέρουν διάφορες επεκτάσεις και τροποποιήσεις που ενσωματώσαμε και τις οποίες προτείνουμε.

2.1 Διαχείριση ενέργειας μέσω του πρωτοκόλλου SMAC (Sensor MAC)

Όπως σε όλα τα επικοινωνιακά δίκτυα που μοιράζονται το ίδιο μέσο, ο έλεγχος πρόσβασης στο μέσο (medium access control, MAC) είναι μια σημαντική τεχνική που εγγυάται την αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Μια βασική λειτουργία κάθε πρωτοκόλλου MAC είναι η αποφυγή συγκρούσεων στη μετάδοση μεταξύ γειτονικών κόμβων. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά MAC πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί για επικοινωνιακά δίκτυα φωνής και δεδομένων. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν το TDMA (time division multiple access), το CDMA (code division multiple access) και contention-based πρωτόκολλα όπως το IEEE 802.11.

Ένα αποδοτικό MAC πρωτόκολλο, πέρα από το γεγονός ότι πρέπει να ενσωματώνει τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας για επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου, θα πρέπει να μπορεί να δίνει τη δυνατότητα στο δίκτυο να προσαρμόζεται στην μεταβολή της πυκνότητας των κόμβων και στις αλλαγές της τοπολογίας. Κατά τη διάρκεια του χρόνου, κάποιοι κόμβοι μπορεί να τεθούν εκτός λειτουργίας, κάποιοι άλλοι μπορεί να εισέλθουν στο δίκτυο ενώ κάποιοι μπορεί να μετακινηθούν. Με βάση αυτό, ένα αποδοτικό MAC πρωτόκολλο θα πρέπει με επιτυχία να ανταποκρίνεται σε τέτοιες αλλαγές. Άλλα τυπικά χαρακτηριστικά όπως δίκαιη αντιμετώπιση (fairness), καθυστέρηση πληροφορίας, χρήση φάσματος ή throughput μπορεί να έχουν δευτερεύουσα σημασία για ένα δίκτυο αισθητήρων.

Το πρωτόκολλο SMAC είναι ένα MAC πρωτόκολλο ειδικά σχεδιασμένο για δίκτυα αισθητήρων. Παρόλο που η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ο βασικός στόχος του πρωτοκόλλου, το SMAC επίσης επιτυγχάνει καλό scalability και αποφυγή συγκρούσεων με τη χρήση ενός σχήματος που συνδυάζει χρονοπρογραμματισμό (scheduling) και διεκδίκηση του μέσου. Για να επιτύχουμε τον πρωτεύοντα στόχο της εξοικονόμησης ενέργειας, θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε ποιοι είναι οι κύριοι λόγοι που προκαλούν άσκοπη σπατάλη ενέργειας καθώς και ποια είναι τα tradeoffs που θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψη μας ώστε να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας.

Ο πρώτος κύριος λόγος σπατάλης ενέργειας είναι οι συγκρούσεις. Όταν ένα μεταδιδόμενο πακέτο συγκρουστεί, θα πρέπει να αγνοηθεί και να επαναμεταδοθεί. Η ενέργεια που δαπανήθηκε για την πρώτη μετάδοση στην ουσία ξοδεύτηκε χωρίς να προσφέρει τίποτα στην λειτουργία του δικτύου. Οι συγκρούσεις επίσης αυξάνουν τις καθυστερήσεις μετάδοσης των πακέτων. Ο δεύτερος λόγος είναι το overhearing, δηλαδή το ότι ένας κόμβος λαμβάνει πακέτα τα οποία δεν προορίζονταν για αυτόν αλλά για άλλο κόμβο. Ο τρίτος λόγος είναι το overhead των πακέτων ελέγχου. Η αποστολή και λήψη τέτοιων πακέτων καταναλώνει ενέργεια. Ο τελευταίος κύριος λόγος σπατάλης ενέργειας είναι το idle listening, δηλαδή το να «ακούει» ένας κόμβος για πιθανή μετάδοση πληροφορίας προς αυτόν χωρίς τελικά να υπάρχει τέτοια. Αυτό είναι ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο λόγω της φύσης των εφαρμογών των δικτύων αισθητήρων. Αν κανένα γεγονός δεν συμβαίνει, οι κόμβοι παραμένουν αδρανείς για το περισσότερο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, σε πολλά MAC πρωτόκολλα όπως στο IEEE 802.11 ad hoc mode ή στο CDMA οι κόμβοι θα πρέπει να ακούν διαρκώς το κανάλι ώστε να λαμβάνουν τυχόν δεδομένα. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι το idle listening καταναλώνει 50% - 100% της ενέργειας που απαιτείται για λήψη. Τα περισσότερα δίκτυα αισθητήρων είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα, συνεπώς αναγκαστικά οι κόμβοι θα παραμένουν αδρανείς για πολύ χρόνο. Κατά συνέπεια, σε αυτές τις περιπτώσεις το idle listening είναι καθοριστικός παράγοντας σπατάλης ενέργειας.

Το πρωτόκολλο SMAC προσπαθεί να μειώσει την σπατάλη ενέργειας από όλους τους παραπάνω λόγους. Σε αντάλλαγμα επιφέρει κάποια μείωση στην επίδοση στους τομείς του fairness και των καθυστερήσεων μετάδοσης. Η πρώτη τεχνική του SMAC είναι η εγκαθίδρυση λειτουργίας low duty cycle στους κόμβους ενός multihop δικτύου. Μειώνει το idle listening με το να τοποθετεί περιοδικά τους κόμβους σε κατάσταση sleep (ύπνου, κατανάλωσης ελάχιστης ενέργειας). Στην κατάσταση αυτή, ο πομποδέκτης τίθεται ολοκληρωτικά εκτός λειτουργίας. Σε παραδοσιακά πρωτόκολλα μετάδοσης δεδομένων όπως το IEEE 802.11, το ποσοστό χρησιμοποίησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης έχει μεγάλη σημασία και οι

κόμβοι συνήθως βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία για όλο το χρονικό διάστημα. Η μετάβαση σε τρόπο λειτουργίας low duty cycle (power save mode στο 802.11) αποτελεί μια επιλογή που συνήθως τίθεται σε λειτουργία όταν ο κόμβος παραμένει ανενεργός για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στο SMAC ωστόσο, η κατάσταση λειτουργίας low duty cycle αποτελεί την κανονική κατάσταση όλων των κόμβων. Γίνονται περισσότερο ενεργοί μόνο όταν υπάρχει κίνηση στο δίκτυο. Για τη μείωση τέλος του overhead ελέγχου και της καθυστέρησης, το SMAC προτείνει συντονισμένο sleeping μεταξύ κόμβων που γειτονεύουν μεταξύ τους.

Η καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων (μετρούμενη από την πηγή του φαινομένου μέχρι τον συλλέκτη) μπορεί να είναι μια σημαντική ή λιγότερο σημαντική μετρική απόδοσης ανάλογα με την εφαρμογή του δικτύου. Σε εφαρμογές όπως για παράδειγμα παρακολούθησης ή επίβλεψης οι κόμβοι μπορεί να μένουν άγρυπνοι για μεγάλο χρονικό διάστημα αλλά και ανενεργοί μέχρι κάτι να παρατηρηθεί. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να ανεχθούν συχνά κάποια επιπρόσθετη καθυστέρηση στην μετάδοση του μηνύματος πληροφορίας, καθώς η ταχύτητα μετάδοσης του δικτύου είναι συνήθως τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ταχύτητα ενός φυσικού αντικειμένου προς παρατήρηση. Η ταχύτητα του φαινομένου αποτελεί το όριο του πόσο γρήγορα το δίκτυο θα πρέπει να αντιδρά. Σε χρονικές περιόδους όπου δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις, ελάχιστα δεδομένα κυκλοφορούν στο δίκτυο. Έτσι, μπορούμε σε πολλές περιπτώσεις να αντισταθμίσουμε την καθυστέρηση στη μετάδοση με επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Το SMAC περιοδικά θέτει τους κόμβους ανενεργούς όταν κρίνει ότι δεν μπορούν να συνεισφέρουν στη λειτουργία του δικτύου και έτσι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας. Η αρχιτεκτονική αυτή επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνει την καθυστέρηση καθώς ένας κόμβος που θέλει να αποστείλει δεδομένα πρέπει να περιμένει τον παραλήπτη να ξυπνήσει (επανέλθει σε πλήρη λειτουργία) ώστε να του μεταδώσει τα δεδομένα αυτού. Μια νέα τεχνική, που ονομάζεται adaptive listening, είναι ικανή να μειώσει σημαντικά αυτού του είδους την καθυστέρηση.

2.1.1 Σχετική έρευνα – Σύγκριση με το SMAC

Ο έλεγχος πρόσβασης στο μέσο αποτελεί ένα ευρύ πεδίο έρευνας που περιλαμβάνει μελέτες στην σχετικά καινούρια περιοχή των δικτύων αισθητήρων χαμηλής ισχύος. Τα υπάρχοντα MAC πρωτόκολλα για δίκτυα αισθητήρων μπορούν να διαιρεθούν κυρίως σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα πρωτόκολλα διεκδίκησης του μέσου (contention-based) και τα TDMA πρωτόκολλα.

Contention-based πρωτόκολλα. Η κατανεμημένη λειτουργία distributed coordination function (DCF) του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 [7] αποτελεί παράδειγμα πρωτοκόλλου διεκδίκησης του μέσου και είναι κυρίως βασισμένη σε ιδέες του πρωτοκόλλου MACAW [4]. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στα ad hoc ασύρματα δίκτυα χάρη στην απλότητα και την αποτελεσματικότητά της, π.χ. στο πρόβλημα hidden terminal. Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες [5] έδειξαν ότι η κατανάλωση ενέργειας με τη χρήση αυτού του πρωτοκόλλου είναι πολύ υψηλή όταν οι κόμβοι βρίσκονται σε αδράνεια, λόγω του idle listening. Το πρωτόκολλο PAMAS [6] εισήγαγε μια βελτίωση στην εξοικονόμηση ενέργειας προσπαθώντας να αποφύγει το φαινόμενο overhearing μεταξύ γειτονικών κόμβων. Το SMAC υιοθέτησε επίσης αυτή την ιδέα, με τη διαφορά ότι δεν χρησιμοποιήθηκε σηματοδότηση out-of-channel, καθώς το PAMAS επιβάλλει τη χρήση δύο ανεξάρτητων ραδιοσυχνοτήτων, πράγμα που με τη σειρά του επιβάλλει την ενσωμάτωση δύο πομποδεκτών σε κάθε κόμβο. Τέλος το PAMAS δεν περιλαμβάνει κάποιο σχήμα μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας λόγω idle listening.

TDMA-based MACs. Η άλλη κατηγορία πρωτοκόλλων MAC βασίζονται στις διαδικασίες κατοχύρωσης και χρονοπρογραμματισμού (reservation and scheduling), όπως για παράδειγμα τα TDMA-based πρωτόκολλα. Τα TDMA πρωτόκολλα έχουν το φυσικό πλεονέκτημα της εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με τα contention-based πρωτόκολλα, διότι ο κύκλος χρήσης του πομποδέκτη μειώνεται και επίσης διότι δεν έχουμε συγκρούσεις και overhead λόγω διεκδίκησης του μέσου. Ωστόσο, η χρήση TDMA πρωτοκόλλων συνήθως απαιτεί την δημιουργία πραγματικών επικοινωνιακών περιοχών (clusters), όπως στο Bluetooth [10], [11] που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι κόμβοι μέσα σε ένα cluster περιορίζονται στο να επικοινωνούν μόνο με κόμβους του ιδίου cluster. Η διαχείριση επικοινωνίας και λειτουργιών μεταξύ των clusters δεν είναι μια εύκολη διαδικασία. Επιπλέον, όταν ο αριθμός των κόμβων μέσα σε ένα cluster αλλάξει, δεν είναι εύκολο για ένα TDMA πρωτόκολλο να μεταβάλλει δυναμικά το μέγεθος του πλαισίου του καναλιού (channel frame) και την ανάθεση των χρονοθυρίδων.

Με βάση τα παραπάνω, η λειτουργία power save (PS) του IEEE 802.11 DCF φαίνεται να σχετίζεται περισσότερο με την low duty cycle λειτουργία του SMAC. Οι κόμβοι στο PS περιοδικά ακούν και κοιμούνται, όπως ακριβώς και στο SMAC. Το πρόγραμμα ύπνου για όλους τους κόμβους είναι κοινό. Η κύρια διαφορά με το SMAC είναι ότι η PS λειτουργία του 802.11 είναι σχεδιασμένη για single hop δίκτυα, όπου όλοι οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν τους άλλους, απλοποιώντας την διαδικασία συγχρονισμού. Έχει παρατηρηθεί όμως [8] ότι στην multi hop περίπτωση η 802.11 PS λειτουργία μπορεί να έχει πρόβλημα στο συγχρονισμό, εξακρίβωση των γειτόνων και στο clustering του δικτύου. Στην πραγματικότητα, το 802.11 MAC έχει σχεδιαστεί για single hop δίκτυα, και η επίδοσή του σε multi hop δίκτυα είναι πολλές φορές

αμφίβολη. Σε αντίθεση, το SMAC έχει σχεδιαστεί για multi hop δίκτυα και δεν υποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι είναι κοινά συγχρονισμένοι. Τέλος, παρόλο που το 802.11 περιλαμβάνει PS λειτουργία, παρέχει πολύ λίγη πληροφορία για το πότε οι κόμβοι πρέπει να τεθούν σε sleep λειτουργία. Αντίθετα, στο SMAC ορίζεται ένας πλήρης μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας.

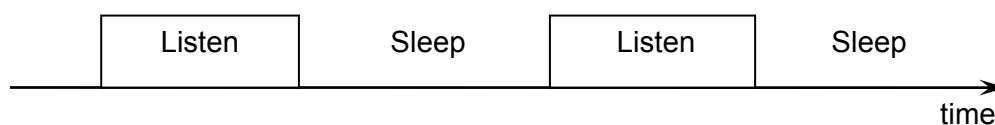
2.1.2 Αρχιτεκτονική του SMAC

Όπως αναφέραμε, το SMAC περιλαμβάνει τεχνικές για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από όλες τις αιτίες σπατάλης ενέργειας που εντοπίσαμε. Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε τις κύριες επιμέρους λειτουργίες του πρωτοκόλλου SMAC.

A. Περιοδικό Listen και Sleep

Είδαμε και παραπάνω ότι σε πολλές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων, οι κόμβοι παραμένουν αδρανείς εάν δεν συμβαίνει κανένα γεγονός. Δεδομένου ότι υπάρχει ελάχιστη ή ακόμη και καθόλου κίνηση μέσα στο δίκτυο, δεν είναι απαραίτητο οι κόμβοι να ακούν συνεχώς. Το SMAC μειώνει την περίοδο listen θέτοντας τους κόμβους σε κατάσταση περιοδικού ύπνου.

Το βασικό σχέδιο φαίνεται στο Σχήμα 4. Κάθε κόμβος κοιμάται για κάποιο χρονικό διάστημα και κατόπιν ξυπνά και ακούει αν κάποιος γειτονικός του κόμβος θέλει να αποστείλει δεδομένα προς αυτόν. Κατά τη διάρκεια του ύπνου ο κόμβος κλείνει τον πομποδέκτη του και ενεργοποιεί ένα χρονόμετρο ώστε να ξυπνήσει μετά από κάποιο προκαθορισμένο διάστημα.



Σχήμα 4. Περιοδικό Listen και Sleep

Ονομάζουμε έναν πλήρη κύκλο listen και sleep πλαίσιο (frame). Η περίοδος listen συνήθως είναι σταθερή, και καθορίζεται από τις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου και του MAC επιπέδου, π.χ. το εύρος ζώνης του καναλιού και το μέγεθος του παραθύρου διεκδίκησης. Ο κύκλος εργασιών (duty cycle) ορίζεται σαν ο λόγος της περιόδου listen προς το μέγεθος του πλαισίου. Η περίοδος ύπνου μπορεί να αλλάξει ανάλογα και με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, πράγμα που αλλάζει τον

κύκλο εργασιών. Για λόγους απλότητας, αυτός ο χρόνος παραμένει σταθερός για όλους τους κόμβους του δικτύου.

Όλοι οι κόμβοι μπορούν να επιλέξουν το δικό τους πρόγραμμα για listen και sleep. Ωστόσο για να μειωθεί το overhead, προτιμάται οι γειτονικοί κόμβοι να επιλέγουν από κοινού ένα πρόγραμμα, δηλαδή να κοιμούνται και να ξυπνούν την ίδια χρονική στιγμή. Σημειώνεται εδώ πως μέσα σε ένα multi hop δίκτυο αισθητήρων όλοι οι κόμβοι μπορεί να μην έχουν τον ίδιο συγχρονισμό. Δύο γειτονικοί κόμβοι A και B μπορεί να έχουν διαφορετικά προγράμματα αν πρέπει να συγχρονιστούν με διαφορετικούς κόμβους όπως τους C και D, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Οι γειτονικοί κόμβοι A και B έχουν διαφορετικά προγράμματα συγχρονισμού. Συγχρονίζονται με τους κόμβους C και D αντίστοιχα.

Οι κόμβοι ανταλλάσσουν τα προγράμμά τους μεταδίδοντας περιοδικά ένα πακέτο SYNC στους άμεσους γείτονες τους. Ένας κόμβος επικοινωνεί με τους γείτονες του σε μια προκαθορισμένη στιγμή της περιόδου listen, εξασφαλίζοντας έτσι ότι οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν ακόμα και αν έχουν διαφορετικά προγράμματα. Στο Σχήμα 5 για παράδειγμα, εάν ο κόμβος A θελήσει να επικοινωνήσει με τον κόμβο B, θα περιμένει μέχρι ο B να μπορεί να ακούσει. Η περίοδος όπου ένας κόμβος μπορεί να στείλει ένα SYNC πακέτο ονομάζεται περίοδος συγχρονισμού.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του SMAC είναι ότι οργανώνει τους κόμβους σε μια επίπεδη, peer to peer τοπολογία. Σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα clustering, το SMAC δεν απαιτεί συντονισμό μεταξύ των cluster heads. Αντίθετα, οι κόμβοι σχηματίζουν ιδεατά clusters γύρω από κοινά προγράμματα, αλλά επικοινωνούν απ' ευθείας με τους υπόλοιπους κόμβους. Ένα πλεονέκτημα αυτού του ευέλικτου συντονισμού είναι ότι μπορεί να είναι πιο αποδοτικός σε τοπολογικές αλλαγές σε σχέση με τα cluster-based πρωτόκολλα. Το μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι η αυξημένη καθυστέρηση μετάδοσης πληροφορίας λόγω του περιοδικού ύπνου. Επιπλέον, η καθυστέρηση μπορεί να αυξάνει σε κάθε hop.

B. Αποφυγή συγκρούσεων.

Εάν πολλοί κόμβοι θέλουν να επικοινωνήσουν με έναν συγκεκριμένο κόμβο την ίδια χρονική στιγμή, θα επιχειρήσουν να στείλουν όταν ο κόμβος αρχίσει να

ακούει. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να διεκδικήσουν το μέσο. Ανάμεσα στα πρωτόκολλα διεκδίκησης του μέσου, το 802.11 τα καταφέρνει πολύ καλά στο θέμα αποφυγής συγκρούσεων. Το SMAC ακολουθεί παρόμοιες τεχνικές, που περιλαμβάνουν φυσική και ιδεατή αίσθηση του φέροντος (carrier sense), και το μοντέλο RTS/CTS για την αντιμετώπιση του hidden terminal προβλήματος.

Σε κάθε μεταδιδόμενο πακέτο υπάρχει ένα πεδίο που υποδεικνύει πόσο θα διαρκέσει η μετάδοσή του. Εάν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο που προορίζεται για άλλο κόμβο, αμέσως γνωρίζει για πόσο χρόνο θα πρέπει να παραμείνει ανενεργός με βάση την πληροφορία σε αυτό το πεδίο. Ο κόμβος αποθηκεύει την τιμή αυτή και θέτει ένα χρονόμετρο. Όσο περνά ο χρόνος, η τιμή στο χρονόμετρο μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Πριν ξεκινήσει μια μετάδοση, ο κόμβος πρώτα κοιτά το χρονόμετρό του. Εάν η τιμή δεν είναι μηδέν, τότε ο κόμβος αντιλαμβάνεται ότι το μέσο είναι κατειλημμένο. Αυτή η τεχνική ονομάζεται ιδεατή αίσθηση φέροντος (virtual carrier sense).

Η φυσική αίσθηση φέροντος πραγματοποιείται στο φυσικό επίπεδο ακούγοντας το κανάλι για πιθανές μεταδόσεις. Η επιλογή του χρόνου που θα γίνει η αίσθηση φέροντος γίνεται τυχαία μέσα σε ένα παράθυρο διεκδίκησης ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συγκρούσεων. Το μέσο χαρακτηρίζεται ως ελεύθερο εάν τόσο η ιδεατή όσο και η φυσική αίσθηση φέροντος υποδηλώνουν ότι είναι ελεύθερο.

Όλοι οι αποστολείς εκτελούν αίσθηση φέροντος πριν ξεκινήσουν μια μετάδοση. Εάν ένας κόμβος αποτύχει να καταλάβει το μέσο, πέφτει για ύπνο και ξυπνά όταν πλέον ο δέκτης είναι διαθέσιμος και ακούει ξανά. Τα πακέτα broadcast μεταδίδονται χωρίς request to send / clear to send (RTS/CTS). Τα πακέτα unicast ακολουθούν τη διαδικασία RTS/CTS/DATA/ACK μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Μετά από μια επιτυχημένη ανταλλαγή RTS και CTS οι δύο κόμβοι θα χρησιμοποιήσουν τον κανονικό χρόνο sleep για μετάδοση δεδομένων. Δεν ακολουθούν πλέον το πρόγραμμα μέχρι να τελειώσει η μετάδοση.

Με την λειτουργία low duty cycle και το μηχανισμό διεκδίκησης του μέσου σε κάθε περίοδο listen, το SMAC αντιμετωπίζει αποδοτικά το πρόβλημα σπατάλης ενέργειας λόγω idle listening και συγκρούσεων. Στην επόμενη ενότητα θα αναλύσουμε την τεχνική του συντονισμένου ύπνου μεταξύ γειτονικών κόμβων.

2.1.3 Coordinated sleeping

Η τεχνική του συντονισμένου ύπνου μειώνει αποδοτικά την σπατάλη ενέργειας λόγω idle listening. Στο SMAC, οι κόμβοι συντονίζουν τα προγράμματα τους αντί να κοιμούνται τυχαία. Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε τις διαδικασίες που όλοι οι κόμβοι σε ένα δίκτυο ακολουθούν για να δημιουργήσουν τα προγράμματα ύπνου

τους. Επίσης παρουσιάζεται μια τεχνική για μείωση της καθυστέρησης της μετάδοσης πληροφορίας λόγω του περιοδικού ύπνου σε κάθε κόμβο.

A. Επιλογή και διατήρηση *schedules*

Πριν κάθε κόμβος ξεκινήσει περιοδικό listen και sleep, χρειάζεται να επιλέξει ένα πρόγραμμα και να το ανταλλάξει με τους γείτονες του. Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα προγραμμάτων (*schedule table*) στον οποίο αποθηκεύει το πρόγραμμά του αλλά και τα προγράμματα όλων των γειτονικών κόμβων. Στη συνέχεια ακολουθεί τα παρακάτω βήματα για να επιλέξει το πρόγραμμά του και να καθιερώσει τον πίνακα προγραμμάτων του.

- 1) Ένας κόμβος πρώτα ακούει για μια προκαθορισμένη διάρκεια χρόνου, ίση τουλάχιστον με την περίοδο συγχρονισμού. Εάν δεν λάβει πρόγραμμα από άλλο κόμβο, αμέσως επιλέγει ένα πρόγραμμα και το ακολουθεί. Εν τω μεταξύ, ο κόμβος προσπαθεί να το κοινοποιήσει κάνοντας broadcast ένα SYNC πακέτο. Το broadcasting του SYNC πακέτου ακολουθεί την κανονική διαδικασία μετάδοσης με διεκδίκηση του μέσου. Ο τυχαίος χρόνος για αίσθηση φέροντος μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης των SYNC πακέτων.
- 2) Εάν ένας κόμβος λάβει ένα πρόγραμμα από κάποιο γείτονα πριν επιλέξει ή ανακοινώσει ένα πρόγραμμα, τότε υιοθετεί αυτό το πρόγραμμα. Κατόπιν ο κόμβος θα προσπαθήσει να ανακοινώσει το πρόγραμμά του στην επόμενη περίοδο listen.
- 3) Υπάρχουν δύο περιπτώσεις εάν ο κόμβος λάβει ένα διαφορετικό πρόγραμμα αφού επιλέξει και ανακοινώσει το δικό του πρόγραμμα. Εάν ο κόμβος δεν έχει άλλους γείτονες, τότε θα αγνοήσει το τρέχον πρόγραμμα και θα υιοθετήσει το νέο. Εάν ο κόμβος ακολουθεί ήδη το πρόγραμμα με έναν ή περισσότερους γείτονες του, υιοθετεί και τα δύο προγράμματα ξυπνώντας και στις δύο περιόδους listen των δύο προγραμμάτων.

Για την περαιτέρω επεξήγηση του αλγορίθμου, ας υποθέσουμε ένα δίκτυο όπου όλοι οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν τους άλλους. Ο κόμβος που θα ξεκινήσει πρώτος θα επιλέξει ένα πρόγραμμα και η μετάδοσή του θα συγχρονίσει όλους τους κόμβους στη γειτονιά του. Εάν δύο ή περισσότεροι κόμβοι ξεκινήσουν την ίδια στιγμή, θα τελειώσουν την αρχική περίοδο listen επίσης την ίδια στιγμή, και θα επιλέξουν ανεξάρτητα ένα πρόγραμμα ο καθένας. Ανεξάρτητα από το ποιος θα μεταδώσει πρώτος το SYNC πακέτο (κερδίσει τη διεκδίκηση του μέσου), θα συγχρονίσει το υπόλοιπο των κόμβων.

Ωστόσο, δύο κόμβοι μπορεί να επιλέξουν ανεξάρτητα προγράμματα εάν δεν μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο. Στην περίπτωση αυτή θα υιοθετήσουν και τα δύο προγράμματα. Για παράδειγμα, οι κόμβοι A και B στο Σχήμα 5 θα ξυπνήσουν στην περίοδο listen που υποδεικνύουν και τα δύο προγράμματα. Με αυτό τον τρόπο, κάθε κόμβος χρειάζεται να στείλει το πρόγραμμά του μόλις μια φορά. Το μειονέκτημα αυτού είναι ότι αυτοί οι κόμβοι (π.χ. οι κόμβοι A και B στο Σχήμα 5) έχουν λιγότερη περίοδο ύπνου και συνεπώς καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τους υπόλοιπους.

B. Adaptive listening

Η τεχνική του περιοδικού listen και sleep είναι ικανή να μειώσει σημαντικά το χρόνο που δαπανιέται σε idle listening όταν το φορτίο στο δίκτυο είναι σχετικά χαμηλό. Ωστόσο, όταν ένα γεγονός αίσθησης συμβεί τελικά, θα θέλαμε τα δεδομένα αίσθησης να ταξιδέψουν μέσα στο δίκτυο αισθητήρων χωρίς μεγάλη καθυστέρηση. Με κάθε κόμβο να ακολουθεί αυστηρά το πρόγραμμα ύπνου του, υπάρχει μια πιθανή καθυστέρηση σε κάθε hop, της οποίας η μέση τιμή εξαρτάται από το μέγεθος του frame. Για το σκοπό αυτό εισάγουμε ένα μηχανισμό ο οποίος σε αυτή την περίπτωση αναλαμβάνει να αλλάξει την κατάσταση των κόμβων από low duty cycle σε ενεργούς.

Το SMAC λοιπόν προτείνει μια σημαντική τεχνική, ονομαζόμενη adaptive listening (προσαρμοσμένο άκουσμα) για να βελτιώσει τις καθυστερήσεις που εισάγονται από το συντονισμένο ύπνο. Η βασική ιδέα είναι να αφήνουμε τον κόμβο να ακούει τις μεταδόσεις των γειτόνων του (αρκούν μόνο τα RTS και CTS) και να ξυπνάει για μια μικρή χρονική περίοδο στο τέλος μιας τέτοιας μετάδοσης. Με αυτό τον τρόπο, εάν ο κόμβος αυτός είναι ο επόμενος κόμβος στη δρομολόγηση των δεδομένων, είναι σε θέση να λάβει αμέσως τα δεδομένα παρά να περιμένει για την επόμενη listen περιόδό του. Εάν ο κόμβος δεν λάβει τίποτα κατά τη διάρκεια της περιόδου adaptive listening, θα πέσει ξανά για ύπνο μέχρι την προγραμματισμένη περίοδο listen.

Ας ξαναδούμε το διάγραμμα συγχρονισμού στο Σχήμα 6. Εάν ο επόμενος κόμβος είναι γείτονας του αποστολέα, θα λάβει το RTS πακέτο. Εάν είναι γείτονας του παραλήπτη, θα λάβει το CTS πακέτο από τον παραλήπτη. Με τον τρόπο αυτό, οι γείτονες τόσο του αποστολέα όσο και του παραλήπτη θα γνωρίζουν πόσο θα διαρκέσει η μετάδοση από το σχετικό πεδίο διάρκειας των RTS και CTS πακέτων. Έτσι μπορούν να ξυπνήσουν ακριβώς μόλις τελειώσει η μετάδοση.

Το χρονικό διάστημα του adaptive listening δεν περιλαμβάνει χρόνο για πακέτο SYNC όπως η κανονική περίοδος listen. Τα πακέτα SYNC αποστέλλονται μόνο στην προγραμματισμένη περίοδο listen ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι

γείτονες θα τα λάβουν. Για να δοθεί προτεραιότητα στο SYNC πακέτο, οι ενέργειες adaptive listen και μετάδοση δεν πραγματοποιούνται εάν η διάρκεια από την στιγμή της προηγούμενης μετάδοσης μέχρι την προκαθορισμένη στιγμή για listen είναι μικρότερη από το διάστημα adaptive listen.

Σημειώνεται ότι μπορεί να υπάρξουν γείτονες που να μην λάβουν ένα πακέτο από την προηγούμενη μετάδοση, ειδικά όταν αυτή αρχίσει συντονισμένα, δηλαδή εκτός της προκαθορισμένης listen περιόδου. Έτσι εάν ένας αποστολέας ξεκινήσει μια μετάδοση στέλνοντας ένα RTS πακέτο κατά τη διάρκεια του adaptive listening, μπορεί να μην λάβει μια απάντηση CTS. Στην περίπτωση αυτή, ξαναπέφτει για ύπνο και θα προσπαθήσει ξανά στην επόμενη κανονική περίοδο listen.

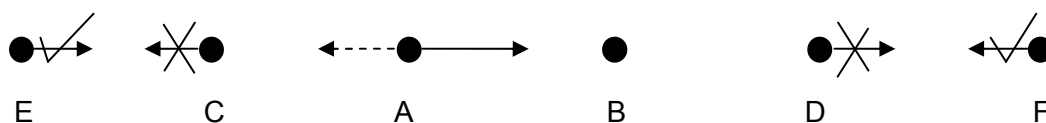
2.1.4 Τεχνικές Overhearing avoidance και Message passing

Όπως είδαμε η αποφυγή συγκρούσεων είναι μια βασική ευθύνη των MAC πρωτοκόλλων. Το πρωτόκολλο SMAC υιοθετεί ένα σχήμα διεκδίκησης του μέσου. Είναι δεδομένο ότι κάθε πακέτο που εκπέμπεται από έναν κόμβο θα ληφθεί από όλους τους γείτονες του παρόλο που μόνο ένας από αυτούς είναι ο πραγματικός του παραλήπτης. Το overhearing καθιστά τα πρωτόκολλα διεκδίκησης μέσου λιγότερο αποδοτικά από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με τα TDMA πρωτόκολλα.

A. Αποφυγή overhearing

Στο 802.11 κάθε κόμβος ακούει όλες τις μεταδόσεις των γειτόνων του ώστε να πραγματοποιήσει αποδοτικά ιδεατή αίσθηση φέροντος. Σαν αποτέλεσμα, κάθε κόμβος ακούει τις μεταδόσεις πολλών πακέτων που δεν προορίζονται για αυτόν. Αυτό οδηγεί σε σημαντική σπατάλη ενέργειας, ειδικά όταν η πυκνότητα των κόμβων και η κίνηση δεδομένων είναι μεγάλη.

Το πρωτόκολλο SMAC προσπαθεί να αντιμετωπίσει το overhearing θέτοντας για ύπνο τους γειτονικούς κόμβους στους οποίους δεν απευθύνεται η μετάδοση, μετά από λήψη σήματος RTS ή CTS. Εφόσον τα πακέτα δεδομένων είναι συνήθως μεγαλύτερα από τα πακέτα ελέγχου, αυτή η τεχνική προλαμβάνει τους γειτονικούς



Σχήμα 6. Ποιος θα πρέπει να πέσει για ύπνο όταν ο A μεταδίδει στον B; Με X συμβολίζεται η μη επιτρεπόμενη μετάδοση ενώ με ✓ η επιτρεπόμενη.

κόμβους από το να λάβουν τα μεγάλα πακέτα δεδομένων και τα πακέτα ACK που τα ακολουθούν. Θα μελετήσουμε ποιοι κόμβοι θα πρέπει να πέσουν για ύπνο όταν λαμβάνει χώρα μια μετάδοση.

Στο Σχήμα 6, οι κόμβοι A, B, C, D, E και F διαμορφώνουν ένα multi hop δίκτυο όπου κάθε κόμβος μπορεί να ακούσει τη μετάδοση μόνο από τους άμεσους γείτονες του. Ας υποθέσουμε τώρα ότι ο κόμβος A μεταδίδει ένα πακέτο προς τον κόμβο B. Ποιοι από τους γειτονικούς κόμβους θα πρέπει να πέσουν για ύπνο; Όπως είναι γνωστό η σύγκρουση πραγματοποιείται στο δέκτη. Είναι σαφές πως ο κόμβος D θα πρέπει να πέσει για ύπνο γιατί η μετάδοσή του παρεμβάλλεται στην λήψη του B. Οι κόμβοι E και F δεν προκαλούν παρεμβολή συνεπώς δεν χρειάζεται να πέσουν για ύπνο. Ο κόμβος C θα πρέπει να πέσει για ύπνο; Ο C βρίσκεται δύο hop μακριά από τον B και η μετάδοσή του δεν παρεμβάλλεται με την λήψη του B, έτσι είναι ελεύθερος να μεταδώσει στους γείτονες του όπως για παράδειγμα στον E. Ωστόσο, ο C δεν θα μπορέσει να λάβει απάντηση από τον E, π.χ. CTS ή δεδομένα, διότι η μετάδοση του E συγκρούεται με τη μετάδοση του A στον κόμβο C. Έτσι η μετάδοση του C είναι απλά σπατάλη ενέργειας. Επιπλέον, αφού ο A στείλει στον B, υπάρχει περίπτωση να περιμένει για ACK από τον B, και η μετάδοση του C θα συγκρουστεί με το ACK πακέτο. Συμπερασματικά, όλοι οι άμεσοι γείτονες τόσο του αποστολέα όσο και του παραλήπτη θα πρέπει να κοιμηθούν αφού ακούσουν το RTS ή CTS μέχρι να τελειώσει η μετάδοση, όπως υποδεικνύουν τα «X» στο Σχήμα 6.

Κάθε κόμβος κρατά ένα χρονόμετρο ώστε να αντιλαμβάνεται την δραστηριότητα της περιοχής του. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο που δεν απευθύνεται σε αυτόν, ενημερώνει το ρολόι του προσθέτοντας την διάρκεια μετάδοσης όπως την διαβάζει από το πεδίο διάρκειας του πακέτου. Μια μη μηδενική τιμή του ρολογιού υποδηλώνει ότι μια μετάδοση λαμβάνει χώρα στην περιοχή του κόμβου. Η τιμή του ρολογιού μειώνεται όσο ο χρόνος περνάει ανάλογα με το συγχρονισμό που έχει συμφωνηθεί από τους κόμβους. Έτσι κάθε κόμβος πέφτει για ύπνο για να αποφύγει το overhearing εάν η τιμή του ρολογιού δεν είναι μηδέν. Κατόπιν ξυπνάει μόλις το ρολόι του μηδενιστεί.

Σημειώνεται επίσης ότι σε μερικές περιπτώσεις το overhearing είναι επιθυμητό. Μερικοί αλγόριθμοι βασίζονται στο overhearing ώστε να συλλέξουν πληροφορία από την περιοχή που βρίσκονται οι κόμβοι (π.χ. επίβλεψη κίνησης, πληροφορίες δρομολόγησης ή κατανεμημένα ερωτήματα προς το δίκτυο). Εάν απαιτείται, το SMAC μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να επιτρέπει επιλεγμένο overhearing ανάλογα με την εφαρμογή. Ωστόσο, αλγόριθμοι που δεν επιτρέπουν overhearing είναι μάλλον προτιμότεροι για δίκτυα με περιορισμό ενέργειας όπως στην περίπτωση των δικτύων αισθητήρων που μελετάμε. Οι απαιτήσεις της εφαρμογής από εκεί και πέρα καθορίζουν τις παραμέτρους του πρωτοκόλλου.

B. Message passing

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον μηχανισμό message passing ο οποίος χρησιμοποιείται για την μετάδοση μεγάλων μηνυμάτων τόσο από πλευράς χρόνου μετάδοσης όσο και από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας. Με τον όρο *μήνυμα* εννοούμε την συλλογή σημαντικών, συσχετισμένων μονάδων δεδομένων. Ο παραλήπτης συνήθως χρειάζεται να συλλέξει όλες τις μονάδες δεδομένων προτού εφαρμόσει in-network επεξεργασία ή συνένωση δεδομένων.

Τα μειονεκτήματα της μετάδοσης ενός μεγάλου μηνύματος σε ένα μεμονωμένο πακέτο είναι το μεγάλο κόστος επαναμετάδοσης του πακέτου εάν χτυπηθεί από θόρυβο κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Ωστόσο, εάν διασπάσουμε ένα μεγάλο μήνυμα σε πολλά ανεξάρτητα μικρά πακέτα, θα πρέπει να υποστούμε το κόστος μεγάλου overhead και καθυστέρησης στη μετάδοση, λόγω των RTS και CTS πακέτων που πρέπει να συμμετάσχουν στην μετάδοση των επί μέρους τμημάτων.

Το πρωτόκολλο SMAC προτείνει τη διάσπαση ενός μεγάλου μηνύματος σε πολλά μικρά τεμάχια και την συνεχόμενη μετάδοσή τους. Μόνο ένα RTS και CTS χρησιμοποιούνται. Καταλαμβάνουν το μέσο για την μετάδοση όλων των τμημάτων. Κάθε φορά που ένα τμήμα μεταδοθεί, ο αποστολέας περιμένει για ένα ACK από τον παραλήπτη. Εάν δεν λάβει το ACK θα περιμένει για ένα χρονικό διάστημα και κατόπιν θα επαναμεταδώσει το τμήμα που δεν επιβεβαιώθηκε.

Όπως και προηγουμένως, όλα τα πακέτα εμπεριέχουν πεδίο διάρκειας, το οποίο τώρα δείχνει το χρόνο που απαιτείται από όλα τα υπολειπόμενα τμήματα και ACK πακέτα. Εάν ένας γειτονικός κόμβος ακούσει ένα RTS ή CTS πακέτο, θα πέσει για ύπνο για όσο χρόνο απαιτείται για να μεταδοθούν όλα τα τμήματα του μηνύματος δεδομένων. Επίσης, με αυτό τον τρόπο εάν ένας κόμβος ξυπνήσει στη διάρκεια της μετάδοσης ή εισέλθει στο δίκτυο ξαφνικά, τότε θα πέσει για ύπνο ασχέτως αν είναι γείτονας του αποστολέα ή του παραλήπτη. Εάν ένα πακέτο χτυπηθεί από θόρυβο, οι γείτονες που κοιμούνται δεν θα το αντιληφθούν αμέσως. Θα το αντιληφθούν όμως μόλις ξυπνήσουν και έτσι θα παρατείνουν τον ύπνο τους ανάλογα με την επιπλέον διάρκεια που απαιτείται μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση του μηνύματος.

Ο σκοπός που χρησιμοποιείται ACK πακέτο μετά από την μετάδοση κάθε τμήματος του μηνύματος είναι για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα του hidden terminal στην περίπτωση που ένας κόμβος ξυπνήσει πρόωρα ή εισαχθεί στο δίκτυο κάποια τυχαία χρονική στιγμή. Εάν ο κόμβος είναι γείτονας μόνο του παραλήπτη αλλά όχι του αποστολέα, δεν θα αντιληφθεί τα πακέτα που στέλνει ο αποστολέας στον παραλήπτη. Εάν ο παραλήπτης δεν στέλνει ACK πακέτα συχνά, ο νέος κόμβος μπορεί λανθασμένα να θεωρήσει, μέσω της αίσθησης φέροντος, ότι το μέσο είναι ελεύθερο. Εάν ξεκινήσει μετάδοση, θα συγκρουστεί με την λήψη του παραλήπτη.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι και το IEEE 802.11 υποστηρίζει την διάσπαση μηνυμάτων. Στην περίπτωση αυτή τα RTS και CTS δεσμεύουν το μέσο μόνο για το πρώτο τμήμα δεδομένων και το πρώτο ACK. Το πρώτο τμήμα και ACK δεσμεύουν το μέσο για το δεύτερο τμήμα και ACK κ.ο.κ. Για κάθε γειτονικό κόμβο αφού λάβει ένα τμήμα και ένα ACK, γνωρίζει ότι υπάρχει ένα ακόμα τμήμα για να μεταδοθεί. Συνεπώς θα πρέπει να συνεχίσει να ακούει μέχρις ότου όλα τα τμήματα μεταδοθούν. Και εδώ, το να ακούν συνεχώς οι κόμβοι αποτελεί σπατάλη ενέργειας για δίκτυα όπου οι πόροι ενέργειας είναι περιορισμένοι.

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 έχει σχεδιαστεί με κύρια προτεραιότητα την δίκαιη αντιμετώπιση των κόμβων. Εάν ο αποστολέας δεν λάβει το ACK για ένα τμήμα, θα πρέπει να διακόψει τη μετάδοση και να διεκδικήσει πάλι το μέσο, ώστε όλοι οι κόμβοι να αποκτήσουν ευκαιρία να μεταδώσουν. Αυτή η τεχνική μπορεί να προκαλέσει μεγάλη καθυστέρηση εάν ο παραλήπτης χρειάζεται ολόκληρο το μήνυμα ώστε να πραγματοποιήσει επεξεργασία. Αντίθετα, με την τεχνική message passing ο χρόνος μετάδοσης του αποστολέα επεκτείνεται ώστε να επαναμεταδοθεί το χαμένο τμήμα, πράγμα που συνεπάγεται λιγότερη διεκδίκηση και καθυστέρηση. Το πρωτόκολλο SMAC θέτει έναν περιορισμό στο πόσες επεκτάσεις μπορούν να γίνουν λόγω θορύβου ή κακής ποιότητας ζεύξης με τον παραλήπτη.

2.1.5 Επίλογος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάσαμε το SMAC, ένα πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο ειδικά σχεδιασμένο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ο πρωτεύων στόχος στον σχεδιασμό του πρωτοκόλλου. Η λειτουργία low duty cycle των κόμβων επιτυγχάνεται με τη χρήση περιοδικού ύπνου. Σε συνδυασμό με τις τεχνικές αποφυγής overhearing και message passing, το SMAC επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με πρωτόκολλα τύπου 802.11 που δεν περιλαμβάνουν sleeping στους κόμβους. Το SMAC επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε σημαντικό βαθμό, γεγονός μείζονος σημασίας για εφαρμογές δικτύων αισθητήρων.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε μέσω της εφαρμογής που θα μελετήσουμε την επίπτωση που έχει η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου SMAC στην διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που εκτελέσαμε επιβεβαιώνεται πως το SMAC επιμηκύνει σημαντικά την διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.2 Scoring σε δίκτυα αισθητήρων με τη χρήση του αλγόριθμου Voronoi

Ένα από τα πλέον δημοφιλή σενάρια για δίκτυα αισθητήρων είναι η παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Οι κόμβοι στην περίπτωση αυτή συλλέγουν δεδομένα και τα αποστέλλουν στο συλλέκτη μέσω μιας ασύρματης multi hop τοπολογίας. Όπως ήδη αναφέραμε, οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία και κατά τη στιγμή της τοποθέτησης είναι αδύνατον να γνωρίζουν τόσο την θέση των συλλεκτών (sinks) όσο και προς ποιο κόμβο θα πρέπει να μεταδώσουν ώστε τελικά τα δεδομένα να φτάσουν στο συλλέκτη. Έτσι, για να δημιουργηθούν οι διαδρομές δικτύωσης και δρομολόγησης μεταξύ των κόμβων, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια δενδροειδής δομή δικτύωσης και για να ενημερώνονται οι κόμβοι, θα πρέπει περιοδικά οι συλλέκτες να διοχετεύουν μηνύματα μέσα στο δίκτυο. Για λόγους scaling, αντοχής σε αστοχίες κόμβων και ισόρροπης κατανομής φορτίου στο δίκτυο, προτιμάται η τοποθέτηση περισσότερων του ενός συλλεκτών ώστε οι κόμβοι να αποστέλλουν τα δεδομένα τους στο συλλέκτη που βρίσκεται «πλησιέστερα» σε αυτούς (με τον όρο πλησιέστερα αναφερόμαστε στην ελαχιστοποίηση μιας επιλεγμένης μετρικής, όπως για παράδειγμα hop distance, ευκλείδειας απόστασης ή ενεργειακού κόστους) παρά να αποστέλλουν όλοι οι κόμβοι σε ένα και μοναδικό συλλέκτη.

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε μια αρχιτεκτονική για scoring με τη χρήση του αλγόριθμου Voronoi, ενός κατανεμημένου αλγόριθμου υπεύθυνου να σχηματίζει δομή δικτύωσης μεταξύ των κόμβων και διαδρομές επικοινωνίας των κόμβων με τους συλλέκτες, καθώς και να περιορίζει την διοχέτευση μηνυμάτων των συλλεκτών προς τους κόμβους. Η αρχιτεκτονική αυτή έχει την ιδιότητα ότι ένα ερώτημα προς το δίκτυο που προέρχεται από έναν συλλέκτη θα προωθηθεί μόνο στους κόμβους για τους οποίους αυτός ο συλλέκτης είναι ο *κοντινότερος* (με την έννοια της απόστασης όπως εξηγήθηκε παραπάνω). Έτσι το ερώτημα προωθείται προς τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό κόμβων και το overhead δεν αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου ή του αριθμού των συλλεκτών. Τέλος, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγόριθμου είναι ότι έχει μια απλή κατανεμημένη υλοποίηση και απαιτεί ελάχιστη μνήμη και επεξεργαστική ισχύ σε κάθε κόμβο, πράγμα που τον καθιστά εξαιρετικά συμφέροντα σε σχέση με παραδοσιακούς αλγόριθμους routing / scoring που εφαρμόζονται σε άλλου τύπου ασύρματα δίκτυα.

2.2.1 Εισαγωγή

Μερικές εφαρμογές παρακολούθησης και καταγραφής του περιβάλλοντος περιλαμβάνουν κλιματικό έλεγχο, παρακολούθηση σεισμικής δραστηριότητας, οικίας, αγροτικής έκτασης ή πεδίου μάχης, καθώς και εφαρμογές κατασκοπείας και

ασφάλειας περιοχής. Για όλες αυτές τις εφαρμογές, είναι απαραίτητο να μετρηθούν φυσικά φαινόμενα μέσω διάσπαρτων αισθητήρων και τα δεδομένα της μέτρησης να αποσταλούν σε κάποιο συλλέκτη.

Τέτοιες εφαρμογές πολλές φορές χρησιμοποιούν ένα δένδρο συλλογής δεδομένων (data gathering tree), το ρόλο της ρίζας του οποίου αναλαμβάνει ένας συλλέκτης. Κάθε κόμβος αισθητήρα στέλνει δεδομένα στον *πατέρα* του, δηλαδή τον κόμβο που είναι ο επόμενος στην multi hop διαδρομή προς το συλλέκτη. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να εκτελούν παράλληλα και διαδικασίες συμπίεσης ή συνένωσης δεδομένων [12], [13]. Ωστόσο, ένα σύστημα που περιλαμβάνει μόνο ένα συλλέκτη κλιμακώνεται μη αποδοτικά με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου. Καθώς η διάμετρος του δικτύου μεγαλώνει, τα πακέτα δεδομένων θα πρέπει να διασχίσουν έναν ολοένα αυξανόμενο αριθμό από κόμβους ώστε να φτάσουν στο συλλέκτη, αυξάνοντας έτσι τόσο την καθυστέρηση όσο και την απαιτούμενη ενέργεια μετάδοσης. Επιπλέον, οι κόμβοι που βρίσκονται δίπλα από τους συλλέκτες διαχειρίζονται ένα δυσανάλογο φορτίο κίνησης σε σχέση με τους κόμβους που βρίσκονται στην περίμετρο του δικτύου. Φυσικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση επιπλέον συλλεκτών εμπεριέχει και ένα κόστος εγκατάστασης καθώς οι συλλέκτες είναι ειδικοί κόμβοι που θα πρέπει να τροφοδοτούνται αδιαλείπτως με ενέργεια, πιθανά να συνδέονται ενσύρματα με το κέντρο ελέγχου κ.α. Σε κάθε περίπτωση στην πλειοψηφία των εφαρμογών η τοποθέτηση περισσότερων του ενός συλλεκτών αποδεικνύεται πιο συμφέρουσα.

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το πρόβλημα του περιορισμού της μεταβίβασης μηνυμάτων και της κατασκευής δένδρου επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι δύο αυτές διαδικασίες είναι υπεύθυνες για την αποδοτική μεταβίβαση ερωτημάτων στους κόμβους και την κατασκευή διαδρομών από κάθε κόμβο (*πηγή*) σε κάποιο παρακείμενο συλλέκτη. Σημειώνουμε ότι λόγω πιθανών παρεμβολών από το περιβάλλον στις ραδιοσυχνότητες επικοινωνίας των κόμβων και λόγω του γεγονότος ότι μερικοί κόμβοι μπορεί να τεθούν εκτός λειτουργίας για λόγους που έχουμε ήδη αναφέρει, οι διαδρομές προς τους συλλέκτες μπορεί να αλλάζουν με το χρόνο και να προσαρμόζονται δυναμικά, απαιτώντας έτσι συνεχή επανα-οργάνωση και επανα-εγκαθίδρυση των διαδρομών μεταξύ των κόμβων και των συλλεκτών.

Η απλούστερη λύση, προερχόμενη από τη μέθοδο one-phase pull diffusion [9] είναι κάθε συλλέκτης να πλημμυρίζει το δίκτυο με μηνύματα. Οι κόμβοι έτσι μπορούν να μαθαίνουν τον πατέρα τους καθώς και την απόσταση από τον κοντινότερο συλλέκτη και απλά να επιλέγουν την πλέον συμφέρουσα λύση. Ωστόσο, αυτό το σχήμα δεν είναι το πλέον αποδοτικό, καθώς το overhead ανά κόμβο αυξάνει δραστικά με το μέγεθος του δικτύου. Με βάση αυτό, χρειαζόμαστε έναν τρόπο να

περιορίσουμε τη διάχυση των ερωτημάτων που προέρχονται από πολλαπλούς συλλέκτες μέσα στο δίκτυο έτσι ώστε κάθε *πλημμύρα* ερωτημάτων να μην διασχίζει όλο το δίκτυο. Συνοψίζοντας, ο σκοπός μας υποκινείται από το εξής ερώτημα: *Πως μπορούμε να περιορίσουμε την διάχυση μηνυμάτων από πολλαπλούς συλλέκτες σε όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους γίνεται, ενώ παράλληλα να εξασφαλίσουμε ότι κάθε κόμβος θα λάβει πληροφορία που θα προέρχεται τουλάχιστον από τον κοντινότερο σε αυτόν συλλέκτη;*

Θα μελετήσουμε για τον σκοπό αυτό έναν απλό και πρακτικό αλγόριθμο, που ονομάζεται Voronoi scoring. Με βάση αυτό τον αλγόριθμο οι συλλέκτες διαβιβάζουν μηνύματα μόνο σε μια περιοχή (υπό-δίκτυο) κόμβων που περιέχονται μέσα σε μια περιοχή Voronoi, αποκλείοντας κόμβους εκτός της περιοχής αυτής. Ο αλγόριθμος αυτός δεν απαιτεί ειδικό τρόπο επικοινωνίας για την εγκαθίδρυση των περιοχών, καθώς επίσης δεν απαιτεί από τους κόμβους να έχουν οποιαδήποτε γνώση της τοπολογίας του δικτύου, του αριθμού των κόμβων, της θέσης τους ή της θέσης των συλλεκτών στην περιοχή. Συνεπώς, δεν απαιτείται από τους κόμβους να ενσωματώνουν ειδικού τύπου πομποδέκτη ούτε υποσύστημα εντοπισμού θέσης.

2.2.2 Μοντέλο scoring

Τόσο το μοντέλο scoring όσο και οι υποθέσεις που γίνονται, βασίζονται σε πρακτικά συστήματα, που πολλά από αυτά έχουν υλοποιηθεί και τεθεί σε λειτουργία.

A. Μετρική απόστασης και συλλογή δεδομένων από τον πλησιέστερο συλλέκτη

Ένα πακέτο δεδομένων συλλέγεται επιτυχώς μόλις φτάσει σε οποιοδήποτε συλλέκτη του δικτύου. Για λόγους αποδοτικής λειτουργίας, επιθυμούμε οι κόμβοι να αποστέλλουν τα δεδομένα που συλλέγουν στον πλησιέστερο συλλέκτη. Με άλλα λόγια, κάθε εσωτερικός κόμβος της περιοχής Voronoi V_k στέλνει τα δεδομένα του στο συλλέκτη k . Ένας κόμβος που βρίσκεται στην περίμετρο της περιοχής Voronoi μπορεί να στέλνει τα δεδομένα σε οποιονδήποτε από τους ισαπέχοντες συλλέκτες.

Το ποιος συλλέκτης είναι πλησιέστερος εξαρτάται από την επιλεγμένη κάθε φορά μετρική απόστασης που χρησιμοποιούμε. Σε πολλές περιπτώσεις (όπως και στην μελέτη στην οποία βασιστήκαμε) η μετρική που χρησιμοποιήθηκε ήταν το hop count. Υποθέτοντας ότι κάθε κόμβος μεταδίδει με την ίδια ισχύ εκπομπής, η επιλογή αυτής της μετρικής μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για να μεταδοθεί ένα πακέτο δεδομένων από την πηγή προς το συλλέκτη. Βέβαια κανείς μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερο εξειδικευμένες μετρικές. Στην εφαρμογή που μελετάμε στο επόμενο κεφάλαιο εξετάζουμε την επίδοση του δικτύου και με βάση μια άλλη

μετρική, αυτή της διαδρομής μικρότερου ενεργειακού κόστους που ακολουθείται για την μετάδοση ενός πακέτου, δεδομένου ότι το ενεργειακό κόστος ενός κόμβου που έχει λίγη εναπομένουσα ενέργεια είναι μεγαλύτερο απ' ότι ενός κόμβου με περισσότερη.

B. Διαμόρφωση του δένδρου

Όπως περιγράψαμε, για την διαμόρφωση του δένδρου χρησιμοποιείται διαδικασία reverse-path flooding. Τα πακέτα που προέρχονται από τους συλλέκτες και διαβιβάζονται στο δίκτυο για διαμόρφωση διαδρομών, περιέχουν ένα πεδίο hop count το οποίο υποδηλώνει τον αριθμό των hops που το πακέτο έχει διασχίσει από τη στιγμή που έφυγε από το συλλέκτη. Όταν ένας κόμβος λάβει το πακέτο αμέσως το προωθεί στους γείτονες του μέχρι όλοι οι κόμβοι να το λάβουν. Όμοια αντίγραφα των πακέτων ανιχνεύονται με βάση έναν αύξοντα αριθμό και απορρίπτονται. Μόλις τα πακέτα για εγκαθίδρυση διαδρομών έχουν φτάσει σε όλους τους κόμβους του δικτύου κάθε κόμβος θα γνωρίζει τον πατέρα του και την απόσταση από τον πλησιέστερο συλλέκτη στο δένδρο που έχει διαμορφωθεί. Από το σημείο αυτό και πέρα οι κόμβοι προωθούν τα πακέτα τους (και τα πακέτα των *παιδιών* τους) στον πατέρα τους.

2.2.3 Ο αλγόριθμος Voronoi

Ο βασικός στόχος μας είναι να περιορίσουμε την πλημμύρα των μηνυμάτων που προέρχονται από τους συλλέκτες ώστε αυτά να μην προωθούνται πέρα από τα όρια της περιοχής Voronoi ενώ ταυτόχρονα όλοι οι κόμβοι να λαμβάνουν μηνύματα τουλάχιστον από ένα συλλέκτη. Από την οπτική γωνία ενός κόμβου, αυτό σημαίνει ότι ένα μήνυμα που προέρχεται από το συλλέκτη k θα πρέπει να προωθηθεί μόνο εάν ο κόμβος είναι εσωτερικός κόμβος της περιοχής V_k . Ειδικότερα, ένας κόμβος i γνωρίζει ότι ανήκει στην περιοχή V_k όταν τα μηνύματα από τον συλλέκτη k φτάνουν στον i πιο σύντομα σε σχέση με τους υπόλοιπους συλλέκτες. Εάν δύο συλλέκτες απέχουν από τον i ακριβώς ίδια απόσταση, τότε λέμε ότι ο i είναι ένας περιμετρικός κόμβος μεταξύ των δύο συλλεκτών. Η πολιτική για το ποιόν συλλέκτη θα πρέπει να διαλέξει ο κόμβος στην περίπτωση αυτή ορίζεται από την εφαρμογή.

Αυτή η υπόθεση μας οδηγεί στην εξής απλή υλοποίηση: κάθε κόμβος κρατά ένα αρχείο με πληροφορίες για τον πλησιέστερο συλλέκτη και την απόσταση από αυτόν. Όταν ένα μήνυμα φτάσει στον κόμβο προερχόμενο από ένα συλλέκτη, τότε αυτός κοιτάζει την απόσταση που έχει διασχίσει το πακέτο μέχρι να φτάσει σε αυτόν. Εάν η απόσταση που αναφέρει το πακέτο είναι μικρότερη από αυτή που έχει ήδη ο

κόμβος, τότε αυτός ανανεώνει την πληροφορία στο αρχείο του και προωθεί το πακέτο στους γείτονες του. Εάν δεν είναι, τότε απορρίπτει το πακέτο και δεν το προωθεί. Ένας κόμβος επίσης προωθεί το μήνυμα εάν η απόσταση που έχει διανύσει είναι ίση με την απόσταση που έχει στο αρχείο του και προέρχεται από τον κοντινότερο συλλέκτη. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε τα επόμενα μηνύματα να προωθούνται από τους κόμβους που ανήκουν στην ίδια περιοχή. Η σημασία αυτού έχει να κάνει με τη δυναμική προσαρμογή του δικτύου σε αλλαγές τοπολογίας και εισαγωγή νέων κόμβων. Εάν τα ισαπέχοντα μηνύματα δεν προωθούνται, ένας νέος κόμβος που τοποθετείται έξω από την περίμετρο μιας περιοχής ποτέ δεν θα ενημερωθεί από πακέτο εγκαθίδρυσης και έτσι θα παραμείνει μόνιμα εκτός δικτύου.

Ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου δίδεται στο Σχήμα 7. Είναι λίγο πιο γενικός σε σχέση με την περιγραφή που προηγήθηκε, καθώς τα μηνύματα μπορεί να προωθούνται και πέραν της διαμέτρου της περιοχής Voronoi κατά ένα διάστημα επικάλυψης L , σταθερό για όλους τους κόμβους στο δίκτυο. Θέτοντας $L = 0$ έχουμε την πιο αυστηρή εκδοχή του αλγορίθμου, όπου οι περιοχές Voronoi δεν επικαλύπτονται. Σημειώνουμε εδώ πως χωρίς τη δεύτερη συνθήκη ($\Delta = 0$ και $k = \text{closest_sink}$) στην γραμμή 7, μόνο το πρώτο μήνυμα από ένα συλλέκτη θα προωθηθεί από κόμβους της περιοχής του. Πράγματι, όταν οι κόμβοι λάβουν

Αλγόριθμος Voronoi(k, d, n)

(* Καλείται κάθε φορά που λαμβάνεται ένα πακέτο *)

Είσοδοι: Συλλέκτης k , απόσταση d , γείτονας n

(* Τα k και n διαβάζονται από το header του εισερχόμενου πακέτου *)

(* n είναι ο γείτονας που μετέδωσε το πακέτο στον κόμβο *)

(* $d_{\min}$ είναι η απόσταση στον πλησιέστερο γνωστό συλλέκτη *)

1. $\Delta \leftarrow d - d_{\min}$

2. **Εάν** ($\Delta \leq 0$)

(* ανανέωσε εάν η απόσταση είναι μικρότερη ή ίση από την τρέχουσα *)

3. **Τότε**

4. $\text{parent} \leftarrow n$

5. $\text{closest_sink} \leftarrow k$

6. $d_{\min} \leftarrow d$

7. **Εάν** $\Delta < L$ ή ($\Delta = 0$ και $k = \text{closest_sink}$)

(* Προώθησε εάν ανήκει στην περιοχή Voronoi ή επιτρέπεται επικάλυψη *)

8. **Τότε**

9. $\text{αύξησε_απόσταση_στο_πακέτο}()$

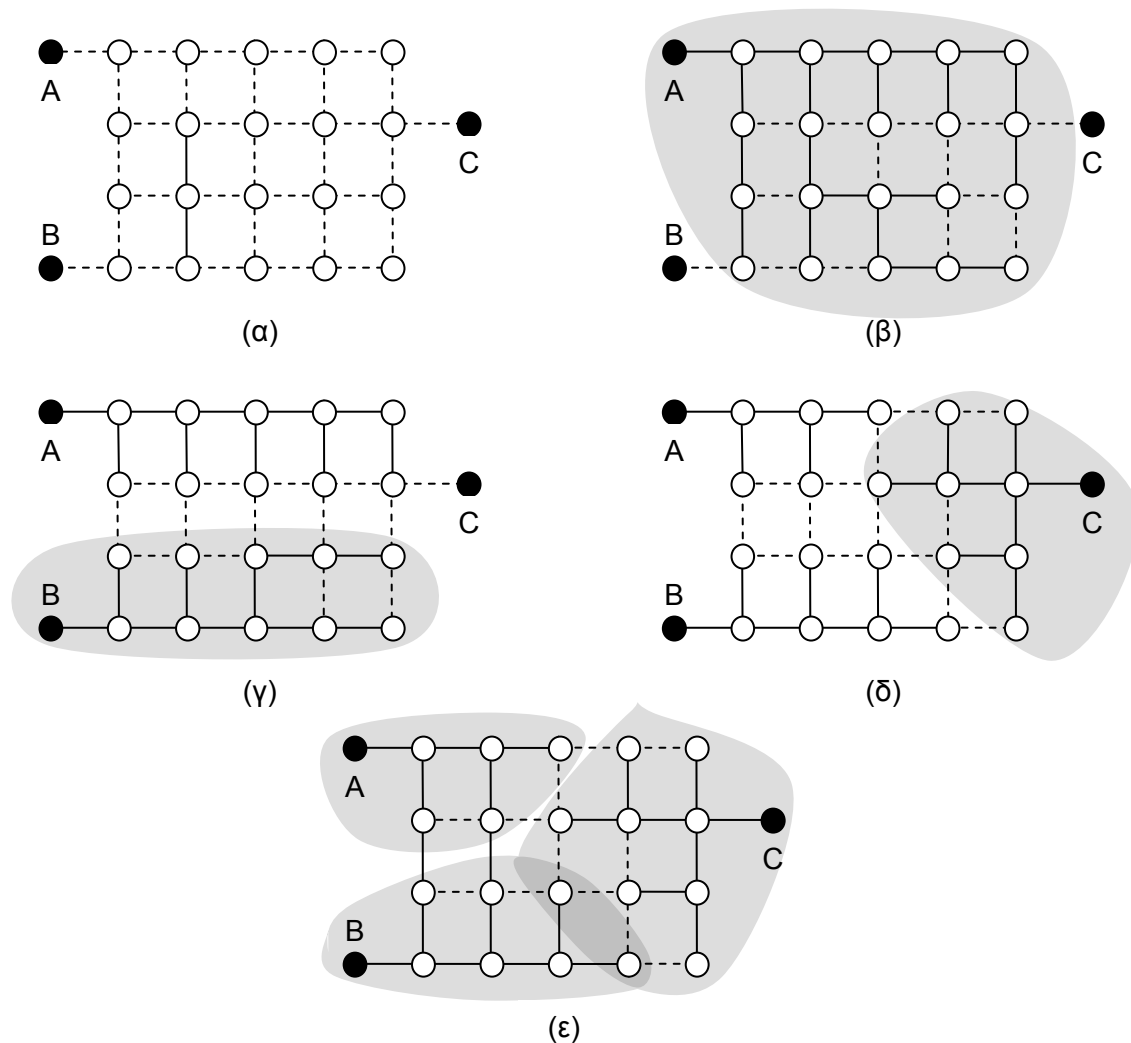
10. $\text{προώθησε_πακέτο}()$

Σχήμα 7. Ο αλγόριθμος Voronoi scoring. Αρχικά το $d_{\min}$ είναι άπειρο. Το L είναι μια σταθερά του αλγορίθμου. Όταν $L = 0$, έχουμε μη επικαλυπτόμενες περιοχές.

δεύτερο πακέτο από το συλλέκτη με την ίδια απόσταση έχουμε $\Delta = 0$, συνεπώς χωρίς αυτή τη συνθήκη αυτό το πακέτο δεν θα προωθηθεί. Επίσης σημειώνεται ότι αυτή η συνθήκη ισχύει μόνο όταν $L = 0$.

2.2.4 Παράδειγμα εφαρμογής

Ας δώσουμε ένα παράδειγμα του αλγόριθμου σε ένα δίκτυο με 20 κόμβους και 3 συλλέκτες στο Σχήμα 8. Οι κόμβοι έχουν τοποθετηθεί σε διάταξη πλέγματος για λόγους απλούστευσης. Σε ένα πραγματικό δίκτυο αισθητήρων η τοποθέτηση μάλλον θα είναι τυχαία και ακανόνιστη. Στο (α), κανένας συλλέκτης δεν έχει ακόμη στείλει μήνυμα. Οι κόμβοι συνεπώς δεν γνωρίζουν ούτε διαδρομή ούτε απόσταση προς κανένα συλλέκτη. Πρώτος ο συλλέκτης A πλημμυρίζει το δίκτυο με μήνυμα. Για κάθε



Σχήμα 8. Η εφαρμογή του αλγόριθμου Voronoi scoring σε ένα δίκτυο με 3 συλλέκτες (A, B και C) και 20 κόμβους. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν ραδιοζεύξη, ενώ οι συμπαγείς γραμμές αναπαριστούν πιθανά Voronoi δένδρα.

κόμβο τώρα ο A είναι ο κοντινότερος (και ο μόνος) γνωστός συλλέκτης. Έτσι το μήνυμα προωθείται σε όλους τους κόμβους του δικτύου όπως φαίνεται στο (β). Κατόπιν στα (γ) και (δ), ο συλλέκτης B (και αντίστοιχα ο C) διαβιβάζουν τα μηνύματά τους στο δίκτυο τα οποία φτάνουν στις περιοχές V_B (και αντίστοιχα V_C). Τέλος στο (ε) κάθε συλλέκτης έχει αποστείλει μήνυμα εγκαθίδρυσης διαδρομών και το δίκτυο βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση (steady-state). Τα περαιτέρω μηνύματα θα διαβιβαστούν μόνο εντός των αντίστοιχων περιοχών Voronoi, ανάλογα με τον αντίστοιχο αποστολέα συλλέκτη. Στο (ε) επίσης φαίνονται δύο κόμβοι που ανήκουν ταυτόχρονα στις περιοχές V_B και V_C οι οποίοι συμβολίζονται με εντονότερο χρώμα. Όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι είναι εσωτερικοί των αντίστοιχων περιοχών.

2.2.5 Ιδιότητες του αλγορίθμου Voronoi

Θα αναφέρουμε τις βασικότερες ιδιότητες που προκύπτουν από μη επικαλυπτόμενο Voronoi scoring. Αυτές είναι steady-state ιδιότητες, δηλαδή ισχύουν μόνο όταν κάθε συλλέκτης έχει διαβιβάσει τουλάχιστον ένα μήνυμα. (π.χ. όπως στο Σχήμα 8 (ε)).

Ιδιότητα 1: (Κάλυψη και scoring). Εάν ο κόμβος i ανήκει στην περιοχή Voronoi V_k , τότε ο i λαμβάνει πακέτα που διαβιβάζονται από τον συλλέκτη k . Εάν δεν ανήκει στην περιοχή αυτή, δεν λαμβάνει τα πακέτα που διαβιβάζονται από τον συλλέκτη k . Ισοδύναμα, τα πακέτα διαβιβάζονται από τον εκάστοτε συλλέκτη προς την αντίστοιχη περιοχή Voronoi, και όχι πέραν αυτής.

Ιδιότητα 2: (Scalability). Εφόσον ένα μήνυμα ποτέ δεν προωθείται πέραν της περιοχής Voronoi, κάθε κόμβος στο δίκτυο μεταδίδει το πολύ ένα μήνυμα όταν ο συλλέκτης διαβιβάσει ένα μήνυμα στο δίκτυο. Επομένως, το ανά κόμβο overhead διαβίβασης παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου και τον αριθμό των συλλεκτών.

Ιδιότητα 3: (Μνήμη). Ο αλγόριθμος απαιτεί την ανά κόμβο αποθήκευση μόνο δύο μεταβλητών, του κοντινότερου συλλέκτη και της απόστασης από αυτόν.

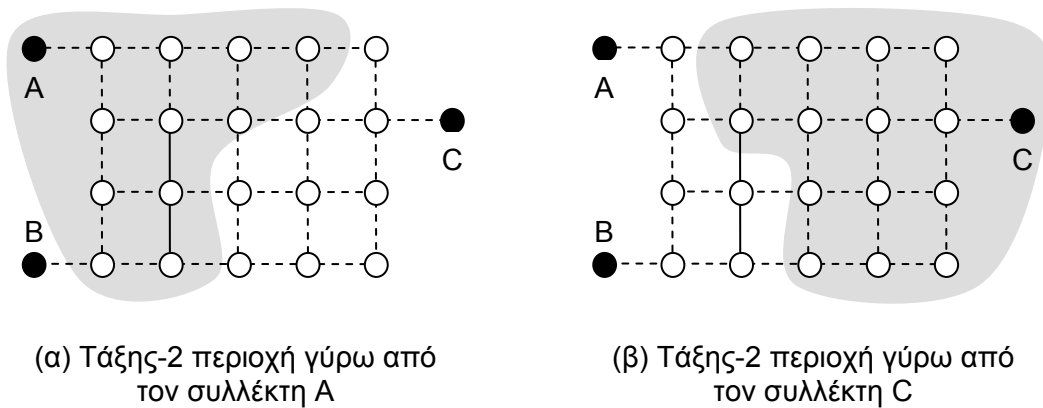
Ιδιότητα 4: (Κατανεμημένη λειτουργία). Κάθε κόμβος αποφασίζει να προωθήσει ή όχι ένα μήνυμα (ερώτημα ή μήνυμα εγκαθίδρυσης σύνδεσης) με βάση μόνο πληροφορία που έχει τοπικά αποθηκευμένη.

Ιδιότητα 5: (Διαφάνεια). Η λειτουργία του αλγορίθμου δεν απαιτεί από τους συλλέκτες διαφορετική συμπεριφορά από αυτή που θα είχαν αν εκτελούσαν μια απλή, unscored διαβίβαση μηνύματος. Οι συλλέκτες δεν χρειάζεται να γνωρίζουν πόσοι άλλοι συλλέκτες υπάρχουν (αν υπάρχουν) και σε ποια κατάσταση βρίσκονται. Αυτή η ιδιότητα καθιστά περιττή την εγκαθίδρυση σύνδεσης και συντονισμού μεταξύ των συλλεκτών, πράγμα που αποτελεί το κλειδί της απλότητας του αλγορίθμου.

2.2.6 Υψηλότερης τάξης Voronoi scoring

Ο αλγόριθμος που παρουσιάσαμε στο Σχήμα 7 καθορίζει, σε κάθε κόμβο, την απόσταση μόνο στον πλησιέστερο συλλέκτη. Μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει τους N πλησιέστερους συλλέκτες. Ονομάζουμε αυτή τη γενίκευση τάξης- N Voronoi scoring, και συμβολίζουμε V_k^N την τάξης- N περιοχή Voronoi που σχετίζεται με το συλλέκτη k . Με βάση αυτό, $V_k = V_k^1$.

Στην περίπτωση της τάξης- N scoring, η περιοχή V_k^N ορίζεται σαν το σύνολο των κόμβων για τους οποίους ο κόμβος k είναι ένας από τους N κοντινότερους συλλέκτες. Η υλοποίηση τάξης- N scoring σε ένα δίκτυο γίνεται πανομοιότυπα με το scoring τάξης-1 που μελετήσαμε, με τη διαφορά ότι τώρα ο κόμβος θα κρατά στο αρχείο του τους N κοντινότερους συλλέκτες και όχι μόνο τον κοντινότερο. Το Σχήμα 9 παρουσιάζει scores τάξης-2. Το Σχήμα υποδεικνύει ότι η περιοχή V_k^N είναι υπο-περιοχή της V_k^M για $N < M$ και φυσικά η περιοχή V_k είναι υπο-περιοχή της V_k^N για $N > 1$. Με άλλα λόγια, υψηλότερης τάξης Voronoi scoring έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερα scores και περισσότερο overhead διαβίβασης σε σχέση με το κανονικό τάξης-1 Voronoi scoring. Βέβαια εάν το N είναι ίσο η μεγαλύτερο από τον συνολικό αριθμό συλλεκτών, το scoring τάξης- N θα έχει σαν αποτέλεσμα global flooding.



Σχήμα 9. Τάξης-2 Voronoi περιοχές γύρω από τους συλλέκτες A και C αντίστοιχα, όπως φαίνονται στις επισκιασμένες περιοχές, με μετρική απόστασης την hop count. Η τάξης-2 περιοχή γύρω από το συλλέκτη A (και αντίστοιχα τον C) εμπεριέχει όλους τους κόμβους για τους οποίους ο A (ή αντίστοιχα ο C) είναι ο πλησιέστερος ή ο επόμενος πλησιέστερος συλλέκτης (σε αριθμό hops). Σε αντιπαράθεση με το Σχήμα 8 (ε), παρατηρούμε ότι οι τάξης-2 περιοχές περιέχουν περισσότερους κόμβους σε σχέση με τις τάξης-1 περιοχές.

Με το υψηλότερης τάξης Voronoi scoring, κάθε κόμβος αποθηκεύει όπως είπαμε τους N πλησιέστερους συλλέκτες. Είναι συνεπώς χρήσιμο να υιοθετήσουμε μια συνάρτηση ασφάλειας (failover function) για εφαρμογές που μπορεί να συνιστούν

την δυνατότητα των κόμβων να αλλάζουν συλλέκτη εάν η διαδρομή προς τον πλησιέστερο συλλέκτη κοπεί ξαφνικά ή ο συλλέκτης πάθει βλάβη. Έτσι το τάξης- N scoring αποτελεί μια απλή και εύκολη στην υλοποίηση λύση που εξασφαλίζει ότι όλοι οι κόμβοι μπορούν να έχουν $N - 1$ διαθέσιμους backup συλλέκτες.

Σημειώνουμε εδώ πως ένας κόμβος δεν μπορεί να αντιληφθεί κάποια πιθανή βλάβη ή αστοχία ζεύξης που μπορεί να γίνει στο μονοπάτι που τον ενώνει με τον συλλέκτη αν αυτή η ζεύξη βρίσκεται μακριά του. Αυτές οι αστοχίες διορθώνονται μόνο όταν μια νεότερη διαβίβαση μηνυμάτων εγκαθίδρυσης σύνδεσης λάβει χώρα και ενημερωθούν οι καταχωρήσεις που διατηρούν οι κόμβοι για τη διαδρομή. Σαν αποτέλεσμα, ένας κόμβος μπορεί να μην γνωρίζει πότε είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσει άλλο συλλέκτη για την δρομολόγηση των πακέτων του. Άλλες τεχνικές που επιτάσσει η εφαρμογή την οποία εξυπηρετεί το δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να εκμεταλλευτούν το υψηλότερης τάξης scoring.

2.2.7 Εναλλακτικές τεχνικές scoring σε δίκτυα αισθητήρων

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε άλλες πιθανές τεχνικές scoring και θα αναλύσουμε τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματά τους.

Global dissemination. Η απλούστερη δυνατή τεχνική είναι να μην πραγματοποιείται καθόλου scoring και τα μηνύματα από τους συλλέκτες να διασκορπίζονται τυχαία μέσα στο δίκτυο. Οι κόμβοι μπορεί να γνωρίζουν την min hop απόσταση προς τους συλλέκτες και να επιλέγουν αυτόν που τους συμφέρει για να αποστείλουν τα δεδομένα τους. Η λύση αυτή είναι απλή και αποδοτική έως ένα βαθμό. Εφόσον οι κόμβοι λαμβάνουν μηνύματα συνεχώς, ακόμα και αυτοί με κακή ζεύξη θα ενημερώνονται για τα μηνύματα που διαβιβάζονται στο δίκτυο. Το κύριο μειονέκτημα είναι φυσικά ότι το overhead λόγω flooding αυξάνει γραμμικά με κάθε προσθήκη συλλέκτη. Για αυτό το λόγο η τεχνική global flooding μπορεί να είναι πολύ ασύμφορη εκτός από πολύ μικρά δίκτυα.

TTL scoring. Ένας γνωστός μηχανισμός scoring είναι και ο TTL (Time-to-live). Στην περίπτωση αυτή κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτή την τεχνική θέτοντας μια TTL τιμή στα μηνύματα που διοχετεύονται στο δίκτυο από τους συλλέκτες. Η τιμή TTL μειώνεται σε κάθε hop μέχρις ότου μηδενιστεί και το πακέτο απορριφθεί. Ωστόσο, η επιλογή μιας τιμής για TTL η οποία από τη μια πλευρά να εγγυάται όσο το δυνατόν μέγιστη κάλυψη και από την άλλη πλευρά να ελαχιστοποιεί το overhead είναι μια δύσκολη διαδικασία, ειδικά σε δυναμικά μεταβαλλόμενα δίκτυα αισθητήρων. Οι συλλέκτες μπορεί στην αρχή να εκτελούν ένα πειραματικό flood και να ζητούν από τους κόμβους να αναφέρουν την απόστασή τους από το κοντινότερο συλλέκτη. Αυτό μπορεί να δώσει τη δυνατότητα στο δίκτυο να εκτιμήσει μια

ικανοποιητική τιμή για το πεδίο TTL, αλλά το overhead που προκαλείται από το πειραματικό flood είναι σημαντικό και θα πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε φορά που κάποιος κόμβος αστοχεί ή ένας άλλος εισάγεται στο δίκτυο. Αυτό το γεγονός επιβάλλει στους συλλέκτες να υιοθετήσουν ένα επιπλέον πρωτόκολλο ώστε να καταγράφουν την κατάσταση των κόμβων του δικτύου.

Η δεύτερη δυσκολία με το TTL scoring έγκειται στην ιστροπική φύση του. Όλοι οι κόμβοι σε μια δεδομένη ακτίνα θα καλυφθούν, σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό είναι ασύμφορο και δεν συμπίπτει με το «σχήμα» των περιοχών Voronoi. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο όπου οι συλλέκτες είναι τοποθετημένοι κοντά ο ένας στο άλλο. Για να καλύψει κάθε συλλέκτης όλο το δίκτυο, θα πρέπει να θέσει μια τιμή TTL όπου τα πακέτα να καλύπτουν αναγκαστικά όλο το δίκτυο. Σε μια τέτοια περίπτωση οι συλλέκτες τελικά πλημμυρίζουν το δίκτυο και το TTL δεν βοηθά.

Geographical scoring. Μερικές εφαρμογές που βασίζονται στη συλλογή δεδομένων είναι γεωγραφικής φύσεως, όταν ο χρήστης ζητά πληροφορία για μια συγκεκριμένη περιοχή. Όπως βέβαια ήδη αναφέραμε, ο εντοπισμός τοποθεσίας είναι μια πολύ δύσκολη υπόθεση όταν αναφερόμαστε σε κόμβους αισθητήρων. Όμως, σε τέτοιες εφαρμογές απαιτείται αποστολή ερωτημάτων προς συγκεκριμένο υποσύνολο ενδιαφέροντος, παρά να εκτελούμε global dissemination ή Voronoi scoring. Εάν οι κόμβοι ενσωματώνουν τέτοια δυνατότητα, το scoring γίνεται με βάση αυτή.

2.2.8 Επίλογος

Στην ενότητα αυτή περιγράψαμε την τεχνική scoring μέσω του αλγόριθμου Voronoi, μια αποδοτική τεχνική δημιουργίας διαδρομών δρομολόγησης δεδομένων και περιορισμού της διαβίβασης των μηνυμάτων από τους συλλέκτες προς τους κόμβους. Με την τεχνική αυτή το overhead ενημέρωσης των κόμβων παραμένει ανεξάρτητο από το μέγεθος του δικτύου ή τον αριθμό των συλλεκτών. Αυτό το χαρακτηριστικό, παράλληλα με την πολύ απλή υλοποίηση και τους ελάχιστους πόρους σε επεξεργαστική ισχύ και μνήμη που απαιτεί, το καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικό για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων, όπου πόροι όπως η ενέργεια και ο εξοπλισμός των κόμβων αισθητήρων είναι πολύ περιορισμένοι.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής όπου εισάγουμε νέες μετρικές όσον αφορά τον υπολογισμό της απόστασης των κόμβων από τους συλλέκτες και προτείνουμε νέες τεχνικές για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του δικτύου τόσο όσον αφορά την διάρκεια ζωής όσο και την μείωση των καθυστερήσεων μετάδοσης των δεδομένων και του overhead λόγω των αναγκαίων rescopes που πρέπει να γίνονται περιοδικά ώστε να διατηρείται η διασύνδεση των κόμβων και το δίκτυο να προσαρμόζεται σε αστοχίες κόμβων ή εισαγωγές νέων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

Εφαρμογή και μελέτη απόδοσης δικτύου αισθητήρων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε το πρωτόκολλο SMAC, ένα πρωτόκολλο επιπέδου πρόσβασης στο μέσο ειδικά σχεδιασμένο για δίκτυα αισθητήρων καθώς έχει σαν πρωτεύοντα στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Πέρα από αυτό ενσωματώνει και όλους τους απαραίτητους μηχανισμούς για αποδοτική επικοινωνία μεταξύ κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Στη συνέχεια μελετήσαμε έναν αλγόριθμο scoring με τη χρήση του αλγόριθμου Voronoi ο οποίος είναι υπεύθυνος να εγκαθιδρύσει μονοπάτια επικοινωνίας από όλους τους κόμβους ενός δικτύου προς τους συλλέκτες με το μικρότερο δυνατό overhead. Είδαμε μεταξύ άλλων πως ο αλγόριθμος αυτός είναι κατάλληλος και αποδοτικός για δίκτυα αισθητήρων καθώς δεν έχει καμία επιπλέον απαίτηση τόσο σε hardware όσο και σε κανάλια επικοινωνίας.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφουμε μια εφαρμογή δικτύου αισθητήρων και εφαρμόζουμε μερικές νέες επεκτάσεις που αποσκοπούν στην περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης αυτού του δικτύου. Για το σκοπό αυτό υλοποιήσαμε μερικά σενάρια προσομοιώσεων στο δίκτυο αυτό και μετράμε μετρικές απόδοσης του δικτύου που καταδεικνύουν το αποτέλεσμα της εφαρμογής των επεκτάσεων που ενσωματώσαμε. Τέλος παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα αυτά και αναλύουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν στην κάθε περίπτωση.

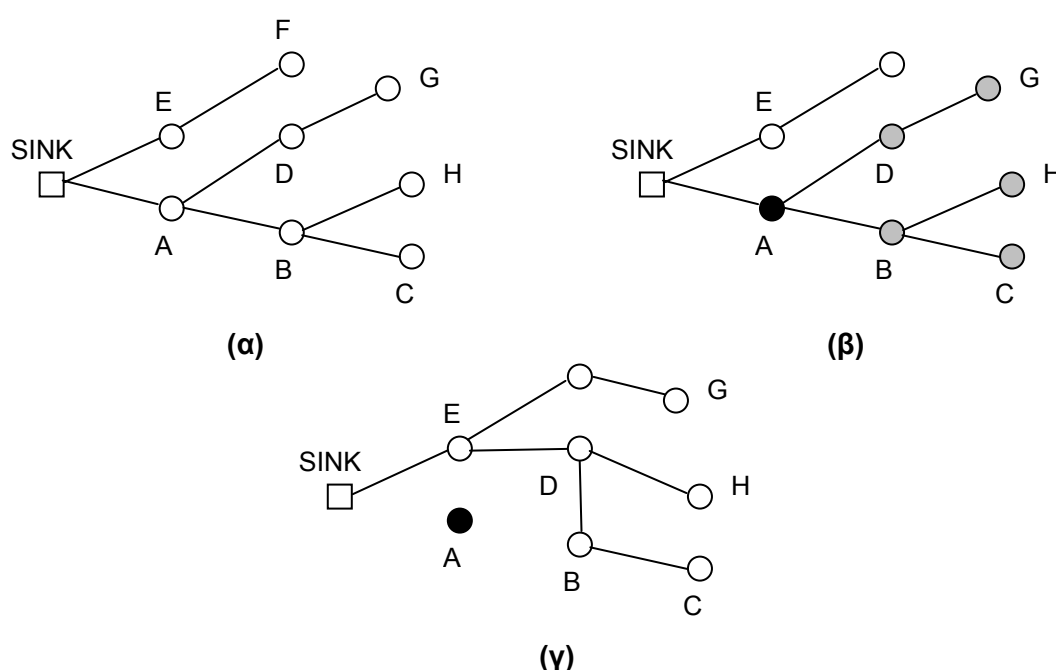
3.1 Επεκτάσεις προς μελέτη

Στην εφαρμογή που περιγράφουμε και εξετάζουμε προσπαθούμε να εξάγουμε συμπεράσματα και να μετρήσουμε την απόδοση τεχνικών που για πρώτη φορά υλοποιούνται σε δίκτυα αισθητήρων. Ας δούμε αυτές τις περιπτώσεις πιο αναλυτικά.

Μέτρηση της απόδοσης του SMAC σε πραγματική 2D τοπολογία. Η μελέτη απόδοσης του SMAC όπως περιγράφεται στο [2] γίνεται σε απλές γραμμικές τοπολογίες μορφής αλυσίδας και για μικρό αριθμό κόμβων. Απ' όσο γνωρίζουμε, δεν έχει γίνει μέχρι σήμερα μελέτη που να εξετάζει την απόδοση ενός δικτύου αισθητήρων το οποίο αντιστοιχεί σε πραγματική εφαρμογή, δηλαδή ένα δίκτυο αισθητήρων που να περιλαμβάνει πολλούς κόμβους, με τυχαία τοποθέτηση και επιπλέον τυχαίους ρυθμούς και θέσεις γέννησης των δεδομένων. Με τη βοήθεια της εφαρμογής που προσομοιώσαμε, η οποία δεδομένων των χαρακτηριστικών της θα μπορούσε να είναι μια πραγματική εφαρμογή, θα δείξουμε την βελτίωση της απόδοσης που επιφέρει η ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας SMAC.

Εναλλακτική μετρική απόστασης σε Voronoi scoring. Ο αλγόριθμος Voronoi scoring που εισάγαμε στο δεύτερο μέρος του προηγούμενου κεφαλαίου και περιγράφεται στο [3] εξετάζει σαν μετρική απόστασης μόνο το hop count distance από τους κόμβους προς κάποιο συλλέκτη. Ενώ στο [3] αναφέρεται πως θα μπορούσε σαν μετρική απόστασης να χρησιμοποιηθεί άλλη ποσότητα σχετιζόμενη άμεσα με την καταναλισκόμενη ενέργεια, οι συγγραφείς εκεί δεν προχωρούν σε μια τέτοια μελέτη. Στην εφαρμογή που θα μελετήσουμε εισάγουμε μια νέα μετρική απόστασης, την απόσταση μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας της επιλεγόμενης διαδρομής. Απ' όσο γνωρίζουμε, δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία αντίστοιχη μελέτη σε δίκτυα αισθητήρων. Θα μελετήσουμε λοιπόν την απόδοση που επιτυγχάνει το δίκτυό με την διαφορετική αυτή μετρική, συγκρίνοντάς την με την απόδοση όταν επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της μετρικής hop count distance.

Τεχνική απαλοιφής των rescopes μέσω δυναμικής ενημέρωσης των συλλεκτών για την κατάσταση των κόμβων. Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από κόμβους με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους. Έτσι, όταν η παροχή ισχύος σε αυτούς εξαντληθεί, αυτοί θα τεθούν εκτός λειτουργίας. Εάν τώρα ένας κόμβος αποτελεί μέρος μιας διαδρομής δρομολόγησης δεδομένων από άλλους κόμβους «παιδιά» προς ένα συλλέκτη, το



Σχήμα 10. (α) Το δίκτυο αισθητήρων βρίσκεται σε steady-state κατάσταση. Όλη η κίνηση που προέρχεται από τους κόμβους D, B, C, H και G περνάει μέσα από τον A. (β) Ο A πεθαίνει. Οι κόμβοι D, B, C, H και G («παιδιά» του A) μένουν ορφανοί και τα δεδομένα τους δεν μπορούν να φτάσουν στο συλλέκτη. (γ) Ο συλλέκτης διοχετεύει νέο πακέτο εγκαθίδρυσης διαδρομών. Η νέα συνδεσμολογία που εγκαθιδρύεται επιτρέπει στους D, B, C, H και G να δρομολογήσουν τα πακέτα τους από άλλη διαδρομή. Ο A απομονώθηκε.

μονοπάτι αυτό διακόπτεται, και έτσι η απενεργοποίηση του συγκεκριμένου κόμβου μπορεί να αποδειχθεί επιζήμια και για ένα σύνολο αρκετών άλλων κόμβων. Για το λόγο αυτό, το δίκτυο – και πιο συγκεκριμένα οι συλλέκτες – θα πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να διοχετεύουν στο δίκτυο νέα πακέτα εγκαθίδρυσης διαδρομών ώστε να παραμένει αδιάλειπτη η ροή δεδομένων προς το συλλέκτη, απομονώνοντας τους ανενεργούς κόμβους από τις διαδρομές. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *rescoring*. Στο Σχήμα 10 φαίνεται η αλλαγή διαδρομής που επιφέρει ένα *rescore* όταν ένας κόμβος που βρισκόταν στο μέσο μιας διαδρομής απενεργοποιηθεί.

Τα επαναλαμβανόμενα *rescores* μπορεί να είναι μεν αναγκαία αλλά εισάγουν μεγάλο *overhead* αφού περιοδικά πρέπει να γίνεται μετάδοση μηνυμάτων σε όλους τους κόμβους. Το *overhead* αυτό είναι επιζήμιο όχι μόνο επειδή καταναλώνει ισχύ των κόμβων αλλά και επειδή αυξάνει την κίνηση στο δίκτυο και κατά συνέπεια το χρόνο μετάδοσης των δεδομένων. Στην εφαρμογή που θα μελετήσουμε θα εισάγουμε μια νέα τεχνική που επιχειρεί να απαλείψει αυτά τα *rescores* μέσω δυναμικής ενημέρωσης των συλλεκτών για την κατάσταση των κόμβων.

3.2 Η εφαρμογή δικτύου αισθητήρων

Για να μελετήσουμε την απόδοση των παραπάνω τεχνικών προσομοιώσαμε ένα δίκτυο αισθητήρων που θα μπορούσε να εξυπηρετεί πραγματική εφαρμογή. Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά του δικτύου, των κόμβων και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε.

A. Γενική περιγραφή της εφαρμογής

Η εφαρμογή σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να χαρακτηριστεί εφαρμογή παρακολούθησης και καταγραφής γεγονότων σε μια περιοχή. Η περιοχή αυτή θα μπορούσε να είναι ένας κλειστός χώρος (αεροδρόμιο, όροφος κτιρίου, χώρος μαζικής συγκέντρωσης) ή μια ανοιχτή περιοχή (δάσος, πάρκο, πίστα αεροδρομίου). Το σχήμα αυτής της περιοχής ορίστηκε για χάρη απλότητας να είναι τετράγωνο με πλευρά 100 m, καταλαμβάνοντας έτσι εμβαδόν 10.000 m².

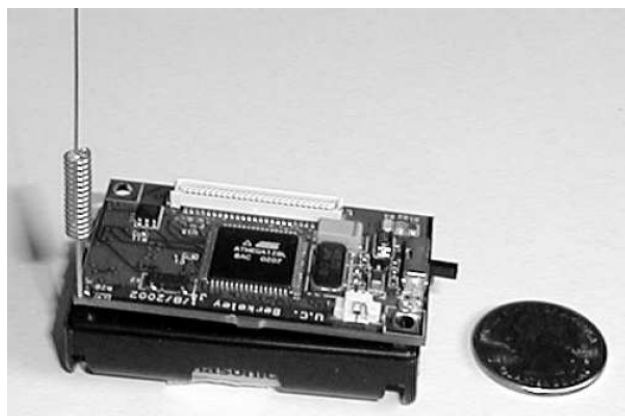
Η τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων γίνεται με τυχαίο τρόπο, ώστε η εφαρμογή να είναι πιο ρεαλιστική σε αντίθεση με την ομοιόμορφη *grid* διάταξη που περιγράφεται στο [3]. Οι κόμβοι συνεπώς θεωρούμε ότι τοποθετούνται χωρίς μελέτη (π.χ. διασκορπίζονται στο χώρο) αλλά φροντίζουμε ώστε η διάταξη που θα πάρουν να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής. Στην περιοχή τοποθετούνται δύο συλλέκτες, στη μέση δύο αντικριστών πλευρών της περιοχής, που θα αναλάβουν τη λήψη της πληροφορίας που γεννάται στην περιοχή αίσθησης.

Η γέννηση της πληροφορίας θεωρούμε ότι ακολουθεί κατανομή Poisson. Η παράμετρος λ της Poisson είναι μια από τις μεταβλητές των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε, καθώς θέλαμε να μετρήσουμε την συμπεριφορά του δικτύου για διάφορες περιπτώσεις φόρτου κίνησης. Στις προσομοιώσεις η συνάρτηση Poisson καθορίζει τον αριθμό των πακέτων πληροφορίας που γεννούνται συνολικά στο δίκτυο σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Η προέλευση των πακέτων πληροφορίας από την άλλη πλευρά θεωρείται τυχαία και ανεξάρτητη, δηλαδή δεδομένου ότι έχει γεννηθεί πληροφορία στο δίκτυο, αυτή μπορεί να προέρχεται κάθε φορά από οποιοδήποτε κόμβο.

Ο αριθμός των κόμβων μέσα στο δίκτυο στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που θα μελετήσουμε ανέρχεται στους 100. Η πυκνότητα των κόμβων μέσα στο δίκτυο θεωρείται συνηθισμένη έως και αυξημένη, καθώς για τέτοιου είδους εφαρμογές ισχύει ο τυπικός κανόνας ότι η πυκνότητα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ένας κόμβος ανά 2 m^2 . Βέβαια, όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο, η πυκνότητα σε άλλες εφαρμογές μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή την τιμή. Η πυκνότητα όμως δεν μπορεί παρά να εξαρτάται άμεσα και από την εφαρμογή και πιο συγκεκριμένα και από τα χαρακτηριστικά των κόμβων που δημιουργούν το δίκτυο αισθητήρων. Ένα δίκτυο που αποτελείται από κόμβους με ακτίνα εμβέλειας 2 m προφανώς θα έχει (και πρέπει να έχει) μεγαλύτερη πυκνότητα από ένα άλλο δίκτυο που αποτελείται από κόμβους με ακτίνα εμβέλειας 15 m.

B. Τεχνικά χαρακτηριστικά κόμβων αισθητήρων

Οι κόμβοι που θεωρούμε ότι αποτελούν το δίκτυο της εφαρμογής που εξετάζουμε είναι η εξελιγμένη έκδοση των Mica motes που περιγράφονται στο [2]. Ένας τέτοιος κόμβος φαίνεται στην Εικόνα 11. Κάθε κόμβος αισθητήρα αποτελείται από έναν μικροελεγκτή Atmel ATmega 128L με 128KB flash και 4KB data μνήμης [15] και είναι εξοπλισμένος με τον πομποδέκτη RFM TR3000 [16] συνοδευόμενος από μια whip antenna. Η διαμόρφωση σήματος που χρησιμοποιείται είναι ASK (Amplitude Shift Keying) ενώ οι καταναλώσεις ισχύος του κάθε κόμβου όταν λαμβάνει ή ακούει / μεταδίδει / κοιμάται είναι 14,4 mW / 36 mW / 15 μ W, αντίστοιχα. Την τροφοδοσία των Mica motes αναλαμβάνουν δύο μπαταρίες Ni-Mh



Εικόνα 11. Ένα UCB Mica Mote.

τύπου AA με παρεχόμενη τάση 3 V και χωρητικότητα 2500 mAh. Θεωρούμε ότι οι κόμβοι δεν είναι εξοπλισμένοι με πιθανή πηγή συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον όπως π.χ. ηλιακές κυψέλες κ.α.

Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πομποδέκτη, ο TR3000 μπορεί να έχει ανάλογα βέβαια και με την κεραία με την οποία συνοδεύεται, ακτίνα εμβέλειας για αποδεκτή μετάδοση μέχρι 115 ft (περίπου 30 m). Στην εφαρμογή μας θεωρούμε πως η ακτίνα κάθε κόμβου είναι 15 m και πέρα από την απόσταση αυτή ο ένας κόμβος δεν μπορεί να λάβει / μεταδώσει στον άλλο. Αυτό δεν ισχύει γενικά στην πραγματικότητα. Η θεωρία διάδοσης [14] αναφέρει πως η ισχύς του ληφθέντος σήματος P_r μειώνεται με την απόσταση d σύμφωνα με τον τύπο:

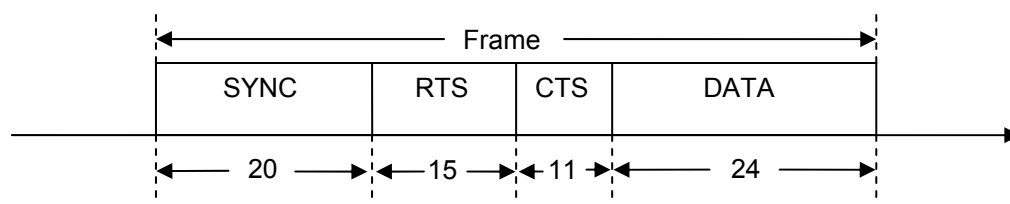
$$P_r \propto P_t d^\beta$$

όπου P_t είναι η ισχύς εκπομπής και β είναι μια εξαρτώμενη από το περιβάλλον σταθερά που παίρνει τιμές συνήθως μεταξύ 2 και 5. Είναι προφανές από τον τύπο πως η ακτίνα μετάδοσης δεν σταματά ξαφνικά μετά από μια συγκεκριμένη απόσταση. Στην εφαρμογή μας κάναμε την παραπάνω παραδοχή για χάρη απλότητας.

Γ. Χαρακτηριστικά μετάδοσης και MAC

Οι κόμβοι που αποτελούν το δίκτυο της εφαρμογής μας θεωρούμε ότι επικοινωνούν μεταξύ τους με το πρωτόκολλο SMAC που περιγράψαμε στο πρώτο μέρος του Κεφαλαίου 2. Όπως αναφέραμε, μεταξύ των αποτελεσμάτων που θα παρουσιάσουμε θα είναι και η βελτίωση που επιφέρει στη διάρκεια ζωής του δικτύου η εφαρμογή του συγκεκριμένου MAC πρωτοκόλλου.

Όπως είδαμε, κάθε πλαίσιο (frame) του SMAC αποτελείται από την περίοδο LISTEN όπου λαμβάνουν χώρα η μετάδοση του schedule και των RTS / CTS μηνυμάτων και την περίοδο DATA όπου μεταδίδεται το πακέτο πληροφορίας. Η περίοδος LISTEN αποτελείται με τη σειρά της από 3 πεδία, το πεδίο SYNC, το πεδίο RTS και το πεδίο CTS. Όσον αφορά τις χρονικές παραμέτρους που εφαρμόσαμε, ακολουθήσαμε τα δεδομένα που αναφέρονται στο [2]. Έτσι, οι επιμέρους



Σχήμα 12. Δομή ενός frame του MAC που χρησιμοποιεί η εφαρμογή. Το συνολικό μέγεθος του frame είναι 70 χρονοθυρίδες (175 msec).

χρονοθυρίδες που απαιτούνται είναι 20 για το SYNC, 15 για το RTS και 11 για το CTS, σύνολο για την περίοδο LISTEN 46 χρονοθυρίδες. Η διάρκεια της κάθε χρονοθυρίδας είναι 2,5 ms. Η δομή ενός frame φαίνεται στο Σχήμα 12. Η περίοδος DATA τώρα εξαρτάται από την εφαρμογή, και στην δική μας περίπτωση ορίστηκε ίση με 24 χρονοθυρίδες. Έτσι, το συνολικό μέγεθος του frame ανέρχεται στις 70 χρονοθυρίδες ή 175 msec.

Ο ρυθμός μετάδοσης των Mica motes είναι 19200 bps. Δεδομένου αυτού του ρυθμού και της διάρκειας κάθε χρονοθυρίδας (2,5 ms), προκύπτει ότι οι 24 χρονοθυρίδες αρκούν για την μετάδοση 1152 bits (144 bytes). Θεωρήσαμε ότι η παραπάνω ποσότητα μεταδιδόμενης πληροφορίας αρκεί για να καλύψει σε ένα πακέτο κάθε μέτρηση που μπορεί να αφορά το δίκτυο αισθητήρων. Σημειώνουμε εδώ πως το είδος μεταδιδόμενης πληροφορίας που γεννάται και διαβιβάζεται από ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολύ διαφορετικό από αυτό που συναντάμε σε ένα τυπικό δίκτυο δεδομένων υπολογιστών. Οι μετρήσεις που λαμβάνουν οι αισθητήρες (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, φως, επίπεδα μαγνητικού πεδίου κ.α.) είναι συνήθως αριθμοί πεπερασμένου μεγέθους, ενώ σε πολλές εφαρμογές είναι απλά τύπου Boolean (υπάρχει γεγονός ή όχι).

Δ. Δεδομένα στους κόμβους αισθητήρων

Όπως αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο, οι πόροι επεξεργαστικής ισχύος και αποθηκευτικής μνήμης κάθε κόμβου είναι ιδιαίτερα περιορισμένοι. Ένα πρωτόκολλο που σχεδιάζεται για δίκτυα αισθητήρων, θα πρέπει να μελετηθεί προσεκτικά ώστε να απαιτεί όσο το δυνατόν λιγότερη πληροφορία να επεξεργάζεται και να αποθηκεύεται σε κάθε κόμβο. Οι κόμβοι θα πρέπει να είναι υπεύθυνοι περισσότερο για την συλλογή και δρομολόγηση των δεδομένων ενώ διεργασίες ανάλυσης, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων καλό θα ήταν να ανατίθενται στους συλλέκτες που συνήθως δεν υπόκεινται στους ίδιους περιορισμούς πόρων με τους κόμβους.

Ωστόσο, για την λειτουργία του δικτύου, κάποια απαραίτητη πληροφορία και κάποιες βασικές λειτουργίες (πέραν της συλλογής δεδομένων) θα πρέπει να διεκπεραιώνονται από τους κόμβους. Όσον αφορά τις λειτουργίες αυτές, θεωρούμε ότι οι κόμβοι περιοδικά εκτελούν ανίχνευση των γειτόνων τους και μπορούν να γνωρίζουν έτσι τον αριθμό και την ταυτότητα κάθε γείτονα. Αν ένας γείτονας απενεργοποιηθεί, τότε στην επόμενη ανίχνευση αφαιρείται από τη λίστα των γειτονικών του κόμβων. Είναι φανερό και δεν χρειάζεται να το αναλύσουμε, ότι κανένα δίκτυο του οποίου οι κόμβοι δεν εκτελούν ανίχνευση γειτόνων δεν μπορεί να δρομολογήσει δεδομένα.

Πέρα από τη λίστα γειτόνων, οι κόμβοι θα πρέπει να αποθηκεύουν και άλλες πληροφορίες. Αρχικά πρέπει να καταχωρούν την τιμή της μετρικής απόστασης από τον κοντινότερο συλλέκτη, ανεξάρτητα από το ποια μετρική έχει χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό (σε κάθε περίπτωση δεν μπορεί παρά να είναι μια αριθμητική τιμή). Επίσης είναι απαραίτητο να αποθηκεύουν την ταυτότητα του κόμβου που είναι κάθε φορά «πατέρας» τους, ώστε να ξέρουν που να δρομολογούν τα δεδομένα που έχουν. Ακόμη έχουμε θεωρήσει ότι οι κόμβοι αποθηκεύουν έναν αύξοντα αριθμό που υποδηλώνει το rescore από το οποίο τελευταία φορά έλαβαν δεδομένα. Αυτό το έχουμε θεωρήσει για να αποφεύγονται φαινόμενα σύγχυσης όταν κάποιο πακέτο score καθυστερήσει υπερβολικά να φτάσει στον προορισμό του. Αν κάποιος κόμβος λάβει ένα πακέτο π.χ. με score id: 12 ενώ τα δεδομένα του έχουν ανανεωθεί με βάση το 13^ο scoring, τότε αγνοεί το πακέτο. Επιπλέον, κάθε κόμβος κρατάει μια τιμή που είναι χαρακτηριστική του επιπέδου υπολειπόμενης ενέργειας στις μπαταρίες του. Θα δούμε αργότερα στο 3^ο σενάριο που εξετάζουμε γιατί αποθηκεύεται η συγκεκριμένη τιμή. Τέλος, κάθε κόμβος διατηρεί ένα κομμάτι μνήμης (buffer) πεπερασμένου μεγέθους σαν ουρά όπου αποθηκεύει τα πακέτα που έχει προς μετάδοση, είτε αυτά είναι πακέτα δεδομένων είτε είναι scoring πακέτα.

Starvations. Αναφέραμε πιο πάνω ότι η πυκνότητα του δικτύου μας είναι καλή έως μεγάλη, δεδομένης της ακτίνας κάλυψης των συγκεκριμένων κόμβων που χρησιμοποιούμε. Επίσης η τοποθέτηση είναι τυχαία, αλλά με έναν σχετικά ομοιόμορφο τρόπο ώστε το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής να καλύπτεται από κόμβους. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, οι κόμβοι μπορεί να πεθάνουν λόγω εξάντλησης της ενέργειας στις μπαταρίες τους. Αν ένας κόμβος ο οποίος αποτελεί πατέρα για κάποιον άλλο πεθάνει, τότε το «παιδί» του (ή τα παιδιά του) θα πρέπει να περιμένει το επόμενο rescore ώστε να αλλάξει πατέρα, να απομονώσει το νεκρό κόμβο και να συνεχίσει την δρομολόγηση δεδομένων από άλλη διαδρομή, όπως περιγράψαμε στο Σχήμα 11.

Τι γίνεται όμως στην περίπτωση όπου ο κόμβος του οποίου πέθανε ο πατέρας δεν έχει άλλους γείτονες (και έτσι δεν πρόκειται να λάβει πακέτο rescore από εναλλακτική διαδρομή); Ο κόμβος αυτός έχει ενέργεια διαθέσιμη, μπορεί να λειτουργήσει αλλά δεν έχει που να δρομολογήσει τα δεδομένα του καθώς αποκόβεται από το δέντρο που ήταν συνδεδεμένος. Αυτή την περίπτωση ονομάζουμε *starvation*. Η ύπαρξη τέτοιων κόμβων στο δίκτυο δεν προσφέρει τίποτα, καθώς δεν μπορούν να διοχετεύσουν στους συλλέκτες τα δεδομένα που αντλούν από το περιβάλλον. Τίθεται τώρα το ερώτημα πως θα πρέπει να αντιμετωπίζει η εφαρμογή τα *starvations*. Μια εφαρμογή μπορεί να επιτάσσει στους κόμβους να πεθαίνουν όταν δεν μπορούν να προσφέρουν τίποτα στο δίκτυο, ενώ μια άλλη μπορεί να τους αφήνει σε idle κατάσταση για το ενδεχόμενο όπου διασκορπιστούν νέοι κόμβοι στο δίκτυο και τελικά

μετά από ένα χρονικό διάστημα οι starved κόμβοι μπορέσουν να βρουν πατέρα. Στην δεύτερη περίπτωση όμως οι κόμβοι δεν θα πρέπει να συλλέγουν δεδομένα, καθώς εάν βρουν πατέρα μετά από αρκετό χρονικό διάστημα, τα δεδομένα που ήδη θα έχουν θα είναι πεπαλαιωμένα και μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα στην εφαρμογή. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει οι κόμβοι να ενσωματώνουν μηχανισμό που θα τους επιτρέπει να αντιλαμβάνονται τότε έχουν γίνει starved.

Προτείνουμε για το σκοπό αυτό έναν μηχανισμό απλό στην υλοποίηση που δεν απαιτεί πολλή μνήμη (μόνο την αποθήκευση τριών αριθμών) και επεξεργαστική ισχύ (μόνο απλές συγκρίσεις). Κάθε κόμβος γνωρίζει (δυνητικά από το scope πακέτο) το rescope interval. Είπαμε ότι σε τακτά χρονικά διαστήματα εκτελεί ανίχνευση γειτόνων. Εάν ο κόμβος αντιληφθεί ότι ένας γείτονας του πέθανε, τότε τον αφαιρεί από τη λίστα γειτόνων του. Κατόπιν ελέγχει αν ο γείτονας που πέθανε ήταν ο πατέρας του. Εάν δεν ήταν δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα, αλλά εάν ήταν τότε ο κόμβος αλλάζει την τιμή μιας Boolean μεταβλητής (π.χ. orphan_id από false σε true) και ξεκινά έναν timer. Εάν ο timer ξεπεράσει το διπλάσιο του rescope interval χρόνου (δηλαδή δεν έλαβε κανένα πακέτο rescope ενώ στο διάστημα πραγματοποιήθηκαν από το δίκτυο δύο rescopes) τότε συμπεραίνουμε πως ο κόμβος έχει γίνει starved και αλλάζουμε το status του. Αν τώρα στο μεσοδιάστημα λάβει scoring πακέτο, τότε επαναφέρει την τιμή της Boolean μεταβλητής, μηδενίζει τον timer, ανανεώνει τα πεδία του με τις πληροφορίες του νέου rescope πακέτου και συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά όπως πριν.

3.3 Σενάρια προσομοιώσεων

Για να μετρήσουμε την επίδοση του δικτύου για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που εξετάζουμε με βάση και τις προσθήκες και επεκτάσεις που προτείνουμε, κατασκευάσαμε τέσσερα σενάρια προσομοιώσεων του τρόπου λειτουργίας του δικτύου. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τα σενάρια αυτά καθώς και τις μετρικές που θέλουμε να μετρήσουμε από κάθε σενάριο. Οι κύριες μετρικές που μας ενδιαφέρουν είναι η διάρκεια ζωής και οι καθυστερήσεις μετάδοσης των πακέτων δεδομένων.

Σενάριο 1^ο – Υπολογισμός start-up time

Το πρώτο σενάριο είναι και το πιο απλό από τα τέσσερα. Στο σενάριο αυτό το δίκτυο ξεκινά τη λειτουργία του με τους συλλέκτες να διοχετεύουν στο δίκτυο το πρώτο μήνυμα scoring. Όλοι οι κόμβοι αρχικά είναι μεν σε πλήρη λειτουργία, γνωρίζουν πόσους και ποιους γείτονες έχουν αλλά δεν έχουν καμία πληροφορία για τον αριθμό ή τη θέση των συλλεκτών ούτε φυσικά για το σε ποιόν πρέπει να στείλουν

τα δεδομένα τους ώστε να δρομολογηθούν στον προορισμό τους. Το μήνυμα scoring θα εγκαθιδρύσει τις αρχικές διαδρομές και έτσι θα κατασκευάσει τα δέντρα Voronoi που θα συνδέουν τους κόμβους με το πλησιέστερο sink. Σαν μετρική απόστασης εδώ χρησιμοποιείται η hop count distance μετρική. Στο σενάριο αυτό μετράμε τον χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρώσει το δίκτυο ένα scoring, χωρίς την ύπαρξη κίνησης δεδομένων στο δίκτυο.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ σημαντικό να το γνωρίζουμε τόσο σαν χαρακτηριστικό του δικτύου όσο και για μελλοντική χρήση στα επόμενα σενάρια. Γνωρίζοντας το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός scoring, μπορούμε με ακρίβεια να ορίσουμε την περίοδο επανάληψης των rescopes, αφού θα γνωρίζουμε πότε ένα προηγούμενο rescore θα έχει εγγυημένα σταματήσει. Μη γνωρίζοντας το χρόνο αυτό, κινδυνεύουμε – ορίζοντας λάθος την χρονική τιμή επανάληψης των rescopes – να εκτελούμε rescore όταν είτε το προηγούμενο score δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί (προκαλώντας σύγχυση στους κόμβους και μεγάλο overhead) ή όταν το προηγούμενο έχει ολοκληρωθεί προ πολλού, μειώνοντας έτσι την απόκριση και προσαρμοστικότητα του δικτύου σε αλλαγές.

Σενάριο 2^ο – Λειτουργία του δικτύου με μετρική απόστασης : min hop

Στο σενάριο αυτό το δίκτυο λειτουργεί κανονικά, χρησιμοποιώντας σαν μετρική απόστασης την hop count distance μεταξύ κόμβων και συλλεκτών. Το δίκτυο θα εκτελεί rescopes ανά κατάλληλο χρονικό διάστημα (το οποίο θα έχει υπολογιστεί με βάση το 1^ο σενάριο) και επίσης το MAC πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιεί θα είναι το SMAC.

Στόχος του σεναρίου είναι να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής του δικτύου (αυτό που στο εξής αναφέρεται ως network longevity και το οποίο ορίζουμε και συζητάμε στο επόμενο σενάριο) για διάφορους ρυθμούς άφιξης δεδομένων στο δίκτυο. Με βάση τα αποτελέσματα που θα έχουμε από το σενάριο αυτό, θα μπορούμε να δούμε την βελτίωση ή μη της απόδοσης (διάρκειας ζωής, χρόνου μετάδοσης δεδομένων) του δικτύου αλλάζοντας παραμέτρους όπως π.χ. την μετρική απόστασης κ.α.

Σενάριο 3^ο – Λειτουργία του δικτύου με μετρική απόστασης : max available energy path

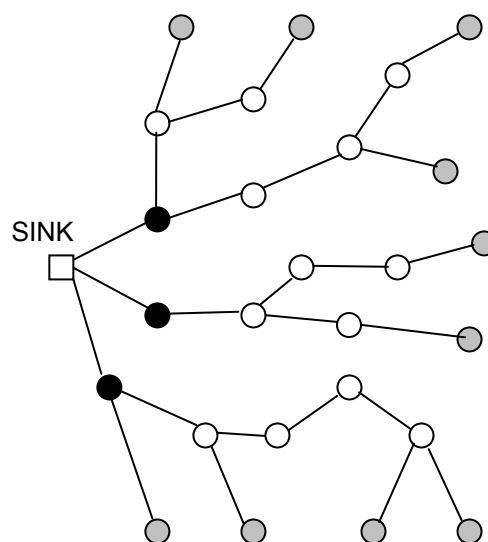
Στο σενάριο αυτό το δίκτυο της εφαρμογής μας λειτουργεί όπως στην περίπτωση του σεναρίου 2, αλλά με μόνη διαφορά ότι η μετρική απόστασης με βάση την οποία θα κατασκευάζονται τα δένδρα Voronoi δεν θα είναι η hop count distance αλλά μια νέα μετρική που ονομάζουμε διαδρομή μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας στους

κόμβους. Για να διευκρινίσουμε τι εννοούμε με τον όρο διαδρομή μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας θεωρούμε ότι κάθε κόμβος γνωρίζει κάθε χρονική στιγμή την διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας του. Ορίζουμε έναν αριθμό από *ενεργειακές στάθμες* (στην περίπτωση μας τέσσερις) και με βάση αυτές κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από το επίπεδο ενέργειας του ανά πάσα στιγμή. Για παράδειγμα, αν ένας κόμβος τροφοδοτείται από μπαταρίες 1000 mAh, τέσσερις στάθμες στα 800, 600, 400 και 200 mAh ορίζουν πέντε αντίστοιχα επίπεδα (επίπεδο 1: >800 mAh, επίπεδο 2: 800 – 600 mAh, επίπεδο 3: 600 – 400 mAh, επίπεδο 4: 400 – 200 mAh και επίπεδο 5: <200 mAh). Έτσι, εάν ο κόμβος έχει 720 mAh διαθέσιμη ενέργεια τότε λέμε ότι βρίσκεται στο επίπεδο 2, αν έχει μόνο 60 βρίσκεται στο επίπεδο 5, κ.ο.κ.

Ο αριθμός του επιπέδου ενέργειας που βρίσκεται ο κάθε κόμβος υποδηλώνει και το *ενεργειακό κόστος που προσθέτει ο κόμβος σε όποιο μονοπάτι τον περιλαμβάνει*. Για παράδειγμα, με τα παραπάνω δεδομένα ένας κόμβος που βρίσκεται στο επίπεδο 2 (720 mAh) προσθέτει 2 μονάδες ενεργειακού κόστους σε όποιο μονοπάτι τον περιλαμβάνει, ένας άλλος κόμβος με ελάχιστη ενέργεια που βρίσκεται στο επίπεδο 5 (60 mAh) προσθέτει 5 μονάδες κ.ο.κ. Η ιδέα πίσω από αυτή τη θεώρηση είναι ότι *θεωρούμε προτιμότερο να ακολουθείται μια διαδρομή που να περιλαμβάνει κόμβους με όσο το δυνατόν περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια (έστω και αν αυτή περιλαμβάνει περισσότερους κόμβους στο μονοπάτι) παρά να ακολουθούνται – ίσως συντομότερες από πλευράς hops – διαδρομές που περιλαμβάνουν κόμβους με λίγη εναπομένουσα ενέργεια*. Με άλλα λόγια, θεωρούμε πιο «επιζήμιο» για το δίκτυο να καταναλώνεται ενέργεια από κόμβους με λίγη εναπομένουσα ενέργεια παρά από κόμβους με περισσότερη. Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 1, πρώτη προτεραιότητα σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και η εφαρμογή τεχνικών που να παρατείνουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη διάρκεια ζωής των κόμβων και επομένως του δικτύου αισθητήρων. Επίσης είδαμε ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι πηγές τροφοδοσίας ενέργειας των κόμβων είναι πολύ δύσκολο να ανανεωθούν ή αντικατασταθούν. Έτσι, είναι ωφέλιμο για τους σχεδιαστές να μπορέσουν να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου, σε αντάλλαγμα άλλων παραμέτρων (καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων κ.λ.π.).

Με την μετρική που προτείνουμε επιχειρούμε να παρατείνουμε όσο γίνεται τη *διάρκεια ζωής* του δικτύου αισθητήρων, αναγκάζοντας τα πακέτα να «αποφεύγουν» (φυσικά όπου αυτό είναι δυνατό) διαδρομές που περιλαμβάνουν κόμβους με λίγη διαθέσιμη ενέργεια. Με τον όρο *διάρκεια ζωής* εννοούμε το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το δίκτυο έχει *ποσοστό κόμβων που λειτουργούν* πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ποσοστό κόμβων λειτουργίας 70%, τότε σαν *διάρκεια ζωής* ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο τουλάχιστον το 70% των κόμβων του δικτύου παραμένει ενεργό. Αν αυτό το ποσοστό

μειωθεί θεωρούμε ότι δεν μετρούμε επαρκώς το πεδίο αίσθησης καθώς δεν καλύπτεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Ωστόσο, σημειώνουμε εδώ ότι με την εφαρμογή της νέας μετρικής δεν περιμένουμε μετατόπιση του συνολικού μέσου όρου ζωής του δικτύου, δηλαδή παράταση λειτουργίας των κόμβων του δικτύου. Αυτό γιατί αν ρίξουμε μια ματιά στην μορφή ενός δένδρου Voronoi (Σχήμα 13), θα δούμε ότι λίγοι κόμβοι βρίσκονται γειτονικά ενός συλλέκτη ενώ πολλοί κόμβοι μπορεί να είναι πάνω στην περίμετρο της περιοχής (border nodes). Συνεπώς όλη η κίνηση των κόμβων που αποτελούν το δέντρο θα περάσει από αυτούς που βρίσκονται γειτονικά με τους συλλέκτες, ό,τι μετρική απόστασης και αν χρησιμοποιήσουμε. Η διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων κόμβων εξαρτάται σε σχεδόν απόλυτο βαθμό από την κίνηση δεδομένων στο δίκτυο. Κατά παρόμοια έννοια, οι κόμβοι πάνω στην περίμετρο δεν βρίσκονται στο ενδιάμεσο κάποιας διαδρομής αλλά αποτελούν την αρχή. Αυτοί δεν δρομολογούν δεδομένα παρά μόνο μεταδίδουν τα δεδομένα που συλλέγουν οι ίδιοι. Συνεπώς, οποιαδήποτε διαδρομή και να ακολουθήσουν περαιτέρω τα πακέτα τους, αυτοί δεν επηρεάζονται καθόλου ενεργειακά. Ομοίως η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται αποκλειστικά από το ρυθμό με τον οποίο συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα, οπότε και ξοδεύουν ενέργεια.



Σχήμα 13. Όλη η κίνηση του δικτύου θα περάσει από τους κόμβους που γειτονεύουν με το συλλέκτη (μαύρο χρώμα). Για τους κόμβους που βρίσκονται στην περίμετρο (γκρι χρώμα) ενεργειακά η επιλογή διαδρομής δεν έχει καμία σημασία.

Αυτό που περιμένουμε να δούμε είναι αλλαγή της συμπεριφοράς του δικτύου την κρίσιμη περίοδο όπου η ενέργεια όλων των κόμβων του δικτύου έχει μειωθεί σημαντικά και οι κόμβοι αρχίζουν να πεθαίνουν. Χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη μετρική, επιτυγχάνουμε μια πιο *ομοιόμορφη* κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους. Κατά συνέπεια περιμένουμε από τη μια πλευρά παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου (το δίκτυο αρχίζει να «πεθαίνει» αργότερα) αλλά από την άλλη πλευρά όπως αναφέραμε όχι επιμήκυνσης ζωής όλων των κόμβων του. Αυτό γιατί με την νέα μετρική οι διαδρομές μπορεί να είναι μεγαλύτερες, συνεπώς ένα δεδομένο πακέτο ταξιδεύει μέσα από περισσότερους κόμβους και καταναλώνει έτσι περισσότερη ενέργεια συνολικά. Έτσι

από ένα σημείο και μετά περιμένουμε πιο «απότομο» ρυθμό θανάτων των κόμβων του δικτύου.

Τέλος, στο σενάριο αυτό παρουσιάζουμε και την βελτίωση από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας που επιφέρει η χρήση του πρωτοκόλλου SMAC στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, μετράμε την διάρκεια ζωής του δικτύου με και χωρίς adaptive sleeping και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές φόρτου κίνησης δεδομένων.

Σενάριο 4^ο – Λειτουργία του δικτύου με απαλοιφή των rescopes και ενσωμάτωση δυναμικής ενημέρωσης των συλλεκτών από πλευράς κόμβων

Στο τελευταίο σενάριο εφαρμόζουμε μια νέα τεχνική η οποία προσπαθεί να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση του δικτύου τόσο από πλευράς καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων όσο και από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας. Για να το επιτύχουμε αυτό, επιχειρούμε να εξαλείψουμε τα περιοδικά rescopes. Στο τέλος της ενότητας 3.1 παρουσιάσαμε την αναγκαιότητα των περιοδικών rescopes για ένα δίκτυο αισθητήρων και αναφέραμε ότι μπορεί μεν να είναι αναγκαία αλλά εισάγουν μεγάλο overhead το οποίο σπαταλά ενέργεια αλλά και αυξάνει την καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων. Ένα rescope που πραγματοποιείται και τελικά αφού ολοκληρωθεί δεν έχει επιφέρει καμία αλλαγή στη δομή του δικτύου είναι σίγουρα ένα άσκοπο rescope. Στο σενάριο αυτό εισάγουμε την τεχνική της δυναμικής ενημέρωσης των συλλεκτών από τους κόμβους όσον αφορά την ενεργειακή τους κατάσταση.

Σε πρώτη φάση καταργούμε τα rescopes. Ένα και μοναδικό scoring θα γίνει στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου. Στο αρχικό αυτό scoring θα εγκαθιδρυθούν οι διαδρομές και όλοι οι κόμβοι θα γνωρίζουν τα μονοπάτια προς τον κοντινότερο συλλέκτη. Σαν μετρική απόστασης ορίζουμε την μετρική μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας αν και η επιλογή της μετρικής δεν έχει και πολύ σημασία στο σενάριο αυτό καθώς στο πρώτο scoring οι διαδρομές που εγκαθιδρύονται με τη χρήση είτε της μετρικής μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας είτε της μετρικής min hop απόστασης ταυτίζονται, αφού όλοι οι κόμβοι βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ενέργειας (υψηλότερο). Στη συνέχεια το δίκτυο εκτελεί κανονικά τη λειτουργία συλλογής και δρομολόγησης δεδομένων όπως στις άλλες περιπτώσεις χωρίς να γίνονται rescopes.

Μόλις κάποιος κόμβος φτάσει σε πολύ χαμηλό επίπεδο ενέργειας (πιο χαμηλό και από το χαμηλότερο επίπεδο κβαντισμού) και ενώ έχει υπολειπόμενη ενέργεια λίγο μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ενέργεια αποστολής ενός πακέτου, τότε στέλνει ένα πακέτο με ειδικό flag (το λεγόμενο *DIE* πακέτο). Μόλις το στείλει με επιτυχία, τότε πεθαίνει (κλείνει τον πομποδέκτη του και απενεργοποιείται). Το πακέτο *DIE* ταξιδεύει όπως κάθε πακέτο δεδομένων και φτάνει σε κάποιο συλλέκτη. Ο

συλλέκτης τώρα διαβάζει αυτό το πακέτο και αντιλαμβάνεται ότι είναι ένα πακέτο DIE, δηλαδή ότι εκείνη τη στιγμή τουλάχιστον ένας κόμβος έχει πεθάνει (μπορεί να βρίσκονται και άλλα τέτοια πακέτα στην πορεία). Δεδομένου αυτού, τη στιγμή εκείνη ξεκινά ένα νέο rescore. Το rescore που ξεκίνησε θα αναλάβει να αποκαταστήσει τυχόν ανωμαλίες που δημιούργησε στις διαδρομές ο κόμβος που πέθανε, ο οποίος και έστειλε το πακέτο. Μόλις τελειώσει το rescore, οι συλλέκτες εξακολουθούν να μην κάνουν rescore αλλά να περιμένουν το επόμενο DIE πακέτο. Αν τώρα λάβουν ένα DIE πακέτο πριν ολοκληρωθεί ένα rescore που μόλις ξεκίνησαν, θα αναλάβουν να ξεκινήσουν νέο λίγο μετά το τέλος του τρέχοντος.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε δυναμική ενημέρωση των συλλεκτών από πλευράς κόμβων. Με άλλα λόγια, οι ίδιοι οι κόμβοι ενημερώνουν τους συλλέκτες για το πότε πιθανά χρειάζεται να γίνει ένα rescore και οι συλλέκτες το διεκπεραιώνουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αποφεύγονται όλα τα rescopes που γίνονται μέχρι οι κόμβοι κατά μέσο όρο να έχουν λίγη εναπομένουσα ενέργεια. Περιμένουμε με την ενσωμάτωση αυτής της τεχνικής να δούμε αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου αλλά και μείωση του χρόνου μετάδοσης των πακέτων δεδομένων, αφού δεν θα υπάρχουν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πακέτα scoring να τα καθυστερούν.

3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

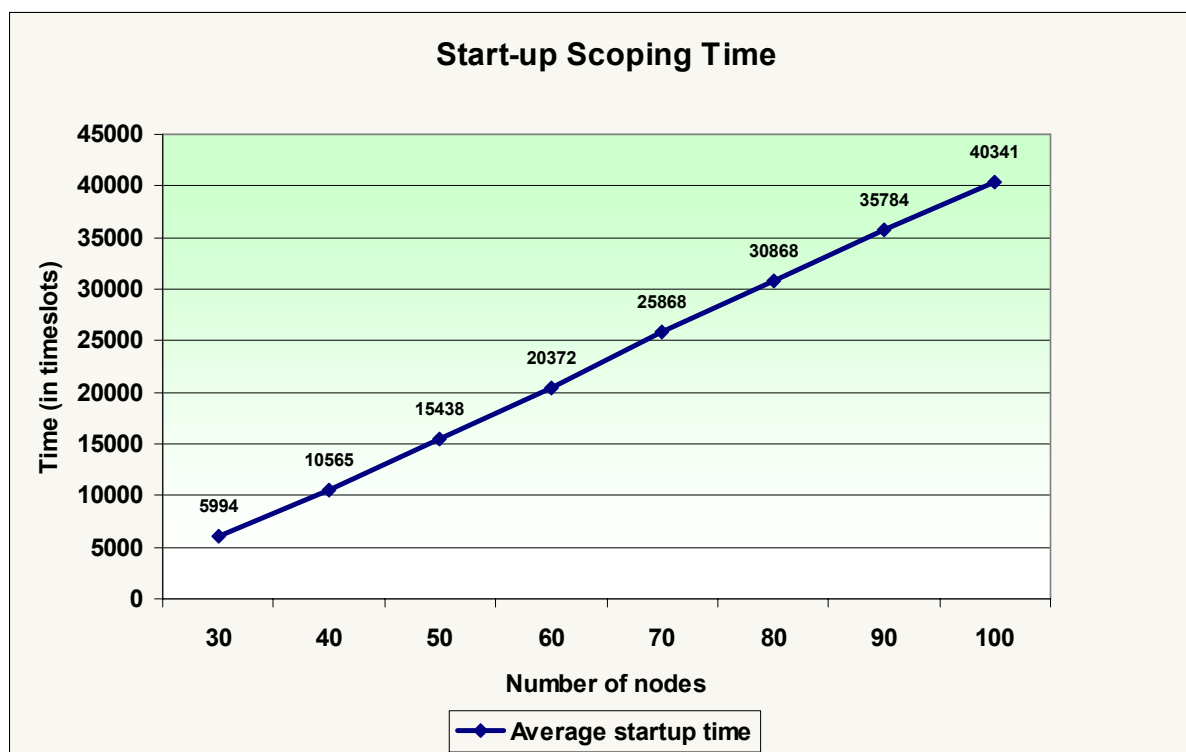
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε για να μετρήσουμε την αποτελεσματικότητα των νέων τεχνικών και μεθόδων που εισάγαμε. Οι προσομοιώσεις βασίστηκαν στα τέσσερα σενάρια που αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν σε γλώσσα C++. Επειδή τα σενάρια εμπεριέχουν παραμέτρους που αλλάζουν σε κάθε εκτέλεση, όπως για παράδειγμα η θέση των κόμβων στο πεδίο, για κάθε διάγραμμα και αποτέλεσμα που παρουσιάζουμε εκτελέσαμε την ίδια προσομοίωση 100 φορές. Για χάρη συντομίας, μειώσαμε την κλίμακα των προσομοιώσεων κατά 100, θεωρώντας ότι οι κόμβοι σε κάθε κύκλο listen / transmit / sleep καταναλώνουν 100 φορές περισσότερη ενέργεια από την πραγματική. Η θεώρηση αυτή έγινε για να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων (ο οποίος για πραγματικά δεδομένα διαρκούσε πάρα πολύ) και δεδομένου ότι η συγκεκριμένη παράμετρος που κλιμακώθηκε δεν επηρεάζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα.

Για το λόγο αυτό επίσης ο άξονας του χρόνου υποδεικνύει χρονοθυρίδες και όχι απόλυτο χρόνο. Με έναν απλό πολλαπλασιασμό (1 timeslot = 2,5 ms) μπορεί να υπολογιστεί ο απόλυτος χρόνος. Επίσης, όπου εμφανίζονται διαστήματα εμπιστοσύνης (confidence intervals), αυτά αντιστοιχούν σε εμπιστοσύνη 95%.

3.4.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 1

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα στο Σενάριο 1 θα μετρήσουμε τον χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρώσει το δίκτυο ένα scoring, χωρίς την ύπαρξη κίνησης δεδομένων στο δίκτυο. Η μέτρηση γίνεται για διακριτές τιμές αριθμού κόμβων στο δίκτυο. Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται οι επιμέρους απαιτούμενοι μέσοι χρόνοι.



Διάγραμμα 1. Ο χρόνος ολοκλήρωσης του αρχικού scoring για διάφορες τιμές αριθμού κόμβων στο πεδίο.

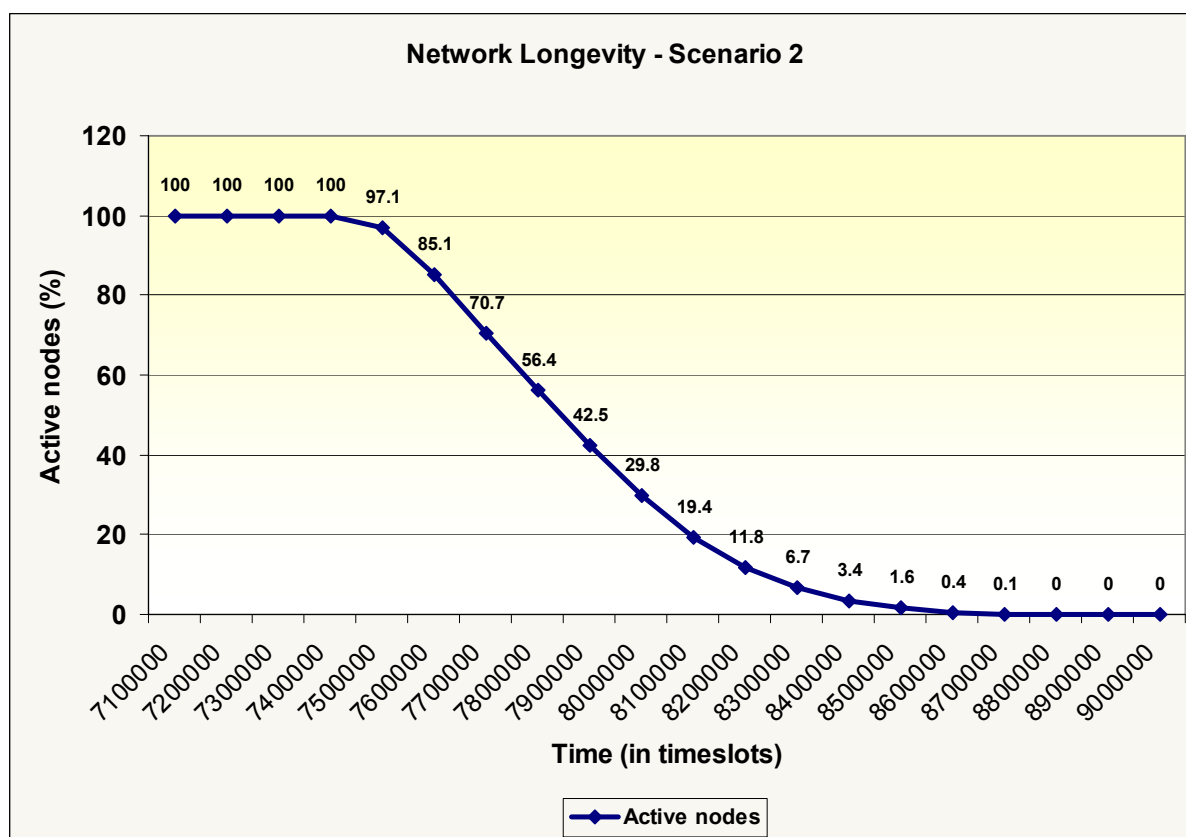
Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, ο χρόνος ολοκλήρωσης του αρχικού scoring είναι γραμμικά ανάλογος με τον αριθμό των κόμβων στο πεδίο. Αυτό εξηγείται απλά από το γεγονός ότι όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν στο πεδίο, τόσο περισσότερες μεταδόσεις πακέτων scoring θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να ενημερωθούν όλοι οι κόμβοι.

Γνωρίζοντας λοιπόν για την εφαρμογή μας τον χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένα scoring, και φυσικά λαμβάνοντας υπ' όψιν μας και τα confidence intervals, μπορούμε με σχετική ακρίβεια και ασφάλεια να ορίσουμε το πλέον κατάλληλο rescoring interval. Η μέση τιμή scoring startup time για την περίπτωση των 100 κόμβων είναι 40.341 χρονοθυρίδες. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια όπου

εξετάζουμε αποκλειστικά δίκτυα 100 κόμβων, ορίζουμε το rescope interval ίσο με 75000 χρονοθυρίδες.

3.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 2

Από αυτό το σενάριο και έπειτα, παρουσιάζουμε σε κάθε περίπτωση αποτελέσματα από πλήρεις κύκλους λειτουργίας του δικτύου. Στο Σενάριο 2 μετράμε την διάρκεια ζωής του δικτύου όταν σαν μετρική απόστασης των κόμβων με τους συλλέκτες χρησιμοποιείται η μετρική min hop count distance. Ο αριθμός των κόμβων είναι 100 και τα rescopes επαναλαμβάνονται κάθε 75000 χρονοθυρίδες.

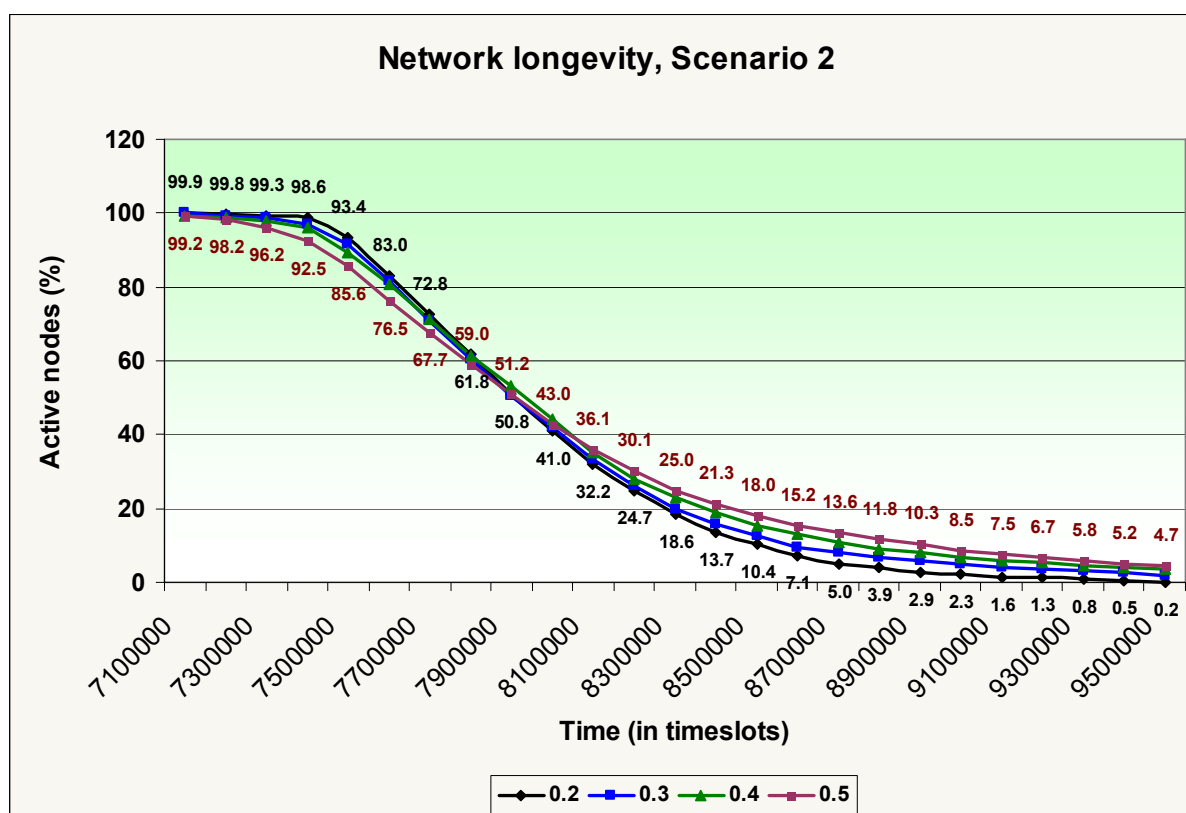


Διάγραμμα 2. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 2 χωρίς κίνηση δεδομένων

Επίσης μετράται η διάρκεια ζωής για διακριτές τιμές του ρυθμού άφιξης πληροφορίας στο δίκτυο. Στο δίκτυό μας η συνάρτηση Poisson καλείται κάθε 100 χρονοθυρίδες και υπολογίζουμε την απόδοση του δικτύου για τιμές του λ από 0,2 έως 0,5 με βήμα 0,1. Με άλλα λόγια υπολογίζουμε την απόδοση για άφιξη (δημιουργία εφόσον μιλάμε για δεδομένα αίσθησης) δύο έως πέντε πακέτων δεδομένων ανά 1000 timeslots = 2,5 seconds. Είναι φανερό πως ο αυτός ο ρυθμός άφιξης δεδομένων (για $\lambda = 0,5$ δημιουργούνται 120 πακέτα δεδομένων μέσα σε μόλις

1 λεπτό) είναι πολύ μεγάλος για μια τέτοια εφαρμογή, όμως θέλαμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά του δικτύου ακόμα και σε τέτοια λιγότερο πιθανά μεγάλα φορτία κίνησης.

Το Διάγραμμα 2 εξετάζει τη διάρκεια ζωής του δικτύου χωρίς κίνηση δεδομένων, ενώ το Διάγραμμα 3 με κίνηση δεδομένων για διάφορες τιμές του λ . Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο αριθμός των κόμβων που *συνεισφέρουν* στο δίκτυο, δηλαδή εκείνων των κόμβων που έχουν διαθέσιμη ενέργεια (είναι ζωντανοί), βρίσκονται συνδεδεμένοι με κάποιο συλλέκτη και μπορούν να διοχετεύσουν δεδομένα (δικά τους ή των παιδιών τους). Με άλλα λόγια δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι κόμβοι που έχουν πεθάνει και οι κόμβοι που έχουν γίνει starved.



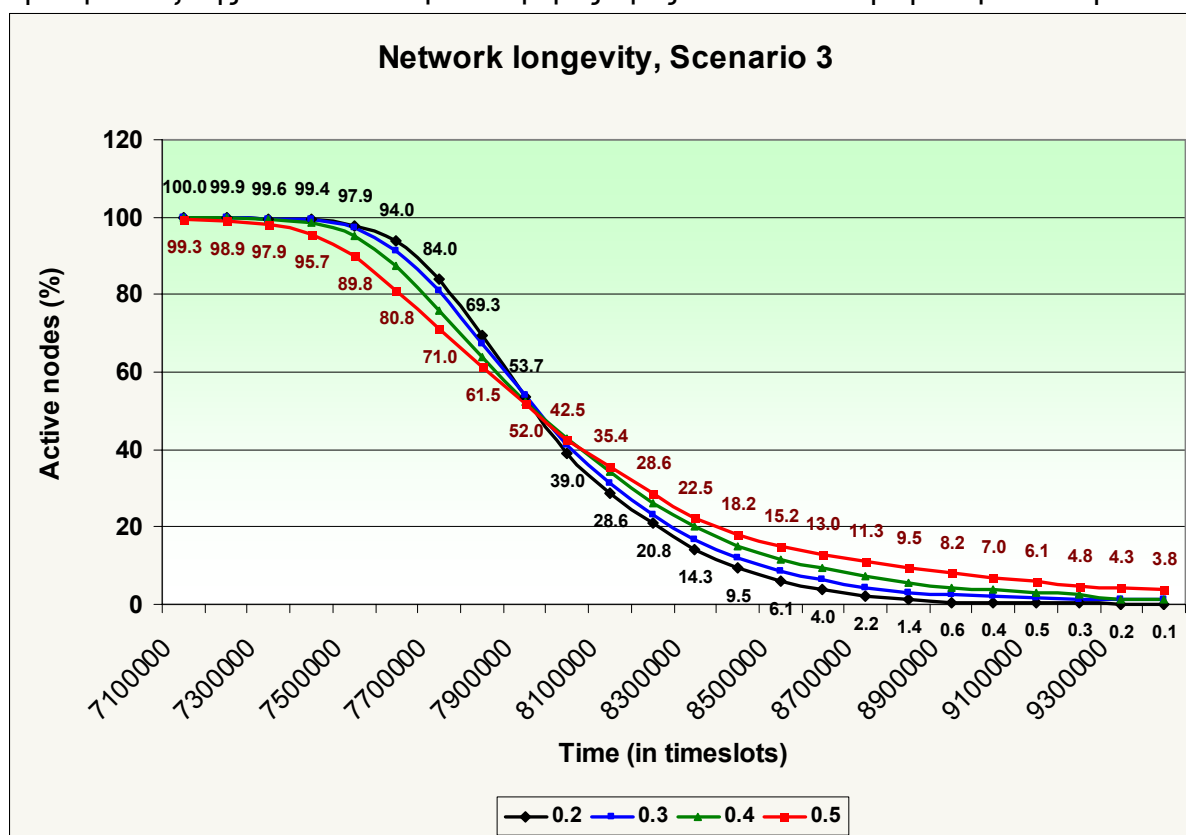
Διάγραμμα 3. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 2 για διακριτές τιμές του λ της Poisson.

3.4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 3

Στο Σενάριο 3 αλλάζουμε την μετρική απόστασης των κόμβων με τους συλλέκτες κατά την κατασκευή των δένδρων Voronoi. Όπως εξηγήσαμε, χρησιμοποιούμε τώρα την μετρική μέγιστης διαθέσιμης ισχύος στους κόμβους που απαρτίζουν τα μονοπάτια.

Είδαμε πως η τιμή της απόστασης συντίθεται από τα επίπεδα ενέργειας του κάθε κόμβου που συμμετέχει στο μονοπάτι. Με άλλα λόγια αν ένα μονοπάτι

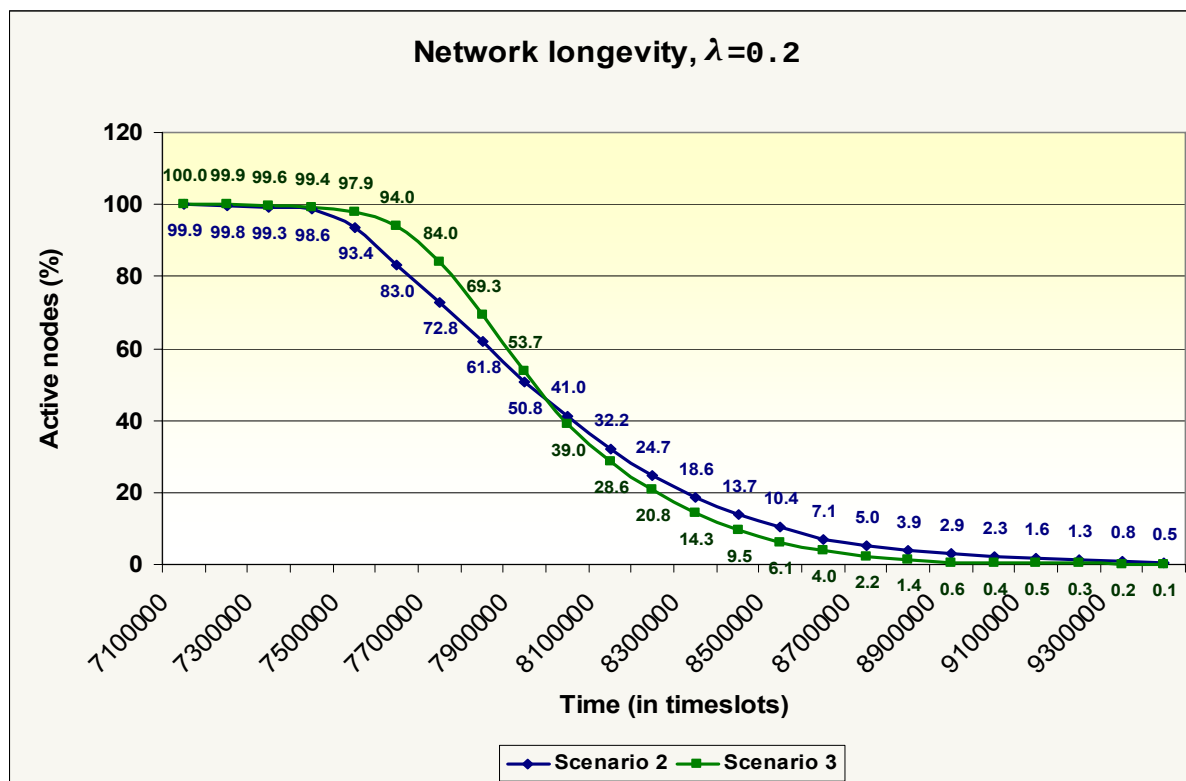
περιλαμβάνει τρεις κόμβους, δύο εκ των οποίων έχουν πλήρη ενέργεια (π.χ. επίπεδο 1) και ο άλλος έχει ήδη καταναλώσει ένα ποσό και έτσι βρίσκεται στο επίπεδο 2, το ενεργειακό κόστος του μονοπατιού θα είναι $1 + 1 + 2 = 3$. Αντίστοιχα, το ενεργειακό κόστος ενός μονοπατιού που αποτελείται από 2 κόμβους με ελάχιστη ενέργεια (επίπεδο π.χ. 5) θα είναι $5 + 5 = 10$. Αν ένας κόμβος έχει να επιλέξει μεταξύ των δύο μονοπατιών, θα επιλέξει το πρώτο παρόλο που περιλαμβάνει ένα επιπλέον hop. Το σκεπτικό είναι ότι παρόλο που μια μετάδοση θα δαπανήσει το ίδιο ποσό ενέργειας, είναι προτιμότερο αυτό να δαπανηθεί από κόμβο που έχει μεγαλύτερη ενέργεια παρά από έναν που έχει ελάχιστη και κινδυνεύει να πεθάνει. Το Διάγραμμα 4 παρουσιάζει τη διάρκεια ζωής του δικτύου για διάφορες τιμές του λ σε αυτή την περίπτωση.



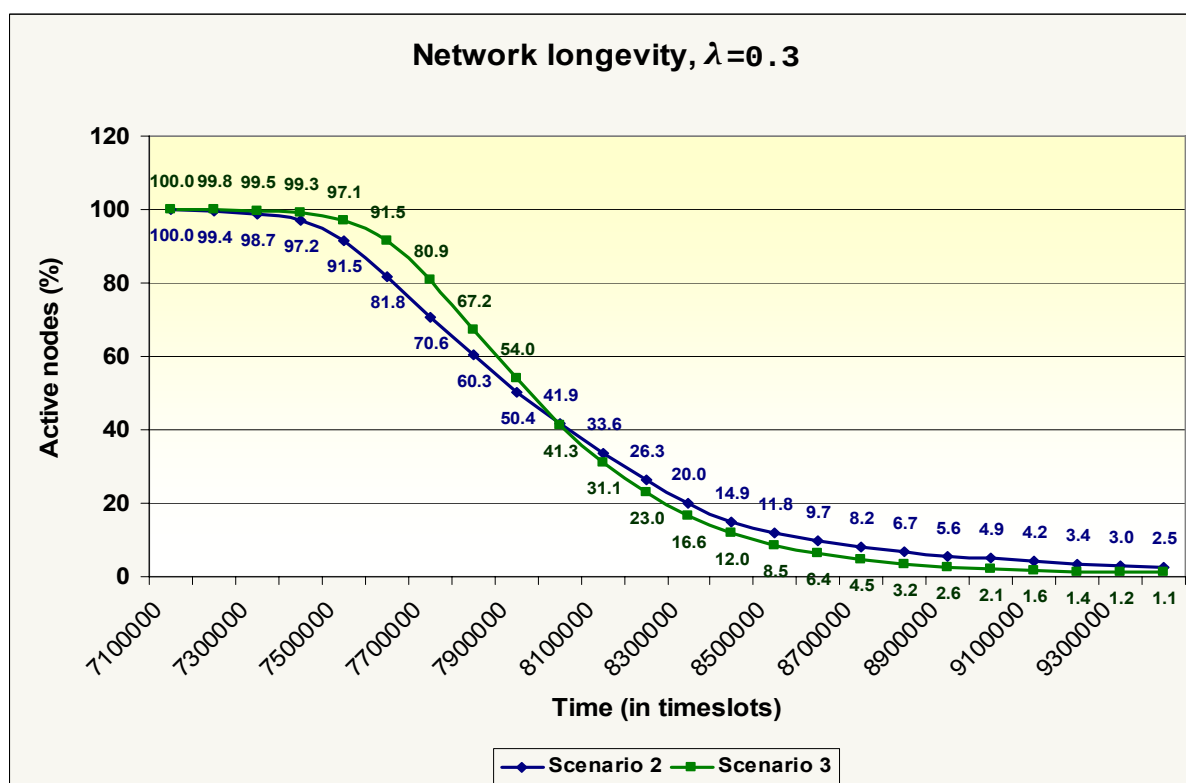
Διάγραμμα 4. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 3 για διακριτές τιμές της παραμέτρου της Poisson λ .

Για την εφαρμογή μας χρησιμοποιήσαμε 4 στάθμες που δημιουργούν πέντε επίπεδα ενέργειας. Είδαμε ότι τα Mica motes τροφοδοτούνται από δύο μπαταρίες AA με διαθέσιμη ενέργεια 2500 mAh. Οι τέσσερις στάθμες ορίστηκαν αρχικά στα 2000, 1500, 1000 και 500 mAh αντίστοιχα. Τα επίπεδα που προκύπτουν είναι: Επίπεδο 1: 2500 – 2000 mAh, Επίπεδο 2: 2000 – 1500 mAh, Επίπεδο 3: 1500 – 1000 mAh, Επίπεδο 4: 1000 – 500 mAh και Επίπεδο 5: 500 – 0 mAh. Επίσης μελετήσαμε την απόδοση του δικτύου και για άλλες τιμές ενεργειακών σταθμών, αλλά καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η ομοιόμορφη αυτή κατανομή είχε σαν αποτέλεσμα μέγιστη

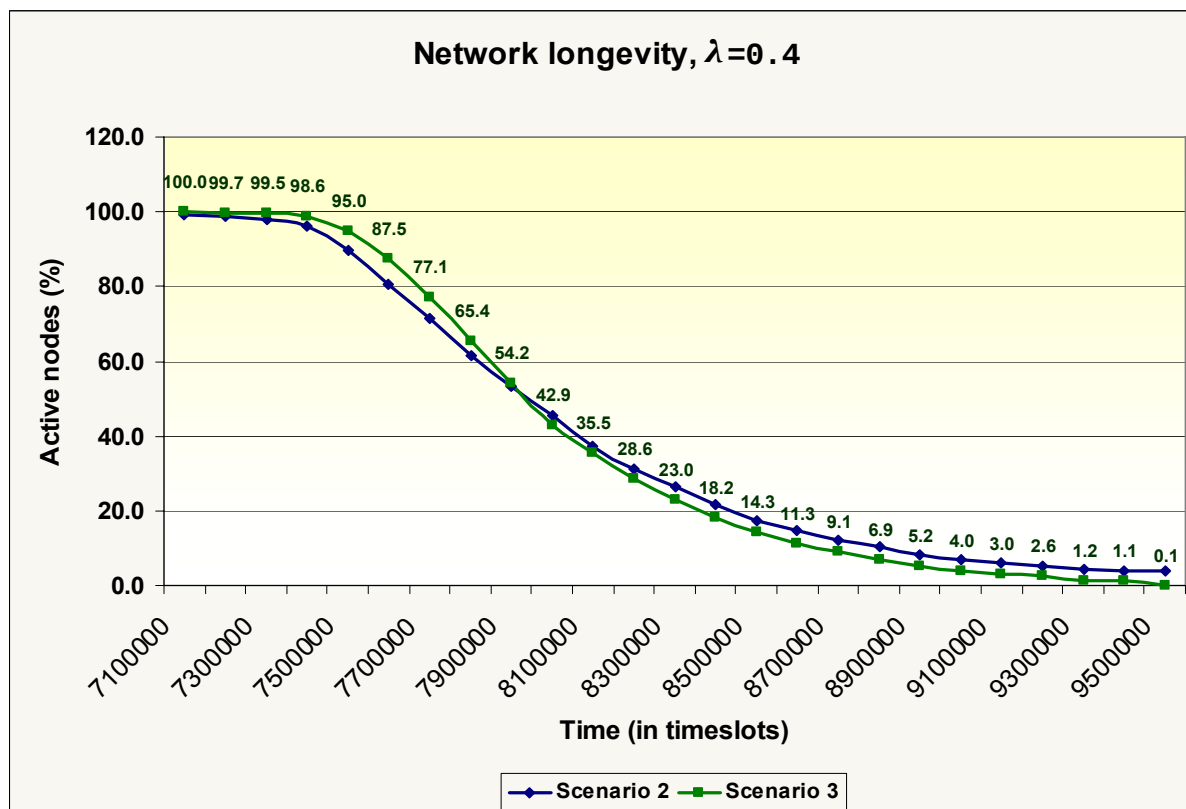
απόδοση του δικτύου, για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζουμε αποτελέσματα με άλλες τιμές ενεργειακών σταθμών.



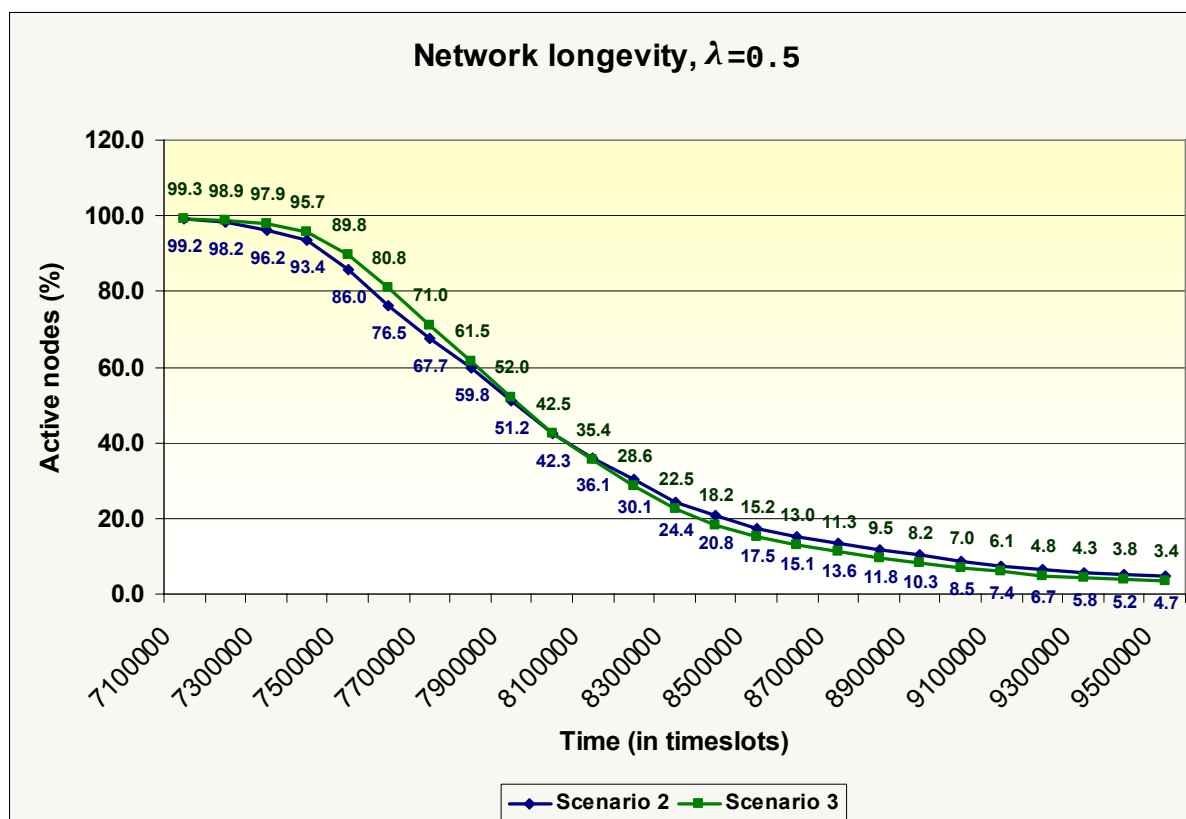
Διάγραμμα 5α. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 3 για $\lambda=0.2$.



Διάγραμμα 5β. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 3 για $\lambda=0.3$.



Διάγραμμα 5γ. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 3 για $\lambda=0.4$.



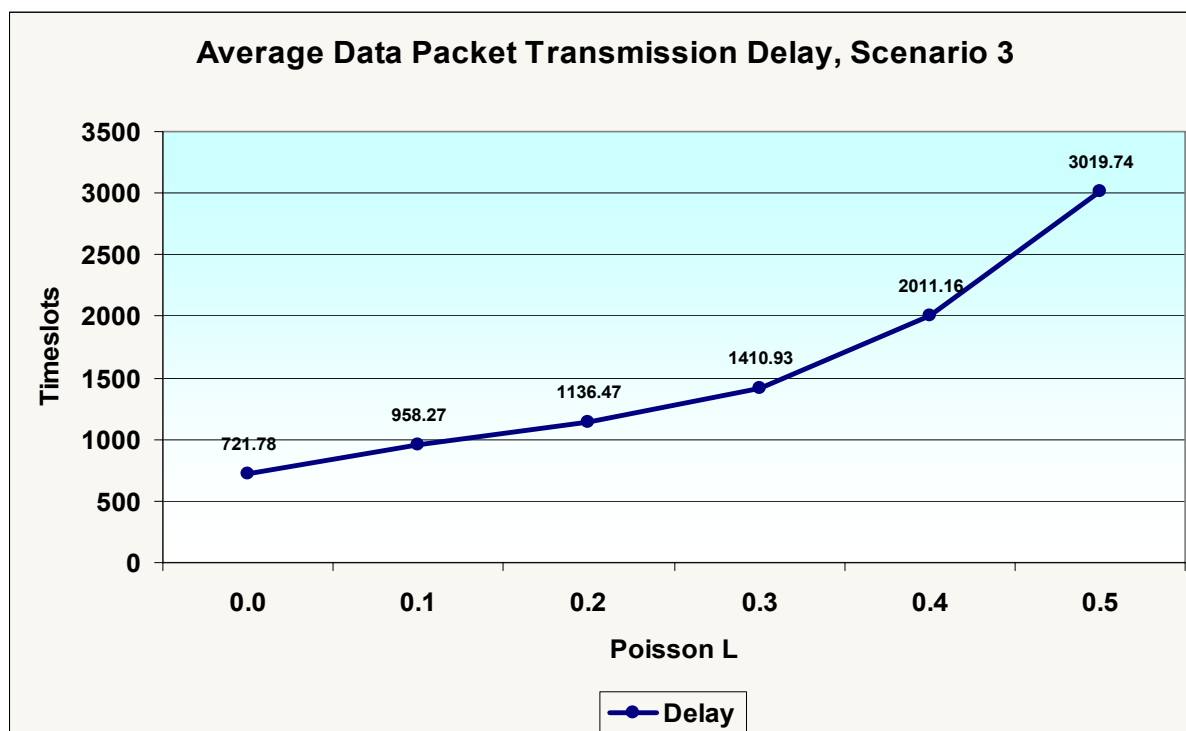
Διάγραμμα 5δ. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 3 για $\lambda=0.5$.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ακριβώς αυτό που περιμέναμε, όπως αναλύσαμε στην ενότητα 3.3. Η διάρκεια ζωής αυξάνεται αρχικά, το δίκτυο αργεί πιο πολύ να αρχίσει να «πεθαίνει». Στη συνέχεια όμως παρατηρούμε ότι πεθαίνει πιο απότομα σε σχέση με το Σενάριο 2. Αυτό γιατί όπως εξηγήσαμε, η κατανάλωση ενέργειας γίνεται με έναν πιο «ομοιόμορφο» τρόπο, διαλέγοντας εναλλακτικές διαδρομές δρομολόγησης όπου το ενεργειακό κόστος μειώνεται. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η εισαγωγή της συγκεκριμένης μετρικής επιφέρει μεν μικρή βελτίωση στην διάρκεια ζωής του δικτύου αλλά δεν πρέπει να ξεχνάμε πως η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται χωρίς κανένα κόστος, αλλάζοντας μονάχα μια μετρική που ούτως ή άλλως αποθηκευόταν και πριν.

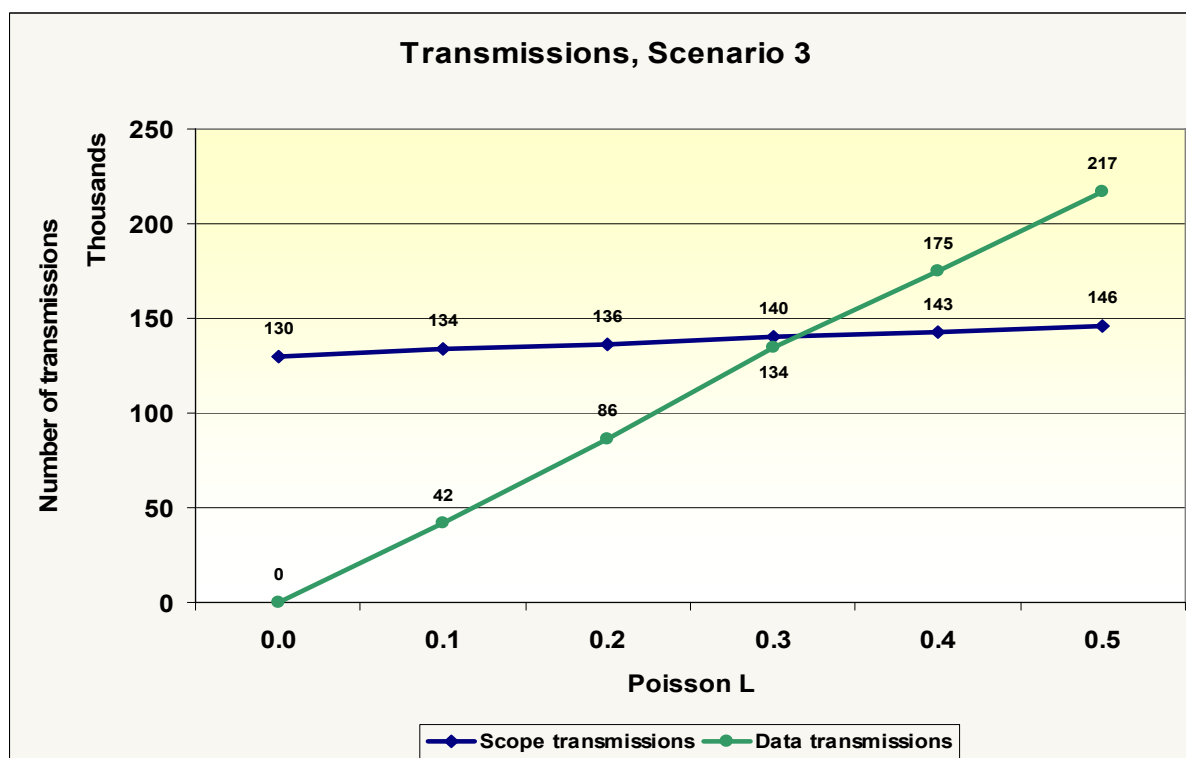
Παρακάτω αναλύουμε λίγο περισσότερο τη βελτίωση που επιτυγχάνει η εισαγωγή της νέας μετρικής. Αυτό που αξίζει κυρίως να επισημάνουμε είναι η βελτίωση στο πρώτο διάστημα της κύριας περιόδου όπου η μετρική μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας υπερσχύει έναντι της *min hop distance* μετρικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τιμές *ποσοστού κόμβων αποδεκτής λειτουργίας* πάνω από 60% για όλες τις περιπτώσεις φόρτου κίνησης δεδομένων, μας συμφέρει να χρησιμοποιήσουμε την μετρική μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας παρά την *min hop distance* μετρική. Υπενθυμίζουμε ότι με τον όρο ποσοστό κόμβων αποδεκτής λειτουργίας εννοούμε τον αριθμό των κόμβων πάνω από τον οποίο το δίκτυό μας θεωρείται βιώσιμο και αποδοτικό. Όπως φαίνεται π.χ. στο διάγραμμα 5α, τη χρονική στιγμή 7.6M timeslots με την *min hop distance* μετρική έχουν παραμείνει ζωντανοί κατά μέσο όρο το 83% των κόμβων ενώ με την μετρική μονοπατιού μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας το 94% των κόμβων (διαφορά 13,25%). Βέβαια, μετά τη χρονική στιγμή 8,0M timeslots υπερσχύει το δεύτερο σενάριο. Ωστόσο, είναι μάλλον απίθανο να υπάρχει εφαρμογή, ειδικά του τύπου που μελετάμε εμείς που να θεωρεί βιώσιμο ένα δίκτυο με ποσοστό κόμβων αποδεκτής λειτουργίας μικρότερο από 60%, καθώς διαισθητικά είναι πολύ δύσκολο ένα δίκτυο που έχει μείνει με σχεδόν τους μισούς του κόμβους ενεργούς να μπορεί να εκτελεί αποδοτικά το έργο του.

Επιπλέον με βάση τα διαγράμματα επισημαίνουμε ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Η βελτίωση της απόδοσης του 3^{ου} σεναρίου σε σχέση με το 2^ο μειώνεται όσο η κίνηση αυξάνει. Για παράδειγμα, για την χρονική στιγμή 7.6M, όταν έχουμε φορτίο $\lambda=0.2$ η διαφορά είναι 11%, για $\lambda=0.3$ είναι 9,7%, για $\lambda=0.4$ είναι 6.8% ενώ για φορτίο $\lambda=0.5$ η διαφορά είναι μόλις 4.3%. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι με την νέα μετρική όπως προαναφέραμε οι διαδρομές είναι σε πολλές περιπτώσεις μακρύτερες και έτσι ένα δεδομένο πακέτο καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για να φτάσει σε κάποιο συλλέκτη αν ακολουθήσει διαδρομή που περιλαμβάνει περισσότερα hops. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο όταν υπάρχουν περισσότερα πακέτα δεδομένων στο δίκτυο.

Επιπλέον μετρήσαμε την μέση καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων δεδομένων για διάφορα φορτία κίνησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών φαίνονται στο Διάγραμμα 6.



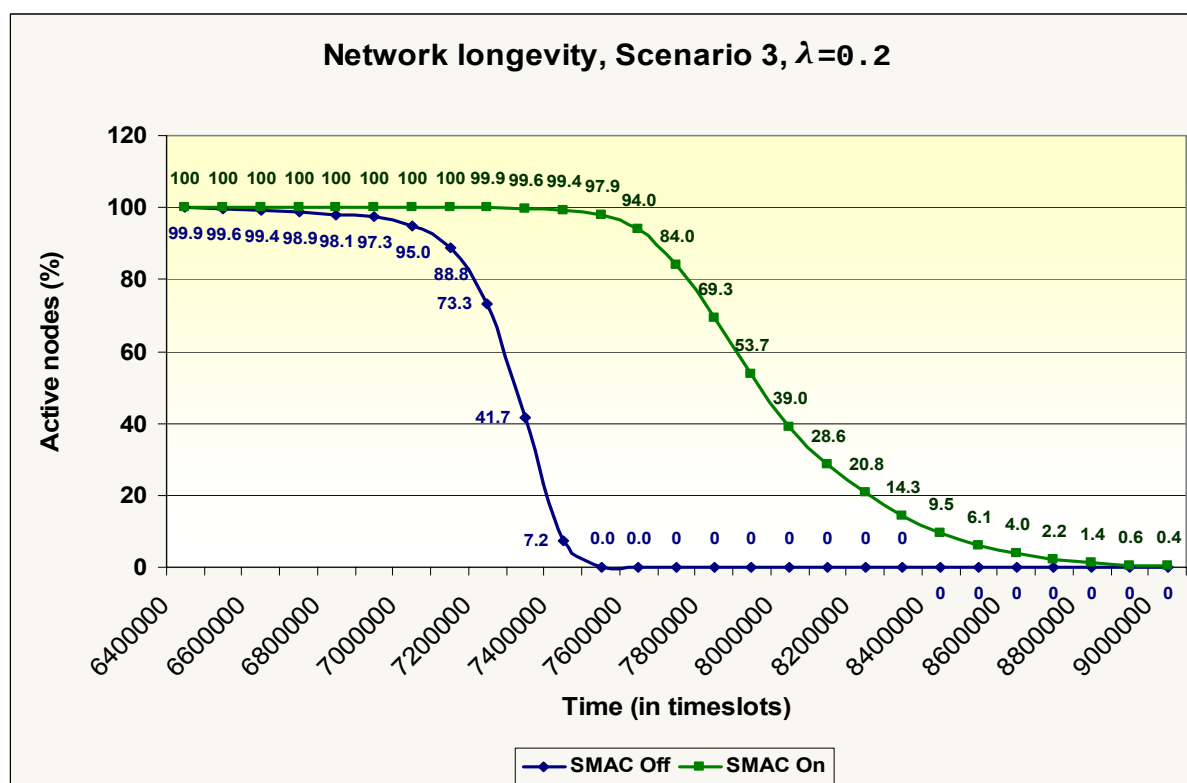
Διάγραμμα 6. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων δεδομένων στο Σενάριο 3.



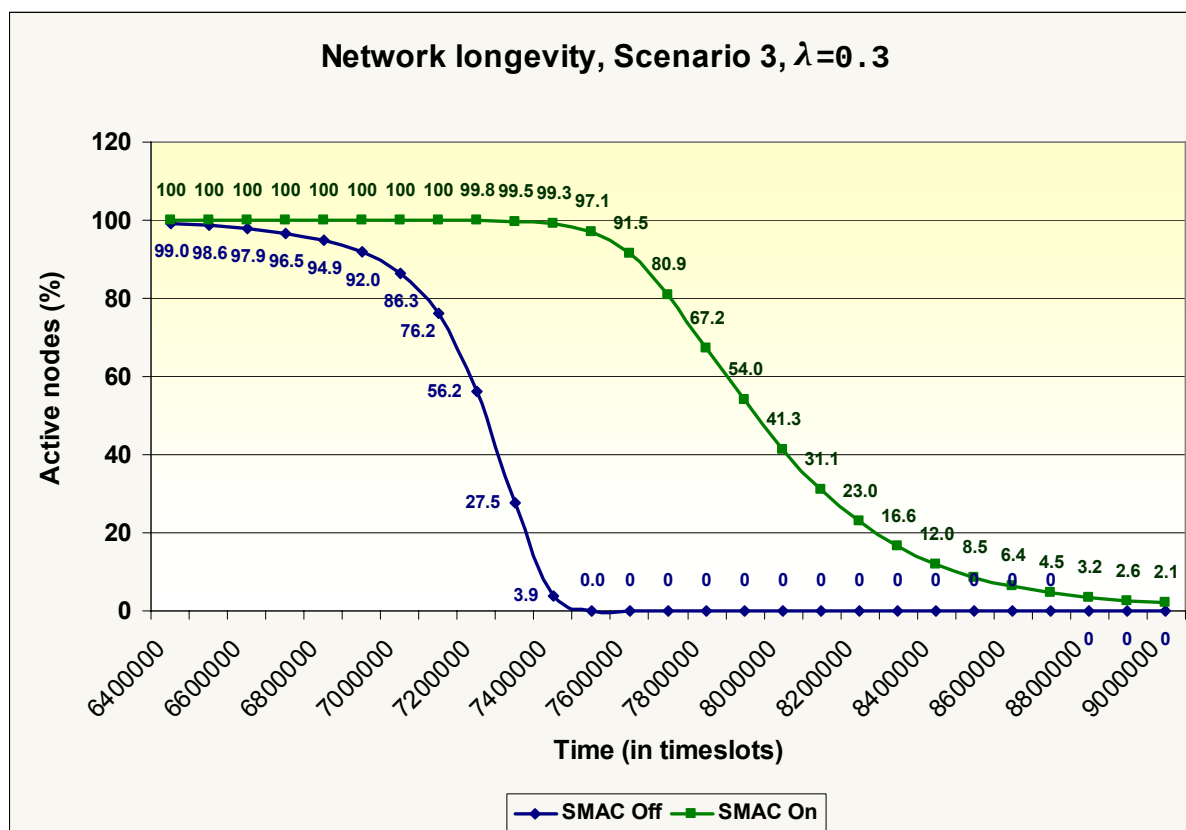
Διάγραμμα 7. Αριθμός μεταδόσεων πακέτων στο Σενάριο 3

Επισημαίνουμε στο σημείο αυτό ότι για μεγάλα φορτία κίνησης ($\lambda=0.4$ και 0.5) η μέση καθυστέρηση μετάδοσης αυξάνεται μη γραμμικά. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη χωρητικότητα ουράς αναμονής πακέτων σε κάθε κόμβο. Εάν ένας κόμβος έχει γεμάτη ουρά, ακόμα και να μπορεί να λάβει δεδομένα δεν θα το κάνει, παρά μόνο όταν καταφέρει να ελευθερώσει χώρο για να αποθηκεύσει το πακέτο που θα του έρθει. Θα επανέλθουμε στο διάγραμμα αυτό κατά τη μελέτη του 4^{ου} σεναρίου. Επίσης μετρήσαμε τον συνολικό αριθμό των μεταδόσεων που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο, τόσο για τα scores όσο και για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Το διάγραμμα 7 δείχνει όπως αναμενόταν, γραμμική αύξηση των μεταδόσεων πακέτων δεδομένων καθώς αυξάνει το λ ενώ αντίθετα οι μεταδόσεις πακέτων score παραμένουν σταθερές με το φορτίο δεδομένων αφού δεν εξαρτώνται από αυτό.

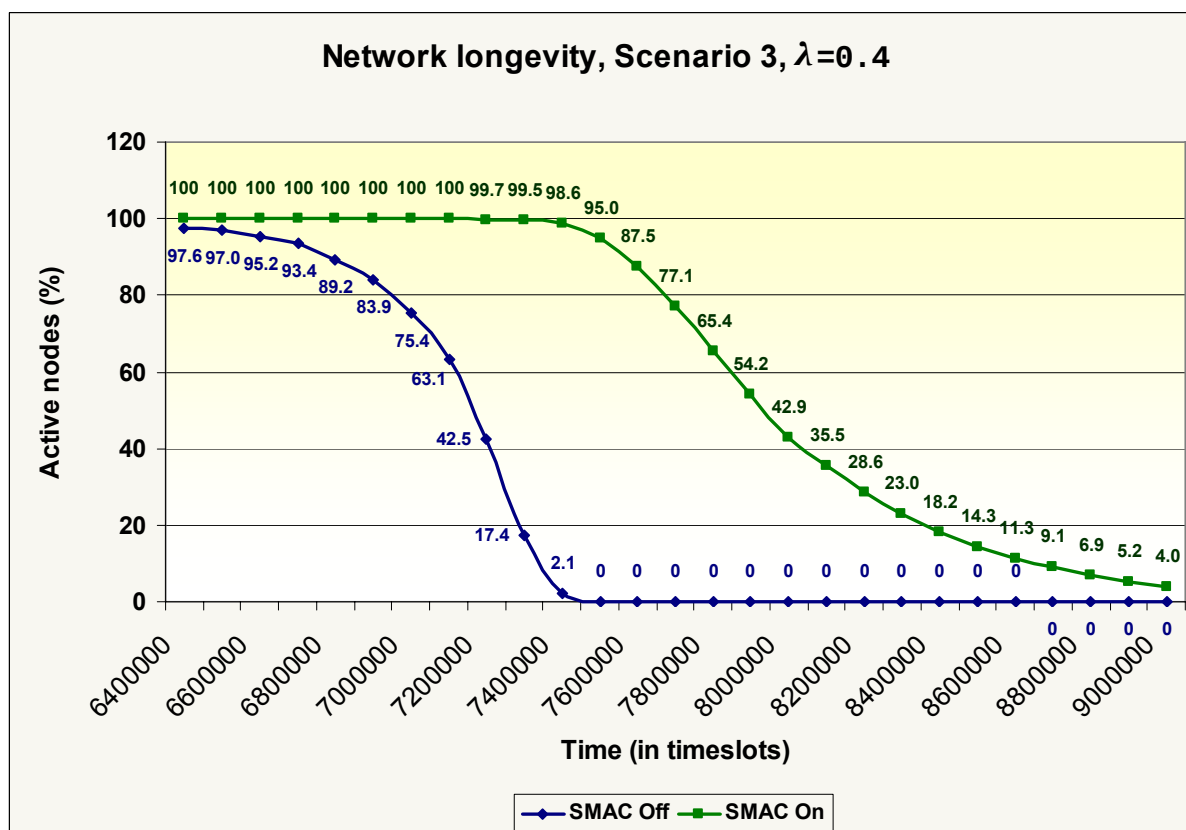
Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των μετρήσεων που διεξάγαμε, προσομοιώσαμε το δίκτυο χωρίς αυτό να χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SMAC για adaptive sleeping μεταξύ των κόμβων. Θέλαμε να μετρήσουμε την βελτίωση που επιφέρει στο δίκτυο το συγκεκριμένο πρωτόκολλο όσον αφορά την δαπάνη ενέργειας στους κόμβους. Από τα Διαγράμματα 8α, β, γ και δ παρατηρείται ότι η συνεισφορά του πρωτοκόλλου στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι πολύ σημαντική. Ειδικότερα, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο φορτίο δεδομένων υπάρχει στο δίκτυο, τόσο μεγαλύτερο είναι το επιτυγχανόμενο ποσοστό επιμήκυνσης της διάρκειας ζωής του.



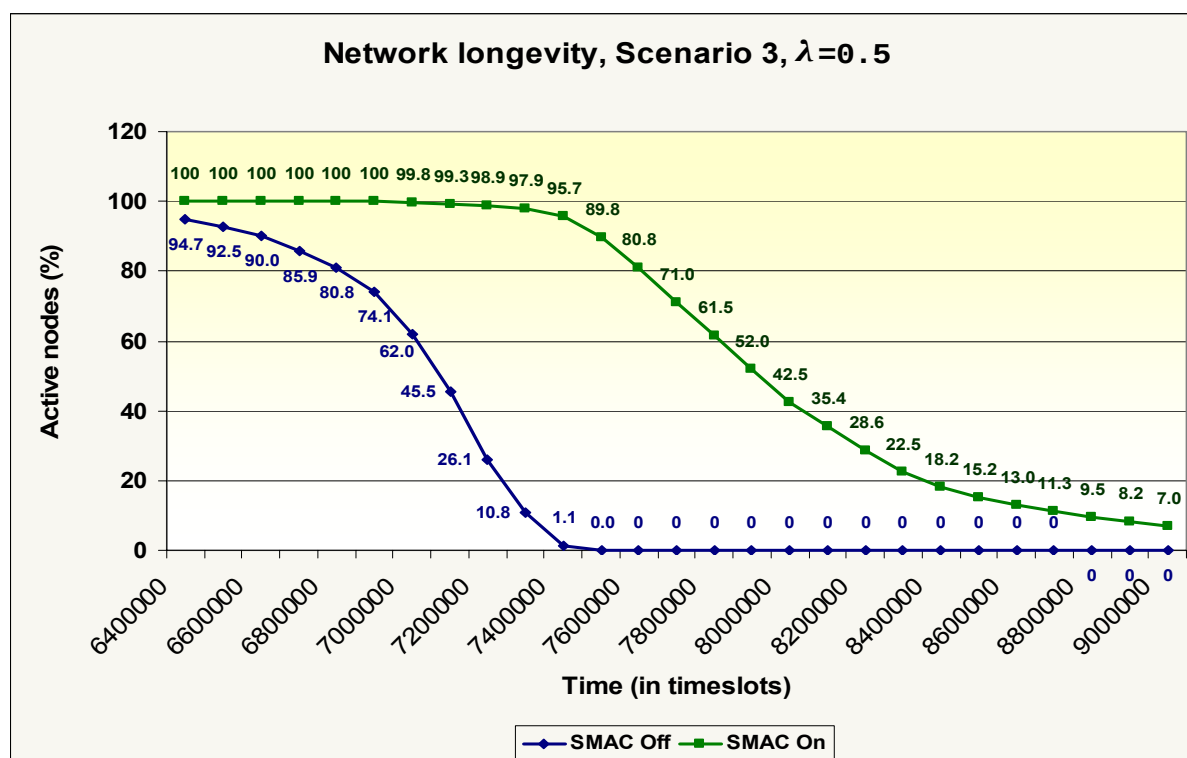
Διάγραμμα 8α. Η διάρκεια ζωής του δικτύου με SMAC On/Off για $\lambda=0.2$.



Διάγραμμα 8β. Η διάρκεια ζωής του δικτύου με SMAC On/Off για $\lambda=0.3$.



Διάγραμμα 8γ. Η διάρκεια ζωής του δικτύου με SMAC On/Off για $\lambda=0.4$.

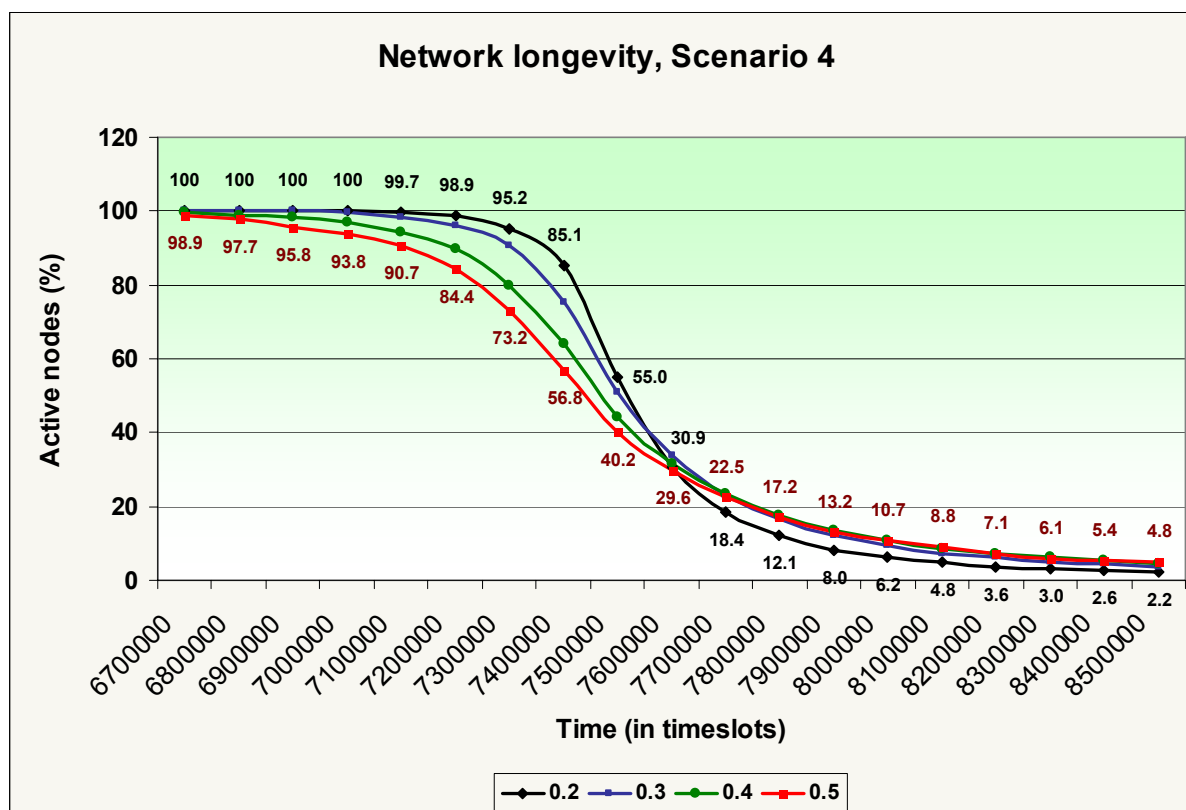


Διάγραμμα 8δ. Η διάρκεια ζωής του δικτύου με SMAC On/Off για $\lambda=0.5$.

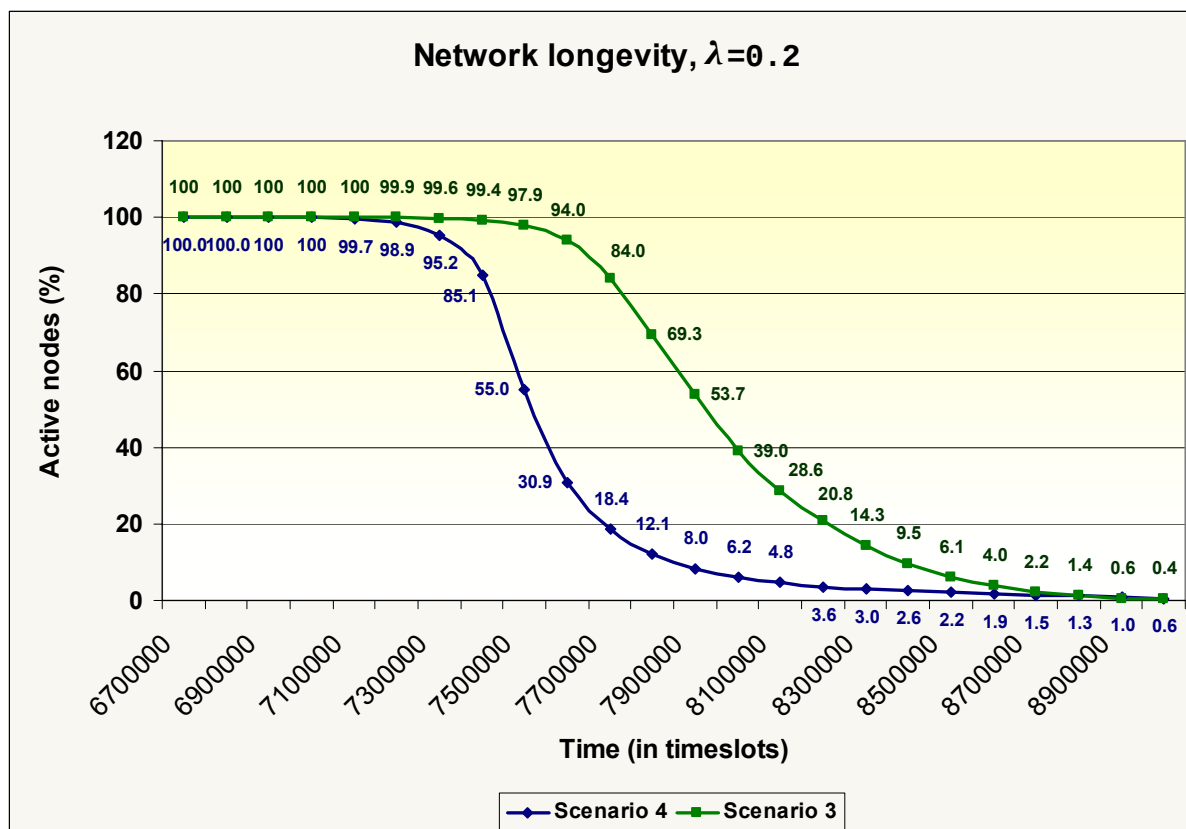
Πιο συγκεκριμένα για παράδειγμα, βλέπουμε από τα διαγράμματα ότι όταν $\lambda=0.4$, χωρίς το SMAC το δίκτυο έχει περίπου το 42% των κόμβων του ενεργό στην χρονοθυρίδα 7.2M ενώ με το SMAC το 42% των κόμβων είναι ενεργό ως τη χρονοθυρίδα 8.0M (αύξηση περίπου 11.1% στο χρονικό διάστημα). Αντίστοιχα, για $\lambda=0.5$, χωρίς το SMAC το δίκτυο έχει το 80.8% των κόμβων του ενεργό έως τη χρονοθυρίδα 6,8M ενώ με το SMAC έχει το 80.8% των κόμβων του ενεργό ως τη χρονοθυρίδα 7,6M (αύξηση περίπου 11.2% στο χρονικό διάστημα). Υπενθυμίζεται εδώ πως όταν οι κόμβοι λειτουργούν το πρωτόκολλο SMAC δεν ενσωματώνουν πρόγραμμα προκαθορισμένου περιοδικού ύπνου αλλά θεωρούμε ότι κάνουν listen συνεχώς όταν είναι idle. Εάν ενσωματωθεί και η λειτουργία περιοδικού ύπνου που είδαμε στο Κεφάλαιο 3 είναι βέβαιο ότι η αύξηση της διάρκειας ζωής θα γίνει πολύ μεγαλύτερη. Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε ότι η χρήση ενός MAC πρωτοκόλλου που να έχει ως πρώτη προτεραιότητα την εξοικονόμηση ενέργειας είναι επιβεβλημένη. Στο σενάριο 4 θα δούμε την βελτίωση που επιφέρει στο δίκτυο το SMAC και από μια άλλη οπτική γωνία.

3.4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων Σεναρίου 4

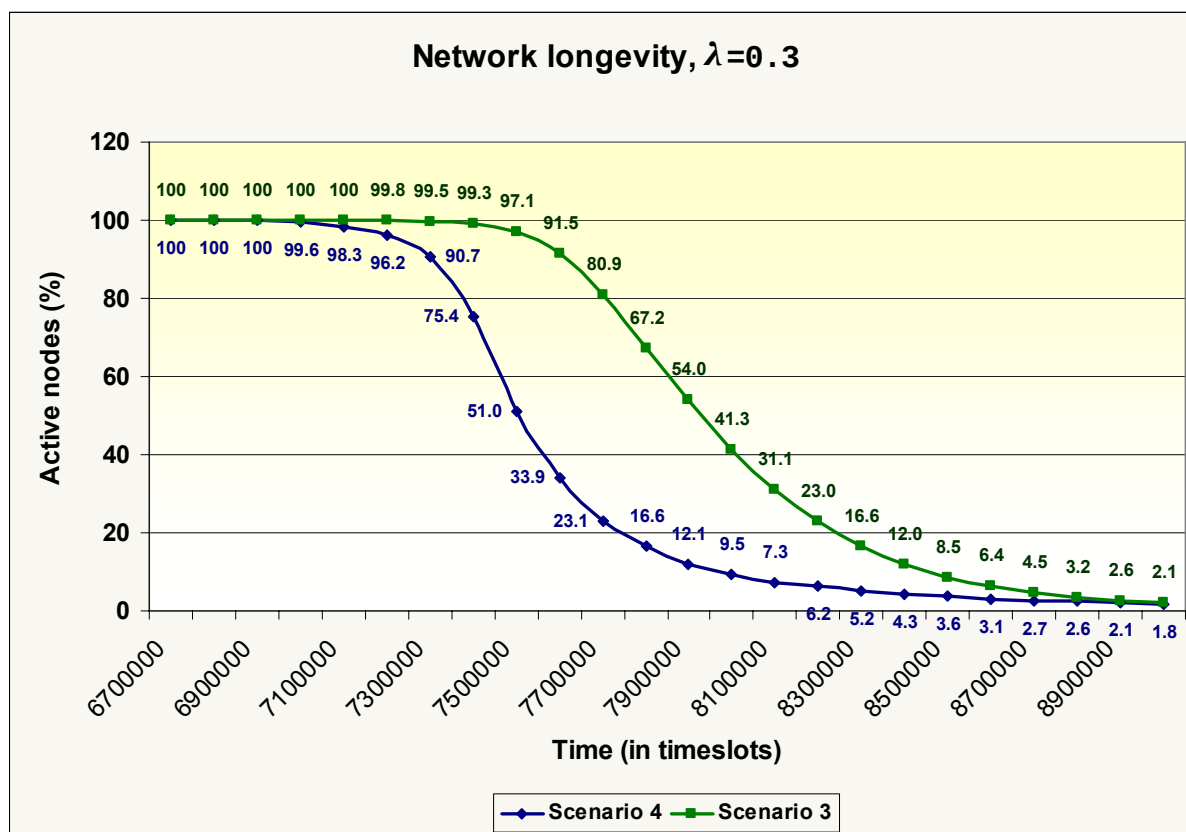
Στην ενότητα 3.3 περιγράψαμε αναλυτικά την αρχιτεκτονική και τον τρόπο λειτουργίας της τεχνικής που εισάγουμε στο σενάριο 4, αυτής των DIE πακέτων.



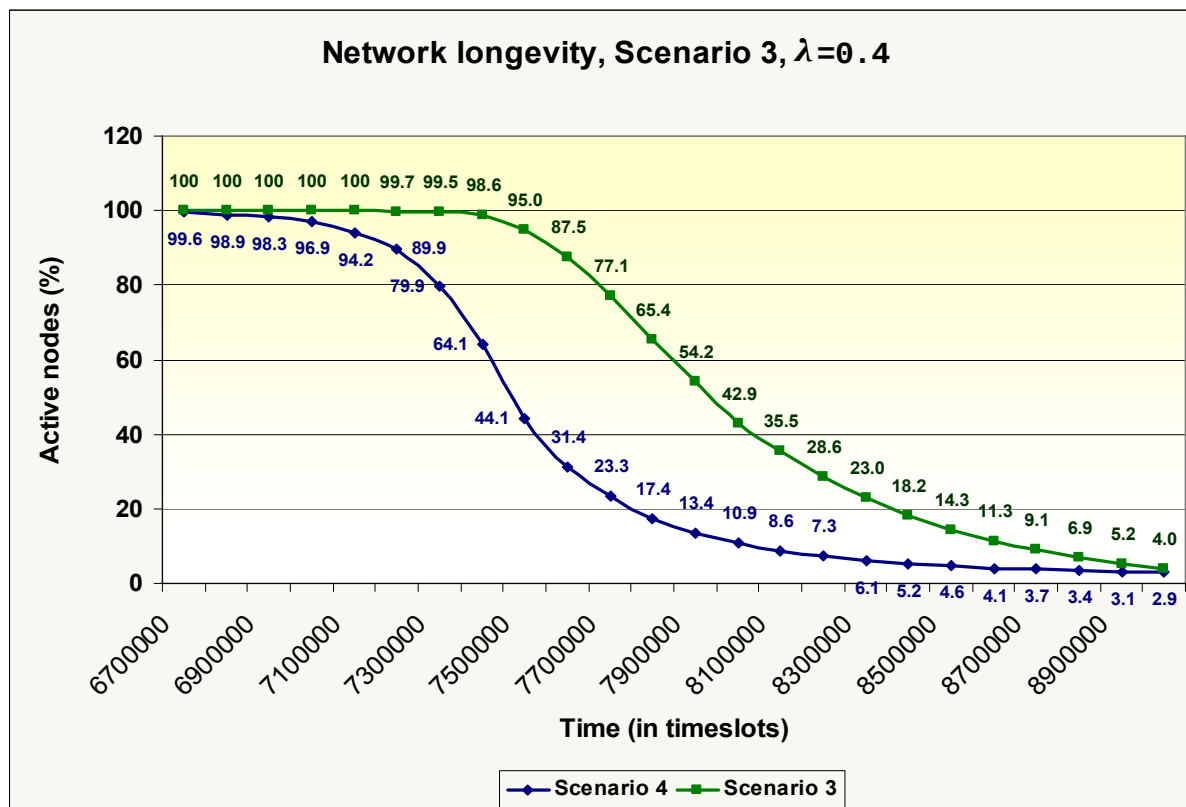
Διάγραμμα 9. Η επίδοση του δικτύου στο Σενάριο 4 για διακριτές τιμές του λ .



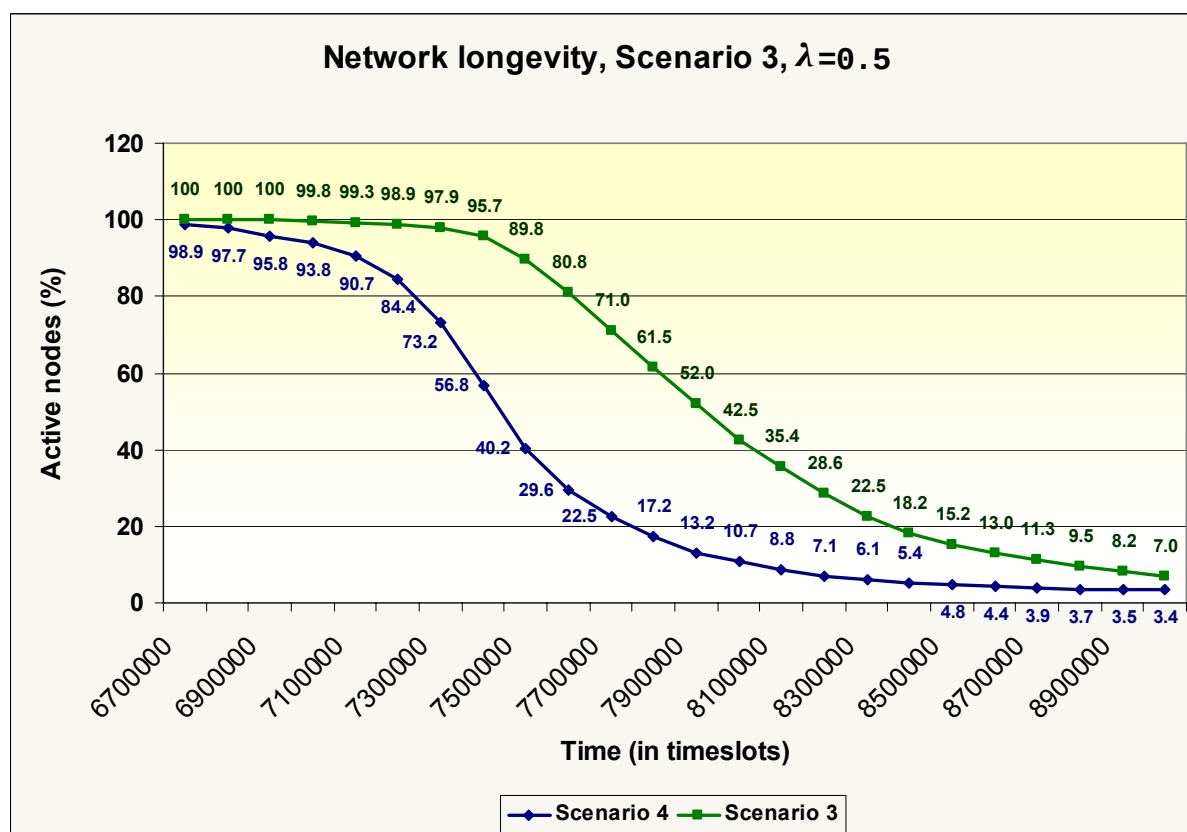
Διάγραμμα 10α. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 4 για $\lambda = 0.2$.



Διάγραμμα 10β. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 4 για $\lambda = 0.3$.



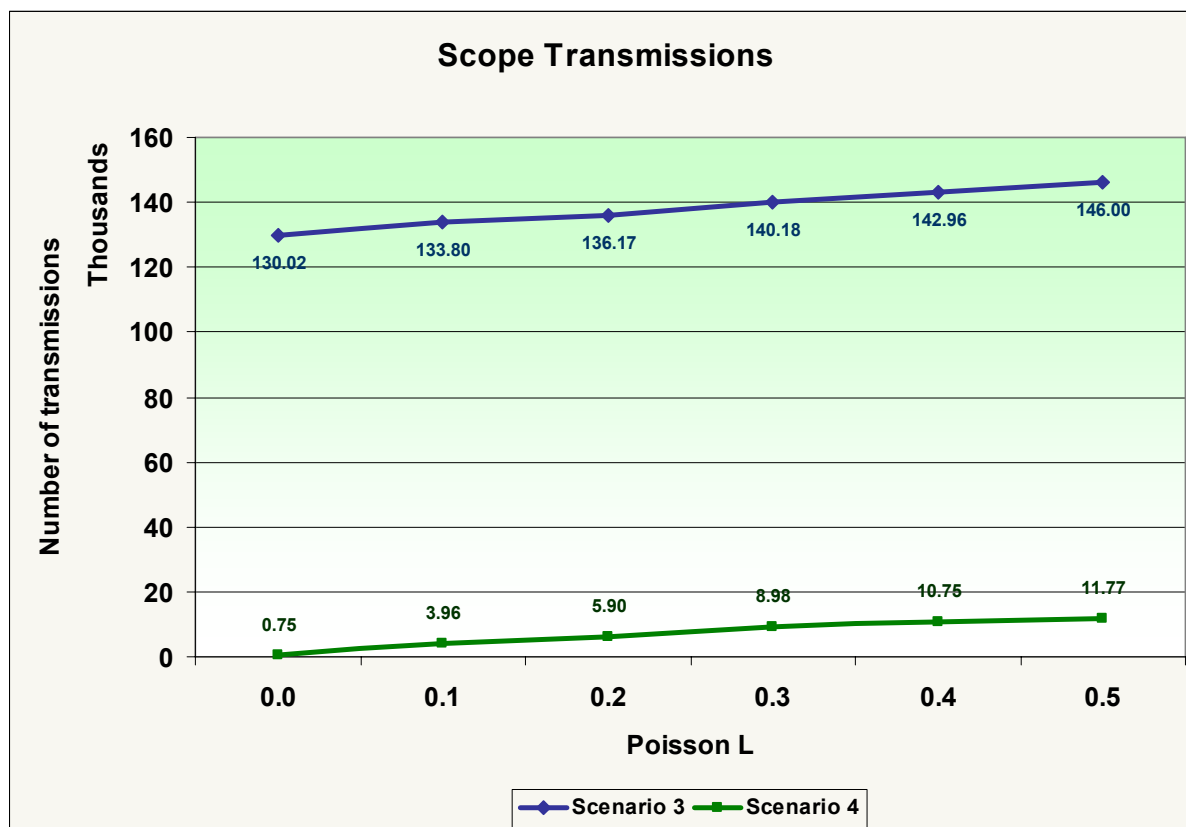
Διάγραμμα 10γ. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 4 για $\lambda = 0.4$



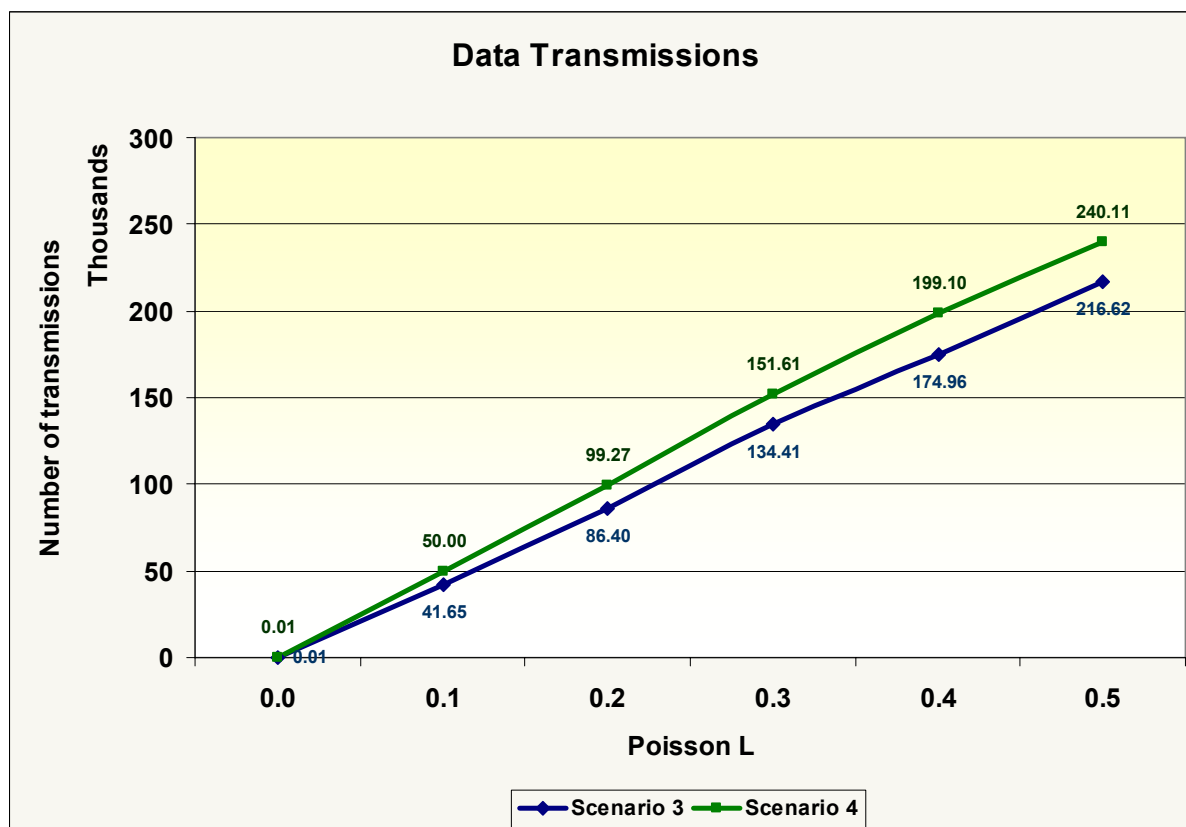
Διάγραμμα 10δ. Διάρκεια ζωής του δικτύου με βάση το Σενάριο 4 για $\lambda = 0.5$

Η ενέργεια που θα πρέπει να έχει απομείνει σε έναν κόμβο για να στείλει πακέτο DIE ορίστηκε σε μια τιμή ικανή για να μπορεί ο κόμβος να στείλει πάνω από 3 πακέτα (τα πακέτα DIE έχουν το ίδιο μέγεθος με τα πακέτα δεδομένων). Η τιμή αυτή ορίστηκε κατάλληλα ώστε να αποσταλεί το DIE πακέτο ακόμα και σε καταστάσεις υψηλού φορτίου κίνησης. Στο διάγραμμα 9 φαίνεται η επίδοση του δικτύου για διακριτές τιμές του λ με βάση το σενάριο 4, ενώ στα Διαγράμματα 10α, β, γ και δ συγκρίνουμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε σχέση με το Σενάριο 3 κάνουμε χρήση των περιοδικών rescopes.

Από μια πρώτη ματιά είναι φανερό ότι η επίδοση του δικτύου όσον αφορά τη διάρκεια ζωής είναι υποδεέστερη αυτής με βάση το Σενάριο 3. Παρόλο που δεν γίνονται περιοδικά rescopes και συνεπώς το φορτίο κίνησης πακέτων είναι σημαντικά μικρότερο αφού λείπουν τα πακέτα rescoping, το δίκτυο «ζει» λιγότερο. Τα Διαγράμματα 11 και 12 δείχνουν την διαφορά στον αριθμό των μεταδόσεων που λαμβάνουν χώρα στο Σενάριο 4 σε σχέση με το Σενάριο 3. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό δεν είναι κατ' αρχήν προφανής. Είναι απόλυτα λογικό κάποιος να περιμένει να δει αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου εφόσον τα πακέτα που διακινούνται είναι πολύ λιγότερα, τουλάχιστον για τα χαμηλά φορτία κίνησης δεδομένων. Το πραγματικό αίτιο που προκαλεί αυτή τη συμπεριφορά είναι το πρωτόκολλο SMAC που χρησιμοποιεί το δίκτυο.



Διάγραμμα 11. Αριθμός μεταδόσεων πακέτων scope στα Σενάρια 3 και 4.



Διάγραμμα 11. Αριθμός μεταδόσεων πακέτων data στα Σενάρια 3 και 4.

Για να κατανοήσουμε την συμπεριφορά του δικτύου στο Σενάριο 4 ας θυμηθούμε την τεχνική *adaptive listening* που συζητήσαμε στην Ενότητα 2.1.3 και *overhearing avoidance* στην Ενότητα 2.1.4. Συνοπτικά, με βάση την αρχιτεκτονική του SMAC, όταν ένας κόμβος A στείλει RTS σε έναν γειτονικό του B προκειμένου να τον ενημερώσει ότι διαθέτει πακέτο που προορίζεται για αυτόν, αυτό το RTS μήνυμα το ακούν όλοι οι άμεσοι γείτονες του A. Επίσης, όλοι οι άμεσοι γείτονες του B θα ακούσουν το CTS μήνυμα που θα στείλει ο B αν εκείνη την περίοδο είναι σε θέση να λάβει το πακέτο του κόμβου A. Έτσι, κατά τη μετάδοση του A προς τον B, όλοι οι άμεσοι γείτονες τόσο του A όσο και του B θα πέσουν για ύπνο, ώστε να μην παρεμβληθούν στη μετάδοση και να εξοικονομήσουν ενέργεια.

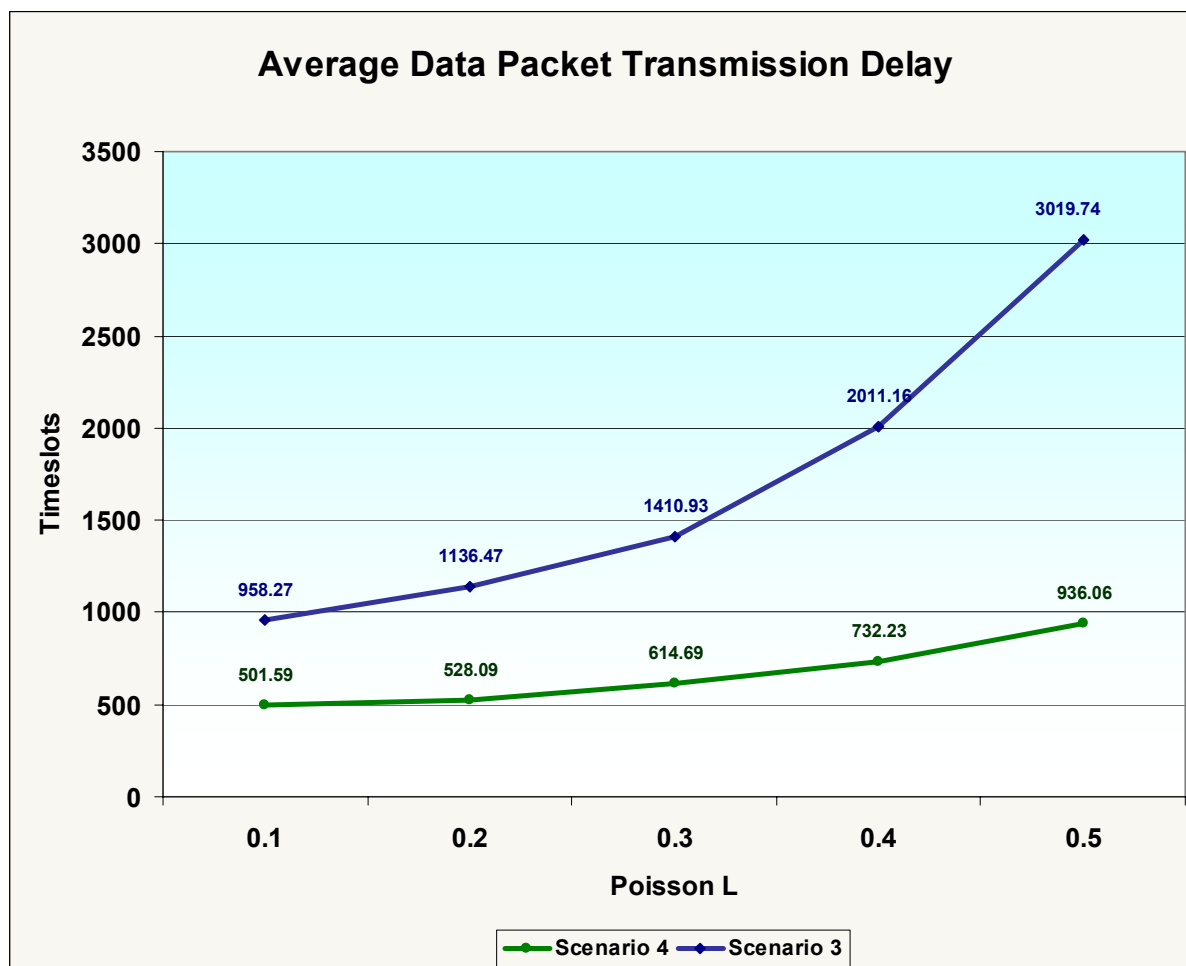
Ενεργειακά, αν θεωρήσουμε ότι κάθε κόμβος έχει κατά μέσο όρο 6 – 10 γείτονες όπως ισχύει στην εφαρμογή μας, η παραπάνω αρχιτεκτονική επιτάσσει ότι για κάθε 2 κόμβους που μεταδίδουν, άλλοι 12 – 20 κόμβοι πέφτουν για ύπνο. Έτσι, σε μια τέτοια χρονική στιγμή, σε ένα cluster 20 κόμβων, οι δύο θα καταναλώνουν 36 mW και 14.4 mW αντίστοιχα (αποστολέας και παραλήπτης για TRANSMIT και LISTEN) ενώ οι υπόλοιποι 18 θα καταναλώνουν 15 μ W εφόσον θα έχουν κλείσει τον πομποδέκτη τους. Αν συγκρίνουμε αυτή την κατάσταση με την κατάσταση όπου δεν πρέπει να γίνει κάποια μετάδοση, οι κόμβοι είναι ενεργοί σε κατάσταση LISTEN και συνεπώς καταναλώνουν όλοι ενέργεια 14.4 mW, συμπεραίνουμε ότι τελικά από ενεργειακής άποψης σε δίκτυο που χρησιμοποιεί το SMAC, μας συμφέρει να υπάρχει μια μικρή κίνηση δεδομένων, όπως αυτή που δημιουργούν τα περιοδικά *rescopes*. Το Σχήμα 14 αναπαριστά το αποτέλεσμα που περιγράψαμε για ένα απλό grid cluster 12 κόμβων.



Σχήμα 14. (α) 12 κόμβοι βρίσκονται σε κατάσταση LISTEN. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι $12 \times 14.4 \text{ mW} = 172.8 \text{ mW}$. (β) Ο κόμβος A μεταδίδει στον κόμβο B. Οι γειτονικοί τους κόμβοι έχουν πέσει για ύπνο. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας τώρα είναι $1 \times 36 \text{ mW} + 1 \times 14.4 \text{ mW} + 10 \times 15 \text{ mW} = 50.15 \text{ mW}$.

Ο σημαντικά μικρότερος αριθμός μεταδόσεων και η απουσία πακέτων *rescoping* για ένα μεγάλο διάστημα της λειτουργίας του δικτύου μπορεί να μην έχει θετικό αποτέλεσμα για την διάρκεια ζωής του δικτύου αλλά αντίθετα έχει ευεργετικό

αποτέλεσμα για τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων δεδομένων στο δίκτυο. Αυτό είναι επόμενο δεδομένου ότι μέσα στο δίκτυο δρομολογούνται μόνο πακέτα δεδομένων, την δρομολόγηση των οποίων στο Σενάριο 4 δεν παρεμποδίζουν τα πακέτα rescoring όπως συνέβαινε στο Σενάριο 3. Σαν αποτέλεσμα, ο μέσος χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων από τον αποστολέα προς κάποιο συλλέκτη είναι σημαντικά μικρότερος. Τη μείωση αυτή δείχνει το διάγραμμα 12.



Διάγραμμα 12. Μέσος χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων δεδομένων.

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα, η μείωση στο μέσο χρόνο μετάδοσης δεδομένων γίνεται ολοένα και πιο μεγάλη για μεγάλα φορτία κίνησης δεδομένων. Έτσι, ενώ για $\lambda = 0.1$ και 0.2 έχουμε μείωση 31.5% και 41.7% αντίστοιχα, για $\lambda = 0.3$ και 0.4 έχουμε μείωση 53.5% και 56.4% αντίστοιχα και τέλος για πολύ μεγάλη κίνηση δεδομένων $\lambda = 0.5$ έχουμε μείωση χρόνου κατά 69%. Αν αναλογιστούμε ότι η μείωση στη διάρκεια ζωής του δικτύου π.χ. για $\lambda = 0.5$ είναι ούτε κατά πολύ μικρότερη του 70% (όπως δείχνει το Διάγραμμα 10δ για ποσοστό ενεργών εναπομεινάντων κόμβων περίπου 60%, 56.8% για το Σενάριο 4 και 61.5% για το Σενάριο 3, η μείωση της διάρκειας ζωής είναι 7.8M/7.4M ή μόλις 5.13%) τότε

μπορούμε να συμπεράνουμε ότι συνολικά το Σενάριο 4 προσφέρει πολύ σημαντική βελτίωση στην επίδοση του δικτύου όσον αφορά τον επιτυγχανόμενο μέσο χρόνο καθυστέρησης της μετάδοσης δεδομένων, «θυσιάζοντας» ένα δυσανάλογο μικρό ποσοστό της διάρκειας ζωής του δικτύου. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το κατά πόσο σε μια εφαρμογή είναι απαραίτητη μια τέτοια τροποποίηση εξαρτάται από τη φύση των δεδομένων που συλλέγει. Για παράδειγμα, εάν μια εφαρμογή έχει εγκατασταθεί σε μια περιοχή για να μετρά κάποιο δεδομένο που από τη φύση του δεν είναι χρονικά ευαίσθητο (θερμοκρασία), τότε προφανώς απαιτείται να δοθεί προτεραιότητα στη μέγιστη διάρκεια ζωής, οπότε το Σενάριο 4 δεν ωφελεί. Όμως εάν η εφαρμογή δρομολογεί time-critical δεδομένα (π.χ. εικόνα πολύ χαμηλής ανάλυσης ή ανίχνευση κίνησης σε μια στρατιωτική εφαρμογή παρακολούθησης πεδίου) τότε η μέση καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων παίζει πολύ σημαντικότερο ρόλο από την μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου. Συμπερασματικά, η χρήση ή μη της τεχνικής που παρουσιάσαμε στο Σενάριο 4 εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή δικτύου αισθητήρων.

Ένα τελευταίο σημείο που πρέπει να επισημάνουμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του Σεναρίου 4 είναι ότι το σενάριο αυτό μαζί με ένα κλάσμα της διάρκειας ζωής του δικτύου θυσιάζει και την ικανότητα του να προσαρμόζεται στις πιθανές αλλαγές τοπολογίας (δεν υφίστανται τέτοιες αλλαγές ωστόσο στην εφαρμογή μας) και στις πιθανές εισαγωγές νέων κόμβων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου. Το δίκτυο (οι συλλέκτες) δεν αντιλαμβάνεται κίνηση κόμβων ή εισαγωγή νέων παρά μόνο όταν γίνει ένα rescope, και αυτό όπως δείχνουν τα αποτελέσματά μας συμβαίνει μόνο προς το τέλος της διάρκειας ζωής του δικτύου. Βέβαια, με μια απλή τροποποίηση της τεχνικής κατά την οποία αποστέλλονται «τύπου» DIE πακέτα στο συλλέκτη τη στιγμή που ένας κόμβος αντιλαμβάνεται την ύπαρξη ενός ή περισσότερων νέων κόμβων στην περιοχή γειτονίας του, το πρόβλημα μπορεί εύκολα να αντιμετωπιστεί. Πακέτα τύπου DIE μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικά για δυναμική ενημέρωση των συλλεκτών και όχι μόνο για την ανακοίνωση του επικείμενου θανάτου κάποιου κόμβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Στο Κεφάλαιο 3 μελετήσαμε μέσω προσομοίωσης την απόδοση του δικτύου της εφαρμογής μας για διάφορα σενάρια ώστε να αξιολογήσουμε τις τεχνικές και τις ιδέες που εφαρμόσαμε. Στο κεφάλαιο αυτό κάνουμε μια αποτίμηση των αποτελεσμάτων και αναλύουμε τα συμπεράσματα που εξάγαμε από την εφαρμογή των επιμέρους προτεινόμενων τεχνικών και επεκτάσεων. Τέλος προτείνουμε πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να ενσωματωθούν στο δίκτυο που μελετήσαμε, αλλά και γενικότερα σε δίκτυα αισθητήρων παρόμοιας αρχιτεκτονικής και να βελτιώσουν περαιτέρω την επίδοσή τους.

4.1 Συμπεράσματα

Από τα τέσσερα σενάρια που εξετάσαμε εξάγαμε μια σειρά από κύρια συμπεράσματα που αφορούν την συμπεριφορά του δικτύου όπως αυτή προκύπτει από μετρικές απόδοσης που εκτιμήσαμε μέσω προσομοίωσης για συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων και τρόπους λειτουργίας. Στη συνέχεια συζητούμε τα βασικά συμπεράσματα.

Συμπέρασμα 1^ο. Η εφαρμογή του πρωτοκόλλου πρόσβασης στο μέσο SMAC σε ένα δίκτυο αισθητήρων αποδεικνύεται ευεργετική για τη διάρκεια ζωής του.

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η χρήση του πρωτοκόλλου SMAC αποδεικνύεται ευεργετική και θα μπορούσαμε να πούμε επιβεβλημένη, όταν η κύρια προτεραιότητα κατά τον σχεδιασμό του δικτύου είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, πράγμα σύνηθες στα δίκτυα αισθητήρων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο καταδεικνύουν ότι η χρήση του SMAC βοηθά πολλαπλά στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Λόγω των τεχνικών *coordinated sleeping* και *overhearing avoidance* που εμπεριέχει το πρωτόκολλο SMAC, η κατανάλωση ισχύος στους κόμβους μειώνεται σημαντικά όταν πέφτουν σε κατάσταση *sleep*. Πιο συγκεκριμένα είδαμε ότι στην περίπτωση αυτή η κατανάλωση ισχύος μειώνεται από 14.4 mW σε 15 μ W, δηλαδή έχουμε μείωση σχεδόν κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Έτσι, η αύξηση στη διάρκεια ζωής που επιφέρει η χρήση του πρωτοκόλλου είναι αναμενόμενη και σημαντική.

Επιπλέον, όπως φαίνεται σε όλα τα διαγράμματα που απεικονίζουν την συμπεριφορά του δικτύου (ανεξάρτητα αρχιτεκτονικής) παρατηρούμε ότι για

διάφορες τιμές του φόρτου κίνησης πακέτων δεδομένων (της παραμέτρου λ των Poisson αφίξεων δεδομένων) η διάρκεια ζωής του δικτύου μεταβάλλεται δυσανάλογα με την μεταβολή του λ . Πιο συγκεκριμένα, διπλασιάζοντας το ρυθμό άφιξης δεδομένων, η διάρκεια ζωής του δικτύου μεταβάλλεται κατά ένα δυσανάλογο ποσοστό. Επιπλέον, μεταβάλλεται σημαντικά ο τρόπος με τον οποίο «πεθαίνει» το δίκτυο γύρω από την κρίσιμη κάθε φορά χρονική περίοδο. Καθώς η κίνηση αυξάνει (όπως είδαμε και στο Σχήμα 15) αυτό δεν επιφέρει ανάλογη μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου, διότι οι τεχνικές *coordinated sleeping* και *overhearing avoidance* που εφαρμόζουν οι κόμβοι βοηθούν στην εξισορρόπηση της κατανάλωσης ισχύος. Ακριβώς για αυτό το λόγο παρατηρούμε από τα αποτελέσματα το φαινόμενο όταν αυξάνει η κίνηση, να μειώνεται μεν το ποσοστό ενεργών κόμβων αρχικά αλλά το δίκτυο να «πεθαίνει» πιο αργά για τιμές αποδεκτής λειτουργίας δικτύου κάτω από 60 – 50%. Για να αντιληφθούμε καλύτερα τη σημασία της παραπάνω παρατήρησης αξίζει να πούμε ότι στα περισσότερα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, η μείωση της διάρκειας ζωής των στοιχείων που τα αποτελούν είναι απόλυτα ανάλογη της κίνησης των πακέτων που γεννιούνται και δρομολογούνται μέσα σε αυτά.

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή του πρωτοκόλλου SMAC αποδεικνύεται πολύτιμη για το δίκτυο όχι μόνο όσον αφορά τη διάρκεια ζωής του αλλά και όσον αφορά τις επιδόσεις του σε αυξημένα φορτία κίνησης δεδομένων.

Συμπέρασμα 2^ο. (Σενάριο 3) Η μετρική μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας αποδεικνύεται καλύτερη της μετρικής *min hop* για τιμές ποσοστού κόμβων αποδεκτής λειτουργίας του δικτύου πάνω από 50%.

Όπως είδαμε στην Ενότητα 3.4.3, η χρήση της μετρικής μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας αποδείχθηκε καλύτερη της μετρικής *min hop* που είχε μελετηθεί χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ανεξάρτητα του ρυθμού άφιξης δεδομένων στο δίκτυο, συμφέρει η χρήση της προτεινόμενης μετρικής. Αυτό ισχύει για τιμές ποσοστού κόμβων αποδεκτής λειτουργίας του δικτύου πάνω από 50%. Όπως αναφέραμε, σε πραγματικές εφαρμογές, οι τιμές ποσοστού κόμβων αποδεκτής λειτουργίας του δικτύου αναμένεται να είναι πάντοτε πάνω από 50% καθώς τα δεδομένα που συλλέγουν οι εναπομείναντες κόμβοι στην περίπτωση αυτή δεν μπορούν να είναι χαρακτηριστικά όλου του πεδίου αίσθησης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η βελτίωση επιτεύχθηκε χωρίς να γίνει καμία βασική αλλαγή στην αρχιτεκτονική του *scoring* και χωρίς να χρειαστεί η αποθήκευση επιπλέον μεταβλητών (δηλαδή αυξημένη κατανάλωση πολύτιμης μνήμης) στους κόμβους.

Συμπέρασμα 3^ο. (Σενάριο 4) Τα περιοδικά rescopes επιβαρύνουν την κίνηση στο δίκτυο και μειώνουν το μέσο χρόνο μετάδοσης δεδομένων αλλά βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής του.

Στο Σενάριο 4 είδαμε ότι η κατάργηση των περιοδικών rescopes και η ενσωμάτωση δυναμικής ενημέρωσης των κόμβων για την κατάσταση του δικτύου (πακέτα DIE) είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου αλλά παράλληλα την βελτίωση του μέσου χρόνου μετάδοσης δεδομένων στο δίκτυο. Στην ουσία το συμπέρασμα αυτό αποτελεί απόρροια του πρώτου συμπεράσματος, αφού όπως εξηγήσαμε η μείωση στη διάρκεια ζωής οφείλεται στο ότι χωρίς κίνηση οι κόμβοι του δικτύου βρίσκονται συνεχώς σε κατάσταση listen, καταναλώνοντας 10^3 φορές περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι στην κατάσταση sleep. Με άλλα λόγια, θα μπορούσαμε να πούμε σε αυτό το σημείο πως τα περιοδικά rescopes ωφελούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου αλλά επηρεάζουν αρνητικά το μέσο χρόνο μετάδοσης δεδομένων.

Σε κάθε περίπτωση αυτό που αξίζει να επισημάνουμε είναι ότι με την αρχιτεκτονική που προτείνουμε στο Σενάριο 4, δίδουμε τη δυνατότητα στο δίκτυο να μπορεί να λειτουργήσει μεταξύ των ορίων μέγιστης διάρκειας ζωής και μέγιστης επίδοσης όσον αφορά το χρόνο μετάδοσης δεδομένων. Δημιουργήσαμε με άλλα λόγια ένα εύκολο στην υλοποίηση και ευέλικτο trade-off το οποίο αποδεικνύεται χρήσιμο για έναν σχεδιαστή δικτύου αισθητήρων, ο οποίος μπορεί να αποφασίσει εάν θέλει (και κατά πόσο) να «θυσιάσει» ένα ποσοστό της διάρκειας ζωής του δικτύου ώστε να επιτύχει χαμηλότερο χρόνο μετάδοσης δεδομένων και επομένως υψηλότερη απόκριση του δικτύου στο φαινόμενο που προσμετράται. Η επιλογή αυτή βέβαια εξαρτάται από τη φύση της εφαρμογής και ειδικότερα από την μέγιστη απόλυτη ή μέση καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων που μπορεί να ανεχθεί η εφαρμογή.

4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε ένα πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο (MAC) και προτείναμε τόσο μια νέα μετρική για scoring σε δίκτυα αισθητήρων όσο και ένα νέο τρόπο δυναμικής λειτουργίας προσπαθώντας να επιμηκύνουμε τη διάρκεια ζωής αλλά και το χρόνο απόκρισης του δικτύου. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις και νέες τεχνικές που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν ώστε δυνητικά να βελτιώσουν την επίδοση ενός δικτύου αισθητήρων.

Επέκταση 1^η. Χρήση άλλων μετρικών όσον αφορά την παράμετρο απόστασης του αλγόριθμου Voronoi.

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε την επίδραση που έχει σε ένα δίκτυο αισθητήρων η εφαρμογή μιας νέας μετρικής απόστασης, της απόστασης μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας, σε σχέση με την μετρική $\min \text{hop}$ που έχει παρουσιαστεί μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία. Είδαμε πως η νέα μετρική βελτίωσε την απόδοση του δικτύου υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις. Βέβαια, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μετρικές απόστασης οι οποίες πιθανόν να βελτίωναν την απόδοση του δικτύου σε σχέση με τις δύο παραπάνω μετρικές απόστασης.

Σαν μια τέτοια μετρική απόστασης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η Ευκλείδεια απόσταση που συνδέει έναν κόμβο με κάποιο συλλέκτη. Δεδομένου ότι οι κόμβοι ενσωματώνουν σύστημα υπολογισμού της απόστασής τους με τους γείτονες με βάση την εξασθένηση του σήματος, η επιλογή μιας τέτοιας μετρικής μπορεί να βελτιώνει την απόδοση του δικτύου. Υποθέτοντας ότι οι κόμβοι, γνωρίζοντας την απόσταση με καθέναν από τους γείτονες τους, εκπέμπουν χρησιμοποιώντας κάθε φορά την ελάχιστη δυνατή ισχύ εκπομπής ανάλογα με τον γείτονα στον οποίο μεταδίδουν, αναμένεται η εξοικονόμηση ενέργειας στους κόμβους να είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρήσαμε στα σενάρια που εξετάστηκαν, καθώς στα τελευταία θεωρήσαμε ότι η ισχύς εκπομπής κάθε κόμβου είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την απόσταση που βρίσκονται οι κόμβοι μεταξύ τους (αρκεί αυτοί να βρίσκονται εντός μιας προκαθορισμένης ακτίνας γειτονίας). Μια παρόμοια αρχιτεκτονική χρησιμοποιείται στα παραδοσιακά *ad hoc* ασύρματα δίκτυα και ενσωματώνεται σε πρωτόκολλα δρομολόγησης ειδικά σχεδιασμένα για τέτοια δίκτυα (π.χ. το AODV).

Ωστόσο, μια τέτοια θεώρηση απαιτεί την ενσωμάτωση στους κόμβους δυνατότητας λειτουργίας ανάλυσης σήματος και προσαρμοσμένης ισχύος εκπομπής, πράγμα που αυξάνει την πολυπλοκότητα κατασκευής και πιθανά το κόστος τέτοιων κόμβων αισθητήρων. Παραταύτα το *trade-off* μεταξύ κόστους κατασκευής και επιτεύξιμης βελτίωσης στην επίδοση του δικτύου θα μπορούσε να μελετηθεί και αναλυθεί.

Επέκταση 2^η. Χρήση 2N-τάξης αλγόριθμου Voronoi για περιβάλλοντα αίσθησης με *bursty* ρυθμό άφιξης δεδομένων.

Στην εφαρμογή που μελετήσαμε, χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο Voronoi τάξεως 1. Όπως είδαμε στην Ενότητα 2.2.6, κάθε κόμβος κρατά πληροφορία μόνο για τον πλησιέστερο προς αυτόν συλλέκτη. Αναφέραμε πως χρησιμοποιώντας N

τάξης Voronoi scoring, οι κόμβοι μπορούν να αποθηκεύουν τους N πλησιέστερους συλλέκτες προς αυτούς, ώστε σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή να μπορούν να επιλέγουν κάποιο εναλλακτικό συλλέκτη πέρα από τον κοντινότερο, για να δρομολογήσουν τα δεδομένα τους.

Είναι σαφές πως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, είναι ασύμφορη η αποστολή δεδομένων σε κάποιο συλλέκτη πέραν του κοντινότερου, τόσο από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας (η απόσταση είναι μεγαλύτερη) όσο και από πλευράς καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων. Ωστόσο, η εναλλακτική αυτή δρομολόγηση έχει νόημα σε κάποιες εξαιρετικά ειδικές περιπτώσεις.

Μια τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να αντιστοιχεί στη μη ομαλή άφιξη δεδομένων στο δίκτυο (τόσο από πλευράς γεωγραφικής περιοχής όσο και ρυθμού άφιξης) όπου στο δίκτυο δημιουργούνται δεδομένα με εκρηκτικό τρόπο και σε μια μικρή και συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου. Στην περίπτωση αυτή απότομα λίγοι κόμβοι επιφορτίζονται με το έργο μετάδοσης ενός σχετικά μεγάλου όγκου δεδομένων. Εάν το scoring έχει γίνει με βάση τον αλγόριθμο Voronoi τάξης 1, οι λίγοι αυτοί κόμβοι θα επιχειρήσουν να δρομολογήσουν τα παραγόμενα δεδομένα μέσω συγκεκριμένων διαδρομών προς τον κοντινότερο συλλέκτη. Όπως είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των δεδομένων και όσο μικρότερη η περιοχή άφιξης τους, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο μέσος χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων.

Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να προταθεί οι κόμβοι να δρομολογούν τα δεδομένα και προς εναλλακτικούς συλλέκτες, προκειμένου να φτάσουν σε κάποιο συλλέκτη πιο γρήγορα. Με άλλα λόγια, να προτιμάται η δρομολόγηση ενός πακέτου προς έναν συλλέκτη που μπορεί να μην είναι ο κοντινότερος του κόμβου, αντί να δαπανά το πακέτο πολύτιμο χρόνο στην ουρά του κόμβου περιμένοντας ο επόμενος στη σειρά κόμβος να μπορέσει να το δεχθεί. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να βελτιώσει το μέσο χρόνο μετάδοσης δεδομένων, με αντάλλαγμα κάποια μείωση στην διάρκεια ζωής του δικτύου, όπως είδαμε στο Σενάριο 4.

Βέβαια, βασική προϋπόθεση για να ισχύσει και να είναι αποδοτική μια τέτοια προσέγγιση είναι η γέννηση πακέτων δεδομένων να είναι εκρηκτική όλη τη λειτουργία του δικτύου. Εάν αυτό δεν ισχύει, τότε η εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης θα είναι κατά πάσα πιθανότητα επιζήμια αφού το Voronoi scoring N τάξης προϋποθέτει α) περισσότερη μνήμη και επεξεργαστική δυνατότητα στους κόμβους ώστε να αποθηκεύουν πληροφορία για περισσότερους δυνατούς συλλέκτες και β) μεγαλύτερες διαδρομές μετάδοσης πακέτων scope και rescope αφού οι περιοχές Voronoi στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μεγαλύτερες (βλ. Σχήμα 9).

Επέκταση 3^η. Χρήση πακέτων τύπου DIE για περισσότερες περιπτώσεις με στόχο την κατασκευή αρχιτεκτονικής πλήρους δυναμικότητας.

Στο Σενάριο 4 μελετήσαμε την επίδραση που έχει στο δίκτυο η χρήση πακέτων τύπου DIE, τα οποία ένας κόμβος αποστέλλει λίγο πριν πεθάνει ώστε να ενημερώσει το συλλέκτη ότι επίκειται αλλαγή στην δομή του δικτύου μετά το θάνατο του. Αυτά τα πακέτα όταν παραληφθούν από κάποιο συλλέκτη αποτελούν έναυσμα για την εκτέλεση ενός rescore, που έχει σαν σκοπό την αντιμετώπιση του προβλήματος που πιθανόν να δημιουργήσει ο θάνατος του κόμβου.

Τα αποτελέσματα της υλοποίησης της συγκεκριμένης τεχνικής όπως είδαμε έδειξαν ότι βελτιώνεται κατά πολύ ο μέσος χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων με αντάλλαγμα μια μικρή μείωση στην διάρκεια ζωής του δικτύου. Μεταξύ άλλων, επισημάναμε στα συμπεράσματα του Σεναρίου 4, πως μαζί με ένα ποσοστό της διάρκειας ζωής του δικτύου θυσιάζεται και η ικανότητα του δικτύου να προσαρμόζεται σε πιθανές αλλαγές τοπολογίας και εισαγωγές νέων κόμβων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του, καθώς το δίκτυο (οι συλλέκτες) δεν αντιλαμβάνεται κίνηση κόμβων ή εισαγωγή νέων παρά μόνο όταν γίνει ένα rescore, και αυτό όπως δείχνουν τα αποτελέσματά μας συμβαίνει μόνο προς το τέλος της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Μια πιθανή επέκταση που θα μπορούσε να ενσωματωθεί με βάση την παραπάνω παρατήρηση είναι η διατήρηση της δυναμικής ενημέρωσης των συλλεκτών του δικτύου με τη χρήση περισσότερων ειδικών πακέτων τύπου DIE και για άλλα φαινόμενα. Έτσι, θα μπορούσαν δυνητικά να δημιουργούνται πακέτα NEW όταν κάποιος κόμβος εισέρχεται στο δίκτυο (τον αντιλαμβάνονται οι γείτονες του), η γενικότερα πακέτα CHANGE όταν αλλάξει ο αριθμός γειτόνων ενός κόμβου (πράγμα που περιλαμβάνει και την πιθανή κίνηση των κόμβων). Η ενσωμάτωση τέτοιων πακέτων είναι πιθανό ότι θα βοηθούσε στην αντιμετώπιση της έλλειψης προσαρμοστικότητας που είδαμε στο Σενάριο 4.

Ωστόσο, και αυτή η τεχνική ίσως επιφέρει και κάποια ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Τα πακέτα τύπου DIE εισήχθησαν στο πρωτόκολλο ώστε να καταργηθούν τα περιοδικά rescopes. Εάν τώρα εισαχθούν πολλών τύπων πακέτα δυναμικής ενημέρωσης, είναι πιθανόν μια τέτοια αλλαγή να μην είναι συμφέρουσα. καθώς μπορεί να λαμβάνουν χώρα περισσότερα rescopes σε σχέση με τα περιοδικά του Σεναρίου 3. Ειδικά αν η άμεση ενημέρωση του δικτύου δεν είναι επιβεβλημένη καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται δεν είναι time-critical, τότε η παραπάνω προσέγγιση θα μπορούσε να αποδειχθεί επιζήμια για τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

4.3 Επίλογος

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή στα δίκτυα αισθητήρων που κάναμε στο Κεφάλαιο 1, το πεδίο έρευνας στα δίκτυα αισθητήρων είναι ένα σχετικά καινούριο πεδίο έρευνας των ασυρμάτων δικτύων. Οι σύγχρονες απαιτήσεις για κάλυψη μεγάλων δυσπρόσιτων περιοχών και παρακολούθηση χώρων σε συνδυασμό με το ολοένα χαμηλότερο κόστος κατασκευής και μέγεθος ολοκληρωμένων συστημάτων συλλογής και ασύρματης μετάδοσης δεδομένων (κόμβοι) οδήγησαν στην εισαγωγή και ανάπτυξη αυτού του νέου πεδίου έρευνας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν μας το μεγάλο ενδιαφέρον που επιδεικνύεται σήμερα στην περιοχή αυτή, την σχετικά περιορισμένη βιβλιογραφία και θεματολογία αλλά και τις νέες εφαρμογές που υλοποιούνται με δίκτυα αισθητήρων, συμπεραίνουμε πως η περιοχή αυτή θα συνεχίσει να απασχολεί την ερευνητική κοινότητα για πολύ.

ΤΕΛΟΣ

REFERENCES

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Elsevier Computer Networks Magazine*, Issue 38 (2002), pages 393 – 422.
- [2] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin, "Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume 12, Issue 3, June 2004, Pages 493 – 506.
- [3] Henri Dubois-Ferriere, Deborah Estrin, "Efficient and Practical Query Scoping in Sensor Networks," *CENS Technical Report #40*, April 2004.
- [4] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wireless LANs," *Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference*, London, UK, Sept. 1994, pp. 212-225.
- [5] Mark Stemm, Randy Katz, "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E80-B, no. 8, pp. 1125-1131, Aug. 1997.
- [6] S. Singh, C.S. Raghavendra, "PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for ad hoc networks," *ACM Computer Communication Review*, vol. 28, no. 3, pp. 5 – 26, July 1998.
- [7] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification*, IEEE, New York, USA, IEEE Std 802-11-1999 edition, 1999.
- [8] Yu-Chee Tseng, Chih-Shun Hsu, Ten-Yueng Hsieh, "Power saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks," *Proceedings of the IEEE Infocom*, New York, June 2002, pp. 200 – 209.
- [9] J. Heidemann, F. Silva, D. Estrin, "Matching data dissemination algorithms to application requirements," *Proceedings of ACM Sensys*, Los Angeles, USA (2003).
- [10] Jaap C. Haartsen, "The Bluetooth radio system," *IEEE Personal Communications Magazine*, pp. 28 – 36, Feb. 2000.
- [11] Bluetooth SIG Inc., "Specifications of the Bluetooth system: Core," <http://www.bluetooth.org/>, 2001.

- [12] R. Cristescu, B. Beferull-Lozano, M. Vetterli, "On network correlated data gathering," *IEEE Infocom*, Hong Kong (2004).
- [13] S. Madden, M.J. Franklin, J. Hellerstein, W. Hong, "Tiny aggregate queries in ad hoc sensor networks," *Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, Boston, USA (2002).
- [14] T. S. Rappaport, "Wireless Communications, Principles and Practice," Prentice Hall Editions, 1996.
- [15] Atmel Corporation, "AVR Microcontroller AT90LS8535 Reference manual," <http://www.atmel.com/>.
- [16] RF Monolithics Inc., "ASH Transceiver TR3000 Data sheet," <http://www.rfm.com/>.