



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τμήμα Διδακτικής της Τεχνολογίας και Ψηφιακών Συστημάτων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΦΕΛΟΥΣ ΚΑΙ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ
ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

Μιχαήλ Σωτήριος

ΑΜ: ΜΕ08060

Επιβλέπων: Μηλιώνης Απόστολος, Λέκτορας Πανεπιστημίου Πειραιώς

ΠΕΙΡΑΙΑΣ

Ιούνιος 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

κ. Μηλιώνης Απόστολος
Λέκτορας
(επιβλέπων καθηγητής)

κ. Ρούσκας Άγγελος
Επίκουρος Καθηγητής

κ. Ξενάκης Χρήστος
Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΙΑΣ

Αφιερώνεται στους γονείς μου,

Περίληψη

Η εργασία πραγματεύεται τα ζητήματα κόστους που υπάρχουν στα δίκτυα αισθητήρων κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς και παρουσιάζει τρόπους βελτιστοποίησης της απόδοσης των δικτύων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας που υπάρχουν και συγκρίνονται μεταξύ τους ώστε να ξεκαθαριστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός πρωτοκόλλου. Το πιο σημαντικό ζήτημα που εγείρεται στα δίκτυα αισθητήρων είναι η κατανάλωση ενέργειας και αυτό προκύπτει από την μικρή ενεργειακή αυτονομία των κόμβων αισθητήρων. Οπότε και οι περισσότερες συγκρίσεις πρωτοκόλλων κατά βάση κινούνται γύρω από την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων και την διάρκεια ζωής του δικτύου. Τέλος υλοποιήθηκε σε γλώσσα C το LEACH πρωτόκολλο το οποίο με την βοήθεια του MATLAB, συγκρίνεται με το πρωτόκολλο απευθείας επικοινωνίας στο ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Δίκτυα αισθητήρων, πρωτόκολλα επικοινωνίας, συγχώνευση δεδομένων, ζητήματα κόστους.

Abstract

This dissertation addresses the cost issues that exist in wireless sensor networks under certain restrictions and presents ways to optimize the performance of networks. Specifically, presents the communication protocols and compares with each other to clear up the advantages and disadvantages of each protocol. The most important issue that arises in sensor networks is energy consumption which is derived from the low energy range of sensor nodes. So, most comparisons between protocols basically revolve around energy consumption of nodes and the lifetime of the network. Finally we have implemented in C language the LEACH protocol and we plotted the results with the help of MATLAB. We compared LEACH with the direct communication protocol to the issue of energy consumption.

KEY WORDS: Wireless sensor networks, communication protocols, data fusion, cost-optimization issues.

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες πρωτίστως στον Λέκτορα κ. Μηλιώνη Απόστολο για την επίβλεψη και τη βοήθεια που μου παρείχε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω επίσης να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους φίλους που τους τελευταίους αυτούς μήνες με στήριξαν και με ενθάρρυναν να συνεχίσω και να ξεπερνάω τους σκοπέλους. Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου και την αδελφή μου για την ηθική και όχι μόνο υποστήριξη και βοήθειά τους σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Ευχαριστίες.....	ii
Περιεχόμενα.....	iii
Κατάλογος Εικόνων.....	vi
Συντομογραφίες.....	vii
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων.....	2
1.3. Προκλήσεις και περιορισμοί.....	3
1.4. Ιδιοδιαχείριση.....	5
1.4.1. Απομακρυσμένη Εγκατάσταση.....	5
1.4.2. Αυτόνομη λειτουργία.....	6
1.5. Ασύρματη Δικτύωση.....	6
1.6. Σχεδιαστικοί Περιορισμοί.....	8
1.7. Ασφάλεια.....	8
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	10
2.1. Εισαγωγή.....	10
2.2. Βασικές αρχές της συγχώνευσης πληροφορίας.....	10
2.3. Περιορισμοί.....	12
2.4. Ταξινόμηση συγχώνευσης πληροφορίας.....	13
2.4.1. Κατηγοριοποίηση βασισμένη στην σχέση μεταξύ των πηγών.....	14
2.4.2. Κατηγοριοποίηση βασισμένη στο επίπεδο αφαίρεσης.....	15
2.4.3. Κατηγοριοποίηση βασισμένη στην είσοδο και την έξοδο.....	17
2.5. Μέθοδοι, τεχνικές και αλγόριθμοι.....	18
2.5.1. Συμπέρασμα (Inference).....	18
2.5.2. Εκτίμηση (Estimation).....	23
2.5.3. Χάρτες Χαρακτηριστικών (Feature maps).....	27
2.5.4. Συνάθροιση (Aggregation).....	30
2.5.5. Συμπίεση (Compression).....	31

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	32
3.1. Δεδομενοκεντρικά Πρωτόκολλα.....	32
3.1.1. Flooding και gossiping	32
3.1.2. SPIN	34
3.1.3. Directed Diffusion	39
3.1.4. Rumor Routing	43
3.1.5. Gradient-Based Routing	45
3.1.6. COUGAR	46
3.1.7. Acquire	47
3.1.8. Energy Aware Routing	59
3.1.9. CADR και IDSQ	51
3.1.10. R.M.U.H.V.	52
3.2. Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης.....	54
3.2.1. LEACH.....	55
3.2.2. V-LEACH	57
3.2.3. HEED	58
3.2.4. PEGASIS και Ιεραρχικό PEGASIS	59
3.2.5. TEEN και APTEEN	62
3.2.6. HPAR	65
3.2.7. Ενεργειακά αποδοτικός ομογενής αλγόριθμος ομαδοποίησης	67
3.2.8. Δρομολόγηση με βάση την ενέργεια για δίκτυα αισθητήρων που σχηματίζουν ομάδες.....	69
3.2.9. SOP.....	71
3.2.10. CBERP	72
3.3. Location-based πρωτόκολλα	74
3.3.1. MECN και SMECN	75
3.3.2. GAF	78
3.3.3. GEAR	80
3.3.4. GeRaF	82
3.4. QoS-based δρομολόγηση	84
3.4.1. SAR	84
3.4.2. SPEED.....	85
3.4.3. Μεγίστης διάρκειας ζωής ενεργειακή δρομολόγηση	87

3.4.4. Μεγίστης διάρκειας ζωής συλλογή δεδομένων.....	89
3.4.5. Δρομολόγηση ελαχίστου κόστους.....	90
3.4.6. Ενεργειακό QoS πρωτόκολλο Δρομολόγησης.....	92
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	94
4.1. Cross-Layer Πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.....	95
4.1.1. MAC + PHY.....	96
4.1.2. MAC + NETWORK.....	98
4.1.3. NETWORK + PHY.....	104
4.1.4. TRANSPORT + PHY.....	104
4.2. Λύση 3-επιπέδων.....	105
4.3. Cross-Layer Module (XML).....	106
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	108
5.1. Συγκρίσεις πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	108
5.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	118

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.....	7
Εικόνα 2.....	14
Εικόνα 3.....	26
Εικόνα 4.....	29
Εικόνα 5.....	33
Εικόνα 6.....	34
Εικόνα 7.....	37
Εικόνα 8.....	40
Εικόνα 9.....	41
Εικόνα 10.....	42
Εικόνα 11.....	44
Εικόνα 12.....	46
Εικόνα 13.....	48
Εικόνα 14.....	51
Εικόνα 15.....	53
Εικόνα 16.....	53
Εικόνα 17.....	54
Εικόνα 18.....	54
Εικόνα 19.....	56
Εικόνα 20.....	57
Εικόνα 21.....	59
Εικόνα 22.....	61
Εικόνα 23.....	64

Εικόνα 24.....	64
Εικόνα 25.....	67
Εικόνα 26.....	68
Εικόνα 27.....	69
Εικόνα 28.....	70
Εικόνα 29.....	74
Εικόνα 30.....	75
Εικόνα 31.....	76
Εικόνα 32.....	78
Εικόνα 33.....	79
Εικόνα 34.....	82
Εικόνα 35.....	86
Εικόνα 36.....	89
Εικόνα 37.....	91
Εικόνα 38.....	91
Εικόνα 39.....	93
Εικόνα 40.....	101
Εικόνα 41.....	109
Εικόνα 42.....	110
Εικόνα 43.....	111
Εικόνα 44.....	111
Εικόνα 45.....	112
Εικόνα 46.....	113
Εικόνα 47.....	115
Εικόνα 48.....	116

Εικόνα 49.....	116
Εικόνα 50.....	117
Εικόνα 51.....	117

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

1.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες τεχνολογικές βελτιώσεις έχουν κάνει πραγματικότητα την κατασκευή μικρών, φθηνών, χαμηλής ισχύος, κατανεμημένων συσκευών που είναι ικανές για επεξεργασία δεδομένων και ασύρματη επικοινωνία. Τέτοιοι κόμβοι είναι οι κόμβοι αισθητήρων. Κάθε τέτοιος κόμβος έχει περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ. Αλλά όταν συνεργάζεται με πολλούς τέτοιους κόμβους όλοι μαζί είναι ικανοί να εποπτεύουν ένα φυσικό περιβάλλον με μεγάλη ακρίβεια. Για αυτό ένα δίκτυο αισθητήρων περιγράφεται ως ένα σύνολο από κόμβους αισθητήρων που συνεργάζονται για να πραγματοποιήσουν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων εξαρτώνται από την εγκατάστασή τους και την συνεργασία τους για να επιτελέσουν το έργο τους.

Παλιότερα τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνταν από μικρότερο αριθμό κόμβων που ήταν συνδεδεμένοι με ένα κεντρικό σταθμό επεξεργασίας. Σήμερα όμως, το ενδιαφέρον εστιάζεται μόνο σε ασύρματους κατανεμημένους κόμβους. Το ερώτημα είναι γιατί γίνεται κατανεμημένη ανίχνευση ενός γεγονότος. Αυτό γίνεται γιατί εφόσον η τοποθεσία του συμβάντος είναι άγνωστη η ανίχνευση του από πολλούς κόμβους είναι προτιμητέα και πιο ακριβής από το να το ανίχνευε ένας μόνο κόμβος. Επίσης πολλές φορές χρειάζονται πολλαπλοί κόμβοι για να ξεπεραστούν φυσικά εμπόδια. Στις περισσότερες περιπτώσεις το περιβάλλον που εποπτεύεται δεν έχει υπάρχουσες υποδομές για την ενέργεια ούτε για την επικοινωνία των κόμβων. Έτσι είναι επιτακτικό οι κόμβοι να επιβιώσουν με μικρές πηγές ενέργειας και να επικοινωνούν μέσω του ασύρματου καναλιού.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που χρειάζονται τα δίκτυα αισθητήρων είναι η κατανεμημένη ικανότητα επεξεργασίας. Αυτό είναι απαραίτητο εφόσον η επικοινωνία είναι ο κύριος παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας. Ένα

κεντριοποιημένο σύστημα επικοινωνίας θα σήμαινε πως οι κόμβοι θα έπρεπε να επικοινωνούσαν σε μακρινές αποστάσεις κάτι που θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι θα ήταν καλή ιδέα η πληροφορία να επεξεργάζεται τοπικά όσο πιο πολύ γίνεται για να περιορίζεται η ποσότητα πληροφορίας που πρέπει να μεταδίδεται.

1.2 Εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων. Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορα πεδία όπου η διαχείριση των δεδομένων είναι σημαντική.

- Ιατρικές εφαρμογές. Υπάρχουν αισθητήρες που συλλέγουν βιομετρικά δεδομένα και παρακολουθούν την εξέλιξη της υγείας των ασθενών. Ακόμα με τα δίκτυα αισθητήρων είναι δυνατόν να παρακολουθούνται οι επιδημίες και να βοηθούν τους γιατρούς να λάβουν τις σωστές αποφάσεις. Τέλος μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματική διαχείριση των πόρων των νοσοκομείων.
- Περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές εφαρμογές. Οι περιβαλλοντολογικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση του καιρού, την αντιμετώπιση των πυρκαγιών και της μόλυνσης του περιβάλλοντος όπως επίσης και για την παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Βιομηχανικές εφαρμογές. Διάφορα είδη αισθητήρων εγκαθίστανται σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας όπως η αεροναυπηγική, οικοδομικές κατασκευές, επεξεργασία τροφίμων και αυτοκινητοβιομηχανία. Οι αισθητήρες αυτοί παρακολουθούν τα προϊόντα από τη στιγμή της παραγωγής τους μέχρι την κατανάλωσή τους ενώ υπάρχουν και άλλες περιοχές εφαρμογών στην βιομηχανία.
- Οικιακές εφαρμογές. Τα έξυπνα σπίτια είναι μια εξέλιξη που οφείλεται στα δίκτυα αισθητήρων. Οι οικιακοί αυτοματισμοί δημιουργούν έξυπνες τεχνολογικές καινοτομίες που κάνουν τη ζωή του χρήστη πιο εύκολη.

Ειδικοί αισθητήρες εγκαθίστανται στις οικιακές συσκευές για την παρακολούθησή τους και ίσως την μέσω διαδικτύου διαχείρισή τους. Επιπλέον τα δίκτυα των αισθητήρων μπορούν να συμβάλουν στην παρακολούθηση και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ηλικιωμένων.

- Στρατιωτικές εφαρμογές. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να παρακολουθήσουν εχθρικές κινήσεις ενώ έχουν και άλλες πολλές πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές. Για παράδειγμα ήδη χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση συγκρούσεων την αναγνώριση στόχων και την αξιολόγηση των καταστροφών.

Οι τομείς που δύναται να εκμεταλλευτούν προς όφελός τους τα δίκτυα αισθητήρων είναι αρκετοί. Όμως ο κάθε τομέας έχει τις δικές του απαιτήσεις από την εγκατάσταση και διαχείριση του εκάστοτε δικτύου αισθητήρων .

Προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων και να υπάρξει μια σύγκλιση μεταξύ των ετερογενών δικτύων απαιτείται περαιτέρω έρευνα.

1.3 Προκλήσεις και Περιορισμοί

Ενώ τα δίκτυα αισθητήρων έχουν ομοιότητες με πολλά άλλα κατανεμημένα συστήματα υπόκεινται σε μια πληθώρα περιορισμών. Αυτοί οι περιορισμοί επηρεάζουν τον σχεδιασμό των δικτύων και οδηγούν σε σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που διαφέρουν από εκείνους στα υπόλοιπα κατανεμημένα συστήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί περιορισμοί στα δίκτυα αισθητήρων.

Ενέργεια

Ο πιο σημαντικός περιορισμός στα δίκτυα αισθητήρων είναι πως οι κόμβοι λειτουργούν καθορισμένο ποσό ενέργειας που συνήθως είναι περιορισμένο.

Τυπικά αντλούν ενέργεια από μπαταρίες οι οποίες πρέπει είτε να αντικαθιστώνται ή να επαναφορτίζονται (πχ με ηλιακή ενέργεια) όταν εξαντλούνται. Για μερικούς κόμβους καμία από τις δυο επιλογές δεν είναι δυνατή γιατί απλά οι κόμβοι θα αποσυρθούν όταν η ενέργειά τους τελειώσει. Το αν μπορεί η μπαταρία να επαναφορτιστεί ή όχι επηρεάζει σημαντικά την στρατηγική που θα ακολουθηθεί για την κατανάλωση ενέργειας. Για μπαταρίες που δεν επαναφορτίζονται, ένας κόμβος πρέπει να μπορεί να λειτουργεί μέχρι ο χρόνος αποστολής του να λήξει ή μέχρι να αντικατασταθούν οι μπαταρίες του. Ο χρόνος αποστολής του κάθε κόμβου ποικίλει ανάλογα με την χρήση. Για παράδειγμα αν ο κόμβος χρησιμοποιείται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές μπορεί ο χρόνος αποστολής του να διαρκεί για χρόνια ενώ για έναν κόμβο στο πεδίο της μάχης μπορεί ο χρόνος αποστολής του να διαρκεί για μερικές ώρες μόνο.

Σαν συνέπεια, η πρώτη και σημαντικότερη πρόκληση για τους κατασκευαστές ασύρματων δικτύων είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Αυτή η απαίτηση υπάρχει σε κάθε πτυχή του ασύρματου κόμβου και της σχεδίασης του δικτύου. Για παράδειγμα οι αποφάσεις που παίρνονται στο φυσικό επίπεδο ενός κόμβου επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας ολόκληρης της συσκευής αλλά και τον σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ανώτερου επιπέδου.

Το MAC επίπεδο είναι υπεύθυνο να παρέχει στους κόμβους πρόσβαση στο ασύρματο κανάλι. Μερικές στρατηγικές MAC είναι βασισμένες στον ανταγωνισμό (contention-based) που σημαίνει πως οι κόμβοι θα προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι κάθε στιγμή και αυτό θα οδηγεί σε συγκρούσεις πακέτων έτσι το MAC επίπεδο θα πρέπει να διευθετήσει αυτό το πρόβλημα για να σιγουρευτεί πως όλες οι εκπομπές τελικά θα είναι επιτυχημένες. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ο μεγάλος ενεργειακός φόρτος και οι καθυστερήσεις που υφίστανται από τις συγκρούσεις και τους μηχανισμούς διόρθωσης των λαθών και έχει σαν αποτέλεσμα ότι οι κόμβοι μπορεί να χρειάζεται να ακροάζονται το κανάλι συνεχώς για να διασφαλίσουν πως οι μεταδόσεις δεν θα χαθούν. Έτσι μερικά πρωτόκολλα MAC είναι απαλλαγμένα από ανταγωνισμό (contention-free) δηλαδή η πρόσβαση στο μέσο είναι περιορισμένη, εξαλείφονται οι συγκρούσεις και οι κόμβοι απενεργοποιούνται όταν δεν υπάρχει ανάγκη επικοινωνίας. Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο να

βρίσκει διαδρομές από την πηγή στο σταθμό βάσης αλλά και χαρακτηριστικά όπως το μήκος διαδρομής (πχ σε αριθμό βημάτων).

Πέραν των πρωτοκόλλων του δικτύου για να υπάρξει αποδοτικότητα στην ενέργεια χρειάζεται και η σχεδίαση ενός λειτουργικού συστήματος, υλικολογισμικού, μηχανισμών ασφαλείας ακόμα και εφαρμογών. Για παράδειγμα ενδοδικτυακή επεξεργασία χρησιμοποιείται για να εξαλείψει τα πλεονάζον δεδομένα ή να κάνει συνάθροιση των δεδομένων. Αυτό οδηγεί σε μια ανταλλαγή ανάμεσα σε δυνατότητα υπολογισμών (επεξεργασίας των δεδομένων) και επικοινωνίας (μετάδοσης των αρχικών παρά των επεξεργασμένων δεδομένων) που μπορεί να εκμεταλλευτεί για να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας.

1.4 Ιδιοδιαχείριση

Τα περισσότερα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να λειτουργούν σε απομακρυσμένες περιοχές και σε σκληρό περιβάλλον χωρίς υποστήριξη υποδομών ή την πιθανότητα συντήρησης και επισκευής. Έτσι οι κόμβοι θα πρέπει να ιδιοδιαχειρίζονται έτσι ώστε να ρυθμίζονται αυτόματα, να λειτουργούν και να συνεργάζονται με τους υπόλοιπους κόμβους, να προσαρμόζονται σε αποτυχίες κόμβων, αλλαγές του περιβάλλοντος χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

1.4.1 Απομακρυσμένη Εγκατάσταση

Πολλές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων δεν χρειάζονται προκαθορισμένες τοποθεσίες για κάθε κόμβο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για κόμβους που τοποθετούνται σε απομακρυσμένες ή απρόσιτες περιοχές. Για παράδειγμα κόμβοι που δείχνουν την εκτίμηση του πεδίου της μάχης ή μιας φυσικής καταστροφής μπορούν να πεταχτούν από αεροπλάνα πάνω από το πεδίο ενδιαφέροντος αλλά πολλοί κόμβοι ίσως δεν είναι ικανοί μετά την πτώση να λειτουργήσουν. Όμως οι κόμβοι που θα λειτουργούν θα πρέπει αυτόνομα να πραγματοποιήσουν ένα πλήθος από βήματα ρυθμίσεων, περιλαμβανομένης και της εγκαθίδρυσης επικοινωνίας με τους γειτονικούς κόμβους, καθορισμού της θέσης τους και

αρχικοποίησης της λειτουργίας ανίχνευσης. Ο ρόλος λειτουργίας κάθε κόμβου μπορεί να διαφέρει για παράδειγμα η τοποθεσία ενός κόμβου και ο αριθμός των γειτόνων του μπορεί να καθορίζουν το πλήθος και τον τύπο πληροφορίας που παράγει και προωθεί για λογαριασμό άλλων κόμβων.

1.4.2 Αυτόνομη λειτουργία

Πολλά δίκτυα αισθητήρων αφού εγκατασταθούν θα πρέπει να λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, δηλαδή η ρύθμιση, η προσαρμογή, η συντήρηση και η επισκευή θα πρέπει να πραγματοποιούνται με αυτόνομο τρόπο. Μια συσκευή ιδιοδιαχείρισης θα εποπτεύει την γύρω περιοχή, θα προσαρμόζεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος και θα συνεργάζεται με τις γειτονικές συσκευές για να σχηματίζει τοπολογίες ή να συμφωνεί σε στρατηγικές ανίχνευσης επεξεργασίας και επικοινωνίας. Η ιδιοδιαχείριση μπορεί γίνει με πολλούς τρόπους. Η αυτοοργάνωση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ικανότητα του δικτύου να προσαρμόζει της παραμέτρους του με βάση την κατάσταση του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα μια συσκευή ανίχνευσης μπορεί να διαλέξει την ισχύ εκπομπής της για να διατηρήσει ένα συγκεκριμένο βαθμό συνδεσιμότητας (πχ με αυξημένη ισχύ εκπομπής είναι πιο πιθανό να μπορεί να επικοινωνήσει με περισσότερους γείτονες).

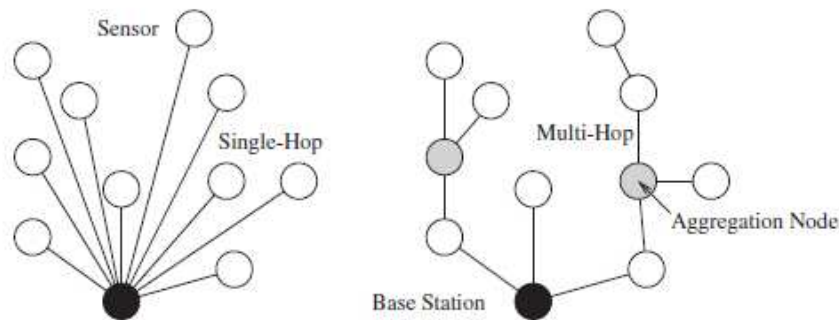
Η αυτοβελτιστοποίηση αναφέρεται στην ικανότητα της συσκευής να ανιχνεύει και να βελτιστοποιεί την χρήση των πόρων της. Τέλος ο όρος αυτοϊαση αναφέρεται στην ικανότητα του κόμβου να ανακαλύπτει να αναγνωρίζει και να αντιδρά σε διαταραχές του περιβάλλοντος. Στα δίκτυα αισθητήρων όλα αυτά τα χαρακτηριστικά ιδιοδιαχείρισης πρέπει να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υφίστανται μεγάλο ενεργειακό φόρτο.

1.5 Ασύρματη Δικτύωση

Η εξάρτηση από την ασύρματη επικοινωνία θέτει κάποιες προκλήσεις στον σχεδιαστή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Για παράδειγμα, η εξασθένηση

(attenuation) περιορίζει τα όρια των σημάτων διότι η ισχύς των σημάτων μειώνεται καθώς το σήμα διαδίδεται σε ένα μέσο και ενώ περνά μέσα από εμπόδια.

Συνεπώς μια συνεχώς αυξανόμενη απόσταση μεταξύ ενός κόμβου και του σταθμού βάσης αυξάνει και την απαιτούμενη ενέργεια εκπομπής. Είναι πιο αποδοτικό να χωρίσουμε μια μεγάλη απόσταση σε μικρότερες αποστάσεις έτσι οδηγούμαστε στην επικοινωνία και τη δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων (multi-hop). Η επικοινωνία πολλαπλών βημάτων απαιτεί συνεργασία των κόμβων για να βρεθεί η καλύτερη διαδρομή. Στην Εικόνα 1 μπορούμε να δούμε την λογική της επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων.



Εικόνα 1. Επικοινωνία ενός βήματος και επικοινωνία πολλαπλών βημάτων.

Αυτή η λογική χρειάζεται ακόμα περισσότερο σε δίκτυα που χρησιμοποιούν κύκλους καθήκοντος (duty cycles) για να διατηρήσουν ενέργεια. Δηλαδή οι κόμβοι χρησιμοποιούν μια πολιτική διατήρησης ενέργειας όπου οι πομποδέκτες απενεργοποιούνται όταν δεν χρησιμοποιούνται. Έτσι κατά τη διάρκεια της απενεργοποίησης των κόμβων δεν μπορούν να επικοινωνήσουν με άλλους κόμβους ούτε να δράσουν σαν κόμβοι αναμεταδότες για να προωθήσουν πακέτα. Χρειάζεται επομένως μια στρατηγική για να διασφαλιστεί πως οι κόμβοι ενεργοποιούνται όταν χρειαστεί. Μια τέτοια στρατηγική είναι η ενεργοποίηση κατά απαίτηση (wakeup on demand) και μια άλλη είναι ο προσαρμοστικός κύκλος καθήκοντος (adaptive duty cycling) όπου δεν επιτρέπεται σε όλους τους κόμβους να απενεργοποιούνται ταυτόχρονα αλλά ορισμένοι παραμένουν ενεργοποιημένοι για να σχηματίσουν μια ραχοκοκαλιά του δικτύου.

1.6 Σχεδιαστικοί Περιορισμοί

Ενώ οι δυνατότητες των υπολογιστικών συστημάτων αυξάνονται συνεχώς ο βασικός στόχος στα συστήματα αισθητήρων είναι η δημιουργία μικρότερων, φθηνότερων και πιο αποδοτικών συσκευών. Αυτός ο σχεδιασμός μπορεί να εμπεριέχει πολλές φορές την ενσωμάτωση και άλλων συσκευών όπως δέκτες GPS. Αυτοί οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις επηρεάζουν και τον σχεδιασμό του λογισμικού για παράδειγμα το λειτουργικό σύστημα πρέπει να έχει μικρές απαιτήσεις σε μνήμη και να κάνει αποδοτική διαχείριση των πόρων του συστήματος. Οι περιορισμοί σε υλικό όμως των αισθητήρων συχνά επηρεάζουν και την σχεδίαση πολλών πρωτοκόλλων και αλγορίθμων. Για παράδειγμα οι πίνακες δρομολόγησης που περιέχουν καταχωρήσεις για πιθανούς προορισμούς μέσα σε ένα δίκτυο μπορεί να είναι πολύ μεγάλοι για να αποθηκευτούν στην μνήμη ενός κόμβου. Αντιθέτως μόνο ένας μικρός αριθμός δεδομένων (όπως λίστα με τους γείτονες) μπορεί να αποθηκευτεί στην μνήμη των κόμβων. Ενώ η ενδοδικτυακή επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί η πλεονάζουσα πληροφορία μερικοί αλγόριθμοι συγχώνευσης και συνάθροισης μπορεί να απαιτούν περισσότερη υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικό χώρο από αυτές που μπορεί να παρέχουν οι χαμηλών δυνατοτήτων κόμβοι. Έτσι οι αρχιτεκτονική των δικτύων αισθητήρων πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί αποδοτικά στο περιορισμένων πόρων υλικό.

1.7 Ασφάλεια

Πολλοί κόμβοι συλλέγουν ευαίσθητες πληροφορίες. Η απομακρυσμένη εγκατάσταση και η αυτόνομη λειτουργία των κόμβων αυξάνει την έκθεσή τους σε εισβολές και επιθέσεις. Επιπλέον οι ασύρματες επικοινωνίες διευκολύνουν τον επιτιθέμενο να υποκλέπτει τις μεταδόσεις. Για παράδειγμα μια από τις πιο ενδιαφέρουσες προκλήσεις είναι η επίθεση που λέγεται άρνηση υπηρεσίας (denial of service) που στόχος της είναι να επηρεάσει την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια πληθώρα επιθέσεων συμπεριλαμβανομένης της επίθεσης παρεμβολών (jamming attack) όπου υψηλής ισχύος σήματα χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν την εύρυθμη λειτουργία των επικοινωνιών. Οι συνέπειες μπορεί να είναι άσχημες και εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής του δικτύου. Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές αντιμετώπισης των επιθέσεων αυτών, πολλές από αυτές απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικό χώρο που συχνά δεν μπορεί να ικανοποιηθεί από τους κόμβους αισθητήρες. Σαν συνέπεια απαιτούνται νέες λύσεις για εγκατάσταση και διανομή κλειδιών, αυθεντικοποίηση των κόμβων και μυστικότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συγχώνευση Δεδομένων

2.1 Εισαγωγή

Ένα σημαντικό θέμα στα δίκτυα αισθητήρων είναι ο τρόπος με τον οποίο επεξεργάζονται τα συλλεγμένα δεδομένα. Σε αυτό το πλαίσιο η συγχώνευση της πληροφορίας εγείρεται σαν θέμα το οποίο πραγματεύεται το πώς τα συλλεγμένα δεδομένα επεξεργάζονται για να αυξηθεί η συσχέτιση τόσο όγκου δεδομένων.

Η συγχώνευση δεδομένων μπορεί να οριστεί σαν ο συνδυασμός πολλαπλών πηγών για να επιτευχθεί η βελτίωση πληροφορίας (φθηνότερα, με μεγαλύτερη ποιότητα ή συσχέτιση).

Στον τομέα των δικτύων αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί απλές μέθοδοι συνάθροισης για να μειώσουν την ολική κίνηση δεδομένων και να εξοικονομήσουν ενέργεια. Επιπλέον, τεχνικές συγχώνευσης πληροφορίας έχουν εφαρμοστεί στα δίκτυα αισθητήρων για να βελτιώσουν την εκτίμηση θέσης των κόμβων καθώς και τα στατιστικά των ζεύξεων για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

2.2 Βασικές αρχές της συγχώνευσης πληροφορίας

Τα δίκτυα αισθητήρων προορίζονται να τοποθετηθούν σε περιβάλλοντα όπου οι κόμβοι θα εκτίθενται σε συνθήκες που ίσως επηρεάσουν τις μετρήσεις τους. Τέτοιες συνθήκες περιλαμβάνουν δυνατές μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης, ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, και ακτινοβολία. Έτσι οι μετρήσεις των κόμβων μπορεί να είναι ανακριβείς ή ακόμα και άχρηστες σε τέτοιες περιπτώσεις. Ακόμα και όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ιδανικές οι κόμβοι μπορεί να μην παρέχουν τέλειες μετρήσεις. Ουσιαστικά ένας κόμβος είναι μια συσκευή μέτρησης και μια ανακριβής μέτρηση συνήθως σχετίζεται με την παρατήρησή του. Μια τέτοια ανακρίβεια παρουσιάζει τις ατέλειες στην τεχνολογία και τις

μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση ενός φυσικού φαινομένου ή μιας ιδιότητας.

Οι αποτυχίες δεν αποτελούν εξαίρεση στα δίκτυα αισθητήρων. Για παράδειγμα, σκεφτείτε ένα δίκτυο αισθητήρων που ελέγχει ένα δάσος για να ανιχνεύσει ένα γεγονός όπως φωτιά ή την παρουσία ενός ζώου. Οι κόμβοι μπορεί να καταστραφούν από την φωτιά ή από τα ζώα ή ακόμα και από τους ανθρώπους, μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα λειτουργίας ή μπορεί να σταματήσουν να λειτουργούν λόγω έλλειψης ενέργειας. Κάθε κόμβος που γίνεται μη λειτουργικός μπορεί να εκθέσει την επικοινωνία στο δίκτυο.

Τόσο η χωρική όσο και η χρονική κάλυψη αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες στα δίκτυα αισθητήρων. Η δυνατότητα ανίχνευσης ενός κόμβου περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα ένα θερμόμετρο σε ένα δωμάτιο μετράει την θερμοκρασία δίπλα στην συσκευή αλλά αυτό ίσως δεν αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία ολόκληρου του δωματίου. Η χωρική κάλυψη των δικτύων αισθητήρων έχει διερευνηθεί σε διάφορα σενάρια όπως η ανίχνευση του προγράμματος του κόμβου και η θέση του κόμβου. Η χρονική κάλυψη μπορεί να θεωρηθεί ως η ικανότητα του δικτύου να εκπληρώσει το σκοπό του κατά την διάρκεια ζωής του. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο αισθητήρων το οποίο χρησιμοποιείται για ανίχνευση γεγονότων η χρονική κάλυψη στοχεύει στο να διασφαλιστεί πως κανένα γεγονός δεν θα χαθεί οποιαδήποτε χρονική στιγμή επειδή κάποιος κόμβος δεν ήταν διαθέσιμος την χρονική αυτή στιγμή. Για αυτό η χρονική κάλυψη εξαρτάται από τον ρυθμό δειγματοληψίας του κόμβου, την καθυστέρηση επικοινωνίας και τον κύκλο καθήκοντος (duty cycle).

Για να ξεπεραστούν οι αποτυχίες των κόμβων, οι τεχνολογικοί περιορισμοί και τα προβλήματα χωρικής και χρονικής κάλυψης πρέπει να διασφαλιστούν τρία κριτήρια: η συνεργασία (cooperation), ο πλεονασμός (redundancy) και η συμπληρωματικότητα (complementarity). Συνήθως μια περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να καλυφθεί από πολλούς κόμβους που συνεργάζονται μεταξύ τους και καθένας από αυτούς καλύπτει ένα συγκεκριμένο κομμάτι ευθύνης. Η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να γίνει για να συνθέσει μια ολοκληρωτική εικόνα της περιοχής από τα κομμάτια που παρέχει ο κάθε κόμβος.

Ο πλεονασμός μπορεί να κάνει τα δίκτυα αισθητήρων λιγότερο ευάλωτα σε ενδεχόμενη αποτυχία κάποιου κόμβου και οι επικαλυπτόμενες μετρήσεις μπορούν να συγχωνευτούν για να παραχθούν πιο ακριβή δεδομένα. Η συμπληρωματικότητα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κόμβους αισθητήρων που αντιλαμβάνονται διαφορετικές ιδιότητες του περιβάλλοντος, έτσι η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδυαστούν τα συμπληρωματικά δεδομένα έτσι ώστε το αποτέλεσμα να οδηγήσει σε συμπεράσματα που ίσως δεν ήταν πιθανό να εξαχθούν από μεμονωμένες μετρήσεις.

Λόγω των ιδιοτήτων του πλεονασμού και της συνεργασίας τα δίκτυα αισθητήρων συχνά αποτελούνται από πολλούς κόμβους, τίθεται ένα θέμα επεκτασιμότητας που προκύπτει από τις εν δυνάμει συγκρούσεις και τις μεταδόσεις των πλεονάζων δεδομένων. Λαμβάνοντας υπόψη τους ενεργειακούς περιορισμούς η επικοινωνία θα πρέπει να περιοριστεί για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των κόμβων. Έτσι και η συγχώνευση πληροφορίας πρέπει να μειώσει την συνολική επικοινωνία για να αποφύγει την μετάδοση πλεονάζων μηνυμάτων. Επιπλέον κάθε εργασία στο δίκτυο που χειρίζεται σήματα ή πρέπει να εξάγει συμπεράσματα μπορεί να χρησιμοποιεί συγχώνευση πληροφορίας.

2.3 Περιορισμοί

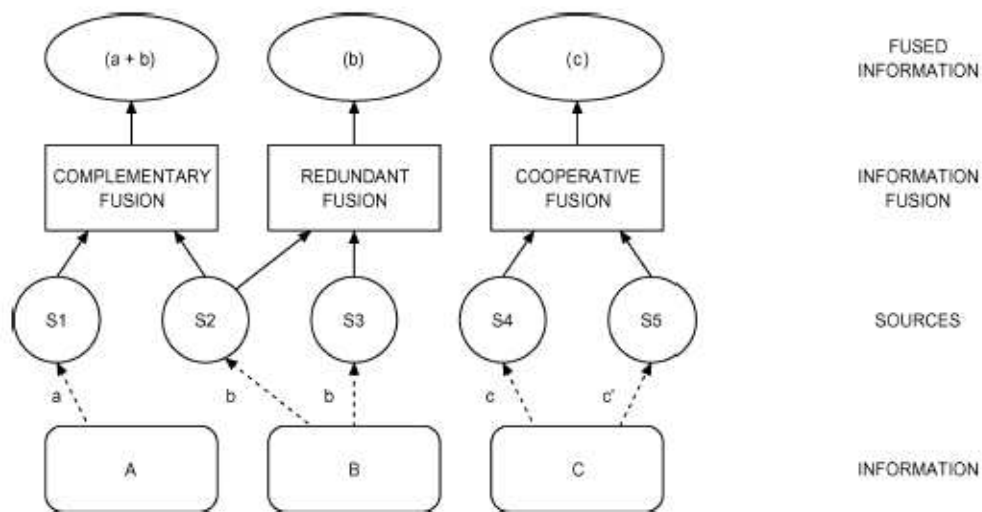
Η συγχώνευση πληροφορίας πρέπει να θεωρείται σαν ένα σημαντικό βήμα στον σχεδιασμό δικτύων αισθητήρων. Ο λόγος είναι γιατί η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου και γιατί χρησιμοποιείται συχνά για να εκπληρώσει τους στόχους μιας εφαρμογής όπως για παράδειγμα εντοπισμό στόχου, ανίχνευση ενός συμβάντος και λήψη απόφασης. Έτσι η λανθασμένη συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να καταλήξει σε σπατάλη πόρων και παραπλανητικά αποτελέσματα. Όταν είναι δυνατόν, η συγχώνευση πληροφορίας πρέπει να πραγματοποιείται με κατανομημένο τρόπο για να παρατείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου.

Όσο αφορά τον φόρτο επικοινωνίας, ένα κεντρικοποιημένο σύστημα συγχώνευσης ίσως αποδίδει καλύτερα από ένα αντίστοιχο καταναμημένο. Η κεντρικοποιημένη συγχώνευση έχει μια καθολική γνώση δηλαδή όλα τα δεδομένα είναι διαθέσιμα ενώ, η καταναμημένη συγχώνευση προσθετική και τοπική αφού συγχωνεύει μετρήσεις που παρέχονται από ένα σύνολο γειτονικών κόμβων και το αποτέλεσμα τους μπορεί να συγχωνευτεί ξανά από ενδιάμεσους κόμβους μέχρι να φτάσει σε ένα κόμβο καταβόθρα. Ένα τέτοιο μειονέκτημα της αποκεντρικοποιημένης συγχώνευσης μπορεί να είναι συχνό σε δίκτυα αισθητήρων όπου λόγω περιορισμών πόρων οι καταναμημένοι αλγόριθμοι προτιμώνται έναντι των κεντρικοποιημένων.

Ένα άλλο θέμα που έχει σχέση με την συγχώνευση πληροφορίας είναι ότι, μπορεί κάποιος να νομίζει πως σε διαδικασίες συγχώνευσης όσο περισσότερα δεδομένα υπάρχουν τόσο το καλύτερο αφού τα επιπρόσθετα δεδομένα θα προσδίδουν επιπλέον γνώση. Όταν όμως ο όγκος των λανθασμένων δεδομένων είναι μεγαλύτερος από τον όγκο των επιπρόσθετων σωστών δεδομένων η συνολική απόδοση της διαδικασίας συγχώνευσης μπορεί να μειωθεί.

2.4 Ταξινόμηση συγχώνευσης πληροφορίας

Η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση διάφορους παράγοντες. Συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων εισόδου μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν την συγχώνευση πληροφορίας σε κατηγορίες (πχ συνεργατική, πλεονάζουσα, συμπληρωματική). Επίσης το επίπεδο αφαίρεσης των επεξεργασμένων δεδομένων κατά την διαδικασία της συγχώνευσης (μέτρηση, σηματοδοσία, χαρακτηριστικά, απόφαση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωριστούν οι διαδικασίες συγχώνευσης. Μια άλλη κατηγοριοποίηση συνίσταται στον σαφή διαχωρισμό του επιπέδου αφαίρεσης της εισόδου και της εξόδου μιας διαδικασίας συγχώνευσης.



Εικόνα 2. Τύποι συγχώνευσης πληροφορίας βασισμένοι στην σχέση μεταξύ των πηγών.

2.4.1 Κατηγοριοποίηση βασισμένη στην σχέση μεταξύ των πηγών

Σύμφωνα με την σχέση μεταξύ των πηγών η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να είναι:

Συμπληρωματική: Όταν η παρεχόμενη πληροφορία από της πηγές αναπαριστά διαφορετικά σημεία μιας ευρύτερης περιοχής, η συγχώνευση μπορεί να εφαρμοστεί για να αποκτηθεί πληροφορία που είναι πιο ολοκληρωμένη. Στην Εικόνα 2 οι πηγές S_1 και S_2 παρέχουν διαφορετικά κομμάτια πληροφορίας, a και b αντίστοιχα, τα οποία συγχωνεύονται για να επιτευχθεί μια ευρύτερη πληροφορία αναπαριστώμενη ως $(a+b)$, αποτελούμενη από μη πλεονάζουσα κομμάτια a και b που αναφέρονται σε διαφορετικά σημεία του περιβάλλοντος (πχ θερμοκρασία δυτικής και ανατολικής πλευράς μιας περιοχής παρατήρησης).

Πλεονάζουσα: Αν δύο ή περισσότερες πηγές παρέχουν το ίδιο κομμάτι πληροφορίας, αυτά τα κομμάτια μπορούν να συγχωνευτούν για να αυξήσουν την εμπιστοσύνη. Οι πηγές S_2 και S_3 στην Εικόνα 2 παρέχουν την ίδια πληροφορία b , που συγχωνεύεται για να παρέχει περισσότερο ακριβή αποτελέσματα.

Συνεργατική: Δύο ανεξάρτητες πηγές είναι συνεργατικές όταν η πληροφορία που παρέχουν συγχωνεύεται και προκύπτει νέα πληροφορία (συνήθως πιο πολύπλοκη). Οι πηγές S4 και S5 στην Εικόνα 2 παρέχουν διαφορετική πληροφορία c και c' οι οποίες συγχωνεύονται σε (c) , που περιγράφει καλύτερα το γεγονός σε σχέση με την c ή την c' ξεχωριστά.

Η συμπληρωματική συγχώνευση αναζητά την πληρότητα συνθέτοντας νέες πληροφορίες από διαφορετικές πηγές. Ένα παράδειγμα συμπληρωματικής συγχώνευσης αποτελείται από συγχωνευμένα δεδομένα κόμβων σε ένα πίνακα χαρακτηριστικών (feature map) που περιγράφει όλο το πεδίο ανίχνευσης άρα και ευρύτερη πληροφορία.

Η πλεονάζουσα συγχώνευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξηθεί η αξιοπιστία, η ακρίβεια και η εμπιστοσύνη της πληροφορίας. Στα δίκτυα αισθητήρων, η πλεονάζουσα πληροφορία μπορεί να παρέχει υψηλής ποιότητας πληροφορία και να αποτρέψει τους κόμβους από το να εκπέμψουν πλεονάζουσα πληροφορία.

Ένα κλασικό παράδειγμα συνεργατικής συγχώνευσης είναι ο υπολογισμός της θέσης ενός στόχου βασισμένος στην πληροφορία της γωνίας και της θέσης του. Η συνεργατική συγχώνευση πρέπει να εφαρμόζεται προσεκτικά γιατί τα παραγόμενα αποτελέσματα βασίζονται στις ανακρίβειες και τις ατέλειες όλων των συμβαλλόμενων πηγών.

2.4.2 Κατηγοριοποίηση βασισμένη στο επίπεδο αφαίρεσης

Τέσσερα επίπεδα αφαίρεσης χρησιμοποιούνται για να κατηγοριοποιηθεί η συγχώνευση πληροφορίας: σήματος, εικονοστοιχείου, χαρακτηριστικού και συμβόλου. Η συγχώνευση επιπέδου σήματος έχει να κάνει με ενός ή πολλών διαστάσεων σήματα που προέρχονται από τους κόμβους. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή σαν ένα ενδιάμεσο βήμα για περαιτέρω συγχωνεύσεις. Η συγχώνευση επιπέδου εικονοστοιχείου χρησιμοποιείται στις εικόνες και μπορεί να ενδυναμώσει διεργασίες επεξεργασίας εικόνας. Η

συγχώνευση επιπέδου χαρακτηριστικού έχει να κάνει με χαρακτηριστικά ή γνωρίσματα που εξάγονται από εικόνες ή σήματα όπως το σχήμα και η ταχύτητα. Στην συγχώνευση επιπέδου συμβόλου η πληροφορία είναι ένα σύμβολο που αναπαριστά μια απόφαση και αναφέρεται συχνά ως επίπεδο απόφασης. Τυπικά, οι συγχωνεύσεις χαρακτηριστικού και συμβόλου χρησιμοποιούνται για εφαρμογές αναγνώρισης αντικειμένων.

Η συγχώνευση πληροφορίας χωρίζεται σε τρία επίπεδα αφαίρεσης δεδομένων: μέτρησης, χαρακτηριστικού και απόφασης. Σύμφωνα με το επίπεδο αφαίρεσης των επεξεργαζόμενων δεδομένων η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις κατηγορίες:

Συγχώνευση χαμηλού επιπέδου: Αναφέρεται επίσης ως συγχώνευση επιπέδου σήματος. Σειρά δεδομένων αποδίδονται ως είσοδοι, συνδυάζονται δημιουργώντας νέα δεδομένα που είναι πιο ακριβή (μικρότερο θόρυβο) από τα αρχικά δεδομένα.

Συγχώνευση μέσου επιπέδου: Τα χαρακτηριστικά ή τα γνωρίσματα μιας οντότητας (πχ σχήμα, υφή, θέση) συγχωνεύονται για να παραχθεί ένας χάρτης χαρακτηριστικών που πιθανώς να χρησιμοποιηθεί για άλλες εργασίες (πχ κατάτμηση ή ανίχνευση ενός αντικειμένου). Αυτό το είδος συγχώνευσης είναι γνωστό επίσης ως συγχώνευση επιπέδου χαρακτηριστικού.

Συγχώνευση υψηλού επιπέδου: Γνωστή και ως συγχώνευση επιπέδου συμβόλου ή απόφασης. Παίρνει συμβολικές αναπαραστάσεις των εισόδων τις συνδυάζει και παρέχει μια πιο σίγουρη και καθολική απόφαση.

Συγχώνευση πολλών επιπέδων: Όταν η διαδικασία συγχώνευσης περιλαμβάνει δεδομένα διαφορετικών επιπέδων αφαίρεσης, όταν η είσοδος και η έξοδος μπορεί να είναι οποιοδήποτε επιπέδου αφαίρεσης (πχ μια μέτρηση συγχωνεύεται με ένα χαρακτηριστικό για να παρέχει μια απόφαση) τότε λαμβάνει χώρα η συγχώνευση πολλών επιπέδων.

2.4.3 Κατηγοριοποίηση βασισμένη στην είσοδο και την έξοδο

Οι διαδικασίες συγχώνευσης πληροφορίας κατηγοριοποιούνται με βάση το επίπεδο αφαίρεσης της πληροφορίας εισόδου και εξόδου. Καθορίζονται έτσι πέντε κατηγορίες:

Data in- Data Out (DAI-DAO): Σε αυτή την ομάδα η συγχώνευση πληροφορίας έχει να κάνει με σειρά δεδομένων και το αποτέλεσμα είναι επίσης μια σειρά από δεδομένα, πιθανώς πιο ακριβή ή αξιόπιστα.

Data In- Feature Out (DAI-FEO): Η συγχώνευση πληροφορίας χρησιμοποιεί δεδομένα από τις πηγές για να εξάγει χαρακτηριστικά που περιγράφουν την οντότητα. Εδώ η οντότητα είναι κάθε αντικείμενο ή κατάσταση.

Feature In- Feature Out (FEI-FEO): Η συγχώνευση FEI-FEO λειτουργεί σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών για να βελτιώσει ένα χαρακτηριστικό ή να εξάγει νέα χαρακτηριστικά.

Feature In- Decision Out (FEI-DEO): Σε αυτή την κατηγορία, η συγχώνευση πληροφορίας παίρνει ένα σύνολο χαρακτηριστικών μιας οντότητας και παράγει μια συμβολική αναπαράσταση ή μια απόφαση.

Decision In- Decision Out (DEI-DEO): Οι αποφάσεις μπορούν να συγχωνευτούν για να παραχθούν νέες αποφάσεις ή να δοθεί έμφαση σε κάποιες παλιές.

Εν συγκρίσει με την κατηγοριοποίηση με βάση το επίπεδο αφαίρεσης, αυτή η κατηγοριοποίηση μπορεί να θεωρηθεί σαν μια επέκταση της προηγούμενης αλλά με μια λεπτομερέστερη ανάλυση όπου η DAI-DAO αντιστοιχεί στην συγχώνευση χαμηλού επιπέδου, η FEI-FEO στην συγχώνευση μέσου επιπέδου, η DEI-DEO στην συγχώνευση υψηλού επιπέδου και οι DAI-FEO και FEI-DEO περιλαμβάνονται στην συγχώνευση πολλών επιπέδων.

2.5 Μέθοδοι, τεχνικές και αλγόριθμοι

Οι μέθοδοι, οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την συγχώνευση των δεδομένων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διάφορα κριτήρια όπως ο βαθμός αφαίρεσης δεδομένων, ο σκοπός, οι παράμετροι, ο τύπος δεδομένων και το μαθηματικό υπόβαθρο. Η κατηγοριοποίηση που παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα βασίζεται στον σκοπό της κάθε μεθόδου. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, η συγχώνευση πληροφορίας μπορεί να πραγματοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς όπως τα συμπεράσματα, η εκτίμηση, η κατηγοριοποίηση, οι χάρτες χαρακτηριστικών, η συνάθροιση και η συμπίεση.

2.5.1 Συμπέρασμα (Inference)

Οι μέθοδοι συμπεράσματος συχνά εφαρμόζονται στην συγχώνευση απόφασης. Σε αυτή την περίπτωση μια απόφαση παίρνεται με βάση την γνώση για μια προηγούμενη κατάσταση. Εδώ το συμπέρασμα αναφέρεται στην μετάδοση από μια πιθανώς αληθή πρόταση σε μια άλλη της οποίας η αλήθεια πιστεύεται ότι προέκυψε από την προηγούμενη. Κλασικές μέθοδοι συμπεράσματος βασίζονται στην Bayesian μέθοδο και στο θεώρημα Dempster-Shafer.

Bayesian Inference: Η συγχώνευση πληροφορίας που βασίζεται στην Bayesian μέθοδο παρέχει ένα φορμαλισμό για το συνδυασμό αποδείξεων σύμφωνα με τους κανόνες της θεωρίας πιθανοτήτων. Η αβεβαιότητα αναπαριστάται με όρους υποθετικές πιθανότητες που περιγράφουν την πίστη και αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως τιμές στο διάστημα $[0,1]$, όπου το 0 αναπαριστά την απόλυτη δυσπιστία και το 1 την απόλυτη πίστη. Η Bayesian μέθοδος βασίζεται στον κανόνα του Bayes που ορίζει ότι:

$$P_r(Y|X) = \frac{P_r(X|Y)P_r(Y)}{P_r(X)} \quad (\chi)$$

όπου η πιθανότητα $P_r(Y|X)$ αναπαριστά την πίστη της υπόθεσης Y η οποία δίνει την πληροφορία X . Αυτή η πιθανότητα εξάγεται πολλαπλασιάζοντας το $P_r(Y)$, την αρχική πιθανότητα της υπόθεσης Y , με το $P_r(X|Y)$, την πιθανότητα δηλαδή να προκύψει το X δεδομένου ότι το Y είναι αληθές. Το $P_r(X)$ μπορεί να θεωρηθεί ή σταθερά κανονικοποίησης. Το μόνο θέμα με την μέθοδο αυτή είναι ότι οι πιθανότητες $P_r(X)$ και $P_r(X|Y)$ πρέπει να εκτιμηθούν ή να μαντευθούν από πριν αφού είναι άγνωστες.

Στο [1] χρησιμοποιείται Bayesian προγραμματισμός, μια γενική προσέγγιση βασισμένη σε μια υλοποίηση της Bayesian θεωρίας, για να συγχωνεύσει τα δεδομένα από διαφορετικούς κόμβους και να επιτύχει καλύτερη ακρίβεια και ευρωστία πληροφορίας που χρειάζεται για υψηλού επιπέδου βοήθεια οδήγησης. Στα δίκτυα αισθητήρων η Bayesian μέθοδος χρησιμοποιείται για να λύσει το πρόβλημα του εντοπισμού θέσης. Στην προσέγγιση BARD [2] χρησιμοποιείται η Bayesian μέθοδος για να μειωθεί το κόστος επικοινωνίας που σχετίζεται με την ανακάλυψη των πόρων και της διαδρομής, περιορίζοντας την επικοινωνία στους κόμβους που είναι πιο πιθανό να συνδέουν μια πηγή με τον κόμβο καταβόθρα.

Dempster-Shafer: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο ομώνυμο θεώρημα το οποίο αναφέρεται και ως Θεωρία της απόδειξης, η οποία είναι μια μαθηματική θεωρία που παρουσιάστηκε από τον Dempster και τον Shafer και που γενικεύει την Bayesian θεωρία. Έχει να κάνει με πίστη όπως και ο κανόνας του Bayes ασχολείται με πιθανότητες. Το θεώρημα αυτό παρέχει ένα φορμαλισμό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ελλιπή αναπαράσταση γνώσης, ανανεώσεις πίστης και συνδυασμό αποδείξεων.

Μια βασική αρχή στο σύστημα Dempster- Shafer είναι το πλαίσιο διάκρισης, το οποίο ορίζεται ως εξής. Έστω $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ το σύνολο των πιθανών καταστάσεων που περιγράφουν το σύστημα, τέτοιες ώστε το Θ να είναι εξαντλητικό και αμοιβαία αποκλειόμενο με την έννοια πως το σύστημα είναι ακριβώς σε μία και μόνο μια κατάσταση $\theta_i \in \Theta$, όπου $1 \leq i \leq N$. Ονομάζουμε Θ

το πλαίσιο διάκρισης επειδή τα στοιχεία του χρησιμοποιούνται για να ξεχωριστούν οι καταστάσεις του συστήματος.

Τα στοιχεία του δυναμοσυνόλου 2^Θ ονομάζονται υποθέσεις. Στο θεώρημα Dempster-Shafer μια πιθανότητα καθορίζεται σε κάθε υπόθεση $H \in 2^\Theta$ σύμφωνα με μία βασική απόδοση πιθανότητας (bpa) ή μιας μαζικής συνάρτησης, $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ που ικανοποιεί τα παρακάτω:

$$\begin{aligned}m(\emptyset) &= 0 \\m(H) &\geq 0, \forall H \in 2^\Theta \\ \sum_{H \in 2^\Theta} m(H) &= 1\end{aligned}$$

Για να εκφραστεί η συνολική πίστη για μια υπόθεση H , το θεώρημα καθορίζει την συνάρτηση πίστης $bel: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ στο Θ ως:

$$bel(H) = \sum_{A \subseteq H} m(A)$$

όπου $bel(\emptyset) = 0$ και $bel(\Theta) = 1$.

Ο βαθμός της αμφιβολίας στο H μπορεί να εκφραστεί με βάση την συνάρτηση πίστης $bel: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ ως:

$$dou(H) = bel(\neg H) = \sum_{A \subseteq \neg H} m(A)$$

Για να εκφραστεί η αληθοφάνεια της κάθε υπόθεσης καθορίζεται η συνάρτηση $pl: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ ως:

$$pl(H) = 1 - dou(H) = \sum_{A \cap H = \emptyset} m(A)$$

Η αληθοφάνεια εκφράζει διαισθητικά πως όσο μικρότερη είναι η αμφιβολία σε κάθε υπόθεση H , τόσο περισσότερο αληθοφανής είναι αυτή. Έτσι το διάστημα βεβαιότητας $[bel(H), pl(H)]$ καθορίζει την αληθινή πίστη της υπόθεσης H .

Για να συνδυαστούν τα αποτελέσματα των δύο bpa m_1 και m_2 το θεώρημα Dempster-Shafer καθορίζει τον συνδυαστικό κανόνα $m_1 \oplus m_2$ όπου δίνεται από:

$$m_1 \oplus m_2(\emptyset) = 0,$$
$$m_1 \oplus m_2(H) = \frac{\sum_{X \cap Y = H} m_1(X)m_2(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)}$$

Το θεώρημα Dempster-Shafer είναι πιο ευέλικτο από τη Bayesian μέθοδο επειδή επιτρέπει σε κάθε πηγή να προσφέρει πληροφορίες διαφορετικού επιπέδου λεπτομέρειας. Για να γίνει πιο σαφής αυτός ο ισχυρισμός ας υποθέσουμε πως υπάρχουν δύο κόμβοι A και B οι οποίοι είναι ικανοί να διαχωρίσουν τον βρυχηθμό από ένα αρσενικό και ένα θηλυκό αιλουροειδές και έχουμε και ένα τρίτο κόμβο C, που ξεχωρίζει τον βρυχηθμό ενός τσιτάχ από τον βρυχηθμό ενός λιονταριού. Σε αυτό το σενάριο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο του Dempster-Shafer για να συγχωνεύσουμε τα δεδομένα από τους τρεις κόμβους για να ξεχωρίσουμε αρσενικά/θηλυκά λιοντάρια και αρσενικά/θηλυκά τσιτάχ κάτι το οποίο θα ήταν πιο δύσκολο με την Bayesian μέθοδο. Ο λόγος που θα ήταν πιο δύσκολο είναι το ότι το θεώρημα Dempster-Shafer μας επιτρέπει να συγχωνεύσουμε τα δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικού τύπου κόμβους. Επίσης δεν χρειάζεται να καθορίσουμε από την αρχή πιθανότητες σε άγνωστες μεταβλητές. Αντιθέτως οι πιθανότητες αποδίδονται μόνο όταν είναι διαθέσιμη η πληροφορία.

Η επιλογή ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους δεν είναι μια τετριμμένη διαδικασία γιατί μεταξύ των άλλων υπάρχει μια ανταλλαγή μεταξύ της ευστοχίας της Bayesian μεθόδου και της ευελιξίας της μεθόδου Dempster-Shafer.

Το [3] πραγματεύεται ενδοδικτυακές εφαρμογές της μεθόδου Dempster-Shafer και της Bayesian μεθόδου με τέτοιο τρόπο ώστε η ανίχνευση ενός συμβάντος και η δρομολόγηση να είναι ενοποιημένες σε ένα αλγόριθμο. Το [4] προτείνει τον TRA αλγόριθμο σαν μια βελτιστοποίηση στους βασισμένους σε δέντρα αλγόριθμους δρομολόγησης. Ο TRA αλγόριθμος αναλύει την κίνηση των δεδομένων και χρησιμοποιεί την μέθοδο Dempster-Shafer για να ανιχνεύσει αποτυχίες στην δρομολόγηση και να πυροδοτήσει μια επαναδημιουργία της τοπολογίας όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Ασαφής λογικής (fuzzy logic): παράγει πιθανότητες και έτσι είναι ικανή να αντιμετωπίσει την προσεγγιστική λογική για να σχηματίσει (ίσως ανακριβή) συμπεράσματα από ανακριβείς υποθέσεις. Κάθε ποσοτική είσοδος γίνεται σαφής μέσω μιας συνάρτησης συμμετοχής (membership function). Οι ασαφείς κανόνες ενός συμπερασματικού συστήματος παράγουν ασαφείς εξόδους που με τη σειρά τους αποασαφοποιούνται από ένα σύνολο κανόνων εξόδου. Ασαφής συλλογισμός χρησιμοποιείται στο [5] για να αποφασιστεί ο κόμβος κεφαλή της ομάδας. Λαμβάνει υπόψη τρία χαρακτηριστικά: την συγκέντρωση κόμβων, το επίπεδο ενέργειας και την κεντρικότητα του κόμβου σε σχέση με την ομάδα. Για να βελτιστοποιήσει την χρήση ενέργειας στο δίκτυο η ασαφής λογική χρησιμοποιείται και για αποδοτική δρομολόγηση [6]. Αυτό προϋποθέτει μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε ομάδες και μελετάται μια κεντρικοποιημένη ενδοδικτυακή δρομολόγηση. Σαν μεταβλητές εισόδου θεωρούνται οι: ενέργεια μετάδοσης, υπολειπόμενη ενέργεια, μέγεθος ουράς, απόσταση από την πύλη (gateway) και η τρέχουσα κατάσταση. Σαν ασαφής έξοδος θεωρείται το κόστος. Λαμβάνοντας υπόψη την σχεδίαση των MAC πρωτοκόλλων [7] προτείνεται ένας βασισμένος στην ασαφή λογική, δυο φάσεων έλεγχος που στοχεύει στο να επεκτείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου. Οι εισοδοί για την πρώτη φάση είναι για κάθε κόμβο το μήκος της τρέχουσας ουράς μετάδοσης, το υπολειπόμενο επίπεδο ενέργειας και οι συγκρούσεις των προηγούμενων πακέτων. Η δεύτερη φάση δίνει προτεραιότητα για πρόσβαση στο μέσο στους κόμβους με μεγάλο μήκος ουράς μετάδοσης χρησιμοποιώντας τις τρεις προηγούμενες εισόδους. Αποδεικνύεται ότι οι προσαρμοστικοί κύκλοι καθήκοντος με περιόδους αδρανοποίησης αυξάνουν την διάρκεια ζωής του δικτύου σε σχέση με τους σταθερούς κύκλους καθήκοντος.

Με σκοπό το ίδιο αποτέλεσμα, στο [8] προτείνεται ένα MAC πρωτόκολλο με ένα σχήμα επαναπρογραμματισμού βασισμένο σε ασαφή λογική που βελτιώνει τα ήδη υπάρχοντα αποδοτικά προς την ενέργεια πρωτόκολλα προσφέροντας και άλλα πλεονεκτήματα. Οι μεταβλητές εισόδου εδώ είναι η αναλογία των κόμβων, με υπερχειλισμένο buffer, με μεγάλο ρυθμό αποτυχίας μεταδόσεων και αυτών που βιώνουν αποτυχείς μεταδόσεις. Στο [9] χρησιμοποιούνται η χωρητικότητα της μπαταρίας των κόμβων, η κινητικότητά τους και η απόσταση από τον

προορισμό σαν μεταβλητές για ένα ασαφές σύστημα που βελτιώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου αποφασίζοντας την πιθανότητα ένας κόμβος αν περιλαμβάνεται ή όχι σε ένα μονοπάτι. Στο [10] χρησιμοποιείται και εδώ ένα ασαφές σύστημα για να συμπεράνει την πιθανότητα κάθε κόμβου να μεταδώσει δεδομένα χρησιμοποιώντας την υπολειπόμενη ενέργειά του και τον τύπο των δεδομένων που προωθούνται και κατά την διάρκεια την ανίχνευσης της διαδρομής η έξοδος του ασαφούς συστήματος ελέγχου χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί εάν θα προωθηθεί ή όχι ένα πακέτο.

2.5.2 Εκτίμηση (Estimation)

Στα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται μέθοδοι εκτίμησης όπως η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η μέθοδος της μεγίστης πιθανοφάνειας και η μέθοδος φίλτρου Kalman.

Μέθοδος μεγίστης πιθανοφάνειας (ML): Οι μέθοδοι εκτίμησης που βασίζονται σε αυτή την κατηγορία είναι κατάλληλοι όταν η κατάσταση η οποία εκτιμάται δεν είναι αποτέλεσμα μιας τυχαίας μεταβλητής.

Στο πεδίο της συγχώνευσης πληροφορίας, έστω x , η κατάσταση που εκτιμάται και $z = (z(1), \dots, z(k))$ μια ακολουθία k παρατηρήσεων της μεταβλητής x , η συνάρτηση πιθανοφάνειας $\lambda(x)$ καθορίζεται ως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) της ακολουθίας παρατηρήσεων z δεδομένης της πραγματικής τιμής της κατάστασης x .

$$\lambda(x) = p(z | x).$$

Ο εκτιμητής μεγίστης πιθανοφάνειας (MLE) αναζητά την τιμή του x που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση πιθανοφάνειας

$$\hat{x}(k) = \arg \max_x p(z | x)$$

που μπορεί να παρθεί από εμπειρικά ή αναλυτικά μοντέλα αισθητήρων.

Το [11] προτείνει ένα κατανεμημένο και τοπικό MLE που είναι ανθεκτικό στις αναξιόπιστες ζεύξεις επικοινωνίας των δικτύων αισθητήρων. Σε αυτή τη μέθοδο κάθε κόμβος υπολογίζει μια τοπική αμερόληπτη εκτίμηση που συγκλίνει προς την ολική λύση του ML. Η μέθοδος αυτή επεκτείνεται για να υποστηρίζει ασύγχρονες και χρονικά παραδοτέες μετρήσεις δηλαδή μετρήσεις που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και που συμβαίνουν ασύγχρονα μέσα στο δίκτυο. Στο[12] χρησιμοποιείται το MLE για να εκτιμηθεί ο ρυθμός απωλειών ανά κόμβο κατά την διαδικασία της συνάθροισης και της αναφοράς των δεδομένων από την πηγή στον κόμβο καταβόθρα. Μια τέτοια στρατηγική μπορεί να είναι χρήσιμη για παράδειγμα στους αλγόριθμους δρομολόγησης για να μπορούν να προσπερνούν περιοχές απωλειών.

Ο MLE χρησιμοποιείται συχνά για να επιλύσει προβλήματα ανίχνευσης τοποθεσίας. Σε αυτό το πεδίο η μέθοδος χρησιμοποιείται για να βρει ακριβείς εκτιμήσεις απόστασης(ή κατεύθυνσης ή γωνίας) που χρειάζονται για να υπολογιστεί ή θέση ενός κόμβου ή της πηγής. Ένα παράδειγμα ανίχνευσης τοποθεσίας κόμβου είναι το KPS [13] το οποίο υποθέτει μια αρχική γνώση για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τοποθέτησης των κόμβων έτσι ώστε οι κόμβοι να μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον MLE για να εκτιμήσουν τις τοποθεσίες τους παρατηρώντας την συμμετοχή των γειτόνων τους στην ομάδα.

Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares): Αυτή η μέθοδος είναι μια μαθηματική τεχνική βελτιστοποίησης η οποία αναζητά μια συνάρτηση που ταιριάζει καλύτερα σε ένα σύνολο μετρήσεων εισόδου. Αυτό επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας το άθροισμα του τετραγωνικού λάθους μεταξύ των σημείων που παράγονται από την συνάρτηση και τον μετρήσεων εισόδου.

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη όταν η παράμετρος που θα εκτιμηθεί είναι σταθερή. Οι μετρήσεις μεταχειρίζονται ως μια ντετερμινιστική συνάρτηση της κατάστασης σαν $z(i) = h(i, x) + w(i)$, όπου το h αναπαριστά το μοντέλο δικτύου και το w την ακολουθία θορύβου για μια σειρά από $1 \leq i \leq k$ παρατηρήσεις. Η μέθοδος ψάχνει για την τιμή του x που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγωνικών λαθών των πραγματικών και των προβλεπόμενων παρατηρήσεων:

$$\hat{x}(k) = \arg \min_x \sum_{i=1}^k [z(i) - h(i, x)]^2$$

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων και η μέθοδος μεγίστης πιθανοφάνειας είναι ίσες όταν ο θόρυβος $w(i)$ είναι μια ακολουθία αποτελεσμάτων, ανεξάρτητων ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών με συμμετρική συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας με μέση τιμή μηδέν.

Φίλτρο του Kalman: Το φίλτρο του Kalman είναι μια πολύ δημοφιλής μέθοδος συγχώνευσης. Προτάθηκε αρχικά από τον Kalman το 1960 και από τότε έχει μελετηθεί διεξοδικά. Το φίλτρο Kalman (Εικόνα γ) εκτιμά την κατάσταση x μιας διακριτού χρόνου διαδικασίας που περιγράφεται από το μοντέλο:

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + G(k)u(k) + w(k),$$

με μετρήσεις z που αναπαριστώνται από την

$$z(k) = H(k)x(k) + v(k),$$

όπου $\Phi(k)$ είναι πίνακας μετάβασης κατάστασης, $G(k)$ είναι ο πίνακας εισαγωγής κατάστασης, $u(k)$ είναι το διάνυσμα εισόδου (πχ η τοποθεσία του κόμβου), $H(k)$ είναι ο πίνακας μετρήσεων και $w(k)$ και $v(k)$ είναι τυχαίες μεταβλητές που υπακούουν στους νόμους του Gauss με μηδενική κατανομή και πίνακες συσχέτισης $Q(k)$ και $R(k)$ αντίστοιχα.

Βασισμένη στις μετρήσεις $z(k)$ και στην γνώση των παραμέτρων του συστήματος η εκτίμηση του $x(k)$ που αναπαριστάται ως $\hat{x}(k)$ και η πρόβλεψη του $x(k+1)$ που αναπαριστάται ως $\hat{x}(k+1|k)$ είναι:

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[z(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)],$$

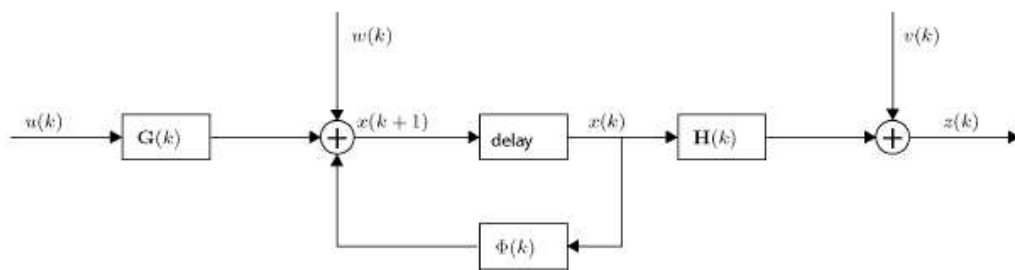
$$\hat{x}(k+1|k) = \Phi(k)\hat{x}(k|k) + G(k)u(k),$$

αντίστοιχα, όπου K είναι το κέρδος του φίλτρου Kalman που καθορίζεται από την:

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1},$$

όπου $P(k | k - 1)$ είναι η πρόβλεψη του πίνακα συσχέτισης που μπορεί να καθοριστεί από την $P(k + 1 | k) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + Q(k)$ με $P(k) = P(k | k - 1) - K(k)H(k)P(k | k - 1)$.

Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιείται για να συγχωνεύσει χαμηλού επιπέδου πλεονάζοντα δεδομένα. Εάν ένα γραμμικό μοντέλο μπορεί να περιγράψει το σύστημα και το λάθος μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν Gaussian θόρυβος, το φίλτρο Kalman συνεχώς αποκτά στατιστικά βέλτιστες εκτιμήσεις. Όμως για να αντιμετωπίσει μη γραμμικές δυναμικές και μη γραμμικά μοντέλα μετρήσεων πρέπει να υιοθετηθούν άλλες μέθοδοι.



Εικόνα 3. Διάγραμμα block του φίλτρου Kalman.

Στα δίκτυα αισθητήρων μπορούμε να βρούμε σχήματα για κατά προσέγγιση καταναμημένο φιλτράρισμα Kalman στα οποία η λύση υπολογίζεται με βάση μια κοινή ομοφωνία ανάμεσα στους κόμβους [[14],[15]]. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι η απώλεια δεδομένων εξαιτίας των αναξιόπιστων καναλιών επικοινωνίας στα δίκτυα αισθητήρων. Στο πλαίσιο αυτό στο [16], εκτιμάται η απόδοση του φίλτρου Kalman σε σενάριο διακεκομμένων παρατηρήσεων και αποδεικνύεται ότι η ύπαρξη μιας κρίσιμης τιμής για τον ρυθμό άφιξης των παρατηρήσεων πάνω από την οποία το φίλτρο γίνεται ασταθές.

Ένα άλλο θέμα του φίλτρου στα δίκτυα αισθητήρων είναι πως χρειάζεται συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων [17]. Αυτό αποδεικνύεται από το [18] στο οποίο φαίνεται πως τα προβλήματα συγχρονισμού μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του φίλτρου οδηγώντας σε λάθος εκτιμήσεις.

Για καιρό το φίλτρο χρησιμοποιούνταν σε αλγορίθμους για εντοπισμό και εύρεση θέσης μιας πηγής. Τα δίκτυα αισθητήρων κληρονόμησαν αυτή την εφαρμογή και

στοχεύοντας στην βελτίωση της ακρίβειας το φίλτρο έχει βρει εφαρμογή στην τελειοποίηση των εκτιμήσεων θέσης και απόστασης [[19],[20]] και στην ανίχνευση διαφορετικών πηγών [21].

Ένα πρωτόκολλο MAC μπορεί να επωφεληθεί από την εφαρμογή του φίλτρου Kalman για να προβλέψει το μέγεθος παραθύρου του. Σε αυτή την κατεύθυνση στο [22] χρησιμοποιείται ένα Kalman φίλτρο για να γίνει πρόβλεψη του μεγέθους του παραθύρου. Το ίδιο συμβαίνει και στο [23].

Στο ίδιο πλαίσιο στο [24] χρησιμοποιείται μια προσέγγιση διπλού φίλτρου Kalman στην οποία και η πηγή και η καταβόθρα προβλέπουν τις ανιχνεύσιμες τιμές έτσι ώστε η πηγή να στέλνει δεδομένα μόνο όταν γνωρίζει πως η πρόβλεψη της καταβόθρας είναι λανθασμένη. Στον αλγόριθμο δρομολόγησης SCAR ένας κόμβος χρησιμοποιεί φίλτρο Kalman για να προβλέψει το πλαίσιο της πληροφορίας (κινητικότητα και πόρους) για τους γείτονές του, και με βάση αυτή την πρόβλεψη διαλέγει τον καταλληλότερο γείτονα.

2.5.3 Χάρτες Χαρακτηριστικών (Feature maps)

Για κάποιες εφαρμογές όπως η καθοδήγηση και η διαχείριση πόρων ίσως δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν απευθείας τα ανιχνευόμενα δεδομένα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορούν να αποσπαστούν χαρακτηριστικά που αναπαριστούν το περιβάλλον και να χρησιμοποιηθούν από την εφαρμογή. Συνήθεις μέθοδοι συγχώνευσης όπως η εκτίμηση και το συμπέρασμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ένας χάρτης χαρακτηριστικών. Παρακάτω παρουσιάζονται δυο τύποι χαρτών χαρακτηριστικών.

Πλέγμα Κατοχής: Τα πλέγματα κατοχής, λεγόμενα και χάρτες κατοχής, ή πλέγματα βεβαιότητας, ορίζουν μια πολυδιάστατη (2D ή 3D) αναπαράσταση του περιβάλλοντος περιγράφοντας ποιες περιοχές είναι κατειλημμένες από κάποιο αντικείμενο και ποιες είναι ελεύθερες. Το παρατηρούμενο πεδίο χωρίζεται σε τετράγωνα ή κυβικά κελιά και κάθε κελί περιέχει μια τιμή που δείχνει την

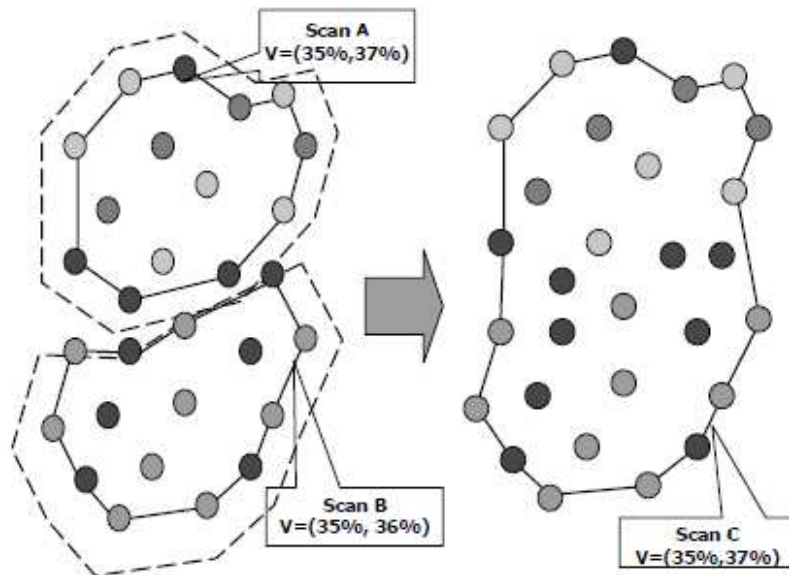
πιθανότητα να είναι κατειλημμένο. Συνήθως μια τέτοια πιθανότητα υπολογίζεται με βάση την πληροφορία που παρέχουν πολλοί κόμβοι- χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως το Bayesian θεώρημα ή το θεώρημα Dempster-Shafer.

Τα πλέγματα κατοχής αρχικά χρησιμοποιούνταν για να δημιουργηθεί ένα εσωτερικό μοντέλο στατικών περιβαλλόντων βασισμένο σε υπερηχητικά δεδομένα [25] και από τότε έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές. Το [26] παρουσιάζει το χρονικό πλέγμα κατοχής σαν μια μέθοδο που μοντελοποιεί και κατηγοριοποιεί χωρικές περιοχές σύμφωνα με τις ιδιότητες του χρόνου τους. Στο [27] χρησιμοποιείται ένα δισδιάστατο μοντέλο σαν χάρτη κατοχής όπου κάθε εικονοστοιχείο του χάρτη περιέχει μια δυαδική τιμή που δείχνει εάν ο αντίστοιχος χώρος είναι κατειλημμένος ή όχι. Τυπικές εφαρμογές των πλεγμάτων κατοχής περιλαμβάνουν τον υπολογισμό θέσης [28] καθώς και πλοήγηση [29].

Σαρώσεις Δικτύου (Network Scans): Οι σαρώσεις δικτύου ορίστηκαν σαν ένα είδος ενός χάρτη δραστηριότητας/πόρων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Παρόμοια με ένα χάρτη καιρού η σάρωση δικτύου απεικονίζει τη γεωγραφική κατανομή των πόρων ή της δραστηριότητας ενός δικτύου αισθητήρων. Θεωρώντας έναν πόρο σαν πόρο ενδιαφέροντος αντί να παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες για κάθε κόμβο του δικτύου, αυτές οι σαρώσεις προσφέρουν μια περίληψη της κατανομής των πόρων. Η σάρωση δικτύου που υλοποιήθηκε στο [30] ονομάζεται eScan και αντλεί πληροφορία για την υπολειπόμενη ενέργεια στο δίκτυο με ένα κατανεμημένο ενδοδικτυακό τρόπο.

Ο αλγόριθμος είναι αρκετά απλός. Αρχικά δημιουργείται ένα δέντρο συνάθροισης για να καθορίσει πως θα επικοινωνούν οι κόμβοι. Ύστερα, κάθε κόμβος υπολογίζει το τοπικό του eScan και όποτε το επίπεδο ενέργειας πέσει σημαντικά σε σύγκριση με την προηγούμενη αναφορά, ο κόμβος στέλνει το eScan του κατευθείαν στην καταβόθρα. Τα eScans συναθροίζονται όταν ένας κόμβος λάβει δύο ή περισσότερα τοπολογικά γειτονικά eScans που έχουν το ίδιο ή παρόμοιο επίπεδο ενέργειας. Το συναθροισμένο eScan είναι μια πολύγωνο που αντιστοιχεί σε μια περιοχή και στην αθροισμένη υπολειπόμενη ενέργεια αυτής

της περιοχής. Βλέπουμε στην Εικόνα 4 την αναπαράσταση ενός eScan καθώς και του συναθροισμένου eScan.



Εικόνα 4. Αναπαράσταση του eScan.

Κάθε eScan έχει μια τιμή V (VALUE) που συντάσσεται ως $V=(\min, \max)$ και αντιστοιχεί στην ελάχιστη και τη μέγιστη υπολειπόμενη ενέργεια κάθε περιοχής. Κάθε ενεργειακό επίπεδο αναπαριστάται με ένα χρωματισμό στην κλίμακα του γκρι. Οι άσπροι κόμβοι είναι κόμβοι που είναι πλήρως φορτισμένοι ενώ οι μαύροι είναι «νεκροί» κόμβοι.

Αν και ο αλγόριθμος αυτός κάνει κάποιες παραδοχές όπως το ότι θεωρεί ένα τέλειο MAC επίπεδο χωρίς απώλειες ή φόρτο εξαιτίας ανταγωνισμού ή περιβαλλοντικών αλλαγών, η σάρωση δικτύου αποτελεί μια ενδιαφέρουσα μέθοδο συγχώνευσης για την παρουσίαση πληροφορίας σχετικά με τους πόρους του δικτύου και της δραστηριότητας στο δίκτυο. Στην περίπτωση του eScan επιτρέπεται η ανίχνευση περιοχών χαμηλής ενέργειας και αυτό βοηθάει τους σχεδιαστές να αποφασίσουν που πρέπει να τοποθετηθούν νέοι κόμβοι. Επιπλέον το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιεί τα eScans για να αναγνωρίζει τον εαυτό του,

έτσι ώστε οι κόμβοι με χαμηλά επίπεδα ενέργειας να χρησιμοποιούνται αποδοτικότερα.

2.5.4 Συνάθροιση (Aggregation)

Το [31] ορίζει την συνάθροιση δεδομένων σαν μια τεχνική για να ξεπεραστούν δυο προβλήματα: η συγκέντρωση και η επικάλυψη. Στην συγκέντρωση τα δεδομένα που ανιχνεύονται από ένα κόμβο δημιουργούν αντίγραφα στο δίκτυο λόγω της στρατηγικής δρομολόγησης (πχ πλημμύρα). Το πρόβλημα της επικάλυψης συμβαίνει όταν δυο διαφορετικοί κόμβοι μεταδίδουν τα ίδια δεδομένα. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν οι κόμβοι είναι πλεονάζοντες-ανιχνεύουν την ίδια ιδιότητα στην ίδια περιοχή. Ο πλεονασμός λοιπόν έχει αρνητική επίδραση τόσο στην ενέργεια όσο και στο εύρος ζώνης, η οποία μειώνεται με την μέθοδο της συγχώνευσης πληροφορίας και της συνάθροισης δεδομένων.

Τεχνικές συνάθροισης είναι οι κοινές αθροιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται από τις γλώσσες επερωτήσεων (πχ SQL) για να λάβουν περιληπτικά δεδομένα από βάσεις δεδομένων. Το [32] παρουσιάζει την ανταλλαγή ανάμεσα σε κατανάλωση ενέργειας και ευστοχία όταν συναρτήσεις συνάθροισης χρησιμοποιούνται για να συνοψίσουν δεδομένα από ένα δίκτυο αισθητήρων. Γενικά συμπεραίνεται πως όσο περισσότερη ανοχή στο σφάλμα μπορεί να δείξει ο χρήστης τόσο λιγότερη ενέργεια χρειάζεται να καταναλωθεί. Άλλες συναρτήσεις συνάθροισης είναι η κατάπνιξη και το πακετάρισμα. Η πρώτη απλά καταπνίγει τα πλεονάζοντα δεδομένα απορρίπτοντας τα αντίγραφα. Για παράδειγμα εάν ένας κόμβος ανιχνεύσει θερμοκρασία 45° C και λάβει την ίδια μέτρηση από τον γείτονά του μόνο το ένα από τα δυο πακέτα θα προωθηθεί. Η δεύτερη συνάρτηση συνάθροισης ομαδοποιεί διάφορες παρατηρήσεις σε ένα πακέτο. Ο σκοπός της τεχνικής αυτής είναι να αποφύγει το φόρτο του MAC πρωτοκόλλου όταν στέλνει διαδοχικά πακέτα.

2.5.5 Συμπίεση (Compression)

Στα δίκτυα αισθητήρων τα δεδομένα μπορούν να συμπιεστούν εκμεταλλευόμενα την χωρική συσχέτιση των κόμβων με ένα κατανεμημένο τρόπο και δεν χρειάζονται επιπλέον κόστος επικοινωνίας για την διάδοσή τους. Μια τεχνική είναι η κατανεμημένη κωδικοποίηση πηγής (DSC) που παίρνει αποδοτικά αποφάσεις δρομολόγησης και κωδικοποίησης ανεξάρτητα τη μία από την άλλη. Σαν μειονέκτημα όμως η λύση αυτή αυξάνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα και απαιτεί την συλλογή πληροφορίας για συλλογικά στατιστικά, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα εύκολο στην πράξη. Η τεχνική αυτή αναφέρεται στην συμπίεση πολλαπλών συσχετιζόμενων πηγών, διαχωρισμένων φυσικά, που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτές οι πηγές στέλνουν τις συμπιεσμένες εξόδους τους σε μια κεντρική μονάδα πχ μια καταβόθρα για από κοινού αποκωδικοποίηση. Το [33] προτείνει ένα DSC μοντέλο για συμπίεση δεδομένων βασισμένο σε μια συνάρτηση κόστους που λαμβάνει υπόψη της απαιτούμενη ενέργεια για κωδικοποίηση, μετάδοση και αποκωδικοποίηση της πληροφορίας που συμπιέζεται. Οι έρευνες πάνω στην συμπίεση δεδομένων εστιάζουν στην μείωση της καθυστέρησης επικοινωνίας ή στο απαιτούμενο εύρος ζώνης μετάδοσης. Στο [34] παραθέτεται η υλοποίηση αλγορίθμων συμπίεσης για σεισμικά δεδομένα. Η δουλειά αυτή υπολογίζει την ελάττωση της ενέργειας μετά την συμπίεση εξαιτίας της μείωσης των δεδομένων και λαμβάνει υπόψη το κόστος επικοινωνίας μόνο του ή ξεχωριστά από το κόστος πολυπλοκότητας. Μια άλλη δουλειά [35] εστιάζει στην συμπίεση ακουστικών σημάτων και έχει αναπτύξει μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση ενεργειακών ανταλλαγών ανάμεσα στην πολυπλοκότητα και την επικοινωνία βασισμένη στις μεθόδους συμπίεσης SVLPC, DVLPC και DCLPC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

3.1 Δεδομενοκεντρικά Πρωτόκολλα

Τα δεδομενοκεντρικά πρωτόκολλα διαφέρουν από τα κλασικά πρωτόκολλα που βασίζονται στην διευθυνσιοδότηση με τον τρόπο με τον οποίο στέλνονται τα δεδομένα από την πηγή στην καταβόθρα. Στα κλασικά πρωτόκολλα κάθε κόμβος που λειτουργεί σαν πηγή που έχει τα κατάλληλα δεδομένα στέλνει τα δεδομένα του στην καταβόθρα ανεξάρτητα από τους άλλους κόμβους. Στα δεδομενοκεντρικά όμως πρωτόκολλα όταν η πηγή στέλνει τα δεδομένα της στην καταβόθρα ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να κάνουν μια μορφή συνάθροισης των δεδομένων που προέρχονται από πολλές διαφορετικές πηγές και να στείλουν τα συναθροισμένα δεδομένα στην καταβόθρα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αποφέρει εξοικονόμηση ενέργειας επειδή χρειάζονται λιγότερες μεταδόσεις για να σταλούν τα δεδομένα από την πηγή στην καταβόθρα. Παρακάτω βλέπουμε μερικά από τα υπάρχοντα δεδομενοκεντρικά πρωτόκολλα για δίκτυα αισθητήρων.

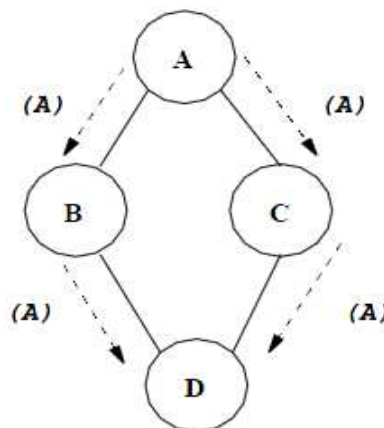
3.1.1 Flooding και gossiping

Οι αλγόριθμοι flooding και gossiping [36] είναι δύο κλασικοί μηχανισμοί για μεταβίβαση δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων χωρίς να είναι αναγκαία η ύπαρξη αλγορίθμων δρομολόγησης και γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Στον αλγόριθμο flooding, κάθε αισθητήρας που λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων το αναμεταδίδει (broadcast) σε όλους τους γείτονές του και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πακέτο να φτάσει στον προορισμό ή μέχρι να φτάσουμε τον μέγιστο αριθμό hops για το πακέτο. Από την άλλη, ο αλγόριθμος gossiping είναι μια ελαφρώς βελτιωμένη έκδοση του flooding όπου ο κόμβος που λαμβάνει το πακέτο το στέλνει σε έναν τυχαία επιλεγόμενο γείτονα, ο οποίος διαλέγει με τη

σειρά του έναν άλλον τυχαίο γείτονα για να προωθήσει το μήνυμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

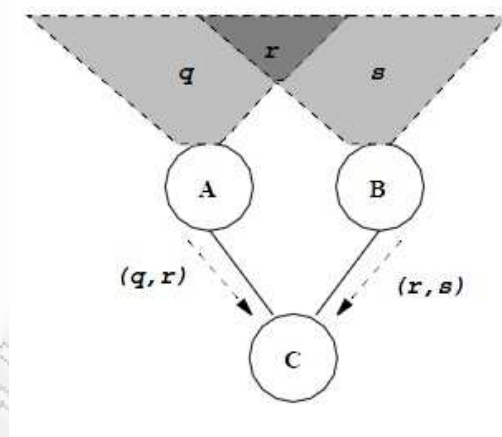
Αν και ο αλγόριθμος flooding είναι πολύ εύκολο να υλοποιηθεί, έχει διάφορα μειονεκτήματα. Για παράδειγμα η συγκέντρωση (implosion) που προκαλείται από διπλότυπα μηνύματα τα οποία στέλνονται στον ίδιο κόμβο. Η επικάλυψη (overlap) που δημιουργείται όταν δυο κόμβοι οι οποίοι ανιχνεύουν την ίδια περιοχή στέλνουν παρόμοια πακέτα στον ίδιο γείτονα. Τέλος έχουμε αδυναμία γνώσης των πόρων (resource blindness) με αποτέλεσμα να καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ενεργειακοί περιορισμοί. Ο αλγόριθμος gossiping αποφεύγει το πρόβλημα της συγκέντρωσης επιλέγοντας τυχαία ένα κόμβο για να στείλει το πακέτο από το να αναμεταδώσει. Αυτό όμως προκαλεί καθυστερήσεις στην μετάδοση των δεδομένων διαμέσου των κόμβων.

Στην Εικόνα 5 βλέπουμε το πρόβλημα της συγκέντρωσης. Εδώ ο κόμβος A στέλνει τα δεδομένα του στους δυο γείτονές του τον B και τον C. Οι κόμβοι αποθηκεύουν τα δεδομένα από τον A και στέλνουν ένα αντίγραφο στον γείτονά τους τον κόμβο D. Εύκολα προκύπτει πως η συγκέντρωση είναι γραμμική ως προς το βαθμό κάθε κόμβου.



Εικόνα 5. Το πρόβλημα της συγκέντρωσης. Στον γράφο ο κόμβος A αρχίζει να στέλνει τα δεδομένα του σε όλους τους γείτονές του. Δύο αντίγραφα των δεδομένων φτάνουν τελικά στον κόμβο D. Το σύστημα σπαταλά ενέργεια και εύρος ζώνης κατά μια αχρείαστη αποστολή και μια λήψη.

Στην Εικόνα 6 βλέπουμε το πρόβλημα της επικάλυψης. Ο κόμβος A και ο κόμβος B ανιχνεύουν κομμάτια δεδομένων από κοινές περιοχές και αυτά τα επικαλυπτόμενα δεδομένα τα στέλνουν στον γείτονά τους στον κόμβο C. Πάλι ο αλγόριθμος σπαταλά ενέργεια και εύρος ζώνης στέλνοντας δυο αντίγραφα ενός κομματιού δεδομένων στον ίδιο κόμβο. Η επικάλυψη είναι δυσκολότερο πρόβλημα να λυθεί από την συγκέντρωση, καθώς η συγκέντρωση είναι απλά συνάρτηση μόνο της τοπολογίας του δικτύου ενώ η επικάλυψη είναι συνάρτηση και της τοπολογίας δικτύου αλλά και της χαρτογράφησης των δεδομένων στους κόμβους.



Εικόνα 6. Το πρόβλημα της επικάλυψης. Δυο κόμβοι καλύπτουν μια κοινή γεωγραφική περιοχή. Όταν οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα στον κόμβο C, ο C θα λάβει δυο αντίγραφα των δεδομένων που έχουν μαρκαριστεί με το r.

3.1.2 SPIN

Για να λυθούν τα προβλήματα των παραπάνω αλγορίθμων προτάθηκε ο αλγόριθμος SPIN [36]. Ο αλγόριθμος αυτός ενσωματώνει δυο καινοτομίες που ξεπερνούν αυτές τις ατέλειες: διαπραγμάτευση (negotiation) και προσαρμοστικότητα στους πόρους(resource-adaptation).

Για να υπερκεράσει τα προβλήματα της συγκέντρωσης και της επικάλυψης οι κόμβοι που χρησιμοποιούν το SPIN διαπραγματεύονται μεταξύ τους πριν εκπέμψουν τα δεδομένα. Η διαπραγμάτευση βοηθά στο να διασφαλίσουμε πως μόνο χρήσιμες πληροφορίες θα μεταδοθούν. Για να διαπραγματευθούν σωστά όμως οι κόμβοι πρέπει να είναι ικανοί να περιγράψουν ή να ονοματίσουν τα δεδομένα που ανιχνεύουν. Οι περιγραφείς αυτοί στις διαπραγματεύσεις του SPIN ονομάζονται μετά-δεδομένα (meta-data).

Στο πρωτόκολλο SPIN οι κόμβοι καταγράφουν τους πόρους τους πριν την εκπομπή των δεδομένων. Κάθε κόμβος έχει τον δικό του διαχειριστή πόρων (resource manager) ο οποίος παρακολουθεί την κατανάλωση των πόρων. Ο διαχειριστής μπορεί να περικόψει συγκεκριμένες διεργασίες όταν η ενέργεια είναι χαμηλή.

Αυτά τα χαρακτηριστικά μαζί υπερκερνούν τις τρεις ελλείψεις του κλασικού αλγορίθμου flooding. Η διαδικασία της διαπραγμάτευσης που προηγείται της αποστολής δεδομένων εξαλείφει την συγκέντρωση επειδή εξαλείφει την μετάδοση πλεονάζων πακέτων δεδομένων. Η χρήση περιγραφών μετά-δεδομένων εξαλείφει την πιθανότητα επικάλυψης επειδή επιτρέπει στους κόμβους να ονομάσουν το κομμάτι των δεδομένων τα οποία ενδιαφέρονται να αποκτήσουν. Γνωρίζοντας τα ενεργειακά αποθέματα επιτρέπουν στους κόμβους να περικόβουν δραστηριότητες όποτε τα ενεργειακά αποθέματα είναι χαμηλά και έτσι να επιμηκύνουν την μακροβιότητα του δικτύου.

Μετά-δεδομένα

Οι κόμβοι χρησιμοποιούν μετά-δεδομένα για να περιγράψουν εξ ολοκλήρου τα δεδομένα που συλλέγουν. Αν x είναι ο περιγραφέας των μετά-δεδομένων για τον κόμβο X τότε το μέγεθος του x σε bytes πρέπει να είναι μικρότερο από το μέγεθος του X για να είναι ο αλγόριθμος αποδοτικός. Αν δύο κομμάτια δεδομένων είναι διακριτά τότε τα αντίστοιχα μετά-δεδομένα πρέπει να είναι διακριτά. Αντιστοίχως δυο κομμάτια που δεν είναι διακριτά τότε πρέπει να μοιράζονται την ίδια αναπαράσταση μετά-δεδομένων.

Οι κόμβοι του SPIN χρησιμοποιούν τρεις τύπος μηνυμάτων για την επικοινωνία τους:

ADV - δημοσίευση νέων δεδομένων. Όταν ένας κόμβος έχει δεδομένα να αποστείλει μπορεί να δημοσιεύσει το γεγονός μεταδίδοντας ένα μήνυμα ADV που περιέχει μετά-δεδομένα.

REQ – αίτημα για δεδομένα. Ένας κόμβος στέλνει ένα REQ μήνυμα όταν θέλει να λάβει δεδομένα

DATA – μήνυμα δεδομένων. Τα DATA μηνύματα δεδομένα του αισθητήρα μαζί με μια επικεφαλίδα μετά-δεδομένων.

Επειδή τα μηνύματα ADV και REQ περιέχουν μόνο μετά-δεδομένα είναι μικρότερα και υπολογιστικά φθηνότερα να σταλούν και να ληφθούν από ότι τα αντίστοιχα μηνύματα DATA.

Διαχείριση πόρων στο SPIN

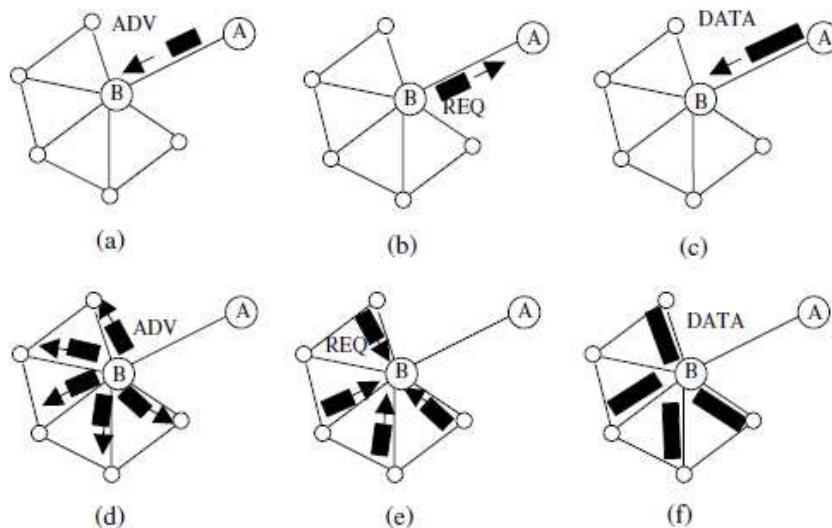
Οι εφαρμογές SPIN είναι ενήμερες για τους πόρους (resource aware) και προσαρμοστικές στους πόρους (resource adaptive). Μπορούν να καταγράψουν τους πόρους του συστήματος για να βρουν πόση ενέργεια είναι διαθέσιμη σε αυτούς. Μπορούν επίσης να υπολογίσουν το κόστος σε ενέργεια για την πραγματοποίηση υπολογισμών, αποστολών και λήψεων δεδομένων στο δίκτυο. Έτσι με αυτές τις πληροφορίες οι κόμβοι μπορούν να αποφασίσουν πώς θα χρησιμοποιήσουν αποδοτικότερα τους διαθέσιμους πόρους.

Θα δούμε τώρα δυο παραλλαγές του πρωτοκόλλου SPIN τα SPIN-1 και SPIN-2.

Το SPIN-1 είναι ένα απλό πρωτόκολλο χειραψίας (handshake protocol) για διάδοση δεδομένων μέσα σε ένα χωρίς απώλειες δίκτυο. Λειτουργεί σε τρεις φάσεις (ADV-REQ-DATA) με κάθε μια από τις φάσεις να αντιστοιχεί στους τύπους μηνυμάτων που περιγράφηκαν παραπάνω. Το πρωτόκολλο ξεκινά όταν ένας κόμβος λάβει νέα δεδομένα που πρέπει να διαδοθούν. Αυτό γίνεται

στέλνοντας ένα μήνυμα ADV στους γείτονές του, ονοματίζοντας τα νέα δεδομένα. Αφού λάβει ένα ADV ο γειτονικός κόμβος ελέγχει να δει αν το έχει ήδη λάβει ή έχει αιτηθεί ο ίδιος τα δεδομένα αυτά. Αν όχι, ανταποκρίνεται στέλνοντας ένα REQ μήνυμα πίσω στον αποστολέα, για τα δεδομένα που του λείπουν. Το πρωτόκολλο ολοκληρώνεται όταν ο αρχικός κόμβος απαντά στο μήνυμα REQ με ένα DATA μήνυμα που περιέχει τις πληροφορίες που χρειάζονται.

Βλέπουμε στην Εικόνα 7 βλέπουμε ένα παράδειγμα του πρωτοκόλλου. Αφού έλαβε ένα ADV πακέτο από τον κόμβο A, ο B ελέγχει αν έχει όλα τα δημοσιευμένα δεδομένα (a). Αν όχι ο κόμβος B στέλνει ένα REQ μήνυμα πίσω στον A αναφέροντας του τα δεδομένα που του λείπουν και χρειάζεται να αποκτήσει (b). Όταν ο A λάβει το REQ πακέτο, συλλέγει τα δεδομένα που του ζήτησε ο B και του τα στέλνει πίσω με ένα DATA μήνυμα (c). Ο B με τη σειρά του, στέλνει ADV μήνυμα δημοσιεύοντας τα νέα δεδομένα που έλαβε από τον A σε όλους τους γείτονές του (d). Δεν στέλνει όμως ADV μήνυμα πίσω στον A επειδή γνωρίζει πως ο A έχει ήδη τα νέα δεδομένα. Οι υπόλοιποι κόμβοι στην συνέχεια στέλνουν δημοσιεύσεις στους γείτονες τους και το πρωτόκολλο συνεχίζεται.



Εικόνα 7. Το πρωτόκολλο SPIN-1.

Ας κάνουμε μερικές σημαντικές παρατηρήσεις για αυτό το παράδειγμα. Αρχικά αν ο κόμβος B είχε τα δικά του δεδομένα θα μπορούσε να γίνει συνάθροιση με τα δεδομένα του A και να στείλει δημοσιεύσεις των συναθροισμένων δεδομένων σε όλους τους γείτονές του (d). Δεύτερον, οι κόμβοι δεν είναι υποχρεωμένοι να απαντάνε σε κάθε μήνυμα. Σε αυτό το παράδειγμα ένας κόμβος δεν στέλνει REQ πακέτο πίσω στον κόμβο B (e). Αυτό θα μπορούσε να συμβεί αν ο κόμβος αυτός είχε ήδη στην κατοχή του τα δεδομένα που δημοσιεύθηκαν.

Η δύναμη αυτού του πρωτοκόλλου έγκειται στην απλότητά του. Κάθε κόμβος του δικτύου παίρνει κάποια ελάχιστη απόφαση όταν λαμβάνει νέα δεδομένα και έτσι εξοικονομεί ενέργεια από περιττούς υπολογισμούς. Επίσης κάθε κόμβος χρειάζεται να γνωρίζει μόνο για τους άμεσους (single-hop) γείτονές του. Το γεγονός πως δεν χρειάζεται επιπλέον γνώση της τοπολογίας του δικτύου για να τρέξει ο αλγόριθμος έχει μερικές σημαντικές συνέπειες. Πρώτον ο SPIN-1 μπορεί να τρέξει σε ένα εντελώς μη παραμετροποιημένο δίκτυο με ένα μικρό κόστος εκκίνησης για να καθορίσει τους γείτονές του. Δεύτερον, εάν η τοπολογία του δικτύου αλλάζει συχνά οι αλλαγές θα πρέπει να μεταβιβαστούν μόνο στους άμεσους γείτονες πριν οι κόμβοι συνεχίσουν να τρέχουν τον αλγόριθμο.

Το SPIN-2 πρωτόκολλο προσθέτει μια απλή ευριστική διατήρησης ενέργειας στο SPIN-1. Όταν η ενέργεια είναι πλεονάζουσα οι κόμβοι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το ίδιο πρωτόκολλο τριών φάσεων όπως στο SPIN-1. Όταν ένας κόμβος παρατηρήσει πως η ενέργεια πλησιάζει σε ένα μια ελάχιστη τιμή κατωφλίου, προσαρμόζεται μειώνοντας την συμμετοχή του στο πρωτόκολλο. Γενικά ένας κόμβος θα συμμετάσχει σε μια φάση μόνο αν θεωρεί πως μπορεί να ολοκληρώσει επιτυχώς και τις υπόλοιπες φάσεις του πρωτοκόλλου χωρίς να πέσει η τιμή της ενέργειάς του κάτω από την τιμή κατωφλίου. Αυτή η προσέγγιση συνεπάγεται πως όταν ένας κόμβος λάβει νέα δεδομένα τότε ξεκινάει τις τρεις φάσεις μόνο εάν πιστεύει πως έχει αρκετή ενέργεια για να ολοκληρώσει το πρωτόκολλο. Παρομοίως εάν ένας κόμβος λάβει μια δημοσίευση, δεν στέλνει ένα REQ μήνυμα εάν δεν έχει αρκετή ενέργεια όχι μόνο για να μεταδώσει το μήνυμα

αλλά και για να λάβει την απάντηση. Αυτή η προσέγγιση δεν αποτρέπει ένα κόμβο από το να λάβει ADV και REQ μηνύματα κάτω από την τιμή κατωφλίου. Αλλά αποτρέπει τον κόμβο από το να διαχειριστεί DATA μηνύματα κάτω από αυτή την τιμή κατωφλίου.

Παρατηρήσεις

- Τα πρωτόκολλα SPIN-1 και SPIN-2 είναι απλά πρωτόκολλα για μετάδοση δεδομένων χωρίς να χρειάζεται γνώση της κατάστασης των γειτόνων. Για αυτό τον λόγο είναι κατάλληλα για περιβάλλον όπου οι κόμβοι είναι κινητοί επειδή στηρίζουν την απόφαση για την προώθηση των δεδομένων μόνο σε πληροφορίες για τους τοπικούς τους γείτονες.
- Σε θέματα χρόνου, ο SPIN-1 έχει συγκρίσιμα αποτελέσματα με τον flooding και μερικές φορές υπερτερεί απέναντί του. Σε θέματα ενέργειας, ο SPIN-1 χρησιμοποιεί μόνο το 25% της ενέργειας που χρησιμοποιεί ο flooding. Ο SPIN-2 είναι ικανός να διανείμει 60% περισσότερα δεδομένα ανά μονάδα ενέργειας από ότι ο flooding.
- Τόσο ο SPIN-1 όσο και ο SPIN-2 υπερτερούν του gossiping.

3.1.3 Directed Diffusion

Το πρωτόκολλο directed diffusion [37] αποτελεί ένα σημαντικό σημείο αναφοράς της δεδομενοκεντρικής δρομολόγησης στα δίκτυα αισθητήρων. Η γενική ιδέα έγκειται στην διάχυση των δεδομένων στους κόμβους χρησιμοποιώντας ένα σχήμα ονοματοδοσίας των δεδομένων. Ο κύριος λόγος για την χρησιμοποίηση αυτού του σχήματος είναι για να ξεφορτωθούμε αχρείαστες λειτουργίες της δρομολόγησης του επιπέδου δικτύου για να εξοικονομήσουμε ενέργεια.

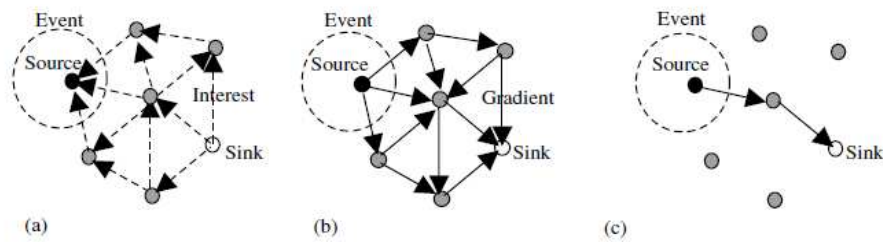
Το πρωτόκολλο προτείνει την χρήση ζευγαριών χαρακτηριστικού-τιμής για τα δεδομένα και ρωτάει (query) τους κόμβους με μια σχέση απαίτησης

χρησιμοποιώντας αυτά τα ζευγάρια. Για να δημιουργηθεί μια επερώτηση καθορίζεται ενδιαφέρον(interest) χρησιμοποιώντας μια λίστα ζευγαριών χαρακτηριστικού-τιμής όπως το όνομα του αντικειμένου, τα χρονικά διαστήματα, την διάρκεια, την γεωγραφική περιοχή κτλ. Το ενδιαφέρον εκπέμπεται καθολικά από μια καταβόθρα διαμέσου των γειτόνων της. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα ενδιαφέρον μπορεί να αποθηκεύσει προσωρινά για μεταγενέστερη χρήση.

```
type = four-legged animal // detect animal location
interval = 20 ms // send back events every 20 ms
duration = 10 seconds // .. for the next 10 seconds
rect = [-100, 100, 200, 400] // from sensor nodes within rectangle
```

Εικόνα 8. Παράδειγμα ονοματοδοσίας τύπου χαρακτηριστικού-τιμής στο directed diffusion

Οι κόμβοι έχουν την ικανότητα να κάνουν συνάθροιση των δεδομένων. Τα ενδιαφέροντα στην προσωρινή μνήμη χρησιμοποιούνται αργότερα για να συγκριθούν τα λαμβανόμενα δεδομένα με τις τιμές στα ενδιαφέροντα. Η καταχώρηση ενδιαφέροντος περιλαμβάνει και πεδία κλιμάκωσης(gradients). Μια κλιμάκωση είναι ένας σύνδεσμος απάντησης σε ένα γείτονα από τον οποίο προήλθε το ενδιαφέρον. Χαρακτηρίζεται από τον ρυθμό μετάδοσης, την διάρκεια και τον χρόνο λήξης που παράγεται από τα λαμβανόμενα πεδία του ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου χρησιμοποιώντας ενδιαφέροντα και κλιμακώσεις δημιουργούνται μονοπάτια μεταξύ των καταβοθρών και των πηγών. Πολλά μονοπάτια μπορούν να δημιουργηθούν, έτσι ένα από αυτά διαλέγεται με την μέθοδο της ενίσχυσης (reinforcement). Η καταβόθρα στέλνει πάλι το αρχικό μήνυμα ενδιαφέροντος μέσα από το επιλεγμένο μονοπάτι που έχει την μικρότερη χρονική διάρκεια έτσι ενημερώνει την πηγή να στέλνει πακέτα δεδομένων πιο συχνά. Στην Εικόνα 9 βλέπουμε την διαδικασία του πρωτοκόλλου περιληπτικά.



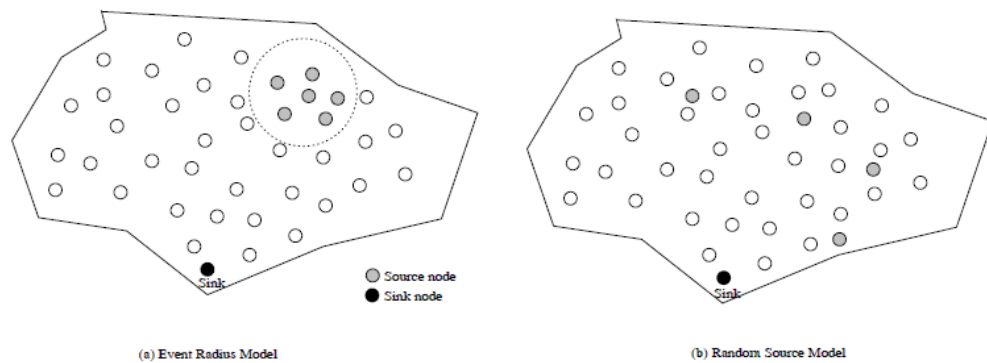
Εικόνα 9. Το πρωτόκολλο της directed diffusion. Στο (a) βλέπουμε την φάση της διάδοσης του ενδιαφέροντος. Στο (b) βλέπουμε την εγκαθίδρυση των αρχικών κλιμακώσεων και τέλος στο (c) βλέπουμε την μεταβίβαση των δεδομένων διαμέσου του ενισχυμένου μονοπατιού.

Η εναλλαγή μονοπατιών είναι δυνατή στο πρωτόκολλο αυτό. Όταν ένα μονοπάτι μεταξύ της πηγής και της καταβόθρας αποτύχει τότε ένα νέο ή ένα εναλλακτικό μονοπάτι πρέπει να καθοριστεί. Για αυτό το πρωτόκολλο επανεκκινεί την διαδικασία της ενίσχυσης ψάχνοντας άλλα μονοπάτια που στέλνουν δεδομένα με μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης. Υπάρχει όμως επιπλέον φόρτος κρατώντας αυτά τα μονοπάτια εν ζωή χρησιμοποιώντας μικρούς ρυθμούς μετάδοσης οπότε και θα χρησιμοποιηθεί επιπλέον ενέργεια αλλά σε περίπτωση αποτυχίας ενός μονοπατιού σίγουρα θα σωθεί περισσότερη ενέργεια.

Όλοι οι κόμβοι είναι στο πρωτόκολλο αυτό είναι application-aware έτσι έχουμε την εξοικονόμηση ενέργειας διαλέγοντας εμπειρικά τα καλύτερα μονοπάτια και αποθηκεύοντας και επεξεργάζοντας τα δεδομένα στο δίκτυο. Η προσωρινή αποθήκευση μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα, την ευρωστία και την επεκτασιμότητα των συντεταγμένων μεταξύ των κόμβων κάτι που είναι η ουσία του πρωτοκόλλου. Άλλη χρήση του πρωτοκόλλου είναι να διαδίδει αυθόρμητα ένα σημαντικό γεγονός σε μερικούς τομείς του δικτύου.

Αναφέραμε πως οι κόμβοι σε αυτό το πρωτόκολλο κάνουν συνάθροιση δεδομένων. Η απόδοση των μεθόδων συνάθροισης που χρησιμοποιούνται στην directed diffusion, επηρεάζονται από ένα αριθμό παραγόντων όπου περιλαμβάνονται οι θέσεις των κόμβων πηγών στο δίκτυο, ο αριθμός των πηγών και η τοπολογία επικοινωνίας του δικτύου. Για την διερεύνηση των παραγόντων αναπτύχθηκαν δυο μοντέλα τοποθεσίας της πηγής. Αυτά ονομάζονται (ER) και τυχαίων πηγών (RS). Στο ER μοντέλο ένα μόνο σημείο καθορίζεται σαν τη

τοποθεσία ενός συμβάντος. Αυτό ίσως αντιστοιχεί σε ένα όχημα ή κάποιο άλλο φαινόμενο που ανιχνεύεται από τους κόμβους. Όλοι οι κόμβοι σε μια απόσταση x (η οποία ονομάζεται περιοχή ανίχνευσης) από αυτό το συμβάν που δεν είναι σταθμοί βάσης θεωρούνται πηγές δεδομένων. Ο μέσος αριθμός πηγών είναι περίπου $\pi * x^{2n}$ σε ένα δίκτυο με n κόμβους. Στο RS μοντέλο k από τους κόμβους που δεν είναι σταθμοί βάσης επιλέγονται τυχαία σαν πηγές. Σε αντίθεση με το ER μοντέλο, οι πηγές δεν είναι απαραίτητα ομαδοποιημένες. Και στα δυο μοντέλα και για κάποιο συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, ένας μεγαλύτερος αριθμός πηγών μπορεί να συνδεθεί στον σταθμό βάσης. Όμως κάθε μία αποδίδει καλά ανάλογα με την εφαρμογή.



Εικόνα 10. Τα δύο μοντέλα τοποθέτησης. Στο (a) το ER μοντέλο και στο (b) το RS μοντέλο.

Το πρωτόκολλο της directed diffusion διαφέρει από το SPIN στον μηχανισμό επερωτήσεων κατά απαίτηση που διαθέτει. Στην direct diffusion η καταβόθρα επερωτά τους κόμβους εάν συγκεκριμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Στο SPIN οι κόμβοι δημοσιεύουν τα την διαθεσιμότητα των δεδομένων επιτρέποντας στους ενδιαφερόμενους κόμβους να ζητούν αυτά τα δεδομένα.

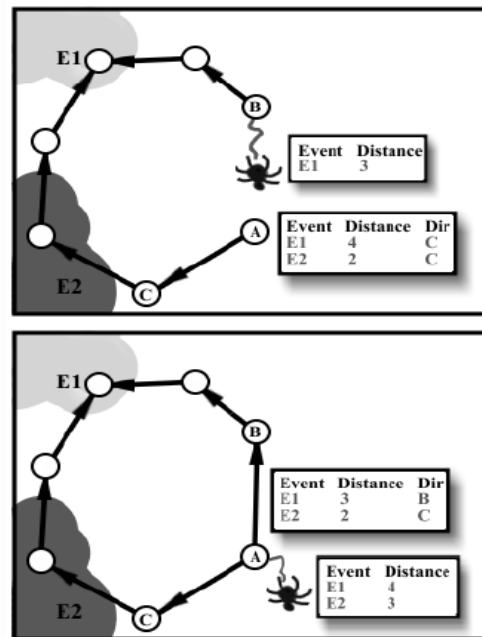
Το πρωτόκολλο αυτό έχει πολλά πλεονεκτήματα. Αφού είναι δεδομενοκεντρικό όλες οι επικοινωνίες γίνονται γείτονα με γείτονα οπότε δεν χρειάζεται μηχανισμός για την διευθυνσιοδότηση των κόμβων. Κάθε κόμβος μπορεί να συναθροίσει τα δεδομένα και να τα αποθηκεύσει προσωρινά στην μνήμη του. Η αποθήκευση αυτή είναι μεγάλο πλεονέκτημα όσο αναφορά

ζητήματα αποδοτικότητας ενέργειας και καθυστέρησης. Επιπλέον είναι εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικό αφού λειτουργεί κατά απαίτηση και δεν χρειάζεται να διατηρεί την καθολική τοπολογία του δικτύου.

3.1.4 Rumor Routing

Το πρωτόκολλο rumor routing [38] είναι μια παραλλαγή του directed diffusion και κυρίως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η γεωγραφική δρομολόγηση δεν είναι εφικτή. Γενικά, ο directed diffusion χρησιμοποιεί πλημμύρα για να διαδώσει την αίτηση σε ολόκληρο το δίκτυο όταν δεν υπάρχει γεωγραφικό κριτήριο για να διαδώσει τα αιτήματα. Όμως σε μερικές περιπτώσεις οι κόμβοι ζητούν μόνο λίγα δεδομένα οπότε η μέθοδος της πλημμύρας δεν είναι απαραίτητη. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να πλημμυρίσουμε τα γεγονότα (events) εάν ο αριθμός τους είναι μικρός και ο αριθμός των αιτήσεων μεγάλος. Η κύρια ιδέα είναι να κατευθύνουμε τα αιτήματα προς τους κόμβους που έχουν ανιχνεύσει ένα συγκεκριμένο γεγονός παρά να πλημμυρίσουμε ολόκληρο το δίκτυο για να λάβουμε πληροφορία για το συγκεκριμένο συμβάν. Για να πλημμυρίσει λοιπόν αυτά τα γεγονότα το πρωτόκολλο δημιουργεί πακέτα μεγάλης διάρκειας ζωής που ονομάζονται πράκτορες (agents). Όταν ένας κόμβος ανιχνεύσει ένα γεγονός προσθέτει το γεγονός στον τοπικό του πίνακα που ονομάζεται πίνακας συμβάντων (events table) και παράγει έναν πράκτορα. Οι πράκτορες κινούνται μέσα στο δίκτυο για να διαδώσουν την πληροφορία σχετικά με ένα τοπικό γεγονός σε απομακρυσμένους κόμβους. Όταν ένας κόμβος παράγει μια αίτηση για ένα γεγονός οι κόμβοι που ξέρουν τη διαδρομή απαντούν στην αίτηση επιθεωρώντας των πίνακα συμβάντων τους. Έτσι δεν είναι αναγκαίο να πλημμυρίσουμε όλο το δίκτυο μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος επικοινωνίας. Από την άλλη το πρωτόκολλο αυτό διατηρεί μόνο ένα μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού, σε αντίθεση βέβαια με το πρωτόκολλο directed diffusion, όπου τα δεδομένα μπορούν να δρομολογηθούν μέσω πολλαπλών μονοπατιών σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα πως ένας πράκτορας κινείται μέσα στο δίκτυο και πως ενημερώνει τους πίνακες γεγονότων.



Εικόνα 11. Διαδικασία ενημέρωσης πινάκων δρομολόγησης από τον πράκτορα.

Ένας πράκτορας φεύγει από τον κόμβο B γνωρίζοντας πως η απόστασή του από το γεγονός E1 είναι 3. Ο κόμβος A έχει ήδη έναν πίνακα συμβάντων με πληροφορίες για τα δυο γεγονότα E1 και E2. Όταν ο πράκτορας φτάσει στον κόμβο A ενημερώνει τον πίνακα του A με τα νέα δεδομένα και αφού η απόσταση προς το E1 είναι μικρότερη ο A την κρατάει σαν βέλτιστη διαδρομή. Στην συνέχεια ο πράκτορας φεύγει από το A έχοντας πλέον γνώση των αποστάσεων και από τα δυο συμβάντα.

Τα πειράματα έχουν δείξει πως το rumor routing είναι αποδοτικότερο ενεργειακά σε σχέση με το flooding και επίσης μπορεί να διαχειριστεί καλά ενδεχόμενη αποτυχία των κόμβων. Όμως το πρωτόκολλο αποδίδει καλά μόνο όταν ο αριθμός των συμβάντων είναι μικρός. Για μεγάλο αριθμό συμβάντων το κόστος για την διατήρηση των πρακτόρων και των πινάκων γεγονότων σε κάθε κόμβο είναι μεγάλο και έτσι ο αλγόριθμος δεν είναι εφικτός.

3.1.5 Gradient-Based Routing

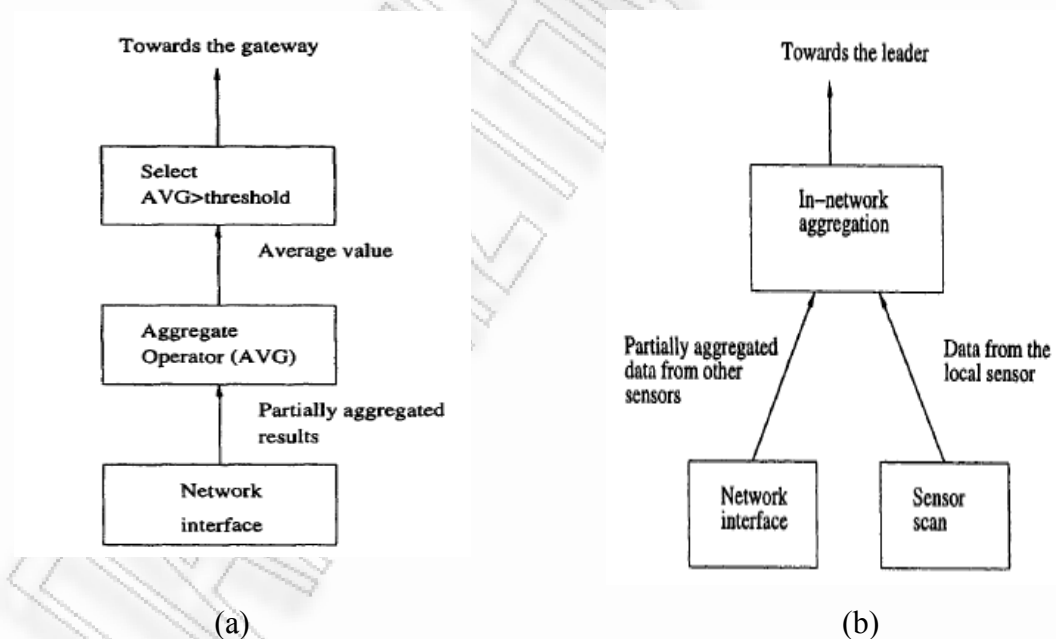
Το πρωτόκολλο αυτό [39] είναι μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου directed diffusion. Η κύρια ιδέα εδώ είναι η απομνημόνευση των αλμάτων όταν το ενδιαφέρον (interest) διαδίδεται σε ολόκληρο το δίκτυο. Κάθε κόμβος μπορεί να υπολογίσει μια παράμετρο που λέγεται ύψος (height) του κόμβου η οποία δείχνει τον μικρότερο αριθμό αλμάτων μέχρι τον σταθμό βάσης. Η διαφορά του ύψους μεταξύ δυο κόμβων καλείται κλιμάκωση (gradient) στο συγκεκριμένο σύνδεσμο. Το GBR χρησιμοποιεί και αυτό συνάθροιση των δεδομένων αλλά και διασπορά της κίνησης(traffic spreading) έτσι ώστε κατανείμει ομοιόμορφα την κίνηση στο δίκτυο. Όταν πολλαπλά μονοπάτια περνούν από ένα κόμβο ο οποίος δρα σαν κόμβος αναμεταδότης, ο κόμβος αυτός μπορεί να συνδυάσει δεδομένα σύμφωνα με μια συγκεκριμένη λειτουργία. Έχουν συζητηθεί τρεις διαφορετικές τεχνικές διάδοσης των δεδομένων, το τυχαίο σχήμα (Stochastic Scheme), όπου ένας κόμβος διαλέγει μια κλιμάκωση(gradient) τυχαία όταν υπάρχουν δυο η περισσότερα επόμενα άλματα που έχουν την ίδια κλιμάκωση, το ενεργειακό σχήμα (Energy-based Scheme), όπου ένας κόμβος αυξάνει το ύψος του όταν η ενέργεια πέσει κάτω από μια τιμή κατωφλίου και έτσι οι υπόλοιποι κόμβοι δεν τον προτιμούν για να του στείλουν τα δεδομένα και τέλος το σχήμα ροής δεδομένων(stream-based Scheme), όπου οι νέες ροές (streams) δεν δρομολογούνται μέσω κόμβων οι οποίοι ανήκουν ήδη στο μονοπάτι των υπαρχόντων ροών.

Ο κύριος σκοπός αυτών των σχημάτων είναι να επιτύχουν μια ισορροπημένη κατανομή της κίνησης στο δίκτυο, έτσι ώστε να αυξήσουν την ζωή του δικτύου. Αποτελέσματα προσομοιώσεων έχουν δείξει πως και το πρωτόκολλο αυτό αποδίδει καλύτερα από το directed diffusion όσο αναφορά την ολική ενέργεια που χρησιμοποιείται στην επικοινωνία των κόμβων.

3.1.6 COUGAR

Το πρωτόκολλο cougar [40] είναι ένα δεδομενοκεντρικό πρωτόκολλο που θεωρεί το δίκτυο σαν ένα τεράστιο καταναμημένο σύστημα βάσης δεδομένων. Η κύρια ιδέα είναι η χρησιμοποίηση δηλωτικών αιτήσεων (declarative queries) ώστε να αφαιρεθεί η διαδικασία της επεξεργασίας της αίτησης από τις λειτουργίες του επιπέδου του δικτύου και η χρησιμοποίηση της συνάθροισης των δεδομένων για την εξοικονόμηση ενέργειας. Η αφαίρεση υποστηρίζεται πλέον από ένα νέο επίπεδο αιτήσεων μεταξύ του επιπέδου δικτύου και του επιπέδου εφαρμογών.

Το cougar προτείνει μια αρχιτεκτονική για το δίκτυο βάσεις δεδομένων όπου οι κόμβοι επιλέγουν έναν αρχηγό κόμβο (leader node) για να πραγματοποιήσει την συνάθροιση και να διαβιβάσει τα δεδομένα στον προορισμό. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την αρχιτεκτονική αυτή.



Εικόνα 12. (a) Σχέδιο αίτησης σε ένα αρχηγό κόμβο και (b) σε έναν μη αρχηγό κόμβο.

Οι μη αρχηγοί κόμβοι έχουν έναν αισθητήρα ανίχνευσης που διαβάζει τιμές από τους κόμβους περιοδικά και τις στέλνει στον αρχηγό κόμβο. Επιπλέον το

σχέδιό τους περιλαμβάνει έναν τελεστή συνάθροισης για την συνάθροιση των δεδομένων που έρχονται από άλλους κόμβους. Οι αρχηγοί κόμβοι έχουν ένα AVG τελεστή για να υπολογίζουν την μέση τιμή από όλους τους αισθητήρες στον τελευταίο γύρο της αίτησης και έναν τελεστή επιλογής(select) που ελέγχει αν το αποτέλεσμα είναι πάνω από την τιμή του κατωφλίου.

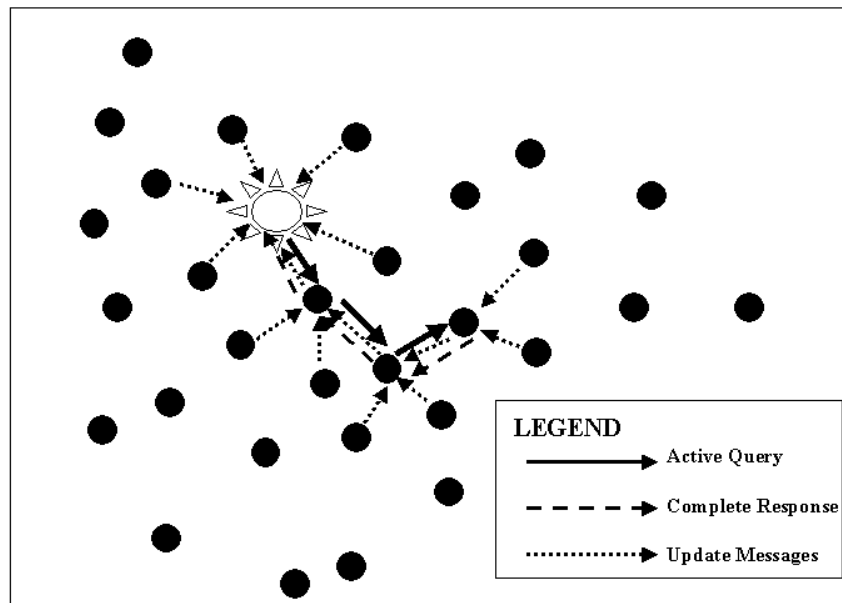
Η πύλη (gateway) είναι υπεύθυνη να παράγει ένα σχέδιο αίτησης(query plan), το οποίο καθορίζει την απαραίτητη πληροφορία για τη ροή δεδομένων και τους ενδοδικτυακούς υπολογισμούς για την επερχόμενη αίτηση και να το στείλει στους σχετικούς κόμβους. Το σχέδιο αίτησης περιγράφει πώς να επιλεγεί ο αρχηγός για την αίτηση. Η αρχιτεκτονική παρέχει ενδοδικτυακή υπολογιστική ικανότητα για όλους τους κόμβους. Μια τέτοια δυνατότητα διασφαλίζει την αποδοτική χρήση της ενέργειας ειδικά όταν ο αριθμός των κόμβων που παράγουν και στέλνουν δεδομένα είναι μεγάλος.

Αν και το cougar έχει το θετικό ότι οι αιτήσεις προς τους κόμβους είναι ανεξάρτητες από το επίπεδο δικτύου έχει και κάποια μειονεκτήματα. Αρχικά η εισαγωγή του επιπλέον επιπέδου αιτήσεων σε κάθε κόμβο έχει ως αποτέλεσμα επιπλέον φόρτο στους κόμβους άρα επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας και τον αποθηκευτικό τους χώρο. Δεύτερος ο ενδοδικτυακός υπολογισμός των δεδομένων από πολλούς κόμβους απαιτεί συγχρονισμό. Τέλος οι αρχηγοί κόμβοι πρέπει να διατηρούνται δυναμικά για να αποφύγουμε προβλήματα όταν κάποιος από αυτούς βγει εκτός λειτουργίας.

3.1.7 Acquire

Όπως και το Cougar, το πρωτόκολλο acquire [41] θεωρεί το δίκτυο σαν μια κατανεμημένη βάση όπου πολύπλοκες αιτήσεις μπορούν να διαιρεθούν σε υπο-αιτήσεις. Η λειτουργία του είναι η εξής. Ο σταθμός βάσης στέλνει μια αίτηση που προωθείται από κάθε κόμβο που τη λαμβάνει. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας κάθε κόμβος προσπαθεί εν μέρει να απαντήσει στην αίτηση χρησιμοποιώντας της υπάρχουσες αποθηκευμένες πληροφορίες που έχει στη μνήμη του και στη συνέχεια να προωθήσει την αίτηση αυτή σε άλλο κόμβο. Αν η αποθηκευμένη πληροφορία δεν είναι ενημερωμένη οι κόμβοι λαμβάνουν

επιπλέον πληροφορία από τους γείτονές τους σε ένα εύρος d βημάτων(hops). Όταν μια αίτηση απαντηθεί τότε στέλνεται πίσω στον σταθμό βάσης είτε μέσω του αντίστροφου μονοπατιού είτε μέσω του ελάχιστου μονοπατιού. Ως εκ τούτου το acquire μπορεί να ανταπεξέλθει σε πολύπλοκες αιτήσεις επιτρέποντας σε πολλούς κόμβους να στέλνουν απαντήσεις. Να σημειωθεί ότι το πρωτόκολλο του directed diffusion δεν χρησιμοποιείται για πολύπλοκες αιτήσεις λόγω ενεργειακών περιορισμών αφού και αυτό χρησιμοποιεί μηχανισμό βασισμένο στην πλημμύρα για συνεχόμενες και συναθροισμένες αιτήσεις. Όμως το acquire μπορεί να παρέχει ένα αποδοτικό μηχανισμό αιτήσεων προσαρμόζοντας κάθε φορά την παράμετρο d . Όταν το d είναι ίσο με την διάμετρο του δικτύου το acquire συμπεριφέρεται σαν το flooding. Όμως η αίτηση πρέπει να διανύσει στο δίκτυο μικρότερη διαδρομή εάν το d είναι μικρό. Ένα σχηματικό παράδειγμα του acquire βλέπουμε στην παρακάτω Εικόνα 13.



Εικόνα 13. Το πρωτόκολλο acquire με $d=1$.

Σε κάθε βήμα της διάδοσης της αίτησης στο δίκτυο ο κόμβος που επεξεργάζεται την αίτηση συλλέγει πληροφορία από τους γείτονές τους σε απόσταση ένα για να απαντήσει μερικώς την αίτηση. Όσο μεγαλύτερο το d τόσο πιο λίγα βήματα θα χρειαστεί να διανύσει η αίτηση στο δίκτυο για να απαντηθεί πλήρως αλλά αυτό θα αυξήσει το κόστος από τις συνεχείς ενημερώσεις. Έτσι

πρέπει να βρεθεί το βέλτιστο d πάντα. Αν το d γίνει πολύ μεγάλο τότε το acquire θα αρχίσει να μοιάζει με τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν πλημμύρα.

Το acquire έχει συγκριθεί με τεχνικές όπως η τεχνική βασισμένη στην πλημμύρα (FBQ) και η τεχνική επεκτεινόμενου δακτυλίου (ERS). Στην πρώτη τεχνική ο κόμβος στέλνει μια αίτηση σε όλους τους κόμβους και αυτοί που έχουν παραπλήσιες τιμές απαντάνε στην αίτηση, ενώ η δεύτερη χωρίζεται σε φάσεις. Στην φάση ένα ο κόμβος στέλνει την αίτηση στους γείτονες του που απέχουν απόσταση ίση με ένα βήμα από αυτός. Αν η αίτηση δεν απαντηθεί ικανοποιητικά τότε στην φάση δύο στέλνει την αίτηση στους κόμβους που απέχουν δυο βήματα από αυτόν κοκ.

Βρέθηκε πως το acquire υπερτερεί των τεχνικών αυτών για πολύπλοκες αιτήσεις ακόμα και όταν οι κόμβοι των άλλων τεχνικών έχουν ενημερωμένες πληροφορίες. Συγκεκριμένα το βέλτιστο acquire, δηλαδή αυτό με το βέλτιστο d , αποδίδει καλύτερα από πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τεχνικές πλημμύρας όπως το directed diffusion. Επίσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας περισσότερο από 60% όταν συγκρίνεται με την τεχνική ERS. Το d αποδείχθηκε πως εξαρτάται από τον παράγοντα απόσβεσης (amortization factor) ο οποίος ουσιαστικά είναι ένας παράγοντας που μας δείχνει πόσο συχνά συμβαίνουν ενημερώσεις των δεδομένων στους κόμβους και είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό των μεταβλητών παρατήρησης του συστήματος του μήκους των υπο-αιτήσεων και του συνολικού αριθμού των κόμβων του δικτύου.

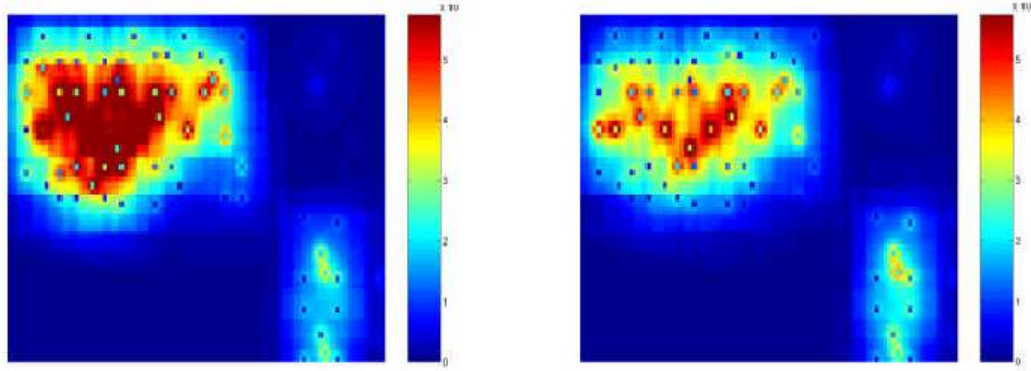
3.1.8 Energy Aware Routing

Σκοπός αυτού του πρωτοκόλλου [42] είναι να αυξήσει την διάρκεια ζωής του δικτύου. Αν και είναι παρόμοιο με το directed diffusion διαφέρει από αυτό στο ότι διατηρεί ένα σύνολο από μονοπάτια αντί να διατηρεί ένα βέλτιστο μονοπάτι. Αυτά τα μονοπάτια διατηρούνται και επιλέγονται με βάση μια συγκεκριμένη πιθανότητα. Η τιμή της πιθανότητας αυτής εξαρτάται το πόσο μικρή κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιτύχει αυτό το μονοπάτι. Διαλέγοντας μονοπάτια σε

διαφορετικές χρονικές στιγμές η ενέργεια κάθε μονοπατιού δεν θα μειωθεί γρήγορα. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του δικτύου αφού η ενέργεια κατανέμεται ισόποσα μεταξύ των κόμβων. Η βιωσιμότητα του δικτύου είναι η σημαντικότερη μετρική σε αυτό το πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο υποθέτει πως κάθε κόμβος είναι διευθυνσιοδοτημένος διαμέσου μιας κλάσης (class-based) διευθυνσιοδότησης. Για παράδειγμα ένας τύπος διευθυνσιοδότησης θα ήταν ο εξής: <Τοποθεσία, τύπος κόμβου, υποτύπος (sub-type) κόμβου> όπου τοποθεσία πληροφορίες για τον γεωγραφικό τομέα που ανήκει ο κόμβος, τύπος κόμβου ο τύπος του κόμβου (πχ αισθητήρας, ελεγκτής, ενεργοποιητής) και υπό-τύπος κόμβου περιλαμβάνει τον σκοπό του κόμβου (πχ αισθητήρας θερμοκρασίας, αισθητήρας υγρασίας, κοκ).

Το πρωτόκολλο αρχίζει μια σύνδεση μέσω τοπικής πλημμύρας η οποία χρησιμοποιείται για να ανακαλυφθούν όλες οι διαδρομές από την πηγή στον προορισμό και τα κόστη της καθεμίας και εν συνεχεία να δημιουργηθούν οι πίνακες δρομολόγησης. Τα μονοπάτια με μεγάλα κόστη απορρίπτονται και ένας πίνακας προώθησης δημιουργείται διαλέγοντας τους κόμβους ανάλογα με τα κόστη τους. Μετά οι πίνακες προώθησης χρησιμοποιούνται για να στείλουν δεδομένα στον προορισμό με πιθανότητα αντιστρόφως ανάλογη του κόστους του κόμβου. Η τοπική πλημμύρα γίνεται από τον προορισμό για να διατηρηθούν εν ζωή τα μονοπάτια. Συγκριτικά με το directed diffusion αυτό το πρωτόκολλο παρέχει μια βελτίωση κατά 21.5% σε εξοικονόμηση ενέργειας και 44% βελτίωση στην συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Όμως αυτή η προσέγγιση χρειάζεται συλλογή πληροφοριών για τις τοποθεσίες των κόμβων και δημιουργία του μηχανισμού διευθυνσιοδότησης των κόμβων κάτι το οποίο περιπλέκει την δημιουργία της δρομολόγησης σε σχέση με το directed diffusion.

Στην εικόνα 14 βλέπουμε την καταναλισκόμενη ενέργεια στο EAR σε σχέση με το directed diffusion.



(a)

(b)

Εικόνα 14. Κατανάλωση ενέργειας (a) στο directed diffusion και (b) στο EAR.

3.1.9 CADR και IDSQ

Η κύρια ιδέα στο πρωτόκολλο cadr [43] είναι να γίνονται επερωτήσεις στους κόμβους και να δρομολογούνται τα πακέτα έτσι ώστε η λήψη πληροφορίας να μεγιστοποιείται ενώ η καθυστέρηση και το εύρος ζώνης της επικοινωνίας να ελαχιστοποιείται. Το cadr διαδίδει την πληροφορία χρησιμοποιώντας ένα σύνολο κριτηρίων για να επιλέξει ποιοι κόμβοι μπορούν να λάβουν τα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται ενεργοποιώντας μόνο τους κόμβους που είναι κοντά σε ένα συγκεκριμένο γεγονός και ρυθμίζοντας δυναμικά της διαδρομές που θα ακολουθήσουν τα δεδομένα. Οι κύριες διαφορές από το directed diffusion είναι ο παράγοντας της λήψης πληροφορίας μαζί με το κόστος επικοινωνίας. Στο cadr κάθε κόμβος εκτιμά ένα κόστος ένα κόστος και δρομολογεί τα δεδομένα βασισμένος στο κόστος αυτό και στις απαιτήσεις του τελικού χρήστη. Η θεωρία εκτίμησης χρησιμοποιήθηκε για να αναπτυχθεί το μοντέλο μέτρησης πληροφορίας. Στο πρωτόκολλο IDSQ ο κόμβος που ζητά πληροφορία μπορεί να καθορίσει ποιος κόμβος μπορεί να του παρέχει την πιο χρήσιμη πληροφορία με το πρόσθετο πλεονέκτημα πως μπορεί να ισορροπήσει το ενεργειακό κόστος. Όμως το IDSQ δεν καθορίζει συγκεκριμένα πως η αίτηση και η πληροφορία δρομολογούνται στους κόμβους και στον σταθμό βάσης. Έτσι το IDSQ μπορεί να θεωρηθεί σαν μια συμπληρωματική διαδικασία βελτιστοποίησης.

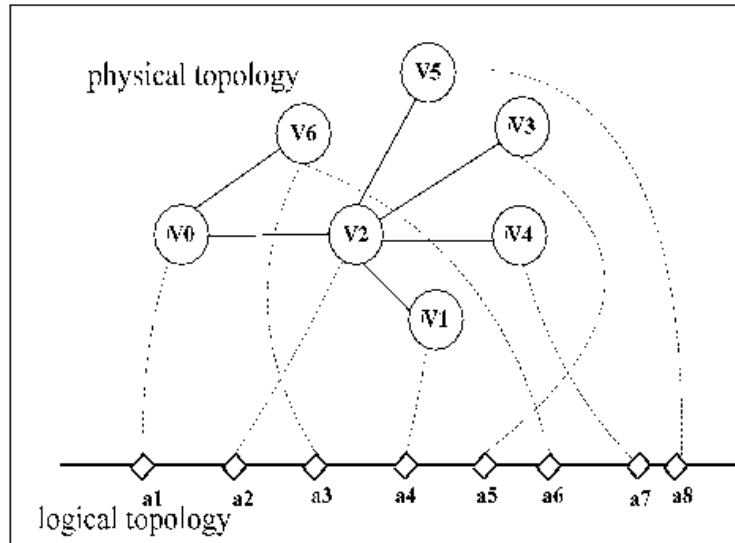
Πειράματα προσομοίωσης έχουν δείξει πως αυτές οι τεχνικές δρομολόγησης είναι πιο αποδοτικές ενεργητικά από την directed diffusion όπου οι αιτήσεις διαδίδονται ισοτροπικά και φτάνουν πρώτα στους κοντινότερους γείτονες.

3.1.10 R.M.U.H.V

Στο πρωτόκολλο αυτό [44] προτείνεται ένα νέο σχήμα ονοματοδοσίας το οποίο προσδίδει σε κάθε κόμβο ένα αναγνωριστικό. Τα δεδομένα περιγράφονται σαν ζεύγη χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα ένας κόμβος στο δωμάτιο 621 μιας βιβλιοθήκης που μετράει την θερμοκρασία περιγράφεται όπως παρακάτω:

```
ATTRIBUTE {  
    Service = temperature  
    Room= R621  
    Building=library  
}
```

Ένας κόμβος μπορεί να έχει πολλές περιγραφές αλλά μια περιγραφή αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κόμβο. Το ίδιο σχήμα ονοματοδοσίας χρησιμοποιείται και για την ονοματοδοσία των αιτήσεων. Αφού ονομαστούν οι αιτήσεις και οι κόμβοι τότε χρησιμοποιείται ένας πίνακας κατακερματισμού (hash table) για να παράγει μια τιμή κατακερματισμού (hash value) και αυτή η τιμή χρησιμοποιείται για να αναγνωρίζεται ο κάθε κόμβος ή αίτηση. Σύμφωνα με αυτό το σχήμα ονοματοδοσίας μπορούμε να αντιστοιχήσουμε μια πολύπλοκη φυσική τοπολογία ενός δικτύου σε μια λογική μονοδιάστατη τοπολογία. Στην Εικόνα 15 βλέπουμε μια τέτοια αντιστοιχία.



Εικόνα 15. Αντιστοίχιση φυσικής τοπολογίας σε λογική με βάση το σχήμα ονοματοδοσίας που προτείνεται.

Κάθε κόμβος έχει έναν πίνακα δρομολόγησης, έναν πίνακα λογικών γειτόνων και έναν πίνακα φυσικών γειτόνων και σύμφωνα με αυτούς η πληροφορία δρομολογείται από την πηγή στον προορισμό. Στις εικόνες 16, 17 και 18 βλέπουμε την δομή αυτών των πινάκων.

Leader	Path	Cost
--------	------	------

Εικόνα 16. Πίνακας δρομολόγησης.

Η μεταβλητή Leader δείχνει τους κόμβους που η τιμή κατακερματισμού τους απέχει το ελάχιστο από την τιμή του τοπικού κόμβου. Η μεταβλητή path δείχνει το μονοπάτι από τον τοπικό κόμβο στον leader και η cost το κόστος αυτής της μετάβασης.

Logic neighbor	Path	Cost
----------------	------	------

Εικόνα 17. Πίνακας λογικού γείτονα

Physical neighbor	Path	Cost
-------------------	------	------

Εικόνα 18. Πίνακας φυσικού γείτονα

Με την ίδια λογική η πρώτη μεταβλητή δείχνει τους λογικούς/φυσικούς γείτονες που η τιμή κατακερματισμού τους είναι η πιο κοντά στην τιμή του τοπικού κόμβου η δεύτερη μεταβλητή δείχνει την διαδρομή και η τρίτη το κόστος.

Από προσομοιώσεις προκύπτει πως το πρωτόκολλο αυτό υπερτερεί έναντι του flooding, του directed diffusion και του rumor routing τόσο σε ζητήματα ενέργειας όσο και σε ζητήματα κόστους δρομολόγησης ειδικά όταν οι κόμβοι στο δίκτυο αυξάνονται.

3.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Η ομαδοποίηση είναι ένα αποδοτικό ενεργειακά πρωτόκολλο επικοινωνίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους κόμβους για να αναφέρουν τα δεδομένα τους στην καταβόθρα. Θα δούμε παρακάτω μερικά πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση την αρχή της ομαδοποίησης. Το δίκτυο αποτελείται από ομάδες κόμβων. Κάθε ομάδα διαχειρίζεται από ένα ειδικό κόμβο που ονομάζεται κεφαλή ο οποίος είναι υπεύθυνος για τις μεταδόσεις όλων των κόμβων που ανήκουν στην ομάδα του.

3.2.1 LEACH

Το πρωτόκολλο LEACH [45] είναι από τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα ιεραρχικής δρομολόγησης. Η λειτουργία του βασίζεται στην δημιουργία ομάδων (clusters) αισθητήριων κόμβων, που βασίζονται στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος και στην χρήση των επικεφαλών των ομάδων σαν δρομολογητών μεταξύ των κόμβων και του κόμβου καταβόθρα (sink). Χρησιμοποιεί τυχαιότητα για να κατανείμει τον φόρτο ενέργειας στους κόμβους του δικτύου.

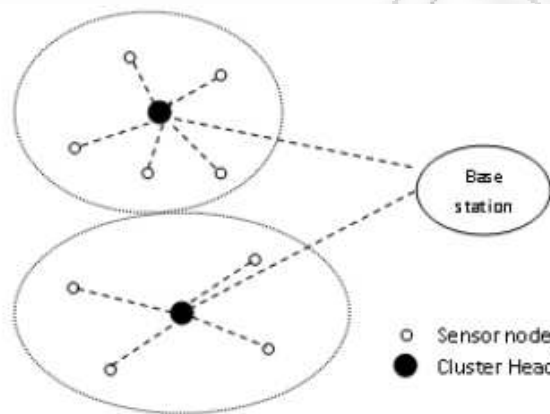
Σύμφωνα με το πρωτόκολλο ο σταθμός βάσης είναι σταθερός και τοποθετημένος μακριά από τους κόμβους και οι κόμβοι είναι περιορισμένοι ενεργειακά. Εδώ ένας κόμβος ονομαζόμενος κόμβος κεφαλή (cluster-head) δρα σαν τοπικός σταθμός βάσης. Το πρωτόκολλο τυχαία εναλλάσσει τις κεφαλές που έχουν υψηλή ενέργεια έτσι ώστε οι δραστηριότητες να μοιράζονται ισάξια στους κόμβους και έτσι η ενέργεια που θα σπαταλιέται να είναι ίση για κάθε κόμβο. Το leach πραγματοποιεί επίσης και συγχώνευση δεδομένων, για παράδειγμα συμπίεση δεδομένων όταν στέλνονται από τις ομάδες (clusters) στο σταθμό βάσης έτσι μειώνει την ενέργεια κατά που καταναλώνεται και μεγαλώνει τον χρόνο ζωής του δικτύου. Το Leach χωρίζει την διαδικασία σε επιμέρους γύρους κάθε γύρος αποτελείται από δυο φάσεις, την φάση εγκατάστασης(setup phase) και την σταθερή φάση (steady phase).

Στην φάση εγκατάστασης δημιουργούνται οι ομάδες και επιλέγεται ένας κόμβος κεφαλή σε κάθε ομάδα. Ο κόμβος κεφαλή επιλέγεται μια συγκεκριμένη στιγμή με μια συγκεκριμένη πιθανότητα. Έχει βρεθεί πως ο βέλτιστος αριθμός κεφαλών είναι περίπου 5% του συνόλου των κόμβων. Κάθε κόμβος παράγει ένα αριθμό από το 0 μέχρι το 1. Εάν ο αριθμός είναι μικρότερος από το κατώφλι του κόμβου $T(n)$ τότε ο συγκεκριμένος κόμβος γίνεται κόμβος κεφαλή. Το κατώφλι $T(n)$ δίνεται από την παρακάτω έκφραση.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})}, n \in G \\ 0, \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου p είναι το ποσοστό των κόμβων που είναι κεφαλές, r είναι ο τρέχον γύρος και G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν ακόμα γίνει κεφαλές στους προηγούμενους $1/p$ γύρους.

Ύστερα, ο επικεφαλής της ομάδας ορίζει τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να στέλνουν δεδομένα, βασιζόμενος σε μια προσέγγιση TDMA. Ο τρόπος ομαδοποίησης στο LEACH φαίνεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19. Ομαδοποίηση στο LEACH

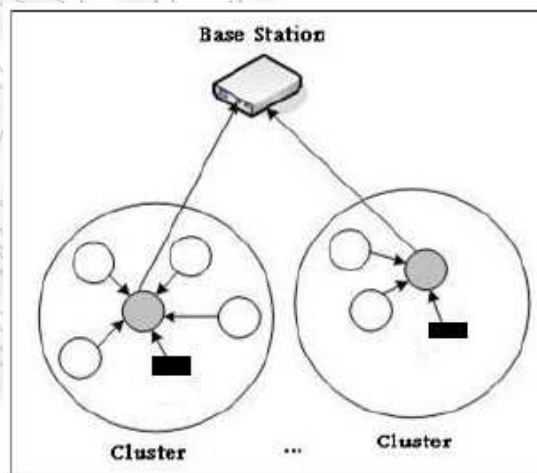
Στην σταθερή φάση τώρα, οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα στον δικό τους κόμβο-κεφαλή κατά την διάρκεια του χρόνου που τους παρέχεται μέσω του TDMA. Όταν η κεφαλή λαμβάνει δεδομένα από την ομάδα της τα συναθροίζει και τα στέλνει συμπιεσμένα στον σταθμό βάσης. Αφού θεωρούμε πως ο σταθμός βάσης είναι μακριά από την κεφαλή χρειάζεται αρκετή ενέργεια για να στείλει τα δεδομένα. Αυτό επηρεάζει μόνο τους κόμβους που είναι κεφαλές και για αυτό η επιλογή ενός κόμβου για να παίξει τον ρόλο της κεφαλής εξαρτάται από την εναπομένονσα ενέργεια που έχει ο κόμβος αυτός.

Πειραματικά έχουν βρεθεί πως το LEACH επιτυγχάνει ελάττωση της ενέργειας κατά τη διάδοση κατά 7 φορές σε σχέση με την απευθείας επικοινωνία (direct communication) και κατά 4-8 φορές σε σύγκριση με το πρωτόκολλο εκπομπής ελάχιστης κατανάλωσης. Το LEACH χρησιμοποιεί δρομολόγηση ενός βήματος (single-hop) όπου ο κάθε κόμβος μπορεί να εκπέμψει κατευθείαν στον επικεφαλής της ομάδας και στον κόμβο sink. Το τελευταίο αποτελεί και

μειονέκτημα διότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα που εγκαθίστανται σε μεγάλες περιοχές. Ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί και η δυναμική αλλαγή των ομάδων που επιφέρει επιπλέον κατανάλωση ενέργειας λόγω αλλαγής του επικεφαλής, της επιπλέον διαφήμισης (advertisements) κ.α.

3.2.2 V-LEACH

Το πρωτόκολλο v-leach [46] είναι μια βελτίωση του leach. Η διαφορά του από το leach έγκειται στο γεγονός πως ενώ στο leach έχουμε μια κεφαλή, εδώ έχουμε μια κεφαλή και μια υπό-κεφαλή (vice head cluster). Επειδή στο κλασικό leach ο κόμβος κεφαλή δέχεται τα δεδομένα από όλους τους άλλους κόμβους της ομάδας του τα συναθροίζει και τα αποστέλλει είναι λογικό πως θα «πεθάνει» γρήγορα και έτσι η ομάδα ουσιαστικά θα αχρηστευτεί αφού δεν θα έχει κόμβο κεφαλή να στείλει τα δεδομένα στον σταθμό βάσης. Στο v-leach όμως όταν ο κόμβος κεφαλή «πεθάνει» τότε ο κόμβος υπό-κεφαλή θα γίνει κεφαλή έτσι δεν θα χρειάζεται να εκλεχθεί νέος κόμβος κεφαλή κάθε φορά που η κεφαλή θα «πεθαίνει». Αυτό συνολικά επεκτείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου. Σχηματικά το v-leach φαίνεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20. V-LEACH

Οι μετρήσεις που έχουν γίνει αποδεικνύουν πως τα μηνύματα που ανταλλάσσονται με το v-leach είναι λιγότερα από τα αντίστοιχα του κλασικού

leach έτσι συνεπάγεται πως η ενέργεια που απομένει τελικά στο σύστημα με το v-leach είναι περισσότερη.

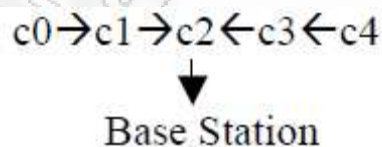
3.2.3 HEED

Το heed [47] επεκτείνει το βασικό σχήμα του Leach χρησιμοποιώντας την υπολειπόμενη ενέργεια και τον βαθμό των κόμβων ή την πυκνότητά τους σαν μετρική για την επιλογή της ομάδας με σκοπό να επιτύχει ισορροπία στην ενέργεια. Λειτουργεί σε δίκτυο πολλαπλών βημάτων (multi-hop) χρησιμοποιώντας μια προσαρμοστική ενέργεια εκπομπής στην ενδοδικτυακή επικοινωνία. Προτάθηκε με τέσσερις στόχους οι οποίοι ονομαστικά είναι i) η διαμήκυνση της ζωής του δικτύου κατανέμοντας την κατανάλωση ενέργειας, ii) ο τερματισμός της διαδικασίας ομαδοποίησης μετά από ορισμένες επαναλήψεις, iii) η ελαχιστοποίηση του ελέγχου προσαύξησης και iv) η παραγωγή καλά κατανεμημένων κεφαλών και πυκνών ομάδων. Στο heed, ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιλέγει κεφαλές περιοδικά σύμφωνα με ένα συνδυασμό δυο παραμέτρων ομαδοποίησης. Η αρχική παράμετρος είναι η υπολειπόμενη ενέργεια κάθε κόμβου και η δεύτερη παράμετρος είναι το εντός της ομάδας κόστος επικοινωνίας σε συνάρτηση με την πυκνότητα της ομάδας ή τον βαθμό του κόμβου (πχ ο αριθμός των γειτόνων).

Η αρχική παράμετρος χρησιμοποιείται για να επιλεγεί με βάση πιθανότητες μια αρχική ομάδα κεφαλών ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται για το σπάσιμο των δεσμών. Το πρωτόκολλο βελτιώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου σε σχέση με το Leach επειδή το Leach επιλέγει τυχαία κεφαλές (άρα και μέγεθος ομάδας), έτσι οδηγεί σε γρηγορότερο «θάνατο» μερικών κόμβων. Στο heed οι κεφαλές είναι κατανεμημένες καλά μέσα στο δίκτυο και έτσι επιτυγχάνεται το ελάχιστο κόστος επικοινωνίας. Όμως η επιλογή ομάδας έγκειται σε ένα υποσύνολο παραγόντων το οποίο μπορεί να επιβάλλει περιορισμούς στο σύστημα.

3.2.4 PEGASIS και Ιεραρχικό PEGASIS

Το *pegasis* [48] είναι μια βελτίωση του *leach*. Αντί να σχηματίζει πολλές ομάδες το *pegasis* σχηματίζει αλυσίδες από κόμβους έτσι ώστε κάθε κόμβος να εκπέμπει και να λαμβάνει προς ένα συγκεκριμένο γείτονα και μόνο ένας κόμβος από αυτή την αλυσίδα επιλέγεται για να μεταδώσει τα δεδομένα στον σταθμό βάσης. Τα συλλεγόμενα δεδομένα μετακινούνται από κόμβο σε κόμβο αφού έχουν υποστεί συναθροίση και τελικά στέλνονται στον σταθμό βάσης. Η κατασκευή της αλυσίδας πραγματοποιείται με άπληστο τρόπο (*greedy way*). Ο αρχηγός, αυτός που μεταδίδει κάθε φορά στον σταθμό βάσης δηλαδή, θα βρίσκεται σε τυχαία θέση στην αλυσίδα, έτσι με αυτή την εναλλαγή αρχηγών σε κάθε διαφορετικό γύρο οι κόμβοι αρχηγοί «πεθαίνουν» σε τυχαία σημεία μέσα στο δίκτυο. Αυτό είναι σημαντικό γιατί κάνει το δίκτυό μας ανθεκτικό στις «αποτυχίες» των κόμβων. Σε κάθε γύρο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια προσέγγιση ενός απλού ελέγχου ένδειξης διάβασης (*token passing approach*) υποκινούμενο από τον αρχηγό για να αρχίσει η μεταφορά των δεδομένων από τις άκρες της αλυσίδας. Το κόστος είναι πολύ μικρό αφού το μέγεθος της ένδειξης (*token*) είναι πολύ μικρό.



Εικόνα 21. Αλυσίδα στο Pegasus πρωτόκολλο

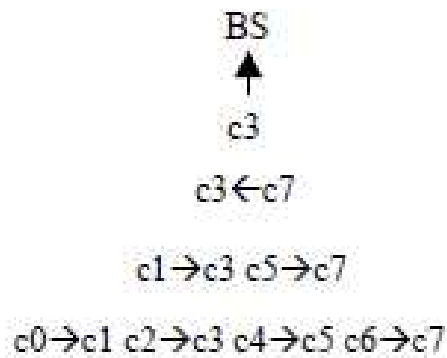
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21 ο κόμβος *c0* μεταβιβάζει τα δεδομένα του στον κόμβο *c1*. Ο *c1* συναθροίζει τα δεδομένα του *c0* μαζί με τα δικά του και τα μεταδίδει στον αρχηγό (*leader*). Αφού ο αρχηγός περάσει την ένδειξη (*token*) στον *c4*, ο *c4* μεταδίδει τα δεδομένα του στον *c3*. Ο *c3* συναθροίζει τα δεδομένα του *c4* μαζί με τα δικά του και τα μεταδίδει στον αρχηγό. Ο *c2* περιμένει μέχρι να λάβει τα δεδομένα και από τους δυο γείτονές του και μετά να τα συναθροίσει τα δικά

του δεδομένα με αυτά των δυο γειτόνων του. Τελικά ο c2 μεταδίδει ένα μήνυμα στον σταθμό βάσης.

Η διαφορά του πρωτοκόλλου αυτού από το Leach είναι ότι χρησιμοποιεί δρομολόγηση πολλών επιπέδων (multi-hop) σχηματίζοντας αλυσίδες και διαλέγοντας μόνο ένα κόμβο να μεταδίδει στον σταθμό βάσης αντί να χρησιμοποιεί πολλούς κόμβους. Το Pegasus έχει αποδειχτεί ότι αποδίδει καλύτερα από το Leach περίπου 100% με 300% για διαφορετικά μεγέθη δικτύου και τοπολογίες. Αυτό το κέρδος στην απόδοση επιτυγχάνεται διαμέσου της εξάλειψης του φόρτου που προκαλείται από το δυναμικό σχηματισμό των ομάδων στο leach και που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού των εκπομπών και των λήψεων χρησιμοποιώντας συνάθροιση δεδομένων. Όμως το pegasus παρουσιάζει υπέρμετρη καθυστέρηση στους απομακρυσμένους κόμβους της αλυσίδας και επιπλέον η χρησιμοποίηση ενός αρχηγού μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση.

Το hierarchical pegasus [49] είναι μια επέκταση του απλού pegasus που στοχεύει στη μείωση της καθυστέρησης που υφίσταται στα πακέτα κατά την διάρκεια της μετάδοσης στον σταθμό βάσης και προτείνει μια λύση στο πρόβλημα συλλογής των δεδομένων χρησιμοποιώντας μια μετρική ενέργειας και καθυστέρησης. Για να μειώσει την καθυστέρηση στο pegasus επιδιώκει την ταυτόχρονη μετάδοση των δεδομένων. Για να αποφευχθούν συγκρούσεις και πιθανές παρεμβολές στο σήμα κατά τις μετάδοσης έχουν μελετηθεί δυο προσεγγίσεις. Η πρώτη ενσωματώνει κωδικοποίηση του σήματος για παράδειγμα CDMA. Η δεύτερη, επιτρέπει μόνο σε χωρικά ανεξάρτητους κόμβους να εκπέμπουν ταυτόχρονα κάθε χρονική στιγμή.

Το πρωτόκολλο που ενσωματώνει το CDMA στους κόμβους, σχηματίζει μια αλυσίδα κόμβων που ουσιαστικά δημιουργεί ένα δέντρο σαν ιεραρχία και κάθε επιλεγμένος κόμβος σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο μεταδίδει δεδομένα στον κόμβο του αμέσως ανώτερου επιπέδου της ιεραρχίας. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει ότι τα δεδομένα μεταδίδονται παράλληλα και έτσι μειώνεται σημαντικά η καθυστέρηση. Αφού το δέντρο είναι ισορροπημένο η καθυστέρηση θα είναι της τάξης του $O(\lg N)$ όπου N ο αριθμός των κόμβων.



Εικόνα 22. Συλλογή δεδομένων σε ένα αλυσίδα σχηματισμένη με βάση το hierarchical pegasis

Για παράδειγμα στην Εικόνα 22 ο κόμβος c_3 είναι ο αρχηγός για το επίπεδο 3. Αφού ο c_3 είναι στην θέση 3 (μετρώντας από αριστερά προς δεξιά και ξεκινώντας από το 0) της αλυσίδας όλοι οι κόμβοι που είναι σε ζυγές θέσεις θα στείλουν στον δεξιό τους γείτονα. Δηλαδή οι κόμβοι c_0 , c_2 , c_4 , c_6 θα στείλουν τα δεδομένα τους στον δεξιό τους γείτονα. Οι κόμβοι οι οποίοι λαμβάνουν σε κάποιο επίπεδο ανέρχονται στο επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας. Δηλαδή εδώ ανελίσσονται οι κόμβοι c_1 , c_3 , c_5 , c_7 που έλαβαν τα δεδομένα από τους υπόλοιπους. Στο πάνω επίπεδο τώρα ο c_3 είναι σε μονό αριθμό θέσης όπως και ο c_7 . Έτσι θα λάβουν δεδομένα από αυτούς που είναι σε ζυγό αριθμό δηλαδή τους c_1 και c_5 . Οπότε οι c_1 και c_5 στέλνουν τα δεδομένα τους δεξιά και οι κόμβοι c_3 και c_7 ανεβαίνουν πάλι επίπεδο. Εδώ σε αυτό το επίπεδο έχουμε καταλήξει με δυο κόμβους τον c_3 και τον c_7 . Ο c_3 είναι σε ζυγή θέση έτσι ο c_7 θα αθροίσει τα δεδομένα του και θα τα στείλει στον c_3 . Τελικά ο c_3 θα συνδυάσει τα δεδομένα του με αυτά του c_7 και θα μεταδώσει το μήνυμα στον σταθμό βάσης.

Η προσέγγιση αυτή που δεν βασίζεται στο CDMA δημιουργεί μια ιεραρχία τριών επιπέδων για τους κόμβους και έτσι τα φαινόμενα παρεμβολών μειώνονται αν σχεδιαστούν προσεχτικά οι ταυτόχρονες μεταδόσεις των κόμβων. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο έχει αποδειχθεί πως αποδίδει καλύτερα από το απλό pegasis κατά ένα παράγοντα 60.

Αν και με το pegasis αποφεύγεται ο φόρτος ομαδοποίησης κάτι που δεν γίνεται στο leach πρωτόκολλο, χρειάζεται ακόμα δυναμική ρύθμιση της

τοπολογίας αφού η ενέργεια των κόμβων δεν ανιχνεύεται. Για παράδειγμα κάθε κόμβος χρειάζεται να είναι ενήμερος για την κατάσταση του γείτονά του έτσι ώστε να ξέρει πού να δρομολογήσει τα δεδομένα. Τέτοια ρύθμιση της τοπολογίας μπορεί να παρουσιάσει σημαντικό φόρτο ειδικά για δίκτυα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό.

3.2.5 TEEN και APTEEN

Το TEEN [50] και το APTEEN [51] είναι δυο ιεραρχικά πρωτόκολλα που έχουν προταθεί για χρονικά κρίσιμες εφαρμογές. Στο TEEN οι κόμβοι ανιχνεύουν το περιβάλλον συνεχώς αλλά η μετάδοση των δεδομένων γίνεται λιγότερο συχνά. Ο κόμβος κεφαλή σε κάθε ομάδα στέλνει στους υπόλοιπους κόμβους της ομάδας μια τιμή ισχυρού κατωφλίου (hard threshold) που είναι η τιμή κατωφλίου του ανιχνευόμενου χαρακτηριστικού και μια τιμή αδύναμου κατωφλίου (soft threshold) που είναι η μικρή μεταβολή στην τιμή του χαρακτηριστικού που πυροδοτεί στον κόμβο το άνοιγμα του πομπού και του δέκτη του. Για αυτό και το ισχυρό κατώφλι προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό των μεταδόσεων επιτρέποντας στους κόμβους να εκπέμψουν μόνο όταν το ανιχνευόμενο χαρακτηριστικό είναι μέσα στο πεδίο ενδιαφέροντος. Το αδύναμο κατώφλι μειώνει και αυτό τον αριθμό των μεταδόσεων που θα μπορούσαν να είχαν έτσι και αλλιώς συμβεί όταν υπάρχει μια ελάχιστη ή καθόλου αλλαγή στη τιμή του χαρακτηριστικού. Μια μικρότερη τιμή του αδύναμου κατωφλίου δίνει μια καλύτερη εικόνα του δικτύου, με αντίκτυπο αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Για αυτό ο χρήστης μπορεί να καθορίσει ο ίδιος το ισοζύγιο μεταξύ κατανάλωση ενέργειας και ακρίβειας των δεδομένων. Όταν οι κεφαλές των ομάδων είναι έτοιμες να αλλάξουν νέες τιμές για τα δυο παραπάνω κατώφλια μεταδίδονται. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι ότι εάν το κατώφλι δεν ξεπεραστεί οι κόμβοι δεν θα επικοινωνήσουν ποτέ και ο χρήστης δεν θα πάρει καθόλου δεδομένα από αυτό το δίκτυο.

Οι κόμβοι ανιχνεύουν το περιβάλλον συνεχώς. Η πρώτη φορά που η τιμή ενός χαρακτηριστικού πιάνει την τιμή κατωφλίου τότε ο κόμβος ανοίγει τον πομπό του

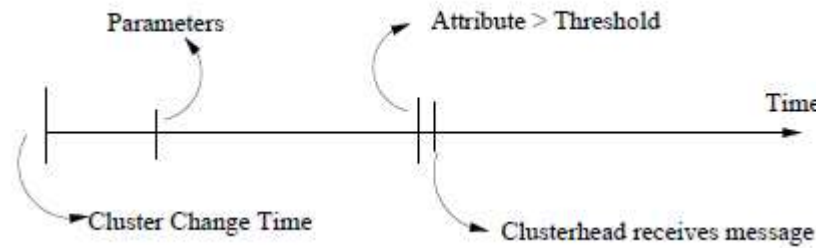
και στέλνει τα δεδομένα. Η μεταβλητή που ανιχνεύτηκε αποθηκεύεται σε μια εσωτερική μεταβλητή που ονομάζεται ανιχνεύσιμη τιμή (Sensed Value). Οι κόμβοι θα μεταδώσουν τα δεδομένα τους μόνο όταν συμβούν τα παρακάτω. (1) Η τρέχουσα τιμή της ανιχνεύσιμης τιμής είναι μεγαλύτερη από την τιμή του ισχυρού κατωφλίου, (2) η τρέχουσα τιμή του ανιχνεύσιμου χαρακτηριστικού διαφέρει από την ανιχνεύσιμη τιμή (Sensed Value) κατά ένα ποσό ίσο ή μεγαλύτερο από το αδύναμο κατώφλι.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου TEEN είναι η καταλληλότητά του για χρονικές κρίσιμα εφαρμογές. Επίσης, αφού η μετάδοση των δεδομένων καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από ότι η ανίχνευσή τους και επειδή οι πομποί και οι δέκτες είναι κλειστοί για μεγάλες χρονικές περιόδους εξοικονομείται ενέργεια. Η τιμή του αδύναμου κατωφλίου μπορεί να ποικίλει. Σε κάθε χρονική αλλαγή της ομάδας (cluster change time), η οποία είναι ουσιαστικά η χρονική στιγμή κατά την οποία η ομάδα αλλάζει κεφαλή, νέες παράμετροι μεταδίδονται και έτσι ο χρήστης μπορεί να τις αλλάξει αν επιθυμεί.

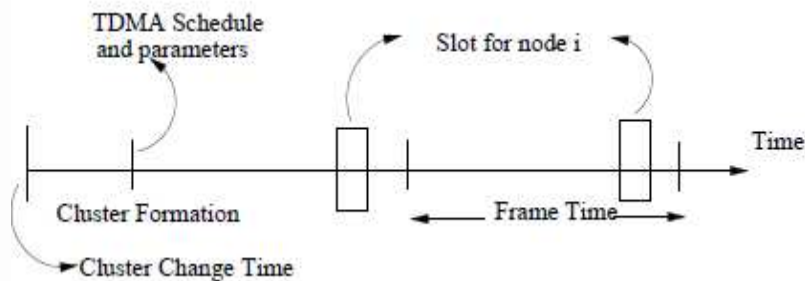
Το APTEEN από την άλλη είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο που αλλάζει την περιοδικότητα των τιμών κατωφλίου σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη και το είδος της εφαρμογής. Στο APTEEN οι κεφαλές κόμβοι μεταδίδουν τις εξής παραμέτρους.

- 1) Χαρακτηριστικά: αυτό είναι ένα σύνολο φυσικών παραμέτρων για τις οποίες ενδιαφέρεται ο χρήστης
- 2) Τιμές κατωφλίου: αυτή η παράμετρος αποτελείται από την τιμή του ισχυρού κατωφλίου (HT) και την τιμή του αδύναμου κατωφλίου (SF)
- 3) Πρόγραμμα: αυτό είναι ένα TDMA πρόγραμμα που αναθέτει μια θυρίδα σε κάθε κόμβο
- 4) Χρόνος μέτρησης: είναι η μέγιστη χρονική περίοδος ανάμεσα σε δυο επιτυχημένες αναφορές που στέλνονται από κάποιο κόμβο.

Βλέπουμε στην Εικόνα 23 και 24 το χρονοδιάγραμμα για την λειτουργία του πρωτοκόλλου TEEN και του APTEEN αντίστοιχα.



Εικόνα 23. Λειτουργία TEEN



Εικόνα 24. Λειτουργία APTEEN

Ο κόμβος ανιχνεύει συνεχώς το περιβάλλον και μόνο οι κόμβοι που ανιχνεύουν τιμές δεδομένων ίσες ή πάνω από το ισχυρό κατώφλι μεταδίδουν. Όταν ο κόμβος ανιχνεύσει μια τιμή κάτω από το ισχυρό κατώφλι μεταδίδει δεδομένα μόνο όταν η τιμή του χαρακτηριστικού αυτού αλλάξει κατά ένα ποσό ίσο ή μεγαλύτερο από το αδύναμο κατώφλι. Εάν ένας κόμβος δεν αποστέλλει δεδομένα για μια δεδομένη χρονική περίοδο ίση με τον χρόνο μέτρησης είναι υποχρεωμένος να ανιχνεύσει ξανά τα δεδομένα και να τα αποστείλει. Ένα TDMA σχήμα χρησιμοποιείται και σε κάθε κόμβο έχει ανατεθεί μια θυρίδα μετάδοσης.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του APTEEN είναι τα ακόλουθα. Συνδυάζει και προορατικές (proactive) και αντιδραστικές (reactive) τεχνικές. Προσφέρει ευελιξία επιτρέποντας στον χρήστη να καθορίσει τα διαστήματα ανάμεσα στους χρόνους μέτρησης και οι τιμές κατωφλίου μπορεί να ελεγχθούν αλλάζοντας είτε τον χρόνο μέτρησης είτε τις ίδιες τις τιμές. Το κύριο μειονέκτημα του είναι η επιπλέον πολυπλοκότητα που χρειάζεται για να υλοποιηθούν οι συναρτήσεις από

τις οποίες προκύπτουν οι τιμές κατωφλίου και ο χρόνος μέτρησης.

Προσομοιώσεις με τα TEEN και APTEEN έχουν δείξει πως και τα δυο αυτά πρωτόκολλα αποδίδουν καλύτερα από το LEACH. Η απόδοση του APTEEN είναι κάπου ανάμεσα σε αυτή του LEACH και του TEEN όσο αναφορά θέματα ενέργειας και χρόνου ζωής του δικτύου. Το TEEN έχει την καλύτερη απόδοση αφού μειώνει τον αριθμό των εκπομπών. Τα μειονεκτήματα των δυο πρωτοκόλλων είναι ο φόρτος και η πολυπλοκότητα που σχετίζονται με: την δημιουργία ομάδων σε πολλαπλά επίπεδα, τη μέθοδο υλοποίησης των συναρτήσεων των τιμών κατωφλίου και με το πώς αντιμετωπίζεται η ονοματοδοσία των χαρακτηριστικών στα επερωτήματα.

3.2.6 HPAR

Το HPAR [52] είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο χωρίζει το δίκτυο σε ομάδες κόμβων. Κάθε ομάδα κόμβων με γεωγραφική εγγύτητα ομαδοποιείται σε μια ζώνη και η κάθε ζώνη θεωρείται σαν μια οντότητα. Για να γίνει η δρομολόγηση κάθε ζώνη είναι ελεύθερη να αποφασίσει πως πώς θα δρομολογήσει τα δεδομένα ιεραρχικά μέσω των άλλων ζωνών έτσι ώστε η διάρκεια ζωής των μπαταριών των κόμβων να μεγιστοποιηθεί. Τα μηνύματα δρομολογούνται μέσω των μονοπατιών που έχουν την μεγαλύτερη, πάνω από το σύνολο των ελαχίστων ενέργεια και αυτό καλείται μέγιστο-ελάχιστο μονοπάτι (min-max path).

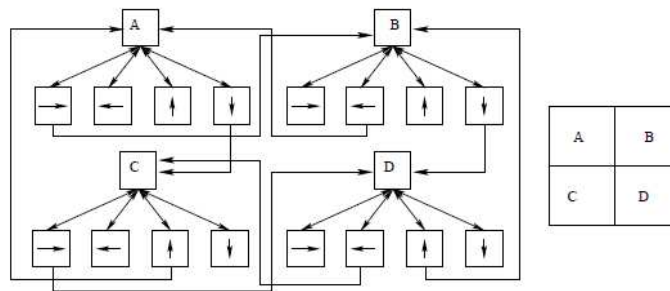
Έχει προταθεί ένας αλγόριθμος που ονομάζεται max-min P_{min} . Η δυσκολία σε αυτό τον αλγόριθμο βασίζεται στην ανταλλαγή μεταξύ της ελαχιστοποίησης της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας και στην μεγιστοποίηση της ελάχιστης υπολειπόμενης ενέργειας του δικτύου. Έτσι ο αλγόριθμος προσπαθεί να ευνοήσει ένα μέγιστο-ελάχιστο μονοπάτι με το να μειώσει την ενέργεια που καταναλώνει.

Αυτό γίνεται ως εξής: Αρχικά ο αλγόριθμος βρίσκει το μονοπάτι με την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας (P_{min}) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Dijkstra.

Έπειτα ο αλγόριθμος βρίσκει το μονοπάτι που μεγιστοποιεί την ελάχιστη υπολειπόμενη ενέργεια του δικτύου. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσπαθεί να βελτιστοποιήσει και τα δυο προτεινόμενα κριτήρια.

Ένας άλλος αλγόριθμος που καλείται δρομολόγηση με βάση τις ζώνες (zone-based routing) έχει προταθεί και στηρίζεται στο max-min zPmin. Είναι μια ιεραρχική προσέγγιση όπου η περιοχή την οποία καλύπτει το δίκτυο χωρίζεται σε ένα μικρό αριθμό ζωνών. Για να σταλεί ένα μήνυμα σε όλο την περιοχή, σχηματίζεται ένα καθολικό μονοπάτι από ζώνη σε ζώνη. Οι κόμβοι σε κάθε ζώνη κατευθύνουν αυτόματα την τοπική δρομολόγηση και συμμετέχουν στην εκτίμηση της στάθμης ενέργειας της ζώνης. Κάθε μήνυμα δρομολογείται μέσω των ζωνών χρησιμοποιώντας πληροφορία για την ενεργειακή στάθμη της κάθε ζώνης. Αυτή η πληροφορία μπορεί να είναι για παράδειγμα ο κόμβος με την μεγαλύτερη ενέργεια. Αν μπορεί το δίκτυο να χωριστεί σε ένα μικρό αριθμό ζωνών τότε η κλίματα της καθολικής δρομολόγησης μειώνεται. Η καθολική πληροφορία που χρειάζεται για να σταλεί κάθε μήνυμα συνοψίζεται στην εκτιμώμενη στάθμη ενέργειας κάθε ζώνης. Ένα γράφημα ζωνών χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τα συνδεδεμένα βέλη των ζωνών εάν από την τρέχουσα ζώνη μπορούμε να πάμε στην γειτονική της προς αυτή την κατεύθυνση. Κάθε βέλος κάθε ζώνης έχει μια στάθμη ενέργειας ίση με 1. Κάθε κατεύθυνση κάθε ζώνης επισημαίνεται από την εκτιμώμενη στάθμη ενέργειας η οποία προκύπτει μέσα από μια διαδικασία που είναι ουσιαστικά ένας τροποποιημένος αλγόριθμος Bellman-Ford.

Στην Εικόνα 25 βλέπουμε ένα τέτοιο γράφημα στο οποίο έχουν παραληφθεί οι στάθμες ενέργειας της κάθε ζώνης.



Εικόνα 25. Η περιοχή χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες και αυτές αναπαριστώνται με τον παραπάνω τρόπο που ορίζει η δρομολόγηση με βάση της ζώνες.

3.2.7 Ενεργειακά Αποδοτικός ομογενής αλγόριθμος ομαδοποίησης

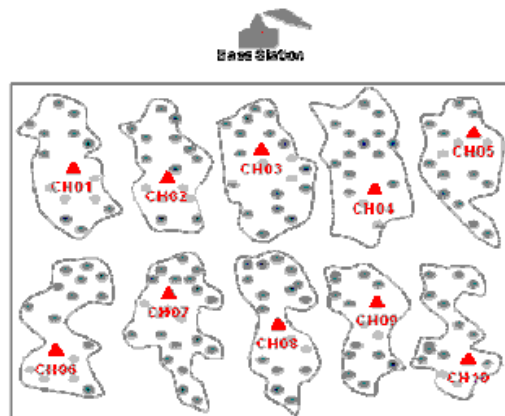
Το πρωτόκολλο αυτό [53] δίνει έμφαση στην αύξηση του κύκλου ζωής του δικτύου διασφαλίζοντας μια ομογενή κατανομή των κόμβων μέσα στις ομάδες έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλος φόρτος εκπομπών και λήψεων στην κεφαλή της ομάδας.

Το πρωτόκολλο αρχικά συλλέγει πληροφορίες σχετικά με την θέση των κόμβων στο δίκτυο. Ανάλογα με την πυκνότητα και την γεωγραφική θέση των κόμβων χωρίζει το δίκτυο εικονικά σε 10 ζώνες. Αντικειμενικός σκοπός είναι να διασφαλιστεί με αυτό τον τρόπο μια ομοιόμορφη κατανομή των κόμβων.

Στη συνέχεια και αφού έχει θεωρηθεί πως όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ενέργεια, σε κάθε ομάδα εκλέγεται ένας κόμβος κεφαλή με τυχαίο τρόπο αφού καθένας έχει μια πιθανότητα ($1/\text{συνολικός αριθμός κόμβων}$) να εκλεγεί.

Ύστερα κάθε κεφαλή στέλνει την ταυτότητά της σε όλους τους κόμβους για να δεχτούν την αίτηση συμμετοχής στην ομάδα και να δημιουργήσουν μία. Οι κόμβοι που λαμβάνουν την αίτηση αναλύουν την δύναμη του σήματος από κάθε κεφαλή. Η ποιότητα του σήματος εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ κεφαλής και κόμβου και από τα φυσικά εμπόδια μεταξύ τους. Ο κάθε κόμβος διαλέγει το σήμα που επιθυμεί και στέλνει μια επιβεβαίωση στην κεφαλή.

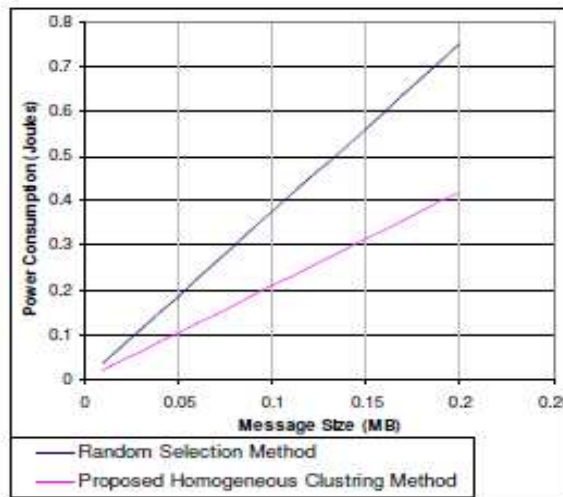
Στο τέλος έχουμε ένα σχηματισμό σαν αυτό της Εικόνας 26.



Εικόνα 26. Δημιουργία ομάδων. Κάθε ομάδα έχει ένα κόμβο κεφαλή.

Αμέσως μετά τον σχηματισμό των ομάδων, οι κεφαλές ετοιμάζουν το πρόγραμμα αποστολής δεδομένων και το κοινοποιούν στα μέλη της ομάδας τους. Τέλος οι κεφαλές συλλέγουν τα δεδομένα από κάθε κόμβο τα συμπιέζουν και τα στέλνουν στον σταθμό βάσης.

Στην μέθοδο της τυχαίας επιλογής κόμβων για τον σχηματισμό ομάδων, τα μέλη των ομάδων αυτών δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα έτσι αυτό προσδίδει φόρτο στην κεφαλή με αποτέλεσμα το δίκτυο να είναι αναγκασμένο να σχηματίζει ομάδες συχνότερα. Με το προτεινόμενο πρωτόκολλο όμως της μεθόδου ομογενούς ομαδοποίησης οι κόμβοι κατανέμονται ομοιόμορφα και έτσι έχουμε οικονομία στην ενέργεια. Από προσομοιώσεις έχει βρεθεί πως η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ μικρότερη στο προτεινόμενο πρωτόκολλο παρά στο πρωτόκολλο τυχαίας επιλογής (Εικόνα 27).



Εικόνα 27. Κατανάλωση ενέργειας αναλογικά με το μέγεθος πακέτου δεδομένων για τις δυο συγκρινόμενες μεθόδους.

3.2.8 Δρομολόγηση με βάση την ενέργεια για δίκτυα αισθητήρων που σχηματίζουν ομάδες

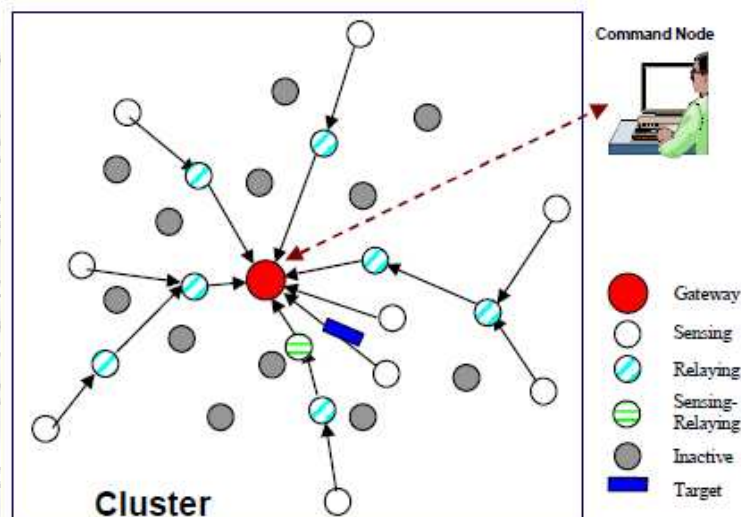
Το πρωτόκολλο αυτό [54] βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική τριών επιπέδων. Οι κόμβοι ομαδοποιούνται σε ομάδες (clusters) πριν την λειτουργία του δικτύου. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί κεφαλές, οι επονομαζόμενες πύλες (gateways), οι οποίες είναι λιγότερο περιορισμένες όσο αναφορά την ενέργεια από τους απλούς κόμβους και υποθέτουμε ότι γνωρίζουν την τοποθεσία των κόμβων. Οι πύλες αυτές διατηρούν τις καταστάσεις των κόμβων και δημιουργούν μονοπάτια πολλαπλών αλμάτων (multi-hop paths) για να συλλέξουν τα δεδομένα από τους κόμβους. Ένα βασισμένο σε TDMA MAC χρησιμοποιείται για να στέλνουν οι κόμβοι δεδομένα στην πύλη. Η πύλη ενημερώνει κάθε κόμβο για τις χρονοθυρίδες που θα πρέπει να περιμένει την αποστολή δεδομένων άλλων κόμβων και για τις χρονοθυρίδες που θα χρησιμοποιεί ο ίδιος για την αποστολή των δεδομένων του. Ο κόμβος καταβόθρα (sink) επικοινωνεί μόνο με την πύλη.

Οι κόμβοι θεωρείται ότι είναι ικανοί να βρίσκονται σε ενεργή λειτουργία (active mode) ή να βρίσκονται σε αναμονή χαμηλής ενέργειας (low-power stand-by mode). Ο πομπός και ο δέκτης θα πρέπει να μπορούν ανεξάρτητα να κλείνουν

και να ανοίγουν και η ισχύς εκπομπής θα μπορεί να προσαρμόζεται βασιζόμενη στην απαιτούμενη εμβέλεια. Οι κόμβοι μέσα σε μια ομάδα θα πρέπει να είναι σε μια από τις τέσσερις επόμενες καταστάσεις: ανίχνευσης, μεταγωγής, ανίχνευσης-μεταγωγής, και ανενεργή.

Στην κατάσταση ανίχνευσης ο κόμβος αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και συλλέγει δεδομένα συνεχώς. Στην κατάσταση μεταγωγής ο κόμβος δεν αλληλεπιδρά με το περιβάλλον αλλά τα κυκλώματα επικοινωνιών του είναι ανοιχτά για να μπορεί να διαβιβάζει δεδομένα που λαμβάνει από άλλους ενεργούς κόμβους. Όταν ένας κόμβος ταυτόχρονα ανιχνεύει αλλά και μεταβιβάζει μηνύματα άλλων κόμβων τότε είναι στην φάση ανίχνευσης-μεταγωγής. Αλλιώς ο κόμβος θεωρείται σαν ανενεργός και μπορεί να κλείσει τα κυκλώματά του.

Στην Εικόνα 28 βλέπουμε ένα παράδειγμα των καταστάσεων των κόμβων αλλά και των διαδρομών σε μια τυπική ομάδα η οποία ανιχνεύει ένα στόχο (target). Μια συνάρτηση κόστους καθορίζεται μεταξύ δυο κόμβων με βάση την κατανάλωση ενέργειας, την βελτιστοποίηση της καθυστέρησης και άλλων τέτοιων μέτρων απόδοσης. Χρησιμοποιώντας αυτή τη συνάρτηση μπορεί να βρεθεί ένα ελάχιστο μονοπάτι μεταξύ των κόμβων και της πύλης. Η πύλη θα ελέγχει συνεχώς την διαθέσιμη ενέργεια σε κάθε κόμβο της ομάδας και μόλις διαπιστώσει κάποια αποτυχία κόμβου θα γίνει επαναδρομολόγηση.



Εικόνα 28. Παράδειγμα μιας ομάδας στο πρωτόκολλο αυτό.

3.2.9 SOP

Το πρωτόκολλο αυτό [55] βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική που υποστηρίζει ετερογενείς κόμβους οι οποίοι μπορεί να είναι είτε σταθεροί ή κινητοί. Μερικοί κόμβοι αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και προωθούν τα δεδομένα στους κόμβους που έχουν επιλεγεί να δρουν σαν δρομολογητές. Οι δρομολογητές είναι σταθεροί και σχηματίζουν την ραχοκοκαλιά της επικοινωνίας. Τα συλλεγόμενα δεδομένα προωθούνται μέσα από τους δρομολογητές στις πιο ισχυρές καταβόθρες. Κάθε κόμβος που εκτελεί ανίχνευση θα πρέπει να επικοινωνεί με έναν δρομολογητή για να είναι μέρος του δικτύου.

Έχει προταθεί μια αρχιτεκτονική δρομολόγησης που χρειάζεται διευθυνσιοδότηση για τον κάθε κόμβο. Οι κόμβοι είναι ανιχνεύσιμοι μέσω της διεύθυνσης του δρομολογητή με τον οποίο συνδέονται. Η αρχιτεκτονική δρομολόγησης είναι ιεραρχική και σχηματίζονται ομάδες από κόμβους οι οποίες έχουν την δυνατότητα να συγχωνευτούν αν είναι ανάγκη. Για να έχει αντοχή στα λάθη χρησιμοποιείται στις μεταδόσεις ο αλγόριθμος Local Markof Loops (LML) ο οποίος πραγματοποιεί τυχαίες μεταβιβάσεις στα μονοπάτια του γράφου. Ο αλγόριθμος για την οργάνωση των κόμβων και την δημιουργία πινάκων δρομολόγησης αποτελείται από τέσσερις φάσεις.:

- Φάση ανακάλυψης: Κάθε κόμβος ανιχνεύει τους γείτονές του.
- Φάση οργάνωσης: Σχηματίζονται ομάδες και συγχωνεύονται δημιουργώντας μια ιεραρχία. Σε κάθε κόμβο απονέμεται μια διεύθυνση βασισμένη στην θέση του μέσα στην ιεραρχία. Σχηματίζονται πίνακες δρομολόγησης για κάθε κόμβο. Κατασκευάζονται δέντρα μετάδοσης (broadcast trees) που διατρέχουν όλους τους κόμβους.
- Φάση συντήρησης: Γίνεται ανανέωση των πινάκων δρομολόγησης και των επιπέδων ενέργειας κάθε κόμβου. Κάθε κόμβος ενημερώνει τους γείτονές του για τον πίνακα δρομολόγησης του και το επίπεδο ενέργειάς του. Ο αλγόριθμος LML χρησιμοποιείται για να συντηρηθούν τα δέντρα μετάδοσης.

- Φάση αυτό-οργάνωσης: Σε περίπτωση αποτυχίας κόμβων γίνονται αναδιοργανώσεις των ομάδων.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τους δρομολογητές για να κρατάει όλους τους κόμβους ενωμένους σχηματίζοντας ένα ισχυρό σύνολο. Τέτοια προσέγγιση μοιάζει με την ιδέα του εικονικού πλέγματος που χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο GAF, το οποίο θα μελετήσουμε αναλυτικά παρακάτω. Και οι δυο προσεγγίσεις πετυχαίνουν οικονομία ενέργειας χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν μικρότερο υποσύνολο κόμβων μπορούν. Το κύριο πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι το μικρό κόστος διατήρησης των πινάκων δρομολόγησης και η διατήρηση της ιεραρχίας σε ισορροπία. Επιπλέον η ενέργεια που καταναλώνεται για να σταλεί ένα μήνυμα είναι λιγότερη από ότι στο πρωτόκολλο SPIN λόγω των δέντρων μετάδοσης που χρησιμοποιούνται. Επίσης έχουμε αντοχή στα σφάλματα λόγω του αλγορίθμου LML που χρησιμοποιείται στα δέντρα διάδοσης. Το μειονέκτημα είναι στην φάση οργάνωσης του αλγορίθμου όπου δεν γίνεται κατά απαίτηση οπότε έχουμε επιπλέον φόρτο. Ένα άλλο πιθανό πρόβλημα είναι στην περίπτωση σχηματισμού ιεραρχίας όταν υπάρχουν πολλές διακοπές στο δίκτυο. Αυτό είναι κοστοβόρο διότι αυτές οι διακοπές θα οδηγούν συνεχώς σε εφαρμογή της φάσης αυτό-οργάνωσης.

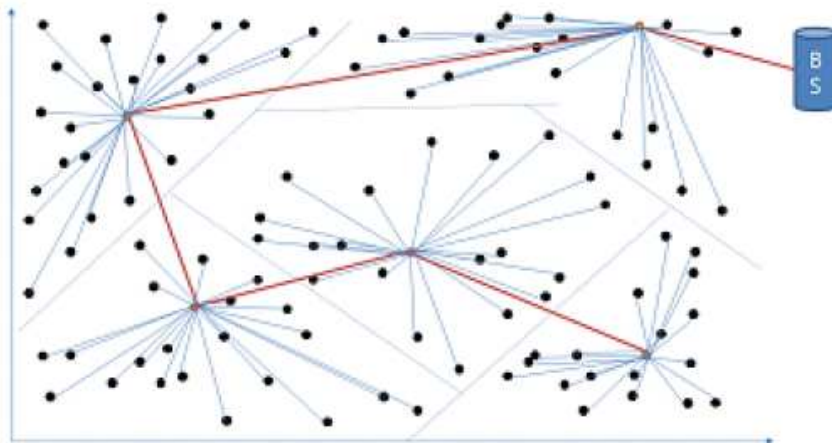
3.2.10 CBERP

Το πρωτόκολλο αυτό [56] είναι ουσιαστικά ένα υβριδικό πρωτόκολλο που προέρχεται από τον συνδυασμό των LEACH και PEGASIS. Χρησιμοποιεί τον μηχανισμό ομαδοποίησης του LEACH και τον μηχανισμό δημιουργίας αλυσίδας του PEGASIS. Σκοπός του πρωτοκόλλου είναι να γίνεται όσο το δυνατόν αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας έτσι ώστε η διάρκεια ζωής του δικτύου να είναι μεγαλύτερη.

Όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους στον κόμβο κεφαλή και αυτός εν συνεχεία τα στέλνει στον αρχηγό της αλυσίδας ο οποίος τέλος τα μεταβιβάζει στον σταθμό βάσης. Ο αρχηγός κόμβος επιλέγεται δυναμικά και όχι στατικά για

να αποφύγουμε την γρήγορη κατανάλωση της μπαταρίας ενός συγκεκριμένου κόμβου. Το CBERP όμως αυξάνει την απόδοση της μετάδοσης των δεδομένων αφού μειώνει το μέσο μήκος της σχηματιζόμενης αλυσίδας σε σχέση με το PEGASIS. Επίσης το CBERP μπορεί να μειώσει σημαντικά τον φόρτο που προκαλείται από την επιλογή νέων κεφαλών αφού διαλέγει και επιπλέον κόμβους οι οποίοι είναι υποψήφιοι για κεφαλές όταν ο αρχικός κόμβος κεφαλή δεν είναι διαθέσιμος.

Ο αλγόριθμος αποτελείται από πέντε στάδια. Αρχικά η φάση της αρχικοποίησης. Ο σταθμός βάσης μεταβιβάζει μήνυμα για επιλογή κεφαλών σε όλους τους κόμβους. Όλοι οι κόμβοι στέλνουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση τους και τις ενέργεια που τους απομένει στον σταθμό βάσης. Στην φάση της επιλογής κεφαλής, ο σταθμός βάσης διαλέγει τέσσερις κόμβους με την μεγαλύτερη εναπομένουσα ενέργεια. Με βάση την τιμή μιας μεταβλητής E , το αποτέλεσμα της οποίας βασίζεται στην ενέργεια του κάθε κόμβου επιλέγεται ποιος από τους τέσσερις έχει την μεγαλύτερη τιμή E και γίνεται κεφαλή ενώ οι υπόλοιποι είναι υποψήφιοι. Στην φάση του σχηματισμού της αλυσίδας γίνεται η αλλαγή των κεφαλών η νέα κεφαλή στέλνει το κουπόνι (token) στον σταθμό βάσης και ο σταθμός βάσης ανακοινώνει στους κόμβους πως η αλυσίδα σχηματίστηκε. Στην φάση της διαχείρισης οι κόμβοι στέλνουν δεδομένα στις κεφαλές. Αυτές τα συλλέγουν και τα στέλνουν μέσω της αλυσίδας στον αρχηγό. Ο αρχηγός με τη σειρά του τα στέλνει στον σταθμό βάσης. Στην φάση αλλαγής κεφαλής επαναυπολογίζεται η τιμή της μεταβλητής E από τον σταθμό βάσης και αν η νέα τιμή είναι μικρότερη από την τρέχουσα τότε ο πρώτος υποψήφιος κόμβος γίνεται κεφαλή. Αν και οι τρεις υπόλοιποι υποψήφιοι έχουν τιμή E μεγαλύτερη από την τρέχουσα μεταβαίνουμε πάλι στην φάση επιλογής κεφαλής.



Εικόνα 29. Ο αλγόριθμος CBERP.

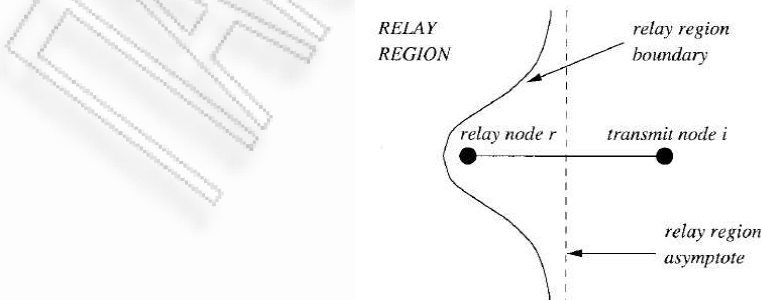
Έχει αποδειχθεί πειραματικά πως ο αλγόριθμος CBERP είχε καλύτερη απόδοση κατά 48% από το LEACH και κατά 7% από το PEGASIS για μικρό αριθμό κόμβων, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό κόμβων τα αποτελέσματα έδειξαν καλύτερη απόδοση κατά 49% σε σχέση με το LEACH και 18% σε σχέση με το PEGASIS.

3.3 Location-based πρωτόκολλα

Στα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας οι κόμβοι είναι διεθυσιοδοτημένοι με βάση την τοποθεσία τους. Πληροφορίες σχετικά με την θέση του κάθε κόμβου χρειάζονται στα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για να υπολογίσουν την απόσταση δύο συγκεκριμένων κόμβων έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η κατανάλωση ενέργειας. Μπορούμε παρακάτω να δούμε μερικά από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα σε αυτή την κατηγορία.

3.3.1 MECN και SMECN

Το MECN [57] είναι ένα πρωτόκολλο που προσπαθεί να επιτύχει την χρησιμοποίηση της ελάχιστης ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων, το οποίο δημιουργεί και διατηρεί ένα δίκτυο ελάχιστης ενέργειας μεταξύ των κόμβων. Είναι ένα πρωτόκολλο που αυτορυθμίζεται και διατηρεί την διασύνδεση μεταξύ των κόμβων παρά το ότι αυτοί μπορεί να κινούνται στον χώρο. Δημιουργεί ένα βέλτιστο διασυνδεδεμένο δέντρο που καταλήγει στον κόμβο καταβόθρα και ονομάζεται τοπολογία ελάχιστης ενέργειας (minimum power topology) το οποίο περιέχει μόνο τα ελάχιστα μονοπάτια ενέργειας από τον κάθε κόμβο στην καταβόθρα. Βασίζεται στις θέσεις των κόμβων στο επίπεδο και αποτελείται από δυο κύριες φάσεις, κατασκευή του έγκλειστου γράφου (enclosure graph construction) και την κατανομή κοστών (cost distribution). Για ένα σταθερό δίκτυο σε πρώτη φάση το MECN δημιουργεί έναν αραιό γράφο (sparse graph) που καλείται έγκλειστος γράφος (enclosure graph) βασισμένο στην τοπικότητα των κόμβων. Αυτός ο έγκλειστος γράφος είναι ένας κατευθυνόμενος γράφος που περιέχει όλους τους κόμβους σαν το σύνολο των κορυφών του και του οποίου το σύνολο των ακμών είναι η ένωση όλων των ακμών μεταξύ των κόμβων και των γειτόνων τους που βρίσκονται στην έγκλειστη περιοχή (enclose region). Με άλλα λόγια ένας κόμβος δεν θα θεωρεί άλλους κόμβους οι οποίοι είναι μέσα στην δική του περιοχή αναμετάδοσης (relay region) σαν υποψήφιους κόμβους για να προωθήσει τα δεδομένα του προς την καταβόθρα. Στις Εικόνες 30 και 31 βλέπουμε σχηματικά τι θεωρείται περιοχή αναμετάδοσης και έγκλειστη περιοχή για ένα κόμβο.

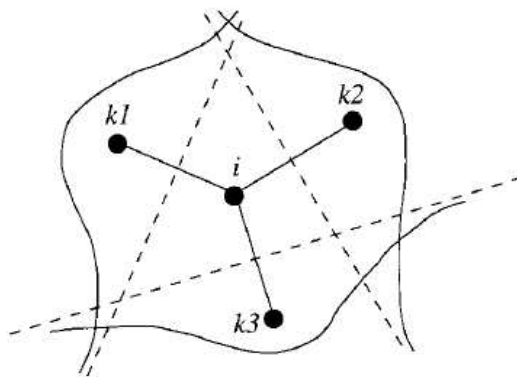


Εικόνα 30. Περιοχή αναμετάδοσης για το ζευγάρι κόμβων i και r

Η περιοχή αναμετάδοσης R για ένα ζεύγος κόμβων (i,r) ορίζεται ως εξής:

$$R_{i \rightarrow r} \equiv \{(x, y) | P_{i \rightarrow r \rightarrow (x, y)} < P_{i \rightarrow (x, y)}\}$$

όπου $P_{i \rightarrow r \rightarrow (x, y)}$ είναι η ενέργεια που χρειάζεται για την μετάδοση των δεδομένων από τον κόμβο i στο (x,y) μέσω του κόμβου αναμετάδοσης r , όπου (x,y) είναι οι συντεταγμένες του κόμβου που θέλουμε να στείλουμε τα δεδομένα, ενώ $P_{i \rightarrow (x, y)}$ είναι η ενέργεια που θέλουμε για να στείλουμε τα δεδομένα από τον i στο (x,y) απευθείας.



Εικόνα 31. Έγκλειστη περιοχή του κόμβου i .

Ο κόμβος i έχει βρει τρεις κόμβους $(k1,k2,k3)$ γύρω από αυτόν. Ο κόμβος i μπορεί να υπολογίσει την περιοχή αναμετάδοσης για τους τρεις κόμβους που έχει βρει. Τις τρεις αυτές περιοχές τις βλέπουμε στην Εικόνα 31. Αυτό μας δείχνει μια περιοχή γύρω από τον κόμβο i όπου πέρα από αυτή την περιοχή δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό για τον i να ψάξει για άλλους γείτονες. Αυτή η περιοχή γύρω από τον i είναι η έγκλειστη περιοχή.

Στην δεύτερη φάση, τα μονοπάτια του έγκλειστου γράφου που δεν είναι βέλτιστα απλά απορρίπτονται και ο γράφος που προκύπτει είναι μια τοπολογία ελάχιστης ενέργειας (minimum power topology). Αυτός ο γράφος έχει ένα κατευθυνόμενο μονοπάτι από κάθε κόμβο στην καταβόθρα και καταναλώνει την ελάχιστη συνολική ενέργεια από όλους τους υπόλοιπους γράφους που έχουν κατευθυνόμενα μονοπάτια προς την καταβόθρα. Κάθε κόμβος μεταδίδει το κόστος του στους γείτονές του όπου το κόστος κάθε γράφου θεωρείται ότι είναι η

ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται από τον συγκεκριμένο κόμβο για να εγκαθιδρύσει ένα κατευθυνόμενο μονοπάτι προς την καταβόθρα.

Ενώ το MECN είναι ένα αυτορρυθμιζόμενο πρωτόκολλο και έτσι παρουσιάζει αντοχή στα σφάλματα (σε περίπτωση κινητού δικτύου), υποφέρει από ελάττωση της μπαταρίας των κόμβων όταν εφαρμόζεται σε στατικά δίκτυα. Το MECN δεν εξετάζει την υπολειπόμενη ενέργεια σε κάθε κόμβο και έτσι τα βέλτιστα μονοπάτια είναι στατικά. Με άλλα λόγια ένας κόμβος θα χρησιμοποιεί πάντα τον ίδιο γείτονα για να στείλει δεδομένα στην καταβόθρα. Έτσι αυτός ο γείτονας θα εξαντλήσει την μπαταρία του γρήγορα και το δίκτυο θα αποσυνδεθεί. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα ο έγκλειστος γράφος και συνεπώς και η τοπολογία ελάχιστης ενέργειας θα πρέπει να είναι δυναμικά βασισμένα στην υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων.

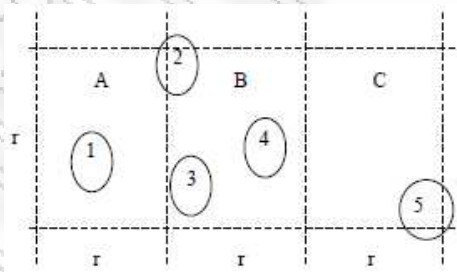
Το SMECN [58] πρωτόκολλο προτάθηκε για να βελτιστοποιήσει το MECN με τέτοιο τρόπο ώστε ένα ελάχιστο μονοπάτι να χαρακτηρίζεται με βάση την ιδιότητα ελάχιστης ενέργειας (minimum energy property). Αυτή η ιδιότητα συνεπάγεται πως για κάθε ζευγάρι αισθητήρων μέσα σε ένα γράφο που σχετίζεται με το δίκτυο, υπάρχει ένα μονοπάτι ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ τους, το οποίο είναι ουσιαστικά ένα μονοπάτι που έχει το μικρότερο κόστος κατανάλωσης ενέργειας από όλα τα δυνατά μονοπάτια μεταξύ των δυο κόμβων. Στο πρωτόκολλο SMECN, κάθε κόμβος βρίσκει τους γείτονές του στέλνοντας ένα μήνυμα ανίχνευσης γειτόνων χρησιμοποιώντας κάποια αρχική ενέργεια η οποία ανανεώνεται σταδιακά. Συγκεκριμένα οι γείτονες κάθε κόμβου υπολογίζονται αναλυτικά. Μετά ο κόμβος μεταδίδει ένα μήνυμα ανίχνευσης γειτόνων με κάποια αρχική ενέργεια p και ελέγχει εάν το θεωρητικό σύνολο των γειτόνων του είναι υποσύνολο των του συνόλου των κόμβων που απάντησαν στο μήνυμά του. Αν αυτό συμβαίνει, ο κόμβος θα χρησιμοποιήσει την ενέργεια p για να επικοινωνήσει με τους γείτονές του. Αν όχι, αυξάνει την ενέργεια p και μεταδίδει πάλι το μήνυμα ανίχνευσης γειτόνων.

Από πειράματα προσομοίωσης βρέθηκε ότι το SMECN αποδίδει πολύ καλύτερα από το MECN. Συγκεκριμένα όσο αναφορά τους κόμβους που

«πέθαναν» στο τέλος μιας προσομοίωσης, με το MECN αυτοί ήταν 64% ενώ με το SMECN μόνο 22%. Όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας στο τέλος της προσομοίωσης το MECN χρησιμοποιεί 63.4% περισσότερη ενέργεια για κάθε κόμβο από ότι το SMECN. Με το SMECN μεταδόθηκαν 127% περισσότερα πακέτα από ότι με το MECN άρα έχει και μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης και όσο αναφορά την καθυστέρηση παράδοσης των πακέτων με το SMECN επετεύχθει 21% λιγότερη καθυστέρηση από το MECN.

3.3.2 GAF

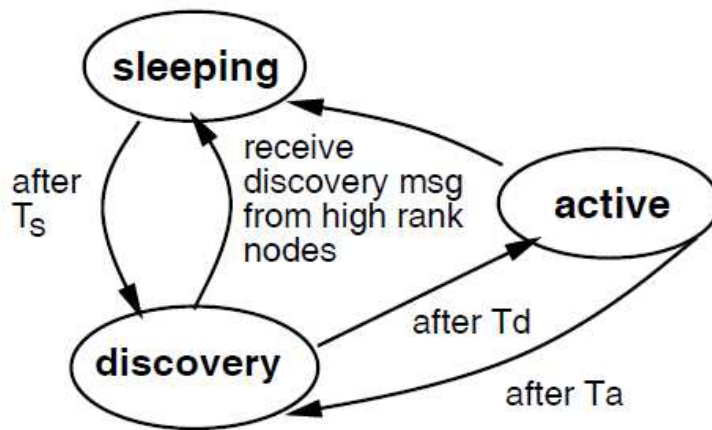
Το πρωτόκολλο GAF [59] είναι ένα πρωτόκολλο που αρχικά σχεδιάστηκε για ad hoc δίκτυα αλλά μπορεί εξίσου να εφαρμοστεί σε δίκτυα αισθητήρων. Η περιοχή του δικτύου αρχικά χωρίζεται σε σταθερές περιοχές και σχηματίζει ένα εικονικό πλέγμα όπως βλέπουμε στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32. Παράδειγμα εικονικού πλέγματος στο GAF.

Σε κάθε ζώνη οι κόμβοι συνεργάζονται μεταξύ τους για να παίξουν διαφορετικούς ρόλους ο καθένας. Για παράδειγμα οι κόμβοι θα εκλέξουν έναν κόμβο να μένει ανοιχτός για κάποιο συγκεκριμένο διάστημα και στη συνέχεια να πέφτει σε κατάσταση αναμονής. Αυτός ο κόμβος είναι υπεύθυνος για να ανιχνεύει και να στέλνει δεδομένα στον σταθμό βάσης εκ μέρους όλων των κόμβων της ζώνης που εκπροσωπεί. Έτσι το GAF διατηρεί ενέργεια απενεργοποιώντας κόμβους που δεν χρειάζονται χωρίς να επηρεάζει την αξιοπιστία της δρομολόγησης. Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί την καθορισμένη θέση του για να αντιστοιχηθεί με ένα συγκεκριμένο σημείο στο εικονικό πλέγμα. Οι κόμβοι που

αντιστοιχούνται στο ίδιο σημείο μέσα στο εικονικό πλέγμα θεωρούνται σαν ίσοι όσο αναφορά το κόστος δρομολόγησης του πακέτου. Αυτή η ισορροπία αξιοποιείται διατηρώντας μερικούς κόμβους που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή μέσα στο πλέγμα σε κατάσταση αναμονής για να διατηρήσουμε ενέργεια. Για αυτό το GAF μπορεί ουσιαστικά να αυξήσει την διάρκεια ζωής του δικτύου όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων. Υπάρχουν τρία στάδια στο πρωτόκολλο GAF. Αυτές είναι η φάση ανακάλυψης, για τον καθορισμό των γειτόνων μέσα στο πλέγμα, η ενεργή φάση που αντικατοπτρίζει την συμμετοχή στην δρομολόγηση και η φάση αναμονής όταν ο πομπός ή ο δέκτης είναι κλειστός. Στην Εικόνα 33 βλέπουμε τις τρεις φάσεις στο GAF.



Εικόνα 33. Διάγραμμα εναλλαγής καταστάσεων στο GAF.

Αρχικά οι κόμβοι ξεκινούν σε κατάσταση ανίχνευσης. Όταν βρίσκεται σε αυτή τη φάση ένας κόμβος ανοίγει τον πομπό του και τον δέκτη και ανταλλάσσει μηνύματα ανίχνευσης για να βρει άλλους κόμβους μέσα στο ίδιο πλέγμα. Σε αυτή τη φάση ο κόμβος θέτει ένα χρόνο T_d και μόλις λήξει ο χρόνος αυτός ο κόμβος στέλνει το μήνυμα ανίχνευσής και μπαίνει σε ενεργή φάση. Όταν ένας κόμβος εισέρχεται σε ενεργή φάση τότε θέτει μια τιμή λήψης (timeout value) T_a για να καθορίσει πόσο θα μείνει σε αυτή τη φάση. Μετά από χρόνο T_a ο κόμβος θα επιστρέψει στην φάση ανακάλυψης. Όσο είναι ενεργός ο κόμβος περιοδικά επαναμεταδίδει το μήνυμα ανίχνευσής του σε χρονικά διαστήματα T_d . Ένας κόμβος που βρίσκεται σε φάση ανακάλυψης ή ενεργή φάση μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση αναμονής όταν μπορεί να καθορίσει πως κάποιοι ίσοι κόμβοι θα

χειριστούν την δρομολόγηση. Οι κόμβοι διαπραγματεύονται μεταξύ τους για το ποιος θα χειριστεί την δρομολόγηση μέσα από μια διαδικασία βαθμολόγησης. Όταν μπει σε κατάσταση αναμονής ο κόμβος ακυρώνει όλους τους εν αναμονή χρόνους του και κλείνει τον πομπό του.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων έχουν δείξει πως το GAF μπορεί να αποδώσει τουλάχιστον όσο καλά αποδίδει ένα κανονικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για ad hoc δίκτυα όσο αναφορά καθυστέρηση και απώλεια πακέτων και αυξάνει όμως την ζωή του δικτύου εξοικονομώντας ενέργεια. Αν και το GAF είναι ένα location-based πρωτόκολλο μπορεί να θεωρηθεί και σαν ιεραρχικό όπου οι ομάδες βασίζονται στην γεωγραφική θέση. Για κάθε συγκεκριμένη περιοχή μέσα στο πλέγμα ένας κόμβος αντιπρόσωπος δρα σαν κεφαλή για να στείλει τα δεδομένα στους άλλους κόμβους. Ο αρχηγός κόμβος όμως δεν κάνει συνάθροιση δεδομένων ή συγχώνευση όπως γίνεται σε άλλα ιεραρχικά πρωτόκολλα που είδαμε πριν.

3.3.3 GEAR

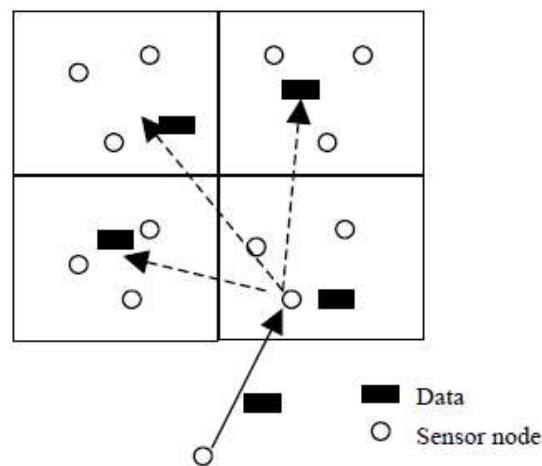
Το GEAR [60] πραγματεύεται την χρησιμοποίηση γεωγραφικής πληροφορίας ενώ διαδίδει επερωτήσεις στα κατάλληλα τμήματα αφού συχνά τα επερωτήματα δεδομένων περιέχουν γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Το πρωτόκολλο επιλέγει τους γείτονές του βάση ευριστικών σχετικών με την ενέργεια και τη γεωγραφική πληροφορία για να δρομολογήσει τα πακέτα στο τμήμα του προορισμού. Η κύρια ιδέα είναι να περιορίσει τον αριθμό των ενδιαφερόντων (interests) στην κατευθυνόμενη διάδοση επικεντρώνοντας την προσοχή του μόνο σε ένα συγκεκριμένο τμήμα παρά να στέλνει τα ενδιαφέροντα σε όλο το δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό το GEAR μπορεί να διατηρήσει περισσότερη ενέργεια από το directed diffusion.

Κάθε κόμβος στο GEAR διατηρεί ένα υπολογισμένο κόστος και ένα νέο κόστος (learning cost) για να φτάσει στον προορισμό. Το υπολογισμένο κόστος είναι ένας συνδυασμός της υπολειπόμενης ενέργειας και της απόστασης του

προορισμού. Το νέο κόστος είναι ένα φιλτράρισμα του υπολογισμένου κόστους όσο αναφορά τη δρομολόγηση γύρω από τρύπες του δικτύου. Μια τρύπα συμβαίνει όταν ένας κόμβος δεν έχει κάποιο άλλο κόμβο εκτός από τον εαυτό του πιο κοντά στην περιοχή στόχο. Αν δεν υπάρχουν καθόλου τρύπες το υπολογισμένο κόστος είναι ίδιο με το νέο κόστος. Το νέο κόστος διαδίδεται ένα βήμα πίσω κάθε φορά που ένα πακέτο φτάνει στον προορισμό έτσι ώστε η δρομολόγηση για τον νέο πακέτο να προσαρμοστεί καταλλήλως.

Ο αλγόριθμος έχει δυο φάσεις

- Αρχικά προωθεί τα πακέτα στην περιοχή στόχο. Όταν λάβει ένα πακέτο, ο κόμβος ελέγχει τους γείτονές του να δει αν υπάρχει κάποιος ο οποίος είναι πιο κοντά στην περιοχή στόχο από ότι αυτός. Εάν υπάρχει παραπάνω από ένας ο κοντινότερος γείτονας στην περιοχή στόχο επιλέγεται σαν επόμενο βήμα στην δρομολόγηση. Εάν όλοι οι γείτονες είναι πιο μακριά από τον κόμβο τον ίδιο, τότε αυτό σημαίνει πως υπάρχει τρύπα. Σε αυτή την περίπτωση ένας κόμβος επιλέγεται για να προωθήσει το πακέτο με βάση τη συνάρτηση νέου κόστους (learning cost function). Αυτή η επιλογή μπορεί μετά ενημερωθεί σύμφωνα με τη σύγκλιση του νέου κόστους κατά τη διάρκεια παράδοσης των μηνυμάτων.
- Σε δεύτερη φάση προωθεί τα πακέτα εντός της περιοχής στόχου. Εάν το πακέτο έχει φτάσει στην περιοχή μπορεί να διαδοθεί μέσα στην περιοχή είτε χρησιμοποιώντας επαναληπτική γεωγραφική προώθηση είτε περιορισμένη πλημμύρα. Η περιορισμένη πλημμύρα είναι καλή όταν οι κόμβοι δεν είναι πυκνά τοποθετημένοι. Σε πυκνά τοποθετημένα δίκτυα η επαναληπτική γεωγραφική πλημμύρα είναι πιο αποδοτική ενεργειακά από την περιορισμένη πλημμύρα. Σε αυτή την περίπτωση η περιοχή χωρίζεται σε τέσσερις υποπεριοχές και δημιουργούνται τέσσερα αντίγραφα του πακέτου. Αυτή η διαδικασία διαίρεσης και προώθησης συνεχίζεται μέχρι και τα τμήματα να μείνουν με ένα μόνο κόμβο. Στην Εικόνα 34 βλέπουμε την διαδικασία αυτή.



Εικόνα 34. Επαναληπτική γεωγραφική προώθηση στο πρωτόκολλο GEAR.

Το GEAR έχει συγκριθεί με το GPSR το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο για ad hoc δίκτυα και χρησιμοποιεί επίπεδους γράφους για να λύσει το πρόβλημα των τρυπών. Στο GPSR τα πακέτα ακολουθούν την περίμετρο του επίπεδου γράφου για να βρουν την διαδρομή τους. Αν και το GPSR μειώνει τον αριθμό των καταστάσεων που ένας κόμβος πρέπει να διατηρεί έχει σχεδιαστεί για ad hoc κινητά δίκτυα και χρειάζεται μια υπηρεσία εντοπισμού για να εντοπίσει της θέσεις και τις ταυτότητες των κόμβων. Το GEAR όχι μόνο μειώνει την καταναλισκόμενη ενέργεια για να ξεκινήσει η δρομολόγηση αλλά αποδίδει καλύτερα από το GPSR στο θέμα της παράδοσης των πακέτων. Προσομοιώσεις έχουν δείξει πως άνιση κατανομή κίνησης το GEAR παραδίδει 70% με 80% περισσότερα πακέτα. Για ομοιόμορφη κατανομή κίνησης το GEAR παραδίδει 25% με 35% περισσότερα πακέτα.

3.3.4 GeRaF

Το Geraf [61] χρησιμοποιεί γεωγραφική δρομολόγηση όπου ένας κόμβος που δρα σαν αναμεταδότης δεν είναι γνωστός από την αρχή στον αποστολέα. Δεν υπάρχει εγγύηση ότι ένας αποστολέας θα μπορεί πάντα να προωθήσει το μήνυμα

στον τελικό προορισμό του που είναι η καταβόθρα. Για αυτό το Geraf λέγεται καλύτερης προσπάθειας (best-effort) δρομολόγηση. Το Geraf θεωρεί πως όλοι οι κόμβοι γνωρίζουν την φυσική τους θέση όπως και την θέση της καταβόθρας. Αν και το Geraf ενσωματώνει την ένα αλγόριθμο γεωγραφικής δρομολόγησης και ένα αλγόριθμο προγραμματισμού ενεργοποίησης και αναμονής των κόμβων, οι κόμβοι δεν χρειάζεται να παρακολουθούν την τοποθεσία των γειτόνων τους και των προγραμμάτων ενεργοποίησης και αναμονής. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύσει δεδομένα που πρέπει να σταλούν στην καταβόθρα τότε αρχικά ελέγχει εάν το κανάλι είναι ελεύθερο για να αποφύγει τις συγκρούσεις. Αν το κανάλι παραμένει αδρανές για λίγο χρόνο ο κόμβος μεταδίδει μια αίτηση για αποστολή (RTS) σε όλους τους ενεργούς γείτονες του. Αυτό το μήνυμα περιλαμβάνει την τοποθεσία της πηγής και της καταβόθρας. Να σημειωθεί πως η καλυπτόμενη περιοχή η οποία καλείται και περιοχή προώθησης (forwarding area), χωρίζεται σε ένα σύνολο N_p περιοχών διαφορετικών προτεραιοτήτων έτσι ώστε όλα τα σημεία σε μια περιοχή με μεγαλύτερη προτεραιότητα να βρίσκονται πιο κοντά στην καταβόθρα από κάθε σημείο μιας άλλης περιοχής χαμηλότερης προτεραιότητας.

Όταν οι ενεργοί γείτονες λάβουν το RTS μήνυμα τότε εκτιμούν την προτεραιότητά τους βασισμένοι στην θέση την δική τους όσο και στην θέση της καταβόθρας. Η πηγή περιμένει για ένα ελεύθερο προς αποστολή (CTS) μήνυμα από ένα κόμβο που βρίσκεται σε περιοχή μεγαλύτερης προτεραιότητας. Σε περίπτωση που η πηγή δεν λάβει το CTS μήνυμα τότε θεωρείται πως η περιοχή με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα είναι κενή. Έτσι στέλνει ένα άλλο RTS μήνυμα αναζητώντας τους κόμβους με το δεύτερο μεγαλύτερο επίπεδο προτεραιότητας. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι ο κόμβος να λάβει ένα CTS μήνυμα το οποίο θα σημαίνει πως βρέθηκε ένας κόμβος αναμεταδότης (relay node). Έπειτα η πηγή στέλνει τα πακέτα της στον επιλεγμένο αναμεταδότη που με την σειρά του απαντάει στην πηγή με ένα ACK μήνυμα επιβεβαίωσης που σημαίνει ότι έλαβε το πακέτο. Ο αναμεταδότης δρα με τον ίδιο τρόπο που δρα και η πηγή για να βρει τον δεύτερο αναμεταδότη. Η ίδια λειτουργία επαναλαμβάνεται μέχρι η καταβόθρα να λάβει τα δεδομένα που προέρχονται από την πηγή.

Υπάρχει ενεχόμενο ο αποστολέας να μην λάβει κανένα CTS μήνυμα αφού έχει στείλει ήδη N_p τέτοια μηνύματα. Αυτό σημαίνει ότι οι γείτονες του κόμβου

δεν είναι ενεργοί. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος οπισθοχωρεί για λίγο χρονικό διάστημα και αποσύρεται αργότερα. Μετά από συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών ο αποστολέας είτε βρίσκει ένα αναμεταδότη ή ακυρώνει την αποστολή του πακέτα αν έχει ξεπεραστεί ο μέγιστος αριθμός επιτρεπόμενων προσπαθειών αποστολής.

3.4 QoS-based δρομολόγηση

Στην δρομολόγηση με βάση την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), το δίκτυο πρέπει να ισορροπήσει μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ποιότητας των δεδομένων. Στην πραγματικότητα το δίκτυο πρέπει να ικανοποιήσει συγκεκριμένες μετρικές ποιότητας υπηρεσίας όπως για παράδειγμα η καθυστέρηση, η αντοχή στα σφάλματα, το εύρος ζώνης κ.α κατά την παράδοση των πακέτων στον σταθμό βάσης. Θα δούμε παρακάτω μερικά πρωτόκολλα που έχουν προταθεί σε αυτή την κατηγορία.

3.4.1 SAR

Το SAR [62] είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα για δίκτυα αισθητήρων που εισάγει τον όρο της ποιότητας υπηρεσίας στις αποφάσεις δρομολόγησης. Η απόφαση δρομολόγησης στο SAR εξαρτάται από τρεις παράγοντες: τα ενεργειακά αποθέματα, την ποιότητα υπηρεσίας σε κάθε μονοπάτι και τον βαθμό προτεραιότητας κάθε πακέτου. Για να αποφύγει αποτυχία μιας διαδρομής το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μια προσέγγιση πολλαπλών μονοπατιών (multi-path) και χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός τοπικών διαδρομών αποκατάστασης. Για να δημιουργήσει πολλαπλά μονοπάτια από την πηγή, δημιουργείται ένα δέντρο κατευθυνόμενο από την πηγή στον προορισμό. Τα μονοπάτια του δέντρου δημιουργούνται αποφεύγοντας τους κόμβους με μικρή ενέργεια ή χωρίς εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Στο τέλος της διαδικασίας όλοι οι κόμβοι θα είναι μέρος κάποιου μονοπατιού. Έτσι το SAR είναι ένα πρωτόκολλο πολλαπλών μονοπατιών

με γνώμονα τους πίνακες (table driven) που στοχεύει να επιτύχει επάρκεια ενέργειας και ανοχή στα σφάλματα.

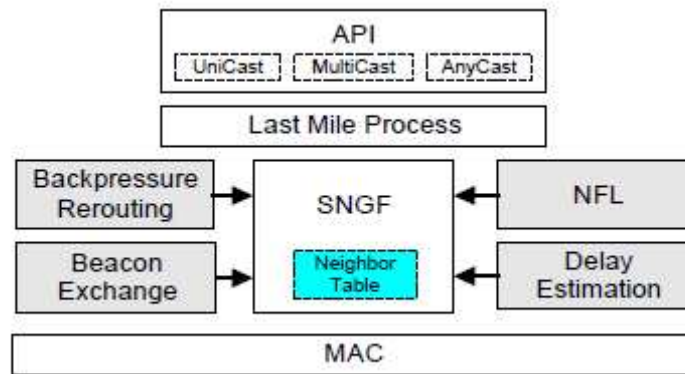
Ουσιαστικά το SAR υπολογίζει μια «ζυγισμένη» μετρική ποιότητας υπηρεσίας που προκύπτει από το αποτέλεσμα της αθροιστικής μετρικής ποιότητας υπηρεσίας και ενός συντελεστή βάρους που σχετίζεται με τον βαθμό προτεραιότητας κάθε πακέτου. Ο στόχος του SAR είναι να ελαχιστοποιήσει την μέση ζυγισμένη μετρική ποιότητας υπηρεσίας κατά την διάρκεια ζωής του δικτύου. Εάν η τοπολογία αλλάξει εξαιτίας αστοχίας κάποιων κόμβων χρειάζεται να υπολογιστεί πάλι κάποιο μονοπάτι. Σαν αποτρεπτικό μέσο, ένας περιοδικός επανυπολογισμός των μονοπατιών πυροδοτείται από τον σταθμό βάσης για να έχει υπόψη του αλλαγές στην τοπολογία. Χρειάζεται μια διαδικασία χειραψίας (handshake) βασισμένη σε ένα μηχανισμό τοπικών διαδρομών αποκατάστασης ανάμεσα στους γείτονες για να ανανήψουν από μια αποτυχία κόμβου.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων έχουν δείξει πως το SAR προσφέρει λιγότερη κατανάλωση ενέργειας από τον αλγόριθμο ελάχιστης ενέργειας (minimum energy metric algorithm) ο οποίος στοχεύει μόνο στην κατανάλωση ενέργειας κάθε πακέτου χωρίς να νοιάζεται για την προτεραιότητα. Το SAR διατηρεί πολλαπλά μονοπάτια από τους κόμβους προς τον σταθμό βάσης. Αν και αυτό διασφαλίζει την ανοχή σε σφάλματα και την εύκολη αποκατάσταση σε περίπτωση αποτυχίας κόμβου, το πρωτόκολλο πάσχει από τον φόρτο της διατήρησης των πινάκων και των καταστάσεων σε κάθε κόμβο ειδικά όταν ο αριθμός των κόμβων είναι μεγάλος.

3.4.2 SPEED

Ένα άλλο πρωτόκολλο είναι το SPEED [63] το οποίο παρέχει πραγματικού χρόνου από άκρο σε άκρο (end to end) εγγυήσεις. Το πρωτόκολλο αυτό απαιτεί κάθε κόμβος να διατηρεί πληροφορία σχετικά με τους γείτονές του και χρησιμοποιεί γεωγραφική προώθηση για να βρει τα μονοπάτια του. Επιπλέον

προσπαθεί να διασφαλίσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα για κάθε πακέτο μέσα στο δίκτυο έτσι ώστε κάθε εφαρμογή να μπορεί να υπολογίσει την καθυστέρηση των πακέτων από άκρο σε άκρο, διαιρώντας την απόσταση από τον σταθμό βάσης με την ταχύτητα του πακέτου. Επιπλέον το SPEED παρέχει αποφυγή των συγκρούσεων όταν το δίκτυο είναι συμφορημένο. Το στοιχείο δρομολόγησης είναι το SNFG και λειτουργεί μαζί με άλλα τέσσερα στοιχεία στο επίπεδο δικτύου. Βλέπουμε στην Εικόνα 35 το πρωτόκολλο SPEED και τα διάφορα στοιχεία του.



Εικόνα 35. Το πρωτόκολλο SPEED.

Όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα το SPEED αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία.

- Ένα API
- Ένα σχήμα σήματος ανταλλαγής γείτονα (Beacon Exchange Scheme)
- Ένα σχήμα εκτίμησης καθυστέρησης (Delay Estimation Scheme)
- Τον αλγόριθμο SNGF
- Το NFL
- Πίεση επιστροφής επαναδρομολόγησης (backpressure rerouting)
- Αποφυγή του κενού (void avoidance)
- Επεξεργασία τελευταίου μιλίου. (Last Mile Process)

Το SNGF είναι υπεύθυνο να διαλέξει τον επόμενο υποψήφιο κόμβο που μπορεί να υποστηρίξει την επιθυμητή ταχύτητα, τα NFL και η πίεση επιστροφής επαναδρομολόγησης είναι υπεύθυνα να μειώνουν ή να διαφοροποιούν την ταχύτητα όταν υπάρχει συμφόρηση, έτσι ώστε το SNGF να έχει διαθέσιμους υποψηφίους να διαλέξει. Η επεξεργασία τελευταίου μιλίου παρέχεται για να υποστηρίξει τους μηχανισμούς επικοινωνίας που αναφέρθηκαν πριν. Το σχήμα εκτίμησης καθυστέρησης είναι ο μηχανισμός με τον οποίο ένας κόμβος αποφασίζει εάν έχει ή όχι συμβεί συμφόρηση στο δίκτυο. Το σχήμα σήματος ανταλλαγής γείτονα παρέχει γεωγραφικές πληροφορίες των γειτόνων έτσι ώστε το SNGF να μπορεί να κάνει δρομολόγηση βασισμένη στην γεωγραφική θέση.

Συγκριτικά με το DSR και την Ad hoc on-demand vector δρομολόγηση το SPEED αποδίδει καλύτερα σε σχέση με την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και το ποσοστό αστοχίας. Επίσης η συνολική εκπεμπόμενη ενέργεια είναι λιγότερη λόγω της απλότητας του αλγορίθμου δρομολόγησης. Όμως το SPEED δεν λαμβάνει υπόψη καμία άλλη ενεργειακή μετρική στο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Τα παρακάτω πρωτόκολλα κάνουν μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα της δρομολόγησης. Οι διαδρομές μοντελοποιούνται και επιλύονται σαν προβλήματα ροής δικτύου. Παρουσιάζονται παρακάτω μερικά τέτοια πρωτόκολλα.

3.4.3 Μεγίστης διάρκειας ζωής ενεργειακή δρομολόγηση

Το πρωτόκολλο αυτό [64] είναι μια λύση στο πρόβλημα της δρομολόγησης που βασίζεται σε μια προσέγγιση ροής δικτύου. Το κύριο χαρακτηριστικό της προσέγγισης αυτής είναι η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου, καθορίζοντας προσεκτικά το κόστος μετάβασης σαν συνάρτηση της υπολειπόμενης ενέργειας του κόμβου και της απαιτούμενης ενέργειας εκπομπής που χρησιμοποιείται στη ζεύξη. Η εύρεση της κατανομής της κίνησης αποτελεί

μια πιθανή λύση στο πρόβλημα της δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και από αυτό προέρχεται το όνομα «μέγιστης διάρκειας ενεργειακή δρομολόγηση». Η λύση στο πρόβλημα μεγιστοποιεί τον εφικτό χρόνο ζωής του δικτύου. Για να βρει την καλύτερη ζεύξη για το καθορισμένο πρόβλημα μεγιστοποίησης, παρουσιάζονται και προσομοιώνονται δύο αλγόριθμοι μέγιστης υπολειπόμενης ενέργειας μονοπατιού.

Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι διαφέρουν στον καθορισμό του κόστους της ζεύξης και στην ενσωμάτωση της υπολειπόμενης ενέργειας των κόμβων. Αντί να χρησιμοποιούν την μεταβλητή e_{ij} η οποία είναι η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά την μετάδοση στην ζεύξη μεταξύ των κόμβων i και j , χρησιμοποιούνται τα παρακάτω κόστη:

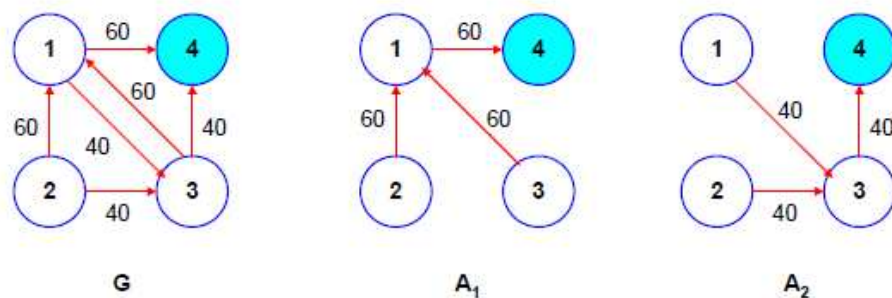
$$c_{ij} = \frac{1}{E_i - e_{ij}} \text{ και } c_{ij} = \frac{e_{ij}}{E_i}, \text{ όπου } E_i \text{ είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου } i.$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ελαχίστου μονοπατιού Bellman-Ford και από τους τύπους $D_i^{(n+1)} = \min[\min_{j \in S_i} \{\max(c_{ij}, D_j^{(n)})\}, D_i^{(n)}]$ και $D_i^{(n+1)} = \min[\min_{j \in S_i} (c_{ij} + D_j^{(n)}), D_i^{(n)}]$, όπου $D_i^{(n)}$ η απόσταση του μονοπατιού από τον κόμβο i στον προορισμό στο n -οστό βήμα. S_i το σύνολο των κόμβων που βρίσκονται στην εμβέλεια μετάδοσης του κόμβου i και c_{ij} τα κόστη ανάμεσα στις ζεύξεις όπως ορίστηκαν παραπάνω.

Το τελικό κόστος μονοπατιού που προκύπτουν από τον συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων είναι και το μονοπάτι που η υπολειπόμενη ενέργειά του είναι η μεγαλύτερη. Οι αλγόριθμοι αυτοί συγκρίθηκαν με τον αλγόριθμο MTE (minimum transmitted energy) ο οποίος λαμβάνει υπόψη την μεταβλητή e_{ij} σαν κόστος ζεύξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος πετυχαίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και για τα δύο μοντέλα κόστους ζεύξης. Η διαφορά αυτή μεταξύ του MTE και του νέου αλγόριθμου έγκειται στο γεγονός πως ο παλιός αλγόριθμος είχε σαν μετρική την τιμή της απόλυτης υπολειπόμενης ενέργειας ενώ ο νέος έχει σαν αναφορά την τιμή της σχετικής υπολειπόμενης ενέργειας που αντανακλά τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας στο μέλλον.

3.4.4 Μεγίστης διάρκειας ζωής συλλογή δεδομένων

Στο πρωτόκολλο αυτό [65] οι διαδρομές των δεδομένων μοντελοποιούνται σαν ένα πρόβλημα μεγίστης διάρκειας ζωής συλλογής δεδομένων. Ο χρόνος ζωής T του συστήματος ορίζεται ως ο αριθμός των γύρων ή των περιοδικών διαβασμάτων των δεδομένων από τους κόμβους μέχρι να «πεθάνει» ο πρώτος κόμβος. Το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων καθορίζει για κάθε γύρω θα δρομολογηθούν τα πακέτα στον προορισμό. Ένα πρόγραμμα έχει ένα δέντρο για κάθε γύρο το οποίο είναι κατευθυνόμενο από τον προορισμό και διατρέπει όλους τους κόμβους του δικτύου. Ο χρόνος ζωής του συστήματος εξαρτάται από την διάρκεια κατά την οποία το πρόγραμμα παραμένει έγκυρο. Στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του προγράμματος. Ένας αλγόριθμος που ονομάζεται MLDA προτείνεται. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη της συνάθροιση των δεδομένων και δημιουργεί διαδρομές μέγιστης διάρκειας ζωής. Σε αυτή την περίπτωση εάν θεωρηθεί ένα πρόγραμμα S με T γύρους αυτό περιλαμβάνει ένα δίκτυο ροής. Το δίκτυο ροής με την μέγιστη διάρκεια ζωής που υπακούει στους ενεργειακούς περιορισμούς ονομάζεται βέλτιστο επιτρεπτό δίκτυο ροής. Ύστερα κατασκευάζεται ένα πρόγραμμα χρησιμοποιώντας αυτό το επιτρεπτό δίκτυο ροής. Στην Εικόνα 36 βλέπουμε ένα επιτρεπτό δίκτυο ροής G με χρόνο ζωής 100 γύρους και δύο δέντρα συνάθροισης A_1 και A_2 με χρόνους ζωής 60 και 50 αντίστοιχα. Το βάθος των A_1 και A_2 είναι 2. Σαν βάθος ορίζεται το $\max \{depth(u) : u \in V\}$ όπου $depth(u)$ το βάθος του u κόμβου δηλαδή ο μέσος όρος των βαθμών του σε κάθε δέντρο συνάθροισης.



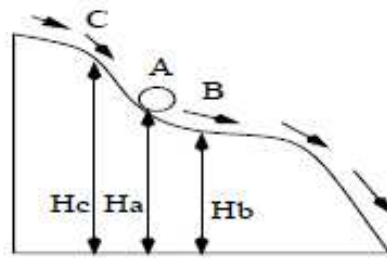
Εικόνα 36. Επιτρεπτό δίκτυο ροής και τα δέντρα συνάθροισης που το αποτελούν.

Μια παραλλαγή του προβλήματος έχει ληφθεί υπόψη για εφαρμογές όπου η συνάντηση δεδομένων δεν είναι εφικτή για παράδειγμα μετάδοση βίντεο από κόμβους. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος ονομάζεται MLDR και μοντελοποιείται σαν ένα πρόβλημα ροής δικτύου με ενεργειακούς περιορισμούς.

Και οι δύο αλγόριθμοι ο MLDR και ο MLDA, έχουν συγκριθεί με το hierarchical-PEGASIS με βάση τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Τα αποτελέσματα έχουν δείξει πως και οι δύο αποδίδουν σαφώς καλύτερα από το hierarchical-PEGASIS. Όμως στο MLDA η καθυστέρηση του πακέτου είναι ελάχιστα πιο μεγάλη από ότι στο hierarchical-PEGASIS. Ενώ το MLDA αποδίδει καλύτερα από τα άλλα δύο όσο αναφορά τη διάρκεια ζωής του συστήματος έχει προταθεί και μια άλλη λύση αυτή του CMLDA το οποίο βασίζεται σε ομαδοποίηση για να διασφαλιστεί η επεκτασιμότητα του αλγορίθμου.

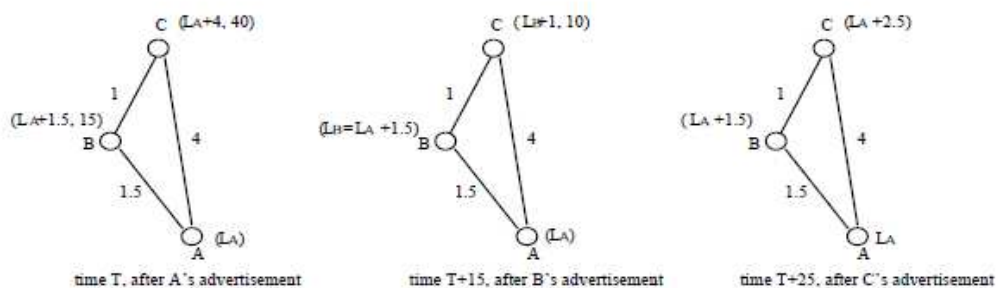
3.4.5 Δρομολόγηση ελαχίστου κόστους

Το πρωτόκολλο [66] εδώ είναι εμπνευσμένο από ένα φυσικό φαινόμενο (Εικόνα 37). Όπως το νερό ρέει στο βουνό προς την κοιλάδα και το ύψος κάθε σημείο είναι ουσιαστικά ο οδηγός του νερού για να κυλήσει από ένα ψηλό σημείο σε ένα χαμηλό έτσι και σε αυτό τον αλγόριθμο ορίζεται σαν κόστος πεδίου το ελάχιστο κόστος από τον κόμβο στην καταβόθρα μέσω του βέλτιστου μονοπατιού. Το πεδίο έχει μόνο μια τιμή για κάθε κόμβο η οποία είναι το ελάχιστο κόστος προς την καταβόθρα. Είναι η μοναδική κατάσταση που κρατείται από τους ενδιάμεσους κόμβους. Το κόστος της ζεύξης μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή είτε ως αριθμός βημάτων είτε ως καταναλισκόμενη ενέργεια είτε ως καθυστέρηση.



Εικόνα 37. Το σημείο A έχει μεγαλύτερο ύψος από το B και μικρότερο από το C. Άρα το νερό θα πάει προς το B και όχι προς το C.

Το πρωτόκολλο έχει δύο φάσεις. Αρχικά έχουμε την φάση εγκαθίδρυσης στην οποία ορίζονται τα κόστη σε όλους τους κόμβους. Αρχίζει από την καταβόθρα και διαχέεται σε όλο το δίκτυο. Κάθε κόμβος προσαρμόζει το κόστος του προσθέτοντας το κόστος του κόμβου από τον οποίο έλαβε το μήνυμα και το κόστος της ζεύξης. Αυτό όμως δεν γίνεται με την μέθοδο της πλημμύρας. Αντί για αυτήν χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος οπισθοχώρησης για να περιορίσει τον αριθμό των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται. Η προώθηση των μηνυμάτων καθυστερείται για κάποιο χρονικό διάστημα για να επιτραπεί στα μηνύματα με το ελάχιστο κόστος να φτάσουν στον κόμβο. Έτσι ο αλγόριθμος βρίσκει το βέλτιστο κόστος όλων των κόμβων προς την πηγή χρησιμοποιώντας μόνο ένα μήνυμα κάθε φορά. Στην Εικόνα 38 βλέπουμε μια σχηματική παράσταση του αλγορίθμου.



Εικόνα 38. Ο αλγόριθμος οπισθοχώρησης

Στη δεύτερη φάση, η πηγή μεταδίδει τα δεδομένα στους γείτονές της. Οι κόμβοι που λαμβάνουν μεταδίδουν το μήνυμα προσθέτοντας το κόστος μετάδοσης τους στο κόστος του πακέτου. Μετά ο κόμβος ελέγχει το

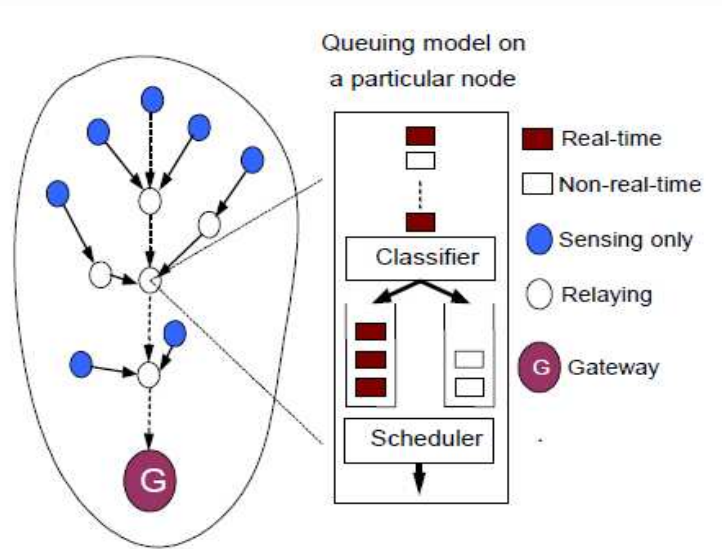
υπολειπόμενο κόστος του πακέτου. Εάν το υπολειπόμενο κόστος δεν είναι επαρκές για να φτάσει στην πηγή το πακέτο απορρίπτεται. Αλλιώς ο κόμβος προωθεί το πακέτο στους γείτονές του. Το πρωτόκολλο δεν χρειάζεται διευθυνσιοδότηση των κόμβων και μονοπάτια προώθησης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουν δείξει πως το κόστος για κάθε κόμβο που επιτυγχάνεται από αυτό το πρωτόκολλο είναι παρόμοια της μεθόδου της πλημμύρας. Σαν συνέπεια, η βέλτιστη προώθηση επιτυγχάνεται με τον ελάχιστο αριθμό δημοσιεύσεων (advertisements). Ο μέσος αριθμός δημοσιεύσεων στην μέθοδο της πλημμύρας μπορούν να μειωθούν κατά ένα παράγοντα 50 χρησιμοποιώντας αυτό τον αλγόριθμο της οπισθοχώρησης με κατάλληλη ρύθμιση του χρόνου οπισθοχώρησης.

3.4.6 Ενεργειακό QoS πρωτόκολλο Δρομολόγησης

Στο πρωτόκολλο [67] αυτό παράγεται από τους κόμβους κίνηση πραγματικού χρόνου. Το πρωτόκολλο αυτό επεκτείνει το πρωτόκολλο Energy-aware routing for cluster-based sensor networks που παρουσιάστηκε παραπάνω και βρίσκει ένα μονοπάτι ελάχιστου κόστους και αποδοτικό ως προς την ενέργεια το οποίο ικανοποιεί συγκεκριμένη καθυστέρηση διάδοσης από άκρη σε άκρη. Το κόστος της ζεύξης που χρησιμοποιείται είναι μια συνάρτηση που ενσωματώνει την υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου, την ενέργεια εκπομπής, το ρυθμό λαθών και άλλες παραμέτρους επικοινωνίας.

Για να υποστηρίξει την κίνηση πραγματικού χρόνου και την καλύτερη λύση ταυτόχρονα χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ουράς βασισμένο σε κλάσεις. Το μοντέλο το οποίο βλέπουμε στην Εικόνα 38, επιτρέπει τον διαμοιρασμό της υπηρεσίας για κίνηση πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Η αναλογία εύρους ζώνης r , καθορίζεται σαν μια αρχική τιμή η οποία θέτεται από την πύλη (gateway) και αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης που θα είναι κοινό για την κίνηση πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου σε μια συγκεκριμένη εξερχόμενη ζεύξη σε περίπτωση συμφόρησης. Συνεπώς ο ρυθμός μετάδοσης των κανονικού δεδομένων δεν μειώνεται αν ρυθμιστεί σωστά το r .



Εικόνα 39. Μοντέλο ουράς σε ένα κόμβο δικτύου.

Το πρωτόκολλο βρίσκει μια λίστα με μονοπάτια ελάχιστου κόστους χρησιμοποιώντας μια διευρυμένη έκδοση του αλγορίθμου του Dijkstra και διαλέγει το μονοπάτι εκείνο από τη λίστα το οποίο πληροί την απαίτηση καθυστέρησης.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων έχουν δείξει πως το προτεινόμενο πρωτόκολλο αποδίδει καλά όσο αφορά την ποιότητα υπηρεσίας και τις μετρικές ενέργειας. Όμως η τιμή r καθορίζεται αρχικά να είναι η ίδια για όλους τους κόμβους έτσι δεν υπάρχει ευελιξία στο να ρυθμίζουμε το κοινό εύρος ζώνης για διαφορετικές ζεύξεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Cross-Layer Βελτιστοποίηση

Έχει γίνει εξονυχιστική έρευνα για να δημιουργηθούν πρωτόκολλα για αποδοτική επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα. Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα επικοινωνίας βελτιώνουν την απόδοση των κόμβων σε θέματα ενέργειας, εκμεταλλευόμενα την συνεργατική φύση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αλλά και τα συσχετισμένα χαρακτηριστικά τους. Όμως η κύρια ομοιότητα αυτών των πρωτοκόλλων είναι ότι ακολουθούν τη παραδοσιακή αρχιτεκτονική των στρωμάτων. Ενώ τα περισσότερα από αυτά τα πρωτόκολλα πετυχαίνουν πολύ υψηλή απόδοση σε σχέση με τις μετρικές για κάθε επίπεδο ξεχωριστά, δεν είναι βελτιστοποιημένα με συνεργατικό τρόπο έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν την συνολική απόδοση του δικτύου ελαχιστοποιώντας παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας. Αν σκεφτούμε την ελάχιστη ενέργεια και τις δυνατότητες επεξεργασίας των δικτύων αισθητήρων, η από κοινού βελτιστοποίηση και σχεδίαση των επιπέδων του δικτύου, διαφαίνεται ως η πιο πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για την ανεπαρκή παραδοσιακή στρωματική αρχιτεκτονική.

Έχει αποδειχθεί μέσα από μελέτες πως οι cross-layer τεχνικές σχεδίασης πετυχαίνουν σημαντική βελτίωση σε θέματα διατήρησης της ενέργειας. Γενικά υπάρχουν τρεις λόγοι πίσω από αυτή την βελτίωση. Αρχικά η μικρή ενέργεια, ο αποθηκευτικός χώρος και οι δυνατότητες επεξεργασίας των κόμβων απαιτούν μια τέτοια διαστρωματική προσέγγιση. Ο σημαντικός φόρτος των στρωματικών πρωτοκόλλων οδηγεί σε ανεπάρκεια των πρωτοκόλλων αυτών. Επίσης, μελέτες δείχνουν πως στη σχεδίαση των πρωτοκόλλων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα χαρακτηριστικά των πομποδεκτών αλλά και οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι επικοινωνίας. Τέλος, η προσέγγιση που βασίζεται σε συμβάντα (event-centric approach) στην οποία στηρίζονται τα δίκτυα αισθητήρων, απαιτεί application-aware επικοινωνιακά πρωτόκολλα. Θα παρουσιάσουμε παρακάτω τις βελτιώσεις στην απόδοση αλλά και τα ρίσκα που συνάγεται αυτής της cross-layer προσέγγισης.

4.1 Cross-Layer Πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Μελέτες και πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει πως υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων στα δίκτυα αισθητήρων. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι σημαντικές για την σχεδίαση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα δίκτυα αυτά. Για παράδειγμα, έχει εξεταστεί η επίδραση του ασύρματου καναλιού στο απλό πρωτόκολλο της πλημμύρας. Η ασύμμετρη φύση του καναλιού έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση να είναι διαφορετική από την προβλεπόμενη. Παρομοίως, πειραματικές μελέτες αποκάλυψαν πως η τέλεια υποδοχή εντός περιοχής μπορεί να είναι παραπλανητική όσο αναφορά εκτιμήσεις απόδοσης εξαιτίας της ύπαρξης της μεταβατικής περιοχής (transitional region) σε ζεύξεις χαμηλής ενέργειας. Επίσης, έχουν εξεταστεί κατευθυντήριες γραμμές για πρωτόκολλα φυσικού επιπέδου. Όλες αυτές οι μελέτες συνηγορούν στο ότι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας πρέπει να επανασχεδιαστούν συνυπολογίζοντας και τις ιδιότητες του ασύρματου καναλιού. Παρομοίως, πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό και η αλληλεπίδραση του τοπικού ανταγωνισμού με την από άκρο σε άκρο συμφόρηση. Η αλληλεξάρτηση μεταξύ αυτών και άλλων στρωμάτων δικτύου απαιτούν τη δημιουργία προσαρμοστικών cross-layer μηχανισμών για την αποδοτική παράδοση των πακέτων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Επιπλέον από την επίδραση του ασύρματου καναλιού και των cross-layer αλληλεπιδράσεων η χωρική συσχέτιση είναι ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των ασύρματων δικτύων. Αν το δίκτυο είναι πυκνό τότε θα υπάρχει μεγάλη συσχέτιση στα αποτελέσματα των παρατηρήσεων των κόμβων. Επίσης λόγω της φύσης της παρατήρησης θα υπάρχει και μια τοπική συσχέτιση αφού ένα τοπικό γεγονός θα ανιχνεύεται από ένα σύνολο κόμβων γύρω από αυτό. Εκμεταλλευόμενοι αυτές τις τοπικές-χωρικές συσχετίσεις μπορεί να βελτιώσουμε την ενεργειακή απόδοση των δικτύων αισθητήρων.

Η cross-layer προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί σε δύο κύρια πλαίσια. Σε πολλές μελέτες θεωρείται η cross-layer αλληλεπίδραση, όπου η παραδοσιακή στρωματική δομή διατηρείται ενώ κάθε στρώμα είναι ενημερωμένο για την κατάσταση των υπολοίπων στρωμάτων. Όμως, οι μηχανισμοί κάθε στρώματος

παραμένουν ανέπαφοι. Από την άλλη, θα επωφεληθούμε πολύ εάν σκεφτούμε τους μηχανισμούς των στρωμάτων του δικτύου με ένα ενοποιημένο τρόπο έτσι ώστε να παρέχουμε μια ενιαία δομή για αποδοτικές επικοινωνίες. Παρακάτω κατηγοριοποιούμε τα cross-layer πρωτόκολλα που υπάρχουν με βάση την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα διάφορα επίπεδα.

4.1.1 MAC + PHY

Στο [68] η ανάλυση για την κατανάλωση ενέργειας για το φυσικό και το MAC στρώμα πραγματοποιείται για τρία διαφορετικά MAC πρωτόκολλα το Nr CSMA, το S-MAC και το nano-MAC. Χρησιμοποιείται ένα γραμμικό μοντέλο δικτύου και διάφορα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας στον πομποδέκτη. Αναπτύσσεται και ένα μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας με αδρανοποίηση κόμβων για μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Όλα αυτά λειτουργούν αρμονικά μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως όταν ένα πραγματικό μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο αισθητήρων τότε για εφικτές αποστάσεις μετάδοσης, η επικοινωνίες ενός βήματος (single hop) μπορούν να είναι πιο αποδοτικές από τις επικοινωνίες πολλαπλών βημάτων (multi hop) όσο αναφορά θέματα ενέργειας. Όμως υπάρχουν κάποια ψεγάδια στην χρησιμοποίηση των ήδη υπάρχοντων ad hoc MAC πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η αδρανής ακρόαση του καναλιού (idle listening) όταν δηλαδή ο κόμβος είναι σε κατάσταση που περιμένει να λάβει δεδομένα αλλά δεν λαμβάνει και η αποφυγή της συνακρόασης (overhearing) όταν δηλαδή λαμβάνει πακέτα τα οποία προορίζονται για άλλο κόμβο είναι σημαντικοί παράγοντες αλλά και κάθε άλλη ακρόαση που δεν είναι απαραίτητη όπως για παράδειγμα η ακρόαση για το RTS στο S-MAC μειώνουν την ενεργειακή απόδοση του MAC. Στην δυαδική εκθετική οπισθοχώρηση (binary exponential backoff) όπου οι κόμβοι ακούν το κανάλι μόνο στο το διάστημα του ανταγωνισμού πριν εκπέμψουν έχουμε επίσης αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας ειδικά όταν η προσφερόμενη κίνηση στο κανάλι αυξάνεται. Χρησιμοποιώντας αδρανοποίηση κόμβων αυξάνεται η καθυστέρηση όμως μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας που είναι το κύριο χαρακτηριστικό που

θέλουμε να επιτύχουμε. Η κατανάλωση της ενέργειας στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό και στο MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε ταυτόχρονα με το αν η επικοινωνία ήταν ενός ή πολλών βημάτων. Τελικά με το πρωτόκολλο nano-MAC και επικοινωνία ενός βήματος επετεύχθη πάνω από 40% εξοικονόμηση ενέργειας από ότι στην επικοινωνία πολλών βημάτων και θα πρέπει να προτιμάται όταν η προσφερόμενη κίνηση στο δίκτυο είναι μικρή ή μεσαίου μεγέθους.

Στο [69] προτείνεται μια cross-layer λύση ανάμεσα στο MAC επίπεδο το φυσικό επίπεδο. Το πρωτόκολλο αυτό δείχνει πως μπορεί η χωρική συσχέτιση ανάμεσα στους κόμβους μπορεί να εκμεταλλευθεί για το επίπεδο MAC για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται εξομαλύνοντας την πρόσβαση στο μέσο έτσι ώστε οι πλεονάζουσες μεταδόσεις να μειωθούν. Επιτρέποντας σε ένα μόνο υποσύνολο των κόμβων να εκπέμπουν δεδομένα προς την καταβόθρα το προτεινόμενο πρωτόκολλο όχι μόνο εξοικονομεί ενέργεια αλλά και ελαχιστοποιεί τον ανταγωνισμό για πρόσβαση στο κανάλι και έτσι βελτιώνει τον ρυθμό χαμένων πακέτων χωρίς να μειώνει τον χρόνο ανίχνευσης ενός γεγονότος.

Το προτεινόμενο CC-MAC πρωτόκολλο είναι σχεδιασμένο για κατανεμημένη εφαρμογή και έχει δύο συνιστώσες. Το Event MAC (E-MAC) το οποίο φιλτράρει τα συσχετιζόμενα δεδομένα και το network MAC (N-MAC) το οποίο δίνει προτεραιότητα στην μετάδοση κάθε ειδικού πακέτου(route-thru packet) έναντι των άλλων πακέτων. Τα ειδικά αυτά πακέτα είναι εκπρόσωποι μιας ολόκληρης συσχετισμένης περιοχής και έτσι τους δίνεται μεγαλύτερη προτεραιότητα στην διαδρομή τους προς την καταβόθρα. Το E-MAC μειώνει την κίνηση σε μια περιοχή επιτρέποντας μόνο στους κόμβους που απέχουν τουλάχιστον όσο η απόσταση συσχέτισης να μεταδώσουν δεδομένα. Οι υπόλοιποι κόμβοι μπαίνουν σε κατάσταση αδρανοποίησης για να σώσουν ενέργεια και «ξυπνούν» για να προωθήσουν μηνύματα. Οι συσχετισμένοι κόμβοι εναλλάσσονται στον ρόλο του κόμβου που στέλνει δεδομένα για να υπάρχει μια ισορροπία στην κατανάλωση ενέργειας από όλους τους κόμβους. Το N-MAC προωθεί τα μηνύματα στην καταβόθρα αλλά αφού το E-MAC έχει ήδη αφαιρέσει τον πλεονασμό από τις πολλαπλές μεταδόσεις η προωθημένη κίνηση γίνεται πιο σημαντική. Το κύριο μειονέκτημα του CC-MAC είναι ότι πρέπει οι κόμβοι να διατηρούν πληροφορίες

για τους γειτονικούς κόμβους τους για να γνωρίζουν ποιοι κόμβοι είναι συσχετισμένοι μεταξύ τους. Επίσης το πρωτόκολλο παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα που μπορεί να περιορίσει την χρήση του. Τέλος όσο ο αριθμός των ανιχνεύσιμων γεγονότων αυξάνεται τόσο η ο φόρτος που σχετίζεται με τον υπολογισμό της ακτίνας συσχέτισης και της διανομής της κίνησης στο δίκτυο αυξάνεται. Για μεγάλα δίκτυα αισθητήρων αυτός ο φόρτος μπορεί να γίνει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Από την άλλη η απόδοση του CC-MAC έχει μελετηθεί μέσα από προσομοιώσεις που έχουν δείξει πως έχει σημαντικά οφέλη όσο αναφορά θέματα κατανάλωσης ενέργειας, καθυστέρησης και ρυθμό χαμένων πακέτων.

4.1.2 MAC + NETWORK

Η αλληλεπίδραση του επιπέδου MAC και του επιπέδου δικτύου έχει διερευνηθεί σε αρκετές μελέτες [[70],[71]]. Το Geraf πρωτόκολλο δρομολόγησης ουσιαστικά θα μπορούσε να ενταχθεί και σε αυτήν την κατηγορία καθώς χρησιμοποιεί το επίπεδο δικτύου σε συνδυασμό με ένα αλγόριθμο MAC για να αποδίδει καλύτερα.

Στο [72] προτείνεται και το πρωτόκολλο MACRO όπου η απόδοση για την δρομολόγηση παίρνεται με βάση το αποτέλεσμα των διαδοχικών ανταγωνισμών στο επίπεδο πρόσβασης μέσου. Συγκεκριμένα η επόμενος κόμβος διαλέγεται με βάση ένα συντελεστή βαρύτητας και η ενέργεια εκπομπής αυξάνεται συνεχώς μέχρι να βρεθεί ο πιο αποδοτικός κόμβος.

Το MAC-CROSS προτείνεται στο [73] και είναι ένα πρωτόκολλο που ελαχιστοποιεί τον αριθμό των κόμβων που πρέπει να είναι ενεργοί για να ολοκληρωθεί η διαδικασία επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο κάνει χρήση της πληροφορίας δρομολόγησης για να ενεργοποιήσει μόνο τους κόμβους που βρίσκονται στο μονοπάτι δρομολόγησης. Αυτό γίνεται χωρίζοντας τους κόμβους σε τρεις κατηγορίες οι οποίες μπορούν δυναμικά να αλλάζουν όταν υπάρχουν εκπομπές πακέτων. Η πρώτη κατηγορία είναι η ομάδα επικοινωνίας στην οποία

ανήκει κάθε κόμβος που λαμβάνει μέρος στην τρέχουσα μετάδοση πακέτων. Υπάρχει ακόμα η ομάδα επερχόμενης επικοινωνίας που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους που θα αναμειχθούν στην μετάδοση των δεδομένων και τέλος υπάρχει και η ομάδα των λοιπών κόμβων που περιλαμβάνει τους κόμβους εκείνους που δεν βρίσκονται πάνω στο μονοπάτι δρομολόγησης και επομένως δεν αναμειγνύονται στην μετάδοση των δεδομένων. Όλοι οι κόμβοι που δεν συμμετέχουν στην διαδικασία δρομολόγησης μπορούν να παραμείνουν σε κατάσταση αδρανοποίησης μέχρι να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος. Μπορεί ο αλγόριθμος να βελτιώνει την κατανάλωση ενέργειας αλλά από την άλλη εισάγει μεγαλύτερη καθυστέρηση.

Στο [74] προτείνεται το πρωτόκολλο ALBA το οποίο είναι ένα cross-layer πρωτόκολλο που βελτιστοποιεί το MAC επίπεδο και το επίπεδο δικτύου. Το ALBA εστιάζει σε κάποια θέματα που μπορούν να μειώσουν την καθυστέρηση αλλά και τις επιτυχείς μεταδόσεις. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει μηχανισμούς 1)για αναδρομολόγηση των πακέτων τα οποία έχουν φτάσει σε ένα αδιέξοδο (έτσι αυξάνει το ποσοστό των επιτυχών μεταδόσεων πακέτων) 2)ισορροπεί την φόρτο της κίνησης στο δίκτυο πετυχαίνοντας μείωση της συμφόρησης και 3)επιτρέπει την μετάδοση μιας ριπής πακέτων στον επιλεγμένο επόμενο κόμβο αναμεταδότη μειώνοντας έτσι τον φόρτο ελέγχου ανά πακέτο.

Προσομοιώσεις έχουν συγκρίνει τα πρωτόκολλα MACRO, ALBA και GeRaF. Το MACRO καταφέρνει να έχει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στην από άκρη σε άκρη μετάδοση των πακέτων από τα άλλα δυο πρωτόκολλα εξαιτίας των τεχνικών ελέγχου ενέργειας και της εύρεσης της μικρότερης διαδρομής. Όμως λόγω των πολλών πακέτων ελέγχου που χρειάζονται για να επιλεγεί ο επόμενος κόμβος αναμεταδότης και λόγω της μεγαλύτερης πιθανότητας συγκρούσεων πακέτων οδηγείται τελικά σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Η αύξηση από το ALBA και το GeRaF είναι της τάξης του 12%. Μεταξύ ALBA και GeRaF δεν παρατηρείται διαφορά σε πυκνά δίκτυα χαμηλής κίνησης. Τέλος τα ALBA και το GeRaF έχουν πολύ καλύτερη απόδοση όσο αναφορά την καθυστέρηση καθώς η εφαρμογή ενός αλγορίθμου διαχωρισμού (splitting algorithm) για την επίλυση των συγκρούσεων μεταξύ διαφορετικών υποψηφίων κόμβων αναμεταδοτών βελτιώνει κατά πολύ την ταχύτητα εύρεσης λύσης ενώ οι πιθανές συγκρούσεις στο

MACRO επιβάλλουν να ξεκινήσει από την αρχή η φάση επιλογής του επόμενου κόμβου αναμεταδότη.

Στο [75] προτείνεται ένας αλγόριθμος για προγραμματισμού και δρομολόγησης από κοινού για την περιοδική κίνηση στα δίκτυα αισθητήρων. Σε αυτό το σχήμα οι κόμβοι σχηματίζουν κατανεμημένα προγράμματα on-off για κάθε ροή στο δίκτυο ενώ οι διαδρομές εγκαθιδρύονται έτσι ώστε οι κόμβοι να είναι ενεργοί μόνο όταν χρειάζεται. Αφού η κίνηση είναι περιοδική, τα προγράμματα διατηρούνται για να υπάρξει μεγαλύτερη απόδοση.

Ο αλγόριθμος αυτός αποτελείται από δύο φάσεις για κάθε ροή στο δίκτυο.

- Την φάση εγκαθίδρυσης και αναδιοργάνωσης η οποία λαμβάνει χώρα κατά την αρχικοποίηση του δικτύου αλλά και σε κάθε αλλαγή των διαδρομών του δικτύου. Η φάση αυτή είναι σχετικά μικρής διάρκειας σε σχέση με την σταθερή φάση. Στόχος της είναι να δημιουργήσει τα προγράμματα που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στην σταθερή φάση.
- Την σταθερή φάση που λαμβάνει χώρα μεταξύ διαδοχικών φάσεων εγκαθίδρυσης και αναδιοργάνωσης. Χρησιμοποιεί τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν στην προηγούμενη φάση για να δρομολογήσει τα πακέτα στον σταθμό βάσης.

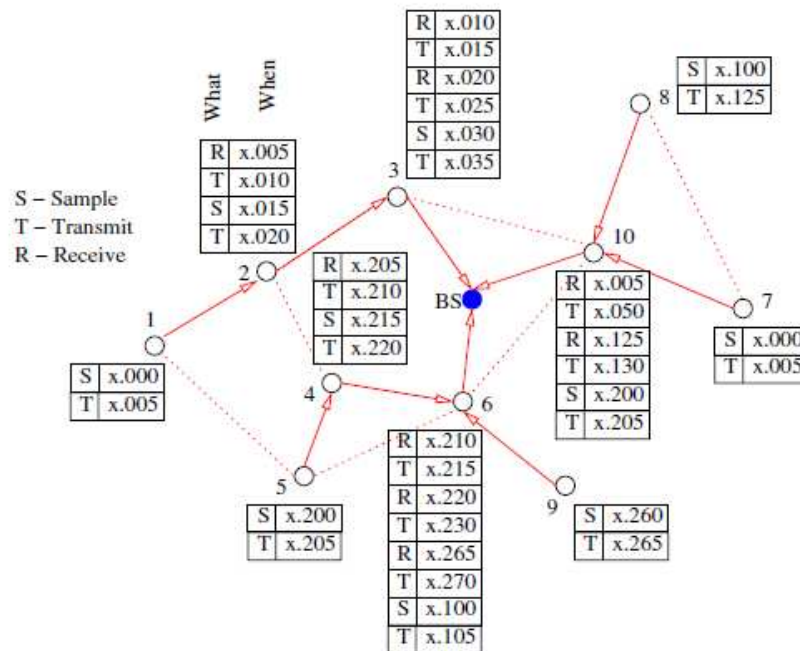
Στην σταθερή φάση οι κόμβοι απλά προωθούν τα πακέτα στις κατάλληλες χρονικές τιμές. Για αυτό κάθε κόμβος έχει και ένα πρόγραμμα που υποδεικνύει πότε θα κάνει κάποια συγκεκριμένη ενέργεια. Οι τρεις διαφορετικές ενέργειες που μπορεί να επιτελέσει είναι:

- Δοκιμή, που αντιστοιχεί στην καταγραφή ενός δείγματος από την πηγή. Αυτό το δείγμα θα προωθηθεί στον σταθμό βάσης. Σε κάθε ροή μόνο η πηγή της ροής μπορεί να έχει μια τέτοια ενέργεια δοκιμής στο πρόγραμμά της.
- Μετάδοση, που αντιστοιχεί στην πράξη της μετάδοσης ενός πακέτου της ροής στον επόμενο κόμβο. Όλοι οι κόμβοι του μονοπατιού προς το

σταθμό βάσης εκτός από αυτόν, έχουν μια ενέργεια μετάδοσης στο πρόγραμμά τους.

- Παραλαβή, που αντιστοιχεί στην παραλαβή του πακέτου. Αυτό το πακέτο θα μεταδοθεί ξανά στον επόμενο κόμβο μέχρι να φτάσει στον σταθμό βάσης. Όλοι οι κόμβοι εκτός από την πηγή έχουν μια ενέργεια παραλαβής στο πρόγραμμά τους.

Στην Εικόνα 40 βλέπουμε κόμβους με τα προγράμματά τους.



Εικόνα 40. Παράδειγμα δικτύου 10 κόμβων και ενός σταθμού βάσης με ένα πιθανό καταναμημένο πρόγραμμα.

Οι ενεργές διαδρομές φαίνονται στο σχήμα με κόκκινα βέλη ενώ οι εναλλακτικές με διακεκομμένες κόκκινες γραμμές. Ο κόμβος 1 για παράδειγμα χρειάζεται να είναι ενεργός μόνο την στιγμή 0 για να πάρει ένα δείγμα και την στιγμή 5 για να το μεταδώσει. Αν υποθέσουμε πως η δειγματοληψία διαρκεί 5 ms και η μετάδοση άλλα 5 ms τότε ο κόμβος 1 θα πρέπει να μείνει ενεργός μόλις για 10 ms ανά λεπτό ενώ θα παραμείνει ανενεργός για 990 ms. Φαίνεται λοιπόν πως

μπορεί να γίνει πολύ καλή διαχείριση της ενέργειας. Τα προγράμματα αυτά προκύπτουν από τον αλγόριθμο δημιουργίας προγραμμάτων που αποτελείται από δύο φάσεις.

Αρχικά έχουμε την φάση επιλογής διαδρομής που είναι η επιλογή μιας διαδρομής από την πηγή της ροής ως τον σταθμό βάσης. Ύστερα έχουμε την φάση δημιουργίας της διαδρομής. Σε αυτή τη φάση δημιουργούνται τα προγράμματα για την καθορισμένη διαδρομή της πρώτης φάσης. Για να γίνει αυτό, ένα ειδικό πακέτο δημιουργίας διαδρομής (route setup packet) στέλνεται κατά μήκος της διαδρομής από την πηγή της ροής στον προορισμό. Αυτό το ειδικό πακέτο (RSETUP) δημιουργεί τα προγράμματα καθώς διαδίδεται στους κόμβους. Αυτό έχει δύο στόχους σε κάθε κόμβο. Να βρει μια χρονική στιγμή που θα προγραμματιστεί ένα πακέτο χωρίς να συγκρούεται με άλλα και να προσαρτήσει τις κατάλληλες εγγραφές στα προγράμματα των δύο κόμβων.

Στο [76] τώρα προτείνεται ένα βασισμένο σε TDMA πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου που η λειτουργία του δεν εξαρτάται από έναν κεντρικό διαχειριστή ή σταθμό βάσης. Οι κόμβοι μπορούν να διαλέξουν τη δική τους χρονοθυρίδα βασισμένοι σε τοπικές πληροφορίες. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους δίχως συγκρούσεις πακέτων. Δεν χρειάζεται όλοι οι κόμβοι να είναι ενεργοί. Έτσι το MAC πρωτόκολλο επιτρέπει σε μερικούς κόμβους να βρίσκονται σε παθητική κατάσταση. Έτσι ο φόρτος μειώνεται δραστικά. Οι κόμβοι σε παθητική κατάσταση μπορούν να επικοινωνήσουν με τους ενεργούς κόμβους αν και αυτή η επικοινωνία δεν είναι εγγυημένα χωρίς συγκρούσεις.

Παρουσιάζεται επίσης ένας απλός αλλά αποδοτικός αλγόριθμος απόφασης για να μπορούν οι κόμβοι να αποφασίζουν σε τι κατάσταση θα μπουν. Πάλι η απόφαση βασίζεται σε τοπική πληροφορία. Προσομοιώσεις έδειξαν πως ο αριθμός των ενεργών κόμβων είναι μικρός.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης ωφελείται από την τοπική πληροφορία που παρουσιάζεται στο MAC πρωτόκολλο. Μόνο οι ενεργοί κόμβοι παίζουν ρόλο στην διαδικασία προώθησης των μηνυμάτων. Μια αρχική διαδρομή καθορίζεται χρησιμοποιώντας η πηγή την μέθοδο της πλημμύρας. Αυτό βέβαια καταναλώνει

αρκετή ενέργεια αλλά είναι αναπόφευκτο. Όταν συμβεί μια αποτυχία κόμβου το πρωτόκολλο είναι σε θέση να εγκαθιδρύσει μια νέα διαδρομή.

Το πρωτόκολλο αυτό συγκρίθηκε με το SMAC στο θέμα της διάρκειας ζωής του δικτύου. Οι προσομοιώσεις έδειξαν πως η cross-layer προσέγγιση αυξάνει την διάρκεια ζωής του δικτύου ειδικά όταν οι κόμβοι είναι κινητοί. Σε δίκτυα όπου οι κόμβοι είναι σταθεροί η διαφορά είναι μικρή και αυτό συμβαίνει γιατί τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να βρουν μόνο μια διαδρομή. Το πρωτόκολλο αυτό όμως διατηρεί ένα καθορισμένο όγκο δεδομένων για ανανεώσεις της διαδρομής δρομολόγησης και στη περίπτωση που οι κόμβοι είναι σταθεροί ο χώρος αυτός μένει ανεκμετάλλευτος.

Όλες οι παραπάνω λύσεις παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα μιας cross-layer προσέγγισης στο επίπεδο MAC και το επίπεδο δικτύου.

Το MINA είναι ένα ακόμα δουλειά που ενσωματώνει MAC πρωτόκολλα και πρωτόκολλα δρομολόγησης. Προτείνεται μια στρωματική αρχιτεκτονική πολλαπλών βημάτων όπου οι κόμβοι που απέχουν τον ίδιο αριθμό βημάτων από τον σταθμό βάσης ομαδοποιούνται στο ίδιο επίπεδο. Η πρόσβαση στο κανάλι γίνεται με ένα βασισμένο σε TDMA, MAC πρωτόκολλο που συνδυάζεται με CDMA ή FDMA. Το πλαίσιο επικοινωνίας αποτελείται από ένα πακέτο ελέγχου, ένα πλαίσιο φάρο και ένα πλαίσιο μετάδοσης πακέτων. Το πλαίσιο φάρος και το πλαίσιο μετάδοσης είναι χωρισμένα με χρονοθυρίδες. Στην αρχιτεκτονική που βασίζεται στην ομαδοποίηση όλα τα μέλη της ομάδας κατοχυρώνουν τις αιτήσεις μετάδοσης στα πλαίσια φάρους. Έπειτα η κεφαλή της ομάδας ανακοινώνει το πρόγραμμα του πλαισίου μετάδοσης πακέτων.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ένα απλό πρωτόκολλο πολλαπλών βημάτων όπου κάθε κόμβος έχει ένα κόμβο που προωθεί τα πακέτα ένα επίπεδο πιο κοντά στον σταθμό βάσης. Ο κόμβος αυτός επιλέγεται μέσα από πολλούς υποψηφίους με βάση την υπολειπόμενη ενέργειά του.

4.1.3 NETWORK + PHY

Στο [77] παρουσιάζεται μια cross-layer βελτιστοποίηση του ρυθμού παράδοσης πακέτων του δικτύου. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του ρυθμού παράδοσης των πακέτων χωρίζεται σε δυο υποπροβλήματα τα οποία είναι, η δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων στο επίπεδο δικτύου και η κατανομή ενέργειας στο φυσικό επίπεδο. Ο ρυθμός παράδοσης πακέτων έχει άμεση σχέση με τους ρυθμούς μετάδοσης ανά ζεύξη που με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις χωρητικότητες της κάθε ζεύξης και συνεπώς από την ισχύς του κάθε κόμβου. Από την άλλη, το πρόβλημα κατανομής της ενέργειας έχει σχέση με τις παρεμβολές όσο και με τον ρυθμό μετάδοσης σε κάθε ζεύξη. Πάνω σε αυτή τη λύση παρέχεται μια λύση βασισμένη σε CDMA/OFDM τέτοια ώστε ο έλεγχος ισχύος και η δρομολόγηση να πραγματοποιούνται κατανεμημένα.

Στο [78] προτείνονται νέες στρατηγικές προώθησης για γεωγραφική δρομολόγηση. Περιγράφονται εκφράσεις για νέες εκφράσεις για την βέλτιστη απόσταση προώθησης για δίκτυα με και χωρίς αυτόματη επαναληπτική αίτηση (ARQ). Επίσης παρέχονται δύο στρατηγικές προώθησης για αυτές τις δυο περιπτώσεις. Οι αλγόριθμοι προώθησης χρειάζεται να γνωρίζουν τον ρυθμό λήψης πακέτων των γειτόνων τους για να καθορίσουν τον επόμενο κόμβο που θα στείλουν τα πακέτα και να δημιουργήσουν την διαδρομή δρομολόγησης. Αν και οι νέες μετρικές προώθησης αντικατοπτρίζουν τα πλεονεκτήματα των cross-layer τεχνικών προώθησης, η ανάλυση για την διανομή της βέλτιστης απόστασης του επόμενου βήματος βασίζεται σε μια γραμμική δομή δικτύου.

4.1.4 TRANSPORT + PHY

Στο [79] παρουσιάζεται μια cross-layer λύση βελτιστοποίησης για έλεγχο ισχύος και έλεγχο συμφόρησης. Παρέχεται ανάλυση του ελέγχου ισχύος και του ελέγχου συμφόρησης και παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ της στρωματικής προσέγγισης και της cross-layer προσέγγισης. Βασισμένο σε αυτά τα πλαίσια

παρουσιάζεται ένα cross-layer πρωτόκολλο επικοινωνίας που στηρίζεται στο CDMA. Στο πρωτόκολλο αυτό η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης είναι ελεγχόμενα. Όμως η λύση αυτή εφαρμόζεται μόνο σε CDMA ασύρματα δίκτυα και ίσως δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα αισθητήρων όπου η τεχνολογία CDMA μπορεί να μην είναι εφικτή.

4.2 Λύση 3-επιπέδων

Εκτός και από τα πρωτόκολλα που εστιάζουν σε αλληλεπίδραση δύο επιπέδων, υπάρχουν και άλλες προσεγγίσεις που εμπλέκουν τρία διαφορετικά επίπεδα. Στο [80] παρουσιάζονται, η βελτιστοποίηση της ενέργειας εκπομπής, του ρυθμού εκπομπής και το πρόγραμμα (schedule) για βασισμένα σε TDMA δίκτυα αισθητήρων. Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται έχει σαν σκοπό να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, αντί να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Στο [81] προτείνονται τεχνικές προσαρμογής που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου μέσω βελτιστοποιήσεων στην δρομολόγηση, στον προγραμματισμό και στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων. Προτείνεται ένα σχήμα TDMA μεταβλητού μήκους όπου η θυρίδα (slot) αποδίδεται βέλτιστα ανάλογα με τις απαιτήσεις δρομολόγησης ενώ μειώνει ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης πραγματεύεται την κατανάλωση ενέργειας δηλαδή τόσο της ενέργειας εκπομπής όσο και την ενέργεια που καταναλώνεται στην διαδρομή. Πάνω σε αυτή την ανάλυση αποδεικνύει πως η επικοινωνία ενός βήματος (single hop) μπορεί να είναι βέλτιστη σε μερικές περιπτώσεις που η ενέργεια κατά τη διαδρομή υπερσχύει της ενέργειας εκπομπής σε κατανάλωση ενέργειας. Αν και το πρόβλημα βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε σε αυτή τη μελέτη είναι υποσχόμενο δεν έχει προταθεί μοντέλο επικοινωνίας για πρακτική εφαρμογή. Επιπλέον τα θέματα του επιπέδου μεταφοράς όπως η συμφόρηση και ο έλεγχος ροής δεν έχουν ληφθεί υπόψη.

4.3 Cross-Layer Module (XML)

Μια άλλη cross-layer προσέγγιση που αντικαθιστά τη κλασική στρωματική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων είναι το XML.

Η βάση της επικοινωνίας του XML βασίζεται σε μια νέα έννοια πρωτοβουλίας. Αυτή αποτελεί τον πυρήνα του XML ενσωματώνει σιωπηρά τις ουσιαστικές λειτουργίες που απαιτούνται για την επικοινωνία. Ένας κόμβος ξεκινά την μετάδοση στέλνοντας ένα RTS πακέτο για να υποδείξει στους γείτονες πως έχει ένα πακέτο να στείλει. Με την παραλαβή ενός RTS πακέτου, κάθε γείτονας του κόμβου αποφασίζει να συμμετάσχει στην επικοινωνία μέσω πρωτοβουλίας απόφασης (initiative determination). Υποδηλώνοντας την πρωτοβουλία ως I αυτή καθορίζεται ως εξής:

$$I = \begin{cases} 1, \text{εάν} & \begin{cases} \xi_{RTS} \geq \xi_{Th} \\ \lambda_{relay} \leq \lambda_{relay}^{Th} \\ \beta \leq \beta^{\max} \\ E_{rem} \geq E_{rem}^{\min} \end{cases} \\ 0, \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου ξ_{RTS} είναι η λαμβανόμενη τιμή SNR του RTS πακέτου, λ_{relay} είναι ο ρυθμός των πακέτων που μεταβιβάζονται από κάποιο κόμβο, β είναι η ποσοστό κατοχής του buffer και E_{rem} είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου. Οι τιμές στο δεξιό μέλος καθορίζουν τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου για αυτές τις μεταβλητές. Κάθε μια συνθήκη από αυτές καθορίζει και μια λειτουργία της επικοινωνίας. Η πρώτη συνθήκη διασφαλίζει πως θα κατασκευαστούν αξιόπιστες ζεύξεις για την επικοινωνία. Η δεύτερη και η τρίτη χρησιμοποιούνται για έλεγχο της τοπικής κίνησης. Η δεύτερη συγκεκριμένα αποτρέπει την συμφόρηση μειώνοντας την κίνηση που μπορεί να διαχειριστεί ένας κόμβος. Η τρίτη διασφαλίζει ότι ο κόμβος δεν θα υποστεί υπερχείλιση του buffer του και έτσι αποτρέπει την συμφόρηση. Η τελευταία συνθήκη διασφαλίζει πως η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου θα παραμένει πάντα πάνω από μια ελάχιστη τιμή. Έτσι επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας. Το I αρχικά έχει την τιμή 1 όταν όλες οι συνθήκες ικανοποιούνται.

Οι cross-layer λειτουργίες του XML στηρίζονται σε αυτούς τους περιορισμούς που καθορίζουν την πρωτοβουλία του κόμβου που συμμετέχει στην επικοινωνία. Χρησιμοποιώντας αυτή την έννοια πρωτοβουλίας το XML πραγματοποιεί τοπικό έλεγχο συμμόρφωσης, αξιοπιστία σε κάθε βήμα και κατανεμημένη λειτουργία. Για μια επιτυχημένη επικοινωνία ένας κόμβος ξεκινά την μετάδοση στέλνοντας ένα RTS πακέτο το οποίο λειτουργεί σαν δείκτης της ποιότητας της ζεύξης και βοηθά τους πιθανούς προορισμούς να πραγματοποιήσουν έναν ανταγωνισμό λήψης (received-based contention). Στην συνέχεια οι κόμβοι που λαμβάνουν αυτή την κίνηση πραγματοποιούν μια απόφαση πρωτοβουλίας σύμφωνα με την εξίσωση που είδαμε παραπάνω. Οι κόμβοι που θα πάρουν μέρος στην επικοινωνία ανταγωνίζονται για την δρομολόγηση του πακέτου στέλνοντας CTS πακέτα. Επίσης ο διαχειριστής της τοπικής συμμόρφωσης διασφαλίζει ενεργειακή επάρκεια και αξιόπιστη επικοινωνία μέσω ενός ελέγχου συμμόρφωσης δυο βημάτων. Αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν πως το XML βελτιώνει σημαντικά της επικοινωνία και αποδίδει καλύτερα από τα παραδοσιακά στρωματική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων σε θέματα τόσο απόδοσης δικτύου όσο και πολυπλοκότητας εφαρμογής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

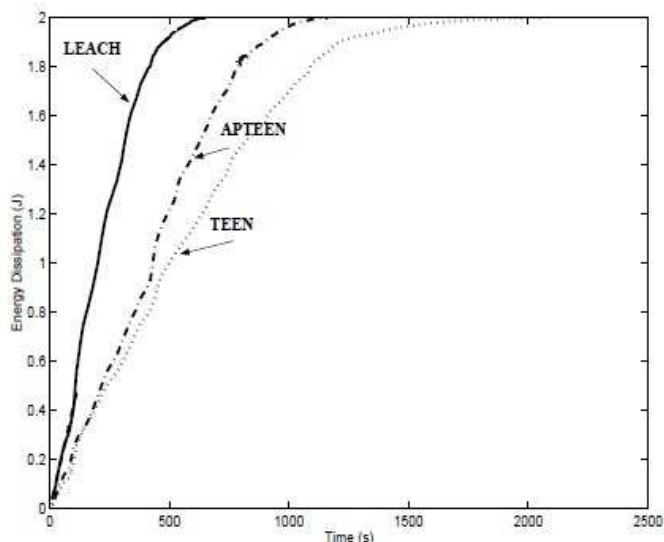
5.1 Συγκρίσεις πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Από όλα τα παραπάνω αναφερόμενα μπορούμε να συμπεράνουμε ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για τα δίκτυα αισθητήρων. Το ζήτημα αυτό είναι το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό βέβαια οφείλεται στους ελάχιστους ενεργειακούς πόρους των κόμβων. Ο κύριος στόχος λοιπόν πίσω από το σχεδιασμό των δικτύων αισθητήρων και των πρωτοκόλλων είναι να διατηρηθούν σε λειτουργία οι κόμβοι όσο το δυνατόν περισσότερο και έτσι ολόκληρο το δίκτυο να αυξήσει την διάρκεια ζωής του. Παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια διάφορα πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων. Θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά μερικών από τα πιο σημαντικά στον παρακάτω πίνακα.

Πρωτόκολλο	Κινητικότητα	Χρήση Ενέργειας	Έλεγχος πόρων	Επιπλέον φόρτος	Συνάθροιση	Query based
ΙΕΡΑΡΧΙΚΑ						
LEACH	Όχι	Μέγιστη	Ναι	Μεγάλο	Ναι	Όχι
TEEN	Όχι	Μεγάλη	Ναι	Μεγάλο	Ναι	Όχι
APTEEN	Όχι	Μεγάλη	Ναι	Μεγάλο	Ναι	Όχι
PEGASIS	Όχι	Μεγάλη	Όχι	Μικρό	Ναι	Όχι
CBERP	Όχι	Χαμηλή	Ναι	Μικρό	Όχι	Όχι
ΔΕΔΟΜΕΝΟΚΕΝΤΡΙΚΑ						
SPIN	Ναι	Χαμηλή	Ναι	Μικρό	Ναι	Ναι
DD	Περιορισμένη	Μέση	Ναι	Μέσο	Ναι	Ναι
RR	Πολύ περιορισμένη	Χαμηλή	Ναι	Μικρό	Ναι	Ναι
R.M.U.H.V	Ναι	Ελάχιστη	Όχι	Μικρό	Όχι	Όχι

LOCATION BASED						
GEAR	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Ναι	Μέσο	Όχι	Όχι
GAF	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Ναι	Μέσο	Όχι	Όχι
QoS BASED						
SAR	Όχι	Χαμηλή	Όχι	Μέσος	Ναι	Όχι

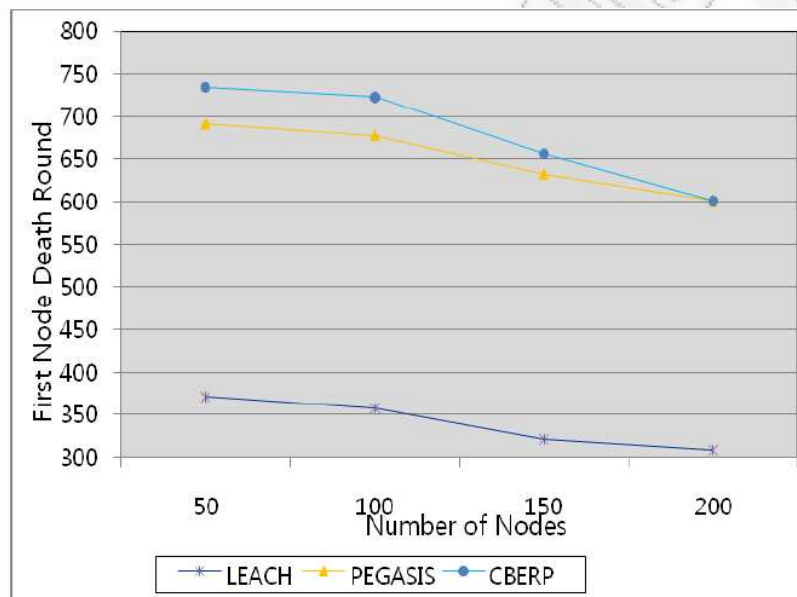
Βλέπουμε πως το LEACH το TEEN, το APTEEN και το PEGASIS έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και οι αρχιτεκτονικές τους είναι παρόμοιες. Έχουν σταθερή υποδομή οι κόμβοι δηλαδή θεωρούνται ακίνητοι. Η απόδοση του APTEEN είναι ανάμεσα στην απόδοση του TEEN και του LEACH όσο αναφορά την κατανάλωση ενέργειας και τη διάρκεια ζωής του δικτύου όπως βλέπουμε και από την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 41. Κατανάλωση ενέργειας στα LEACH, TEEN και APTEEN πρωτόκολλα

Το TEEN μεταδίδει μόνο τα κρίσιμα δεδομένα ενώ το APTEEN κάνει περιοδικές μεταδόσεις δεδομένων. Σε αυτό το θέμα το APTEEN είναι επίσης καλύτερο από το LEACH επειδή μεταδίδει δεδομένα με βάση μια τιμή κατωφλίου ενώ το LEACH μεταδίδει δεδομένα συνεχώς. Βέβαια από την άλλη, το TEEN και το APTEEN έχουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα λόγω της υλοποίησης των συναρτήσεων που υπολογίζουν τις τιμές κατωφλίου στα δυο πρωτόκολλα. Το αρνητικό του LEACH είναι ότι αφού είναι πρωτόκολλο μονού βήματος δεν μπορεί να έχει εφαρμογή σε ευρείας κλίμακας δίκτυα. Το PEGASIS δεν έχει τον

φόρτο ομαδοποίησης του LEACH αλλά απαιτεί δυναμική ρύθμιση της τοπολογίας αφού η ενέργεια των κόμβων δεν ελέγχεται. Το CBERP μειώνει ακόμα περισσότερο τον φόρτο επιλέγοντας και δεύτερη υποψήφια κεφαλή σε περίπτωση αποτυχίας της πρώτης. Βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα ένα συγκριτικό γράφημα που δείχνει την διάρκεια ζωής του δικτύου μέχρι να πεθάνει ο πρώτος κόμβος. Παρατηρούμε πως το CBERP είναι καλύτερο από το PEGASIS ενώ σχεδόν εξισώνονται για μεγάλο αριθμό κόμβων.



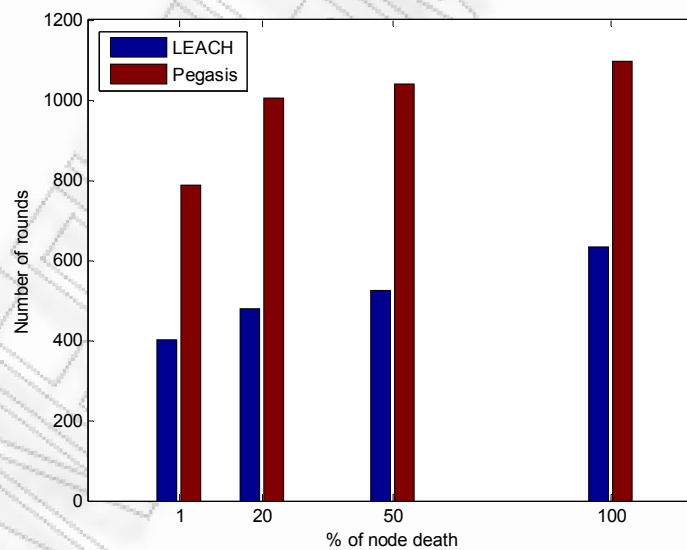
Εικόνα 42. Σύγκριση πρωτοκόλλων LEACH, PEGASIS, CBERP ως προς τον χρόνο ζωής τους.

Το PEGASIS έχει υπερβολική καθυστέρηση για κόμβους που είναι απομακρυσμένοι στην αλυσίδα κάτι που δεν συμβαίνει με το CBERP το οποίο μειώνει το μήκος αλυσίδας άρα και την αξιοπιστία μετάδοσης. Στο PEGASIS ο κόμβος αρχηγός μπορεί να γίνει σημείο συμφόρησης. Το PEGASIS όμως αυξάνει την διάρκεια ζωής του δικτύου δύο φορές σε σχέση με το LEACH. Βλέπουμε για παράδειγμα στον παρακάτω πίνακα τα ποσοστά των νεκρών κόμβων ανάλογα με τους γύρους προσομοίωσης για τα πρωτόκολλα LEACH και PEGASIS.

Energy J/Node	Protocol	1%	20%	50%	100%
.25	LEACH	402	480	523	635
	PEGASIS	788	1004	1041	1096
.5	LEACH	803	962	1036	1208
	PEGASIS	1578	2011	2082	2192
1.0	LEACH	1610	1921	2055	2351
	PEGASIS	3159	4023	4165	4379
.25	LEACH	166	204	232	308
	PEGASIS	335	624	684	779
.5	LEACH	339	408	461	576
	PEGASIS	675	1250	1362	1544
1.0	LEACH	690	812	911	1077
	PEGASIS	1346	2497	2720	3076

Εικόνα 43. Πίνακας με στοιχεία προσομοίωσης

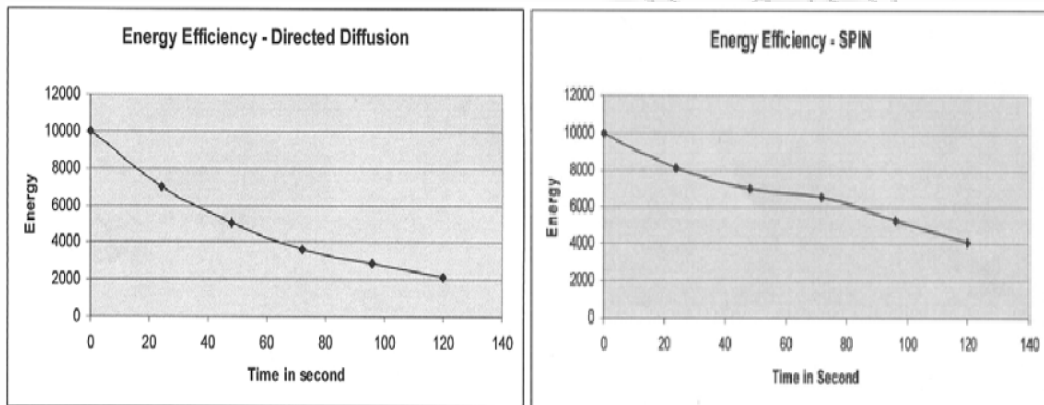
Παρακάτω βλέπουμε σε γράφημα τα στοιχεία αυτά και συγκεκριμένα για ενέργεια/κόμβο 0.25J.



Εικόνα 44. Διάγραμμα σύγκρισης ποσοστού νεκρών κόμβων

Στο πρωτόκολλο directed diffusion ο σταθμός βάσης στέλνει ερωτήσεις στους κόμβους με την μέθοδο της πλημμύρας ενώ στο SPIN οι κόμβοι δημοσιεύουν την διαθεσιμότητα των δεδομένων έτσι ώστε οι κόμβοι που είναι άμεσα

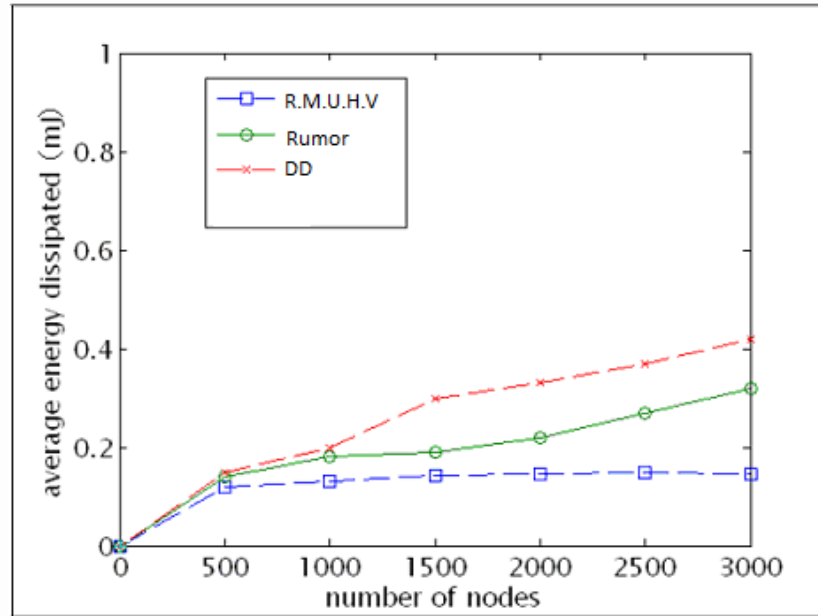
ενδιαφερόμενοι να μπορέσουν να ζητήσουν τα δεδομένα. Η χρησιμοποίηση μετά-δεδομένων κάνει το SPIN ενεργειακά πιο αποδοτικό όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα καθώς αρχίζει η δημοσίευση των ενδιαφερόντων και ύστερα αναμένονται αιτήσεις από τους κόμβους για να σταλεί κάποιο δεδομένο. Στην Εικόνα 45 εμφανίζεται η σύγκριση της ενέργειας των δύο πρωτοκόλλων και μπορούμε να παρατηρήσουμε πως σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης το SPIN υπερτερεί το DD [83].



Εικόνα 45. Σύγκριση της υπολειπόμενης ενέργειας στο SPIN και το DD σε χρόνο προσομοίωσης δύο λεπτών.

Το SPIN μειώνει στο μισό τον πλεονασμό των δεδομένων σε σχέση με την μέθοδο της πλημμύρας λόγω των μετά-δεδομένων κάτι που φαίνεται και από την κατανάλωση ενέργειας του DD που είναι μεγαλύτερη. Το SPIN είναι κατάλληλο για κόμβους με κινητικότητα αφού στηρίζει την απόφαση δρομολόγησης στους γειτονικούς και μόνο κόμβους του.

Το πρωτόκολλο R.M.U.H.V χρησιμοποιεί μια λογική αναπαράσταση του δικτύου και έτσι υποστηρίζει κινητικότητα κόμβων αλλά παράλληλα είναι σαφώς πιο ενεργειακό από τα Rumor Routing και DD ειδικά για ευρεία δίκτυα με πολλούς κόμβους όπως προκύπτει και από το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 46. Σύγκριση ενέργειας που καταναλώνεται/query των RMUHV,RR και DD.

Το πρωτόκολλο GEAR περιορίζει τον αριθμό των ενδιαφερόντων σε σχέση με το directed diffusion λαμβάνοντας υπόψη μόνο ένα συγκεκριμένο τομέα και έτσι δεν στέλνει τα ενδιαφέροντα σε ολόκληρο το δίκτυο. Έτσι μπορεί και διαφυλάττει αρκετή ενέργεια. Το ίδιο και το πρωτόκολλο GAF που και αυτό με τη σειρά του μπορεί και σώζει ενέργεια αυξάνοντας την ζωή του δικτύου αδρανοποιώντας τους κόμβους όταν αυτοί δεν χρειάζεται να στείλουν ή να λάβουν δεδομένα.

Το SAR είναι από τα πρώτα πρωτόκολλα που χρησιμοποίησαν σαν μετρική ποιότητας υπηρεσίας την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και την προτεραιότητα των πακέτων. Έτσι κάθε φορά επιλέγεται το μονοπάτι με την καλύτερη QoS μετρική για να δρομολογηθεί το κάθε πακέτο.

Αφού τα δίκτυα αισθητήρων εξαρτώνται από την εφαρμογή δεν μπορούμε πραγματικά να πούμε πως υπάρχουν χρήσιμα ή μη χρήσιμα πρωτόκολλα. Το καθένα έχει τα αρνητικά του και τα θετικά του. Ο σχεδιαστής θα πρέπει να σκεφτεί πολύ σοβαρά τις απαιτήσεις του συστήματος και των εφαρμογών πριν διαλέξει τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιήσει.

5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στο πλαίσιο της εργασίας υλοποιήθηκε σε γλώσσα C κώδικας προσομοίωσης του πρωτοκόλλου LEACH. Η λειτουργία του LEACH χωρίζεται σε γύρους. Σε κάθε γύρο κάθε κόμβος αποφασίζει αν θα γίνει κεφαλή με βάση την εξίσωση

$$T(n) = \begin{cases} P / (1 - P * (r \bmod 1 / P)) \\ 0 \end{cases}, \text{ όπου } P \text{ το ποσοστό κεφαλών στο δίκτυο και } r \text{ ο}$$

τρέχον γύρος. Στο πρόγραμμα $P=0.1$. Όταν λοιπόν κάποιος κόμβος έχει γίνει κεφαλή δεν μπορεί να γίνει για τους επόμενους $1/P$ γύρους.

Αφού αποφασιστούν οι κεφαλές σε κάθε γύρο, ο αλγόριθμος περνάει στην “cluster-head-advertisement” φάση όπου κάθε κόμβος που είναι κεφαλή στέλνει τα advertisements του στους κόμβους που αναζητούν ομάδα. Στη συνέχεια περνάμε στην φάση που οι κόμβοι αποφασίζουν σε ποιο cluster θα ανήκουν. Αυτή η απόφαση καθορίζεται από την απόσταση του κάθε κόμβου από την κεφαλή αφού προϋποθέτουμε ομογενές δίκτυο και ενεργειακό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη μόνο την απόσταση για τον καθορισμό της ενέργειας εκπομπής και λήψης.

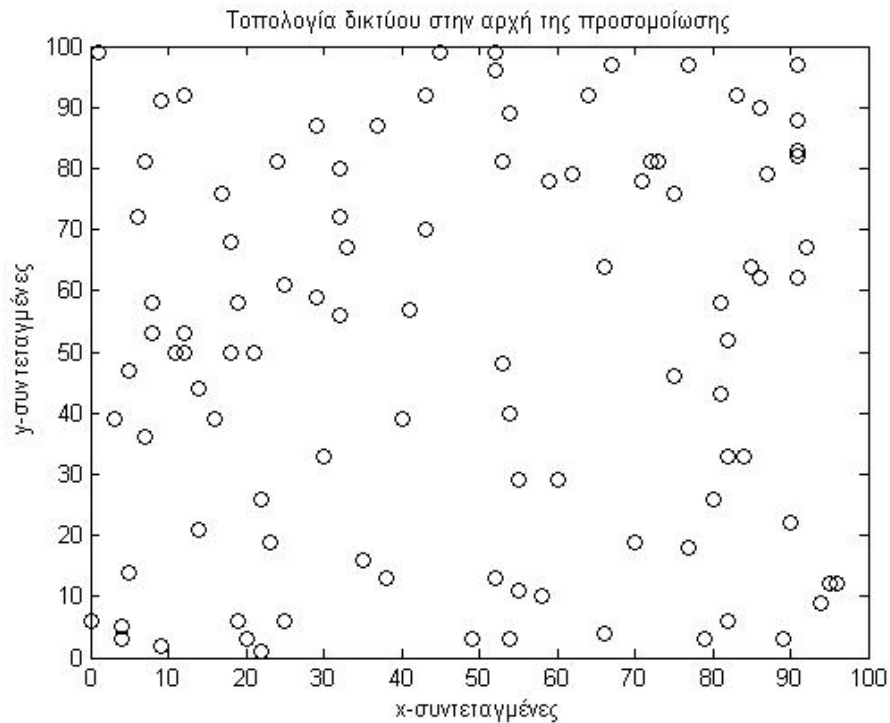
Οι κόμβοι λοιπόν που έχουν αποφασίσει σε ποια ομάδα ανήκουν ενημερώνουν τις κεφαλές. Στη συνέχεια οι κεφαλές στέλνουν μήνυμα στους κόμβους της ομάδας τους ενημερώνοντάς τους για το χρονικό διάστημα που θα εκπέμπουν τα δεδομένα τους. Στον αλγόριθμο λαμβάνουμε υπόψη απλά το κόστος εκπομπής και λήψης αυτών των μηνυμάτων.

Τέλος περνάμε στην φάση μετάδοσης των δεδομένων. Αρχικά οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους στην κεφαλή της ομάδας τους. Αυτή λαμβάνει τα δεδομένα με τη σειρά της και τα στέλνει στον σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης στον αλγόριθμο είναι απομακρυσμένος και τοποθετείται στις συντεταγμένες $x = -200$ και $y = -200$. Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και παραμένουν σταθεροί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι το μέγεθος των πακέτων δεδομένων που είναι ίσο με 2000 bits, η αρχική ενέργεια κάθε κόμβου που είναι ίση με 3 μονάδες και το μέγεθος των μηνυμάτων advertisement και schedule που είναι ίσο με 64 bits.

Το εν λόγω πρωτόκολλο συγκρίνεται με το πρωτόκολλο απευθείας μετάδοσης δεδομένων. Το leach πρωτόκολλο είναι αποδεδειγμένα καλύτερο από το direct

communication πρωτόκολλο κάτι το οποίο φαίνεται και στην περίπτωση της δικής μας προσομοίωσης.

Παραθέτονται τα διαγράμματα για τον αριθμό των νεκρών κόμβων/γύρο, των ζωντανών κόμβων/γύρο και της υπολειπόμενης ενέργειας δικτύου για $N=100$ κόμβους καθώς και μιας όψης του δικτύου για $N=100$ κόμβους.



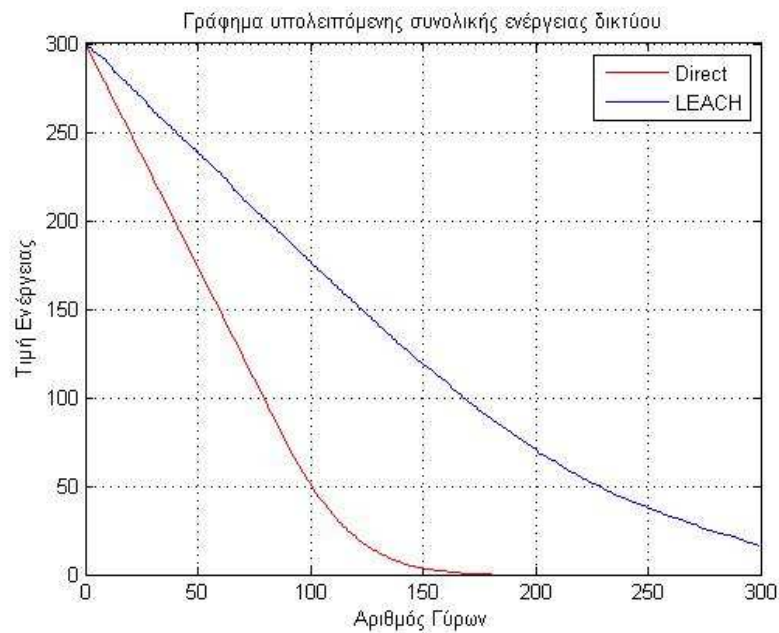
Εικόνα 47. Τοπολογία δικτύου για $N=100$ κόμβους

Η παραπάνω εικόνα μας δείχνει πως θα ήταν το δίκτυο αισθητήρων στο τετράγωνο πλέγμα $NETWORK_SIZE * NETWORK_SIZE$ όπου η μεταβλητή $NETWORK_SIZE=N=100$ στην προκειμένη περίπτωση. Η τοπολογία παράγεται τυχαία με την βοήθεια της συνάρτησης $rand()$.

Οι εξισώσεις του ενεργειακού μοντέλου έχουν αντληθεί από το [45] και είναι οι εξής. Για την καταναλισκόμενη ενέργεια εκπομπής

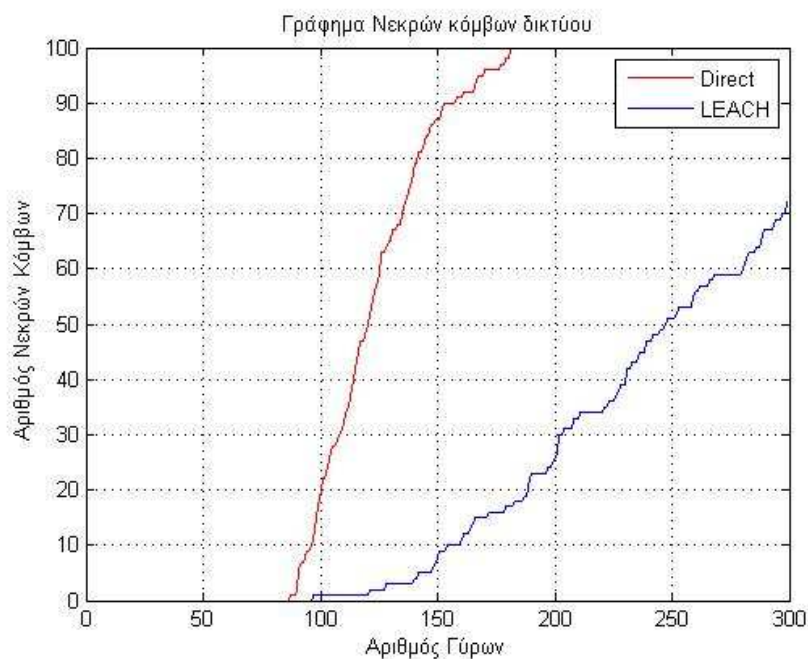
$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2 \text{ και για την καταναλισκόμενη ενέργεια λήψης}$$

$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k$. Όπως φαίνεται η ενέργεια εκπομπής είναι συνάρτηση των bits του μεταδιδόμενου πακέτου και της απόστασης ενώ η ενέργεια λήψης είναι απλά συνάρτηση των bits του πακέτου άρα και λιγότερη κοστοβόρα ενεργειακά.



Εικόνα 48. Συνολική ενέργεια δικτύου/γύρο

Παρατηρούμε ότι το LEACH είναι αποδοτικότερο ενεργειακά από το direct όπως αναμενόταν και σε αυτό παίζει ρόλο ο σχηματισμός των ομάδων που δεν επιτρέπει να χαθεί μεγάλο ποσό ενέργειας από την μετάδοση κόμβων απευθείας στον σταθμό βάσης αλλά η ενέργεια που σπαταλιέται είναι μικρή αφού οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα στις κεφαλές των ομάδων τους.



Εικόνα 49. Αριθμός νεκρών κόμβων/γύρο



Εικόνα 50. Αριθμός ζωντανών κόμβων/γύρο

	Θάνατος πρώτου κόμβου	Θάνατος των μισών κόμβων	Θάνατος όλων των κόμβων
LEACH	98	247	-
Direct	88	120	181

Εικόνα 51. Γύρος θανάτου για διάφορα ποσοστά κόμβων

Στα διαγράμματα φαίνεται καθαρά πως στο θέμα της διάρκειας ζωής του δικτύου το LEACH υπερτερεί το direct καθώς ο πρώτος κόμβος πεθαίνει στο direct νωρίτερα και ενώ η προσομοίωση δεν έχει τελειώσει στο LEACH απομένουν ζωντανοί 28 κόμβοι.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Coue, C., Fraichard, T., Bessiere, P., and Mazer, E. 2002. Multi-sensor data fusion using Bayesian programming: An automotive application. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*. Vol. 1. IEEE, Lausanne, Switzerland, 141–146.
- [2] Stann, F. and Heidemann, J. 2005. BARD: Bayesian-assisted resource discovery in sensor networks. In *24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, 866–877.
- [3] Pinto, A. J., Stochero, J. M., and De Rezende, J. F. 2004. Aggregation-aware routing on wireless sensor networks. In *Proceedings of the IFIP TC6 9th International Conference on Personal Wireless Communications (PWC'04)*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3260. Springer, Delft, The Netherlands, 238–247.
- [4] Nakamura, E. F., Figueiredo, C.M., and Loureiro, A. A. 2005a. Information fusion for data dissemination in self-organizing wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th International Conference on Networking (ICN 2005)*, P. Lorenz and P. Dini, Eds. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3420. Springer-Verlag GmbH, Reunion Island, France, 585–593.
- [5] Gupta, I., Riordan, D., and Sampalli, S., Cluster head election using fuzzy logic for wireless sensor networks, *Proc. of the 3rd Annual Commn. Netw. & Services Res. Conf. (CNSR'05)*, IEEE, Canada, 2005, 255-260.
- [6] Yusuf, M., and Haider, T., Energy-aware fuzzy routing for wireless sensor networks, in *IEEE Intl. Conf. on Emerging Technologies (ICET'05)*, Pakistan, 2005, 63-69.
- [7] Wallace, J., Pesch, D., Rea, S., and Irvine, J. 2005. Fuzzy logic optimization of MAC parameters and sleeping duty-cycles in wireless sensor networks. In *62nd Vehicular Technology Conference, 2005. VTC- 2005-Fall*. Vol. 3. IEEE, Dallas, TX, 1824–1828.

- [8] Liang, Q. and Ren, Q. 2005b. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *2005 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'05)*. Vol. 1. IEEE, St. Louis.
- [9] Liang, Q. and Ren, Q. 2005a. Energy and mobility aware geographical multipath routing for wireless sensor networks. In *2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'05)*. Vol. 3. IEEE, New Orleans, 1867–1871.
- [10] Srinivasan, T., Cchandrasekar, R., and Vijaykumar, V. 2006. A fuzzy, energy-efficient scheme for data centric multipath routing in wireless sensor networks. In *2006 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*. IEEE, Bangalore, India.
- [11] Xiao, L., Boyd, S., and Lall, S. 2005. A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, 63–70.
- [12] Hartl, G. and Li, B. 2004. Loss inference in wireless sensor networks based on data aggregation. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, 396–404.
- [13] Fang, L., Du, W., and Ning, P. 2005. A beacon-less location discovery scheme for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, 161–171.
- [14] Spanos, D., Olfati-Saber, R., and Murray, R. M. 2005. Approximate distributed Kalman filtering in sensor networks with quantifiable performance. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, 133–139.
- [15] Olfati-Saber, R. 2005. Distributed kalman filter with embedded consensus filters. In *44th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'05)*. IEEE, Seville, Spain, 8179–8184.

- [16] Sinopoli, B., Schenato, L., Francheschetti, M., Poolla, K., Jordan, M., and Sastry, S. 2004. Kalman filtering with intermittent observations. *IEEE Trans. Autom. Cont.* 49, 9 (September), 1453–1464.
- [17] Ganeriwal, S., Kumar, R., and Srivastava, M. B. 2003. Timing-sync protocol for sensor networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networks Sensor Systems (SenSys'03)*, 138–149.
- [18] Manzo, M., Roosta, T., and Sastry, S. 2005. Time synchronization attacks in sensor networks. In *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks (SASN'05)*. ACM, Alexandria, VA, 107–116.
- [19] Savvides, A., Han, C., and Srivastava, M. B. 2003. The n-hop multilateration primitive for node localization. *Mobile Netw. Appl.* 8, 4 (August), 443–451.
- [20] Hongyang, C., Ping, D., Yongjun, X., and Xiaowei, L. 2005. A robust location algorithm with biased extended Kalman filtering of TDOA data for wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WCNM'05)*. Vol. 2. IEEE, Wuhan, China, 883–886.
- [21] Li, T., Ekpenyong, A., and Huang, Y. 2006. Source localization and tracking using distributed asynchronous sensor. *IEEE Trans. Sig. Proc.* 54, 10 (October), 3991–4003.
- [22] Ci, S., Sharif, H., and Nuli, K. 2004. A UKF-based link adaptation scheme to enhance energy efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'04)*. Vol. 4. IEEE, Barcelona, Spain, 2483–2488.
- [23] Raviraj, P., Sharif, H., Hempel, M., and Ci, S. 2005. MOBMAC—an energy efficient and low latency MAC for mobile wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2005 Systems Communications*. IEEE, Montreal, Canada, 370–375.
- [24] Jain, A., Chang, E. Y., and Wang, Y.-F. 2004. Adaptive stream resource management using Kalman filters. In *Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD*

International Conference on Management of Data (SIGMOD'04). ACM, Paris, France, 11–22.

[25] Elfes, A. 1987. Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE J Robotics Automat.* RA-3, 3 (June), 249–265.

[26] Arbuckle, D., Howard, A., and Mataric, M. J. 2002. Temporal occupancy grids: A method for classifying spatio-temporal properties of the environment. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Switzerland, 409–414.

[27] Hoover, A. and Olsen, B. D. 1999. A real-time occupancy map from multiple video streams. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. IEEE, Detroit, Michigan, 2261–2266.

[28] Wongngamnit, C. and Angluin, D. 2001. Robot localization in a grid. *Inform. Proc. Lett.* 77, 5–6 (March), 261–267.

[29] Pagac, D., Nebot, E. M., and Durrant-Whyte, H. 1998. An evidential approach to map-building for autonomous vehicles. *IEEE Trans. Robotics Autom.* 14, 4 (August), 623–629.

[30] Zhao, J., Govindan, R., and Estrin, D. 2002b. Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02)*. Vol. 1. IEEE, Orlando, FL, 356–362.

[31] Kulik, J., Heinzelman, W., and Balakrishnan, H. 2002. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks* 8, 2/3 (March-May), 169–185.

[32] Boulis, A., Ganeriwal, S., and Srivastava, M. B. 2003a. Aggregation in sensor networks: An energy-accuracy trade-off. *Ad Hoc Networks* 1, 2-3 (September), 317–331. Special Issue on Sensor Network Protocols and Applications.

[33] Tang C., Raghavendra C.S., and Prasanna V.K., An energy efficient adaptive distributed source-coding scheme in wireless sensor networks in *Proc. of the IEEE Intl. Conf. on commns. (ICC'03)*, vol.1, IEEE, AK, 2003, 732-737.

- [34] Zhang Y. and Li J., Efficient seismic response data storage and transmission using arx model-based sensor data compression algorithm, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.35, 2006, pp, 781-788.
- [35] Puthenpurayil S., Gu R. and Bhattacharya S.S., Energy-aware data compression for wireless sensor networks, *Proc. of the Intl. Conf. on Acoustics Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 2, Hawaii, Apr. 2007, pp. 45-48.
- [36] Heinzelman, W., Kulik, J. & Balakrishnan, H. (1999). Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, the 5th Annual ACM/IEEE International of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, USA.
- [37] Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D., Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks, in: *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_00)*, Boston, MA, August 2000.
- [38] Braginsky D., Estrin D., Rumor routing algorithm for sensor networks, in: *Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, October 2002.
- [39] Schurgers C. and Srivastava M.B, "Energy efficient routing in wireless sensor networks", in the *MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean, VA, 2001.
- [40] Yao Y., Gehrke J., The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, in: *SIGMOD Record*, September 2002.
- [41] Sadagopan N. et al., The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks, in: *Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications*, Anchorage, AK, May 2003.
- [42] Shah R., Rabaey J., Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks, in: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, FL, March 2002.

- [43] Chu M., Haussecker H., Zhao F., Scalable informationdriven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks, *The International Journal of High Performance Computing Applications* 16 (3) (2002) 293–313.
- [44] Xiaomin Zhao, Keji Mao, Shaohua Cai, Qingzhang Chen, Data-Centric Routing Mechanism Using Hash-Value in Wireless Sensor Network, *Wireless Sensor Network*, 2010, 2, 710-717
- [45] Heinzelman W., Chandrakasan A. and Balakrishnan H., "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, January 2000.
- [46] Bani M., Yassein, Al-zou'bi A., Khamayseh Y., Mardini W., Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network (VLEACH), *International Journal of Digital Content Technology and its Applications* Volume 3, Number 2, June 2009
- [47] Ossama Younis and Sonia Fahmy” Heed: A hybrid, Energy-efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, Oct.-Dec. 2004, pp. 366-369.
- [48] Lindsey S., Raghavendra C., PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems", *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2002, Vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.
- [49] Savvides A., Han C-C, and Srivastava M., Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors," *Proceedings of the Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, July 2001. pp. 166-179.
- [50] Manjeshwar A. and Agrawal D.P., “TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks”, in the *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001.
- [51] Manjeshwar A. and Agrawal D.P., "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor

Networks", in the Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing, San Francisco CA, April 2001, pp. 2009-1015.

[52] Li Q. and Aslam J. and Rus D., Hierarchical Power-aware Routing in Sensor Networks", In Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking, May, 2001.

[53] Singh S.K. , Singh M.P. , and Singh D.K., Energy Efficient Homogenous Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks, International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), Vol.2, No.3, August 2010

[54] Younis M., Youssef M. and Arisha K., "Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks", in the Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002), Fort Worth, TX, October 2002.

[55] Subramanian L. and Katz R.H., "An Architecture for Building Self Configurable Systems," in the Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA, August 2000.

[56] Young Han Lee, Kyoung Oh Lee, Hyun Jun Lee, Aries Kusdaryono, CBERP: Cluster Based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network.

[57] Rodoplu V. and Meng T.H, Minimum Energy Mobile Wireless Networks", IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 8, Aug. 1999, pp. 1333-1344.

[58] Li L., and Halpern J.Y., Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited," IEEE International Conference on Communications (ICC) 2001. Vol. 1, pp. 278-283.

[59] Xu Y., Heidemann J., Estrin D., Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing," In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001, pp. 70-84.

[60] Yu Y., Estrin D., and Govindan R., Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor

Networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.

[61] Zorzi M. and Rao R.R., "Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance", IEEE Transactions on mobile Computing, vol. 2, no. 4, Oct.-Dec. 2003, pp. 337-348.

[62] Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramanian Y., and Cayirci E., "Wireless sensor networks: a survey", Computer Networks (Elsevier) Journal, Vol. 38, no. 4, Mar. 2002, pp. 393-422.

[63] T. He et al., "SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks," in the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, May 2003.

[64] Chang Jae-Hwan, Tassiulas Leandros, "Maximum lifetime routing in wireless sensor networks" Networking, IEEE/ACM Transactions on volume 12 issue 4, Aug. 2004, pp. 609 – 619

[65] Kalpakis K., Dasgupta K. and Namjoshi P, "Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks", Computer Networks volume 42, Issue 6, 21 August 2003, Pages 697-716

[66] Fan Ye, Chen, A., Songwu Lu, Lixia Zhang, "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks", Computer Communications and Networks. Proceedings of Tenth International Conference on Scottsdale, AZ , USA, pp. 304 – 309, 2001

[67] K. Akkaya and M. Younis, "An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," in the Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN 2003), Providence, Rhode Island, May 2003.

[68] Haapola, J., Shelby, Z., Pomalaza-Raez, C., Mahonen, P., "Cross-layer energy analysis of multihop wireless sensor networks", Wireless Sensor Networks, 2005 in Proceedings of the Second European Workshop, pp.33-34, Feb 2005.

- [69] Vuran M.C. and Akyildiz I.F., “Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks”, *Journal IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, volume 14, issue 2, April 2006.
- [70] M. Zorzi and R. Rao, Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance, *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2(4), 337–348, October–December 2003.
- [71] M. Zorzi and R. Rao, Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Energy and latency performance, *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2(4), 349–365, October–December 2003.
- [72] D. Ferrara et al., MACRO: An integrated MAC/routing protocol for geographical forwarding in wireless sensor networks, in *Proceedings of IEEE INFOCOM’05*, vol. 3, pp. 1770–1781, March 13–17, 2005, Miami, FL.
- [73] C. Suh, Y. Ko, and D. Son, An energy efficient cross-layer MAC protocol for wireless sensor networks, *LNCS Book Series: Advanced Web and Network Technologies and Applications Book*, ISBN:978-3-540-31158-4, Springer, Berlin/Heidelberg.
- [74] P. Casari, M. Nati, C. Petrioli, and M. Zorzi, “ALBA: An adaptive load-balanced algorithm for geographic forwarding in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 25th IEEE Military Communication Conference, MILCOM 2006*, Washington, DC, October 23–25 2006, pp. 1–9.
- [75] M. L. Sichitiu, Cross-layer scheduling for power efficiency in wireless sensor networks, in *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM’04)*, vol. 3, pp. 1740–1750, March 7–11, 2004, Hong Kong.
- [76] L. van Hoesel, T. Nieberg, J. Wu, and P. J. M. Havinga, Prolonging the lifetime of wireless sensor networks by cross-layer interaction, *IEEE Wireless Communications*, 11(6), 78–86, December 2004, ISSN 1536-1284.
- [77] J. Yuan, Z. Li, W. Yu, and B. Li, A cross-layer optimization framework for multicast in multi-hop wireless networks wireless Internet, in *Proceedings of the*

1st International Conference on Wireless Internet, WICON05, pp. 47–54, July 10–14, 2005, Budapest, Hungary.

[78] K. Seada, M. Zuniga, A. Helmy, and B. Krishnamachari, Energy-efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks, in Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Sensys04, pp. 108–121, November 2004, Baltimore, MD.

[79] M. Chiang, Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: Jointly optimal congestion control and power control, IEEE Journal on Selected Areas in Communications (IEEE JSAC), 23(1), 104–116, January 2005.

[80] R. Madan, S. Cui, S. Lall, and A. Goldsmith, Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks, in Proceedings of IEEE INFOCOM'05, vol. 3, pp. 1964–1975, March 13–17, 2005, Miami, FL.

[81] S. Cui, R. Madan, A. Goldsmith, and S. Lall, Joint routing, MAC, and link layer optimization in sensor networks with energy constraints, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC'05, vol. 2, pp. 725–729, May 16–20, 2005, Seoul, Korea.

[82] I. F. Akyildiz, M. C. Vuran, and O. B. Akan, “Cross-Layer Module (XLM) for Wireless Sensor Networks,” to appear in CISS '06, March 2006.

[83] A. H. Azni, Madihah Mohd Saudi, Azreen Azman, and Ariff Syah Johari, “Performance Analysis of Routing Protocol for WSN Using Data Centric Approach”, World Academy of Science, Engineering and Technology 53 2009