



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ»**

ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ Ι. ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέποντες Καθηγητές:

**Σταμούλης Γεώργιος, Καθηγητής
Κίκιρας Παναγιώτης, Συμβ. Διδάσκων ΠΔ 407/80**

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής είναι αποτέλεσμα τόσο προσωπικής όσο και ομαδικής εργασίας, υπό την έννοια ότι όλοι όσοι βοήθησαν στη διεκπεραίωση της διπλωματικής συντελούν μία ομάδα με κοινό σκοπό το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Θα ήθελα εκ βάθους καρδίας να ευχαριστήσω τον Κ. Σταμούλη Γεώργιο, για την καταλυτική συνεισφορά του τόσο στην ανάθεση και βοήθεια στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας αλλά πολύ περισσότερο για τη συνολική του συνεισφορά στη φοιτητική μου παιδεία και στις περαιτέρω γνώσεις που μας έδωσε εντός και εκτός διδακτικών ωρών.

Ευχαριστώ τον Κ. Κίκρια Παναγιώτη διότι με τη δική του συμβολή κατέστη δυνατή η εκκίνηση και η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τη γραμματειακή υποστήριξη του τμήματος και ιδιαιτέρως τις κυρίες Παπαλαξανδρή Μαρία και Κουγιουμιζίδου Ελένη για την άψογη συνεργασία και τη βοήθεια που μου προσέφεραν στη διεκπεραίωση των τυπικών μου υποχρεώσεων προς το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τέλος, Ευχαριστώ,

την Ιωάννα για τη δημιουργικότητα της που μοιράστηκε μαζί μου και για την έμπνευση που αποτέλεσε με την παρουσία της,

τον αδερφό μου που επωμίστηκε διπλά βάρη για την επιτυχή συνέχιση της λειτουργίας του γραφείου μας δεδομένης της απουσίας μου από τα επαγγελματικά καθήκοντα για να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή,

τους γονείς μου που με εφοδίασαν με όλα τα απαραίτητα υλικό-σωματικά, πνευματικά και ψυχικά αγαθά ώστε αυτά να αποτελέσουν θεμέλια στοιχεία οικοδόμησης της μέχρι τώρα πορείας μου.

Αφιερωμένη

σε όσους συντέλεσαν στο να αποτελέσουν τα χρόνια των σπουδών μου στο πανεπιστήμιο και χρόνια σπουδών στην ίδια τη ζωή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ WSN	6
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ	7
1.3 ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ WSN	9
1.4 ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	11
1.5 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ	13
1. 6 ΚΡΙΣΙΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ WSN	15
2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ WSN ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	21
2.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.	21
2.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	23
2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ WSN.....	24
2.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ WSN).....	25
2.4.1 <i>Everlast και ZebraNet</i>	26
2.4.2 <i>Heliomote, Prometheus, και Trio Platforms</i>	27
2.4.3 <i>VIBES, PMG Perpetuum και PicoCube Platforms</i>	28
2.5 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ.....	30
3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	31
3.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	31
3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	32
3.3 ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.	33
3.4 ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ	36
3.4.1 <i>Ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης</i>	38
3.4.1.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	39
3.4.1.2 PEGASIS & Ιεραρχικό PEGASIS	40
3.4.1.3 TEEN & ARTEEN.....	41
3.4.1.4 Energy – Aware routing for cluster based sensor networks.....	42
3.4.1.5 Self-organizing Protocol.....	43
3.4.2 <i>Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη θέση</i>	45
3.4.2.1 MECN & SMECN.....	45
3.4.2.2 GAF (Geographical Adaptive Fidelity).....	46
3.4.2.3 GEAR (Geographically and Energy Aware Routing)	47
Τεχνικές εύρεσης θέσης	49
3.4.3 <i>Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας</i>	52
3.4.3.1 Maximun lifetime energy routing.....	53

3.4.3.2 Energy Aware QoS Routing Protocol	53
3.4.3.3 Maximum lifetime data gathering.....	54
3.4.3.4 Minimum Cost Forwarding	55
3.4.3.5 Sequential Assignment Routing SAR.....	56
3.4.3.6 Speed	56
<i>3.4.4 Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω πρωτοκόλλων δρομολόγησης με βάση τα δεδομένα.</i>	<i>57</i>
3.4.4.1 Flooding και Gossiping	58
3.4.4.2 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)	58
3.4.4.3 Directed Diffusion	59
3.4.4.4 Energy Aware Routing.....	60
3.4.4.5 Rumor Routing.....	61
3.4.4.6 Gradient Based Routing.....	62
3.4.4.7 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing)	62
4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ DATA-DRIVEN POWER MANAGEMENT FRAMEWORK (DDPM)	64
4.1 ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	64
4.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΧΡΗΣΗΣ	65
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ DDPM	65
4.3.1 Η τοπολογία του δικτύου.....	65
4.3.2 Η επικοινωνία του Δικτύου.....	66
4.3.3 Αίτηση δεδομένων από το WSN.....	67
4.3.4 Ο ορισμός του προβλήματος.....	67
4.4 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ DDPM	70
4.4.1 Συνολική επισκόπηση	70
4.4.2 Interval Predictor (IP).....	72
4.4.3 Sleep Schedule.....	72
4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ DDPM.....	77
4.5.1 Αξιολόγηση ως προς την καθυστέρηση	77
4.5.2 Αξιολόγηση του DDPM ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας	78
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παγκοσμίως γνωστά και με τη συντομογραφία WSN (Wireless Sensor Networks), αποτελούν μία από τις πλέον αναπτυσσόμενες τεχνολογίες. Ο βασικός ρόλος της ύπαρξής τους είναι για να μεταφέρουν δεδομένα από το περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται σε ένα κεντρικό κόμβο με σκοπό την αποδοτικότερη λήψη αποφάσεων για τη λειτουργία του επιβλέποντος αντικειμένου. Εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι για την επιτυχή τοποθέτηση και χρήση ενός WSN απαιτείται συνδυασμός πολλών επιστημών, όπως των η/υ (ασύρματα δίκτυα, προγραμματισμός χαμηλού επιπέδου), τεχνολογία ανάπτυξης ενεργειακών πηγών (μπαταρίες, ανανεώσιμες πηγές), τεχνολογία αισθητήρων (αισθητήρες κίνησης, υγρασίας, θερμοκρασίας) καθώς και της επιστήμης του αντικειμένου που εποπτεύεται σε κάθε εφαρμογή, π.χ.: Ιατρική, Γεωπονία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνούμε ένα καταλυτικό στοιχείο της λειτουργίας των WSN, αυτό της ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφουμε τη λειτουργία και τα γενικά χαρακτηριστικά που διέπουν ένα WSN.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύουμε μία εναλλακτική μέθοδο αποφυγής του προβλήματος, χρησιμοποιώντας τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση σε ένα WSN

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφουμε και αξιολογούμε ένα μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας οδηγούμενο από τα δεδομένα

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο καταλήγουμε με τα συμπεράσματα και τις προοπτικές όπως τις βλέπουμε μετά από την ενασχόληση με τον τομέα των WSN.

1 Περιγραφή των WSN

1.1 Εισαγωγή

Ο «Heinrich Rudolf Hertz» όταν επιβεβαίωσε το 1888 την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δε μπορούσε να φανταστεί την εξέλιξή τους και είχε δηλώσει χαρακτηριστικά:

"It's of no use whatsoever[...] this is just an experiment that proves Maestro Maxwell was right - we just have these mysterious electromagnetic waves that we cannot see with the naked eye. But they are there."

Που σε ελεύθερη μετάφραση σημαίνει: « Δεν έχουν καμία απολύτως χρήση, είναι απλά ένα πείραμα το οποίο αποδεικνύει ότι ο Maxwell είχε δίκιο – έχουμε απλώς αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που δεν μπορούμε να τα δούμε με γυμνό μάτι. Αλλά υπάρχουν.»

Στη συνέχεια στην ερώτηση αν θεωρεί ότι τα κύματα αυτά θα έχουν κάποια προέκταση στο μέλλον, η απάντηση ήταν:

"Nothing, I guess."

«Καμία φαντάζομαι.»

Όπως γνωρίζουμε βέβαια όχι μόνο άχρηστα δεν αποδείχτηκαν αλλά δημιουργήθηκε τόσο μεγάλη πληθώρα εφαρμογών που έχουν ενταχθεί σε τέτοια βαθμό μέσα στην καθημερινότητά μας που πλέον η χρήση τους αποτελεί πρωτογενή ανάγκη για αρκετούς ανθρώπους και πολλά επαγγέλματα.

Την αλματώδη εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων συμπλήρωσε μία άλλη εξίσου αναπτυσσόμενη επιστήμη αυτή των αισθητήρων δημιουργώντας έτσι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παγκοσμίως γνωστά με την συντομογραφία WSN (Wireless Sensor Networks).

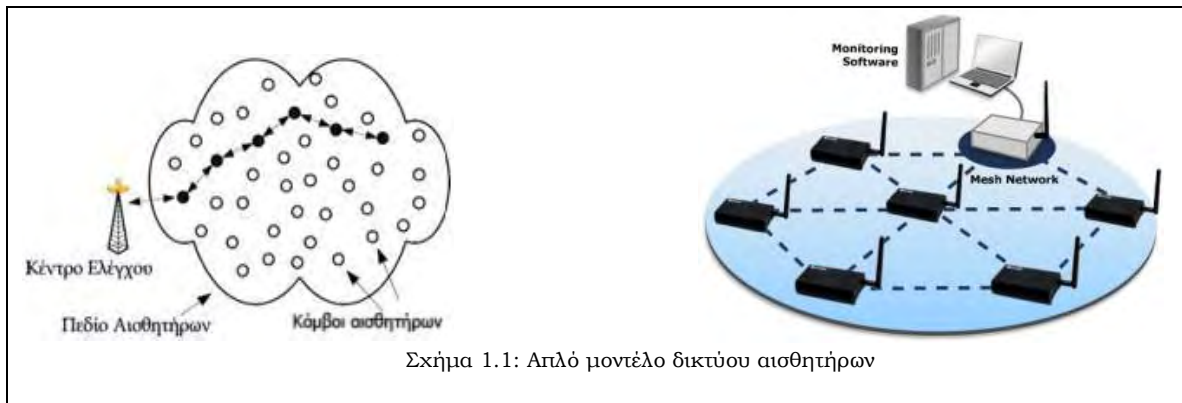
1.2 Γενικά χαρακτηριστικά

Τα δίκτυα αισθητήρων ως κυρίαρχο ρόλο ύπαρξης έχουν την άμεση παραλαβή και διανομή πληροφοριών σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου του δικτύου. Σκοπός της συλλογής πληροφοριών είναι η αποδοτικότερη και πιο εύστοχη λήψη αποφάσεων διαχείρισης του υπό επίβλεψη αντικειμένου. Εφαρμοζόμενα σε μεγάλες κατασκευές, σε πολύπλοκες μηχανές ή στο περιβάλλον, μπορούν να αποδώσουν τεράστια οφέλη όπως: λιγότερες καταστροφικές βλάβες, εξοικονόμηση φυσικών πόρων, αυξημένη κατασκευαστική παραγωγή, αμεσότερη επέμβαση και ενημέρωση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όπως και μεγαλύτερη αίσθηση οικογενειακής ή επαγγελματικής ασφάλειας.

Το κλασσικό μοντέλο ενός δικτύου αισθητήρων περιλαμβάνει ένα σύνολο από κόμβους με αισθητήρες και ενεργοποιητές και ένα κέντρο ελέγχου που καθορίζει τη λειτουργία του δικτύου και στο οποίο συλλέγεται η πληροφορία που λαμβάνουν οι κόμβοι. Το κόστος των κόμβων θεωρείται χαμηλό και οι δυνατότητές του καθενός ξεχωριστά περιορισμένες, ωστόσο μπορούν και συνεργάζονται μεταξύ τους στις λειτουργίες αίσθησης και στην επεξεργασία της διαδιδόμενης πληροφορίας δημιουργώντας ένα έξυπνο καταμεμημένο δίκτυο αισθητήρων.

Το κέντρο ελέγχου θεωρείται πως διαθέτει απεριόριστους υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους και πραγματοποιεί τις πρωταρχικές λειτουργίες και πολιτικές, που είναι υπεύθυνες για τη ανάπτυξη του δικτύου και με σκοπό να αποκομίσουν πληροφορίες από αυτό.

Το *σχήμα 1.1* παρουσιάζει ένα αρκετά γενικευμένο δίκτυο αισθητήρων, όπου οι κόμβοι φαίνονται στατικοί, ομότιμοι και επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους καθώς επίσης και με στατικό κέντρο ελέγχου.



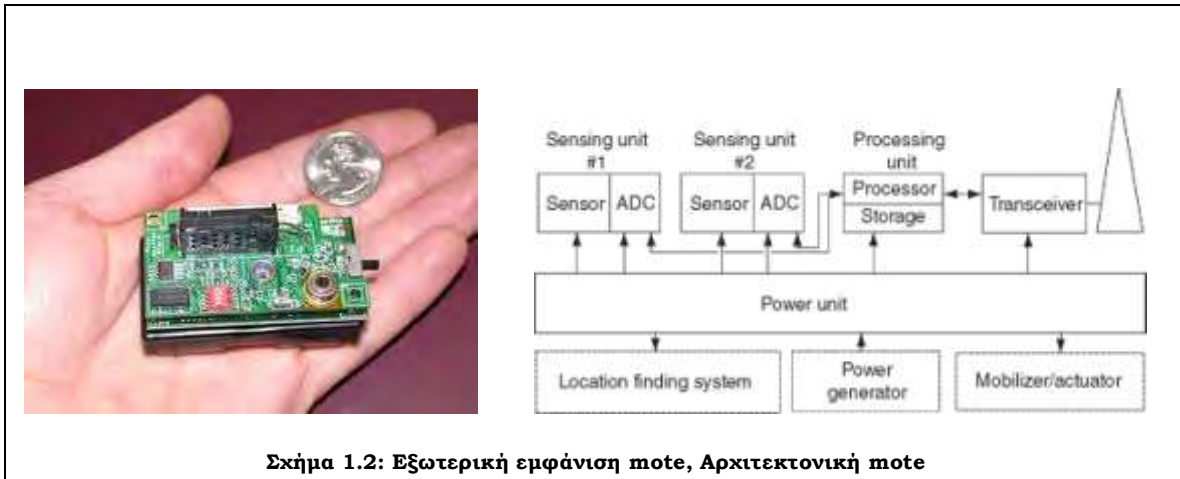
Όπως είπαμε, βασικές λειτουργίες των κόμβων είναι η συλλογή πληροφοριών από τον περιβάλλοντα χώρο μέσω των αισθητήρων τους και η προώθηση πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου. Ο κάθε κόμβος μπορεί να έχει ένα σύνολο από διαφορετικούς αισθητήρες για να αντιλαμβάνεται ποικίλα φαινόμενα που διαδραματίζονται στο άμεσο περιβάλλον του. Επιπρόσθετα ο κάθε κόμβος αναλαμβάνει να δημιουργήσει πληροφορίες σχετιζόμενες με τις μετρήσεις των αισθητήρων που διαθέτει, καθώς και άλλες σχετιζόμενες με την δρομολόγηση κάθε εισερχόμενης πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου.

Τα είδη των αισθητήρων που μπορεί να ενσωματώνουν οι κόμβοι των δικτύων αισθητήρων καθορίζουν τις υπηρεσίες που μπορεί να παρέχει το δίκτυο στο οποίο συμμετέχουν και συνεπώς τις εφαρμογές που μπορεί να βασιστούν σε αυτά. Μερικά από τα μεγέθη που μπορεί να ανιχνεύονται από ένα κόμβο με αισθητήρες είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, το επίπεδο ηχητικού θορύβου, τα μαγνητικά πεδία, το επίπεδο φωτεινότητας και η επιτάχυνση ενός αντικειμένου. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η αρχιτεκτονική και η εξωτερική εμφάνιση ενός αισθητήρα ή *mote* (όπως συνηθίζει να λέγεται ένας κόμβος) του wsn.

Η πληροφορία που ζητάει το κέντρο ελέγχου μπορεί να σχετίζεται:

- 1) με τον τόπο εκδήλωσης κάποιου φαινομένου, οπότε περιμένει απαντήσεις μόνο από ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό τμήμα του δικτύου.
- 2) με τις μετρήσεις ενός συγκεκριμένου κόμβου, οπότε θα απαντήσει μόνο ο καθορισμένος κόμβος.

- 3) με τις μετρήσεις για κάποιο φυσικό μέγεθος ή φαινόμενο γενικά, στην οποία περίπτωση θα απαντήσουν όσοι κόμβοι διαθέτουν σχετική πληροφορία.



Σχήμα 1.2: Εξωτερική εμφάνιση mote, Αρχιτεκτονική mote

1.3 Πόροι και ιδιαιτερότητες των WSN

Σημαντική παράμετρος στη φύση των δικτύων αυτών είναι ότι τυπικά οι κόμβοι των αισθητήρων έχουν περιορισμένες δυνατότητες και συνεπώς απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα για να διαχειριστούν την συμπεριφορά και τη λειτουργία τους. Ο κάθε κόμβος διαθέτει πεπερασμένο ποσό αρχικής ενέργειας, το οποίο καταναλώνεται κατά την αναμονή ή τη μετάδοση μηνυμάτων και κατά την επεξεργασία πληροφορίας. Έρευνες που έχουν γίνει, έδειξαν ότι εάν ένας κόμβος λειτουργεί με τη μέγιστη ισχύ του, η διάρκεια ζωής του κόμβου είναι περίπου τέσσερις μέρες. Για τη λειτουργία ενός WSN αυτές οι τέσσερις μέρες πρέπει να κατανεμηθούν σε αρκετά χρόνια ζωής. Κάτι τέτοιο, για τα υπόλοιπα συστήματα δεν είναι κάτι που πρέπει να λαμβάνουν υπόψη, αλλά για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού πολλές φορές η αντικατάσταση των μπαταριών σε κάθε κόμβο είναι είτε δύσκολη είτε ασύμφορη. Πολλά πρωτόκολλα αναλαμβάνουν τη διαχείριση της ενέργειας του κόμβου, ώστε να εξασφαλίζονται περιόδοι που ο κόμβος θα λειτουργεί σε κατάσταση μειωμένης κατανάλωσης, απέχοντας προσωρινά από τη λειτουργία του δικτύου (sleep mode). Όσοι κόμβοι εξαντλούνται ενεργειακά καθίστανται

ανενεργοί και δε συμμετέχουν πλέον στην ανίχνευση ή στη διάδοση πληροφορίας

Ένας ακόμα περιορισμός-ιδιαιτερότητα των wsn είναι η δύσκολη τοποθέτηση τους. Αντίθετα με τους κόμβους άλλων ασύρματων δικτύων, οι αισθητήρες συχνά πρέπει να τοποθετηθούν σε δυσπρόσιτες περιοχές. Ως εκ τούτου κάποιες φορές η τοπολογία είναι προσεγγιστική και όχι ακριβής.

Επίσης απαιτείται μεγάλη προσοχή και ευελιξία στους αλγορίθμους δρομολόγησης των πακέτων σε ένα wsn, γιατί είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί ο λόγος για τον οποίο μπορεί να χαθεί ένα πακέτο. Οι πιθανοί λόγοι μπορεί να είναι λόγω υπερχειλίσης της ουράς, έλλειψης ενέργειας ή έλλειψης ασφάλειας, για παράδειγμα, κάποιος εξωγενής παράγοντας μετακίνησε τον αισθητήρα, όπως κάποιο πουλί. Ακόμα ένας πιθανός λόγος για την απώλεια πακέτων είναι η συμφόρηση στο δίκτυο, οπότε κάποια πακέτα να μην μπορούν να μεταφερθούν και ειδικότερα αυτά που βρίσκονται πιο μακριά από τον κόμβο συγκέντρωσης δεδομένων (sink).

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της απώλειας του πακέτου έρχεται να συμπληρώσει η περιορισμένη εμβέλεια μετάδοσης μηνυμάτων. Αυτό αποτελεί πρόβλημα ειδικά στην περίπτωση δικτύων με πολλαπλούς κόμβους που αναπτύσσονται σε μεγάλη έκταση με την πιθανή παρουσία φυσικών εμποδίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο κάθε κόμβος δεν μπορεί να επικοινωνεί απευθείας με το κέντρο ελέγχου και απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης των μηνυμάτων σε πολλαπλά βήματα, αποφεύγοντας τα εμπόδια και λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές αλλαγές στην τοπολογία λόγω απώλειας των εξαντλημένων κόμβων. Ιδιαίτερα περίπλοκο σε αυτή την κατάσταση είναι και το θέμα του συγχρονισμού των κόμβων, αλλά και του υπολογισμού της θέσης τους για τις περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητο οι κόμβοι να γνωρίζουν την τοποθεσία που βρίσκονται.

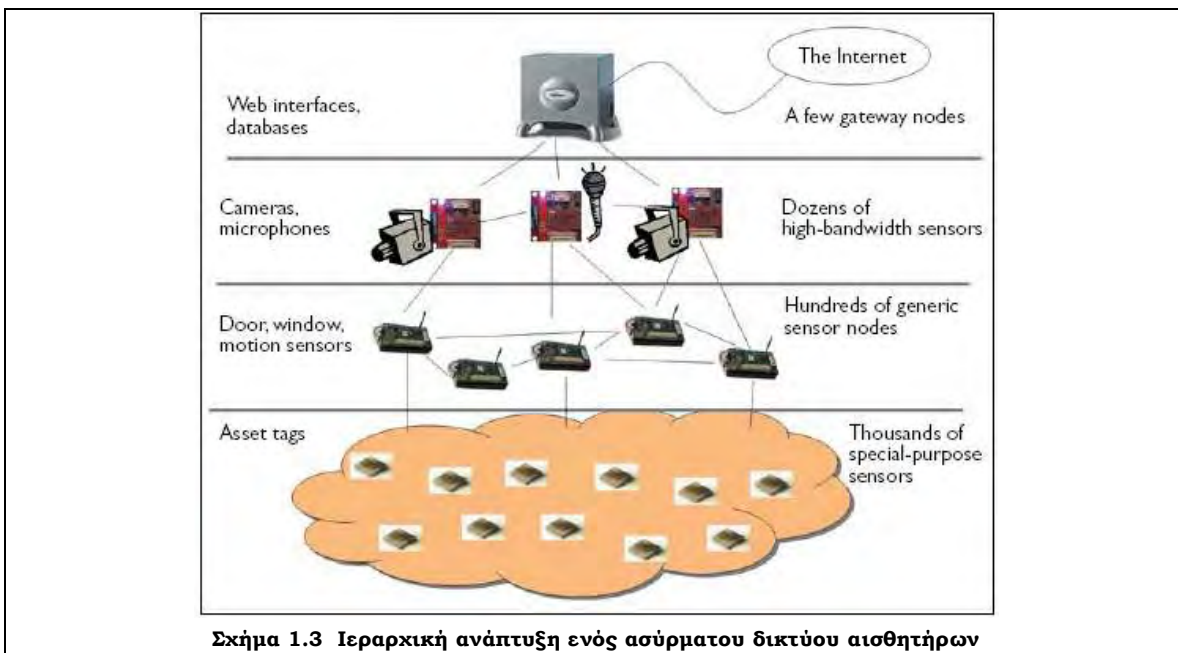
Τέλος, οι κόμβοι διαθέτουν μικρό αποθηκευτικό χώρο και σχετικά απλή μονάδα επεξεργασίας. Έτσι υπάρχουν αυστηρά όρια στο μέγεθος του λογισμικού και την πολυπλοκότητα που μπορεί να εκτελείται σε αυτούς, το μέγεθος της ουράς, για τα μηνύματα που λαμβάνονται και αυτά που αναμένουν μετάδοση και το μέγεθος του χώρου προσωρινής αποθήκευσης για την αναμετάδοση δεδομένων που χάθηκαν.

Από τα παραπάνω θέματα προκύπτει πως τα πρωτόκολλα και το λογισμικό που εκτελείται στα δίκτυα αισθητήρων οφείλουν να λαμβάνουν

υπόψη τις ιδιαιτερότητες της φύσης των δικτύων αισθητήρων. Πρέπει να είναι ανθεκτικά σε σφάλματα (λόγω απώλειας ή υπο- λειτουργίας των κόμβων) ευέλικτα ώστε να προσαρμόζονται στη δυναμική τοπολογία των δικτύων, να χειρίζονται το θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης και της περιορισμένης εμβέλειας μετάδοσης και να είναι απλά, ώστε να μπορεί ο κάθε κόμβος να τα εκτελέσει.

1.4 Πλατφόρμες στις οποίες βασίζονται τα δίκτυα αισθητήρων

Η εμπειρία από την αρχική τους ανάπτυξη, έδειξε ότι τα συστήματα δικτύων αισθητήρων απαιτούν μια ιεράρχηση των κόμβων, που να ξεκινάει από χαμηλού επιπέδου αισθητήρες και να συνεχίζει σε υψηλού επιπέδου μονάδες με δυνατότητες συλλογής δεδομένων, ανάλυσης και αποθήκευσης.



Σχήμα 1.3 Ιεραρχική ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Αυτή η βαθμωτή αρχιτεκτονική είναι κοινή σε όλα σχεδόν τα δίκτυα αισθητήρων και γίνεται εύκολα κατανοητή με ένα παράδειγμα. Ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο αισθητήρων ενός προηγμένου συστήματος ασφαλείας, στο οποίο η πλειονότητα των αισθητήρων καλύπτει σπάσιμο τζαμιών, κλείσιμο επαφών και ανίχνευση κίνησης. Το πλήθος των αισθητήρων και των κατάλληλων θέσεων τους απαιτούν να τροφοδοτούνται από μπαταρία. Συμπληρώνονται από μερικούς περισσότερο εξελιγμένους

αισθητήρες, όπως είναι οι κάμερες ,οι ανιχνευτές ήχων και χημικών, τοποθετημένοι σε καίρια σημεία. Τα απλά και τα σύνθετα δεδομένα των αισθητήρων δρομολογούνται μαζί, μέσω ενός δικτύου, σε μια μονάδα παρακολούθησης και ελέγχου του κτιρίου, που παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης. Οι αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε παράθυρα και πόρτες για ανίχνευση εισβολής είναι παραδείγματα γενικευμένων μονάδων αισθητήρων (generic sensing devices). Η λειτουργία τους είναι απλή και συγκεκριμένη και απαιτεί την τροφοδοσία από μπαταρία μεγάλης διάρκειας. Επιπλέον, οι ρυθμοί επεξεργασίας και επικοινωνίας που διαθέτουν, είναι οι ελάχιστοι. Αντίθετα, οι αισθητήρες ήχου, εικόνας και χημικών είναι παραδείγματα *μονάδων μεγάλου εύρους ζώνης*, που απαιτούν επικοινωνία και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να απαιτούν τροφοδότηση από μπαταρία αλλά συχνά χρειάζεται να συνδεθούν με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής τάσης, για να λειτουργήσουν σε μακρά διάρκεια. Επιπλέον των παραδοσιακών εφαρμογών ασφαλείας, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι σχεδιασμένα να παρακολουθούν κινητά αντικείμενα αξίας (mobile assets), μέσω μικροσκοπικών, χαμηλού κόστους συσκευών ασφαλείας (security tagsmini motes). Αυτοί οι *κόμβοι αισθητήρων ειδικού σκοπού* είναι συνώνυμοι μικροσκοπικών διατάξεων με απαίτηση ελάχιστης τροφοδοσίας. Θα μπορούσαν να ενεργοποιήσουν τον συναγερμό όταν ένα αντικείμενο απομακρυνθεί χωρίς εξουσιοδότηση. Επίσης πρέπει να είναι πλήρως ολοκληρωμένοι και σχετικά φτηνοί. Στα συστήματα ασφαλείας, το δίκτυο αισθητήρων είναι πιθανό να έχει ένα ή περισσότερα τελικά σημεία, που περιλαμβάνουν μια βάση δεδομένων ή άλλο λογισμικό συλλογής δεδομένων, σχεδιασμένο να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει ενδείξεις ανεξάρτητων αισθητήρων. Αυτές οι *μονάδες πύλης* παρέχουν μια διεπαφή σε πολλά υπάρχοντα είδη δικτύων.

Στο σχήμα 1.4 παρατίθενται τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεσσάρων κατηγοριών των μονάδων-κόμβων: πλατφόρμα-αισθητήρας ειδικού σκοπού, πλατφόρμα-αισθητήρας γενικού σκοπού, πλατφόρμα-αισθητήρας μεγάλου εύρους ζώνης και πύλη, όλες κατασκευασμένες με τεχνολογία αιχμής.

Node Type	Sample "Name" and Size	Typical Application Sensors	Radio Bandwidth (Kbps)	MIPS Flash RAM	Typical Active Energy (mW)	Typical Sleep Energy (uW)	Typical Duty Cycle (%)
Specialized sensing platform	Spec mm ³	Specialized low-bandwidth sensor or advanced RF tag	<50Kbps	<5	1.8V*10–15mA	1.8V *1uA	0.1–0.5%
				<0.1Mb			
				<4Kb			
Generic sensing platform	Mote 1-10cm ³	General-purpose sensing and communications relay	<100Kbps	<10	3V*10–15mA	3V *10uA	1–2%
				<0.5Mb			
				<10Kb			
High-bandwidth sensing	Imote 1-10cm ³	High-bandwidth sensing (video, acoustic, and vibration)	~500Kbps	<50	3V*60mA	3V *100uA	5–10%
				<10Mb			
				<128Kb			
Gateway	Stargate >10cm ³	High-bandwidth sensing and communications aggregation Gateway node	>500Kbps–10 Mbps	<100	3V*200mA	3V *10mA	>50%
				<32Mb			
				<512Kb			

Σχήμα 1.4 -Τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των 4 κατηγοριών ασύρματου δικτύου.

Η μονάδα Spec: Είναι ενδεικτική της τάξης αισθητήρων ειδικού σκοπού. Είναι μια μονάδα μονού στοιχείου (single-chip node), σχεδιασμένη ιδιαίτερα για παραγωγή εξαιρετικά χαμηλού κόστους και λειτουργία χαμηλής ισχύος. Απαιτώντας μόνο 2.5mm*2.5mm πυριτίου, περιλαμβάνει μνήμη RAM και ικανότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας. Προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος και η πολυπλοκότητα, η μονάδα Spec κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει διεπαφή μόνο με απλούς αισθητήρες και να επικοινωνεί σε μικρές αποστάσεις. Οι πρώτες εκδοχές της περιλάμβαναν μόνο πομπό, ενώ οι επόμενες έχουν πλήρη πομποδέκτη. Η μονάδα Spec είναι ιδανική για εφαρμογές παρακολούθησης ‘κινητών αντικειμένων αξίας’. Εξοπλισμένη με μικρή μπαταρία είναι ικανή να λειτουργεί για πολλά χρόνια.

1.5 Αρχιτεκτονικές διαφορές

Η συνολική αρχιτεκτονική δομή και στις 4 κατηγορίες πλατφορμών δικτύων αισθητήρων είναι αξιοσημείωτα όμοια, παρά τις σημαντικές διαφορές στις δυνατότητες των συσκευών. Η αρχιτεκτονική ομοιότητα προκύπτει από την απαίτηση να υποστηρίξουν την ασύρματη δικτύωση. Αντίθετα, οι βασικές τους διαφορές προκύπτουν από την επιθυμία των σχεδιαστών τους να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας καθεμιάς

πλατφόρμας για συγκεκριμένη κατηγορία εφαρμογής. Κάποιες από τις θεμελιώδεις αποφάσεις που πρέπει να λάβουν οι μηχανικοί εφαρμογών περιλαμβάνουν το μέγεθος της on-board μνήμης, εάν θα συμπεριλάβουν μνήμη αναλαμπής (flash memory), το μέγεθος ισχύος της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) καθώς, επίσης, τον τύπο και το εύρος ζώνης της ασύρματης ζεύξης. Αφού οι περισσότερες υλοποιήσεις μεταχειρίζονται εξεζητημένα συστατικά στοιχεία, κάποιες από αυτές τις αποφάσεις υπαγορεύονται από τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων μερών. Στο τέλος, το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον τελικό σχεδιασμό της κάθε μονάδας- αισθητήρα. Μια κύρια διαφορά ανάμεσα σε μονάδες δικτύου αισθητήρων και πιο παραδοσιακών υπολογιστικών πλατφορμών, περιλαμβανομένων των προσωπικών υπολογιστών, των υπολογιστών παλάμης (PDAs), ακόμα και των ενσωματωμένων συσκευών είναι η έντονη έμφαση που δίνεται στα δίκτυα αισθητήρων στη διαχείριση της ενέργειας. Μια πληθώρα εφαρμογών απαιτούν τροφοδότηση με μπαταρία για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Προκειμένου να διαχειρίζεται αποτελεσματικά η ισχύς, κάθε υποσύστημα της πλατφόρμας τροφοδοτείται ανεξάρτητα. Για παράδειγμα, ο πομποδέκτης πρέπει να λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια της ενεργής επικοινωνίας και, αν είναι δυνατόν, να κλείνει την κεντρική μονάδα επεξεργασίας στις περιόδους μη επεξεργασίας. Όμοια, πρέπει να είναι σε θέση να κόβει την τροφοδοσία στα υποσυστήματα αισθητήρων και μονάδων εισόδου-εξόδου, ξεχωριστά, όταν είναι ανενεργά. Το λειτουργικό σύστημα TinyOS, σε πολλές περιπτώσεις, ελέγχει την δραστηριότητα και την ισχύ των διαφόρων υποσυστημάτων. Ο χρονισμός των περιόδων που σταματάει η τροφοδοσία (power-down cycles) καθορίζεται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως είναι οι απαιτήσεις της εφαρμογής και το συγκεκριμένο υλικό που χρησιμοποιείται. Στο TinyOS, η διαχείριση ισχύος αφορά κάθε τομέα του συστήματος και όλα τα επιμέρους στοιχεία είναι σχεδιασμένα ώστε να μην καταναλώνουν ισχύ όταν είναι ανενεργά. Για να διευκολυνθεί η σωστή διαχείριση ισχύος, οι πλατφόρμες των δικτύων αισθητήρων δίνουν απευθείας στις εφαρμογές, λεπτομερή έλεγχο του υποκείμενου υλικού. Παραδοσιακές αντιλήψεις διαστρωμάτωσης για τις στοίβες τόσο του δικτύου όσο και των αισθητήρων οδηγούν σε αναποτελεσματική χρήση της ισχύος. Πρόσφατη έρευνα προτείνει μια κοινή προσέγγιση αυτής της πρόκλησης στο

πεδίο των πλατφορμών, με τη χρήση 3 πρόσθετων αρχιτεκτονικών στοιχείων:

- Ένα πλαίσιο στοιχείων γενικού σκοπού που καταργεί τη διαστρωμάτωση
- Λειτουργίες υλικού που είναι διαθέσιμες σε εφαρμογές και σε εξατομικευμένο λογισμικό (middleware)
- Εικονικοποίηση (virtualization), μεταφρασμένα προγράμματα ή απλοποιημένη διαδικασία προγραμματισμού για την ανάπτυξη εφαρμογών δικτύων αισθητήρων

Στις συσκευές κατηγορίας mote (mote-class devices), όπως είναι το Spec και το Mica2, το TinyOS παρέχει ένα χαμηλού επιπέδου έλεγχο υλικού, μέσω ενός ενσωματωμένου στοιχείου που απαλείφει τη διαστρωμάτωση. Στο TinyOS, επιτρέπεται στα στοιχεία επιπέδου εφαρμογής να έχουν απευθείας πρόσβαση στο υλικό, όπως απαιτείται. Ενώ αυτή η δυνατότητα εμφανίζεται και σε άλλα ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα, γενικώς απουσιάζει από άλλα πιο παραδοσιακά λειτουργικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου και του Linux.

Αναλύοντας την εξέλιξη στο υλικό των δικτύων αισθητήρων πρέπει να τονίσουμε την επίδραση του νόμου του Moore, στο σχεδιασμό και την εξέλιξη των δικτύων. Για όλες τις κατηγορίες πλατφορμών, εκτός από τις μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού, ο νόμος του Moore εγγυάται αύξηση της απόδοσης για δεδομένη ισχύ. Μέρος της αυξημένης απόδοσης των μονάδων αισθητήρων γενικευμένης τάξης οφείλεται στους νέους CMOS ραδιοπομπούς, που έχουν σχεδιαστεί για εκπομπή χαμηλού ρυθμού και χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

1. 6 ΚΡΙΣΙΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ WSN

- 1)Αξιοπιστία
- 2)Ολοκλήρωση με θέματα wake/sleep
- 3)Πραγματικός χρόνος
- 4)Φορητότητα

- 5) Ασφάλεια
- 6) Συμφόρηση
- 7) Αποφυγή(void)
- 8) Unicast, multicast and anycast semantics
- 9) Εντοπισμός των κόμβων
- 10) Συγχρονισμός ρολογιού

1)Αξιοπιστία: Από τη στιγμή που τα μηνύματα ταξιδεύουν με πολλές αναπηδήσεις(hops) είναι σημαντικό να έχουν μια υψηλή αξιοπιστία σε κάθε σύνδεση, αλλιώς η πιθανότητα ενός μηνύματος να μεταφέρεται σε ολόκληρο το δίκτυο θα είναι πολύ χαμηλή. Σημαντική δουλειά έχει γίνει για να αναγνωριστούν αξιόπιστες συνδέσεις χρησιμοποιώντας μετρικά όπως η λαμβανόμενη δύναμη του σήματος(POWER SIGNAL), η ποιότητα του σήματος βασισμένη στα λάθη(BER) και η αναλογία το πακέτων(PACKAGE RATIO) που παραδίδονται. Σημαντικά εμπειρικά στοιχεία δείχνουν ότι η αναλογία των πακέτων που παραδίδονται είναι η καλύτερη μέτρηση, αλλά μπορεί να είναι πολύ ακριβή για να την συλλέξουμε.. Εμπειρικά δεδομένα επίσης δείχνουν πως πολλές συνδέσεις σε ένα ΑΔΑ είναι ασύμμετρες, εννοώντας πως ενώ ο κόμβος Α μπορεί επιτυχώς να μεταδώσει ένα μήνυμα στο κόμβο Β, η αντίθετη σύνδεση από τον Β στον Α μπορεί να μην είναι αξιόπιστη. Οι ασύμμετρες συνδέσεις είναι ένας λόγος που τα WSN πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως το DSR και το AODV δε λειτουργούν σωστά σε ένα WSN διότι αυτά τα πρωτόκολλα στέλνουν ένα μήνυμα ανακάλυψης από τη πηγή στο προορισμό και μετά χρησιμοποιούν το αντίστροφο μονοπάτι για επιβεβαίωση. Αυτό το αντίστροφο μονοπάτι δεν είναι τόσο αξιόπιστο λόγω της ασυμμετρίας των WSN.

2)Ολοκλήρωση με θέματα wake/sleep: Για να εξοικονομήσουμε ενέργεια πολλά WSN τοποθετούν κόμβους σε κατάσταση «ύπνου». Προφανώς, μια αντίθετη κατάσταση δε θα πρέπει να επιλέγει μια κατάσταση «ύπνου» στην επόμενη μεταπήδηση.

3)Πραγματικός χρόνος: Για κάποιες εφαρμογές, τα μηνύματα πρέπει να φθάνουν στο προορισμό μέχρι το τέλος μιας προθεσμίας. Εξαιτίας του υψηλού βαθμού αβεβαιότητας στα WSN είναι δύσκολο να αναπτυχθούν πρωτόκολλα δρομολόγησης με απόλυτη εγγύηση. Πρωτόκολλα όπως το

SPEED και το RAP χρησιμοποιούν μια υποθετική ταχύτητα για να επισπεύδονται οι μεταδόσεις των πακέτων. Η ταχύτητα είναι ένα καλό μέτρο που συνδυάζει την προθεσμία και την απόσταση που το μήνυμα πρέπει να διανύσει.

4)Φορητότητα: Η δρομολόγηση περιπλέκεται αν η πηγή ή ο προορισμός του μηνύματος μετακινούνται. Λύσεις περιλαμβάνουν συνεχή ανανέωση των τοπικών γειτονικών κόμβων ή αναγνώριση βοηθητικών κόμβων που είναι υπεύθυνη για να παρακολουθούν το πού βρίσκονται οι κόμβοι. Οι βοηθητικοί κόμβοι για έναν δεδομένο κόμβο μπορούν να αλλάζουν αν ο κόμβος απομακρύνεται όλο και -περισσότερο από την αρχική του θέση.

5)Ασφάλεια: Αν υπάρχουν «αντιπαλότητες», μπορεί κάποιος να εισάγει μια μεγάλη γκάμα από επιθέσεις στον αλγόριθμο δρομολόγησης περιλαμβάνοντας επιλεκτικές επιθέσεις, μαύρες τρύπες, επαναλήψεις και επιθέσεις στις υπηρεσίες. Δυστυχώς, σχεδόν όλοι οι WSN αλγόριθμοι δρομολόγησης έχουν αγνοήσει την ασφάλεια και τα δίκτυα είναι ευάλωτα σε αυτές τις επιθέσεις. Πρωτόκολλα όπως το SPINS αποτελούν τις πρώτες απόπειρες ανάπτυξης πρωτοκόλλων που ενσωματώνουν το δείκτη της ασφάλειας στις αρχές δημιουργίας τους.

6)Συμφόρηση: Σήμερα, πολλά WSN έχουν περιοδική ή σπάνια κίνηση. Η συμφόρηση δε θεωρείται μεγάλο πρόβλημα στα WSN. Ωστόσο, η συμφόρηση είναι ένα πρόβλημα για πιο απαιτητικά WSN και προβλέπεται να είναι ένα πιο σημαντικό θέμα με μεγαλύτερα συστήματα που μπορεί να επεξεργάζονται ήχο, ή εικόνα και να έχουν πολλαπλούς σταθμούς βάσης. Ακόμα και στα συστήματα με ένα μόνο σταθμό βάσης, η συμφόρηση κοντά σε αυτόν είναι ένα σοβαρό πρόβλημα από τη στιγμή που η «κίνηση» βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης. Λύσεις χρησιμοποιούν τους ρυθμούς μετάδοσης των κόμβων που αποτελούν την πηγή, μη δίνοντας έμφαση σε μηνύματα λιγότερης σημασίας και χρησιμοποιώντας προγράμματα για να αποφευχθούν όσο πιο πολλές συγκρούσεις γίνεται και να μειωθεί το πρόβλημα της συμφόρησης.

7)Αποφυγή(void): Από τη στιγμή που οι κόμβοι των WSN έχουν περιορισμένη εμβέλεια μετάδοσης, είναι πιθανό για κάποιους κόμβους στο μονοπάτι δρομολόγησης να μην βοηθούν στη προώθηση της κατεύθυνσης που πρέπει να ακολουθήσει το μήνυμα. Πρωτόκολλα όπως το GPSR λύνουν το πρόβλημα με το να επιλέγουν κάποιους άλλους κόμβους που δε χρησιμοποιούνται για δρομολόγηση στη σωστή κατεύθυνση ώστε να γίνει μια προσπάθεια να βρεθεί ένα μονοπάτι γύρω από αυτούς.

8)Unicast, multicast and anycast semantics: Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στις περισσότερες περιπτώσεις ενός WSN σχετικά με τη δρομολόγηση των μηνυμάτων υφίσταται ένας γεωγραφικός προορισμός. Τι συμβαίνει όταν αυτό φτάνει στο προορισμό του? Υπάρχουν αρκετές πιθανότητες. Πρώτον, το μήνυμα μπορεί να περιέχει μια ταυτότητα με ένα συγκεκριμένο unicast κόμβο σε αυτή τη περιοχή σα στόχο, ή σημασιολογικά μπορεί να είναι ένας μόνο κόμβος που είναι πλησιέστερος στη γεωγραφική περιοχή που θα είναι τώρα αυτός ο κόμβος unicast. Δεύτερον, οι σημασιολογία θα μπορούσε να είναι ότι όλοι οι κόμβοι μέσα στη περιοχή γύρω από τη διεύθυνση του προορισμού θα πρέπει να λαμβάνουν το μήνυμα. Αυτοί είναι και η περιοχή multicast. Τρίτον, μπορεί να είναι αναγκαίο για κανέναν κόμβο στην εγγύς περιοχή προορισμού να μη λάβει το μήνυμα, που αποκαλείται anycast. Το -πρωτόκολλα SPEED υποστηρίζει αυτούς τους τρεις τύπους. Υπάρχει επίσης συχνά η ανάγκη να «πλημμυρίσει» όλο το δίκτυο με πληροφορία(multicast). Πολλοί αλγόριθμοι υποστηρίζουν αυτή την αποδοτική τεχνική.

9)ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ: Ο εντοπισμός των κόμβων είναι ένα πρόβλημα του προσδιορισμού της γεωγραφικής τοποθεσίας του κάθε κόμβου μέσα στο σύστημα. Ο εντοπισμός είναι ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν σε ένα WSN. Ο εντοπισμός είναι μια λειτουργία από πολλές παραμέτρους και απαιτήσεις και τον καθιστούν πολύ περίπλοκη διαδικασία. Για παράδειγμα, θέματα που αφορούν και περιέχουν: το επιπλέον κόστος του hardware εντοπισμού, τα beacons(κόμβοι που ξέρουν τη θέση τους), πόσοι είναι και ποιες είναι οι εμβέλειες τους, ποιος είναι ο βαθμός της ακρίβειας της τοποθεσίας τους που απαιτείται, αν το σύστημα είναι indoor/outdoor, αν δεν υπάρχει κατευθείαν οπτική επαφή μεταξύ των κόμβων, ποιος είναι ο

προϋπολογισμός ισχύος(power budget), πόσος χρόνος απαιτείται για τον εντοπισμό, αν τα ρολόγια είναι συγχρονισμένα.

Για κάποιους συνδυασμούς απαιτήσεων και θεμάτων το πρόβλημα λύνεται εύκολα. Αν το κόστος δεν είναι παράγοντας σημαντικός και η ακρίβεια μερικών μέτρων είναι δεκτή, τότε για εξωτερικά συστήματα(outdoors) το να εξοπλίσεις κάθε κόμβο με σύστημα GPS είναι μια απλή απάντηση. Αν το σύστημα αναπτύσσεται χειροκίνητα με ένα κόμβο τη φορά, τότε ένας απλός κόμβος με GPS μπορεί να εντοπίζει κάθε άλλο κόμβο μέσω μιας λύσης που ονομάζεται WALKING GPS. Περισσότερες, από τις λύσεις για εντοπισμό σε ένα WSN είναι είτε βασισμένο στην εμβέλεια(range-based) ή στην ελεύθερη εμβέλεια(range-free). Η πρώτη χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές για να καθορίσει πρώτον τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων και έπειτα να υπολογίσει την τοποθεσία χρησιμοποιώντας κάποιες γεωμετρικές αρχές. Για το προσδιορισμό των αποστάσεων, επιπλέον hardware συνήθως απαιτείται παραδείγματος χάρη, hardware για τον εντοπισμό της χρονικής διαφοράς της άφιξης του ήχου και των ράδιο-κυμάτων. Αυτή η διαφορά μπορεί να μετατραπεί σε μέτρηση της απόστασης. Στη δεύτερη οι αποστάσεις δε προσδιορίζονται ευθέως, αλλά μετράται ο αριθμός των μεταπηδήσεων(hops) που πραγματοποιούνται. Αν και οι μετρήσεις των μεταπηδήσεων είναι καθορισμένες, οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων είναι εκτιμημένες χρησιμοποιώντας μια μέση απόσταση ανά μεταπήδηση, και τότε οι γεωμετρικές αρχές εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της τοποθεσίας. Αυτή η τεχνική δεν είναι τόσο αποδοτική όσο η πρώτη που αναφέραμε και συχνά απαιτεί περισσότερα μηνύματα. Ωστόσο, δεν απαιτούν επιπλέον hardware για κάθε κόμβο.

Αρκετές πρώιμες λύσεις για τον εντοπισμό περιέχουν APIT και CENTROID. Κάθε ένα από αυτά τα πρωτόκολλα λύνει το πρόβλημα του εντοπισμού για ένα συγκεκριμένο σύνολο από υποθέσεις. Δυο πρόσφατες και ενδιαφέρουσες λύσεις είναι το SPOTLIGHT και το RADIO INTERFEROMETRIC GEOLOCATION. Το πρώτο μετακινεί τους περισσότερους κώδικες εντοπισμού και τους οδηγεί σε μια συσκευή που τα συγκεντρώνει. Αυτό απαιτεί απευθείας οπτική επαφή και συγχρονισμό του ρολογιού.

Το δεύτερο πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μια τεχνική επεξεργασίας που στηρίζεται στην εκπομπή ράδιο-κυμάτων των κόμβων ταυτοχρόνως με κάποιες αλλαγές τις συχνότητας. Αυτή η λύση είναι θέμα για προβλήματα

πολλαπλών δρόμων(multipath) σε κάποιες εφαρμογές και απαιτεί πολλά μηνύματα. Οι δυο αυτές τεχνικές προσφέρουν υψηλή ακρίβεια σε εμβέλειες της τάξης των cm.

10)ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΡΟΛΟΓΙΟΥ: Το ρολόι κάθε κόμβου σε ένα WSN θα πρέπει να διαβάζει τον ίδιο χρόνο μέσα στο «έψιλον» και να παραμένει σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας. Από τη στιγμή που τα ρολόγια παρασύρονται πάνω από αυτό το χρόνο, θα πρέπει να συγχρονίζονται περιοδικά και σε κάποια παραδείγματα όταν απαιτείται υψηλή ακρίβεια είναι σημαντικό για τους κόμβους να υπολογίζουν το αν θα «παρασυρθεί» το ρολόι μεταξύ των περιόδων συγχρονισμού. Ο συγχρονισμός του ρολογιού είναι σημαντικός για πολλούς λόγους. Όταν ένα γεγονός λαμβάνει χώρα σε ένα WSN είναι συχνά απαραίτητο να γνωρίζουμε που και πότε αυτό συμβαίνει. Τα ρολόγια είναι επίσης χρησιμοποιούμενα σε πολλές εφαρμογές και σε πολλά συστήματα. Για παράδειγμα, sleep/awake λειτουργίες, κάποιοι αλγόριθμοι εντοπισμού, και συγχώνευση κόμβων είναι κάποιες από τις υπηρεσίες που συχνά εξαρτώνται από ρολόγια που είναι συγχρονισμένα. Εφαρμογές όπως παρακολούθηση και υπολογισμός ταχύτητας εξαρτώνται από συγχρονισμένα ρολόγια.

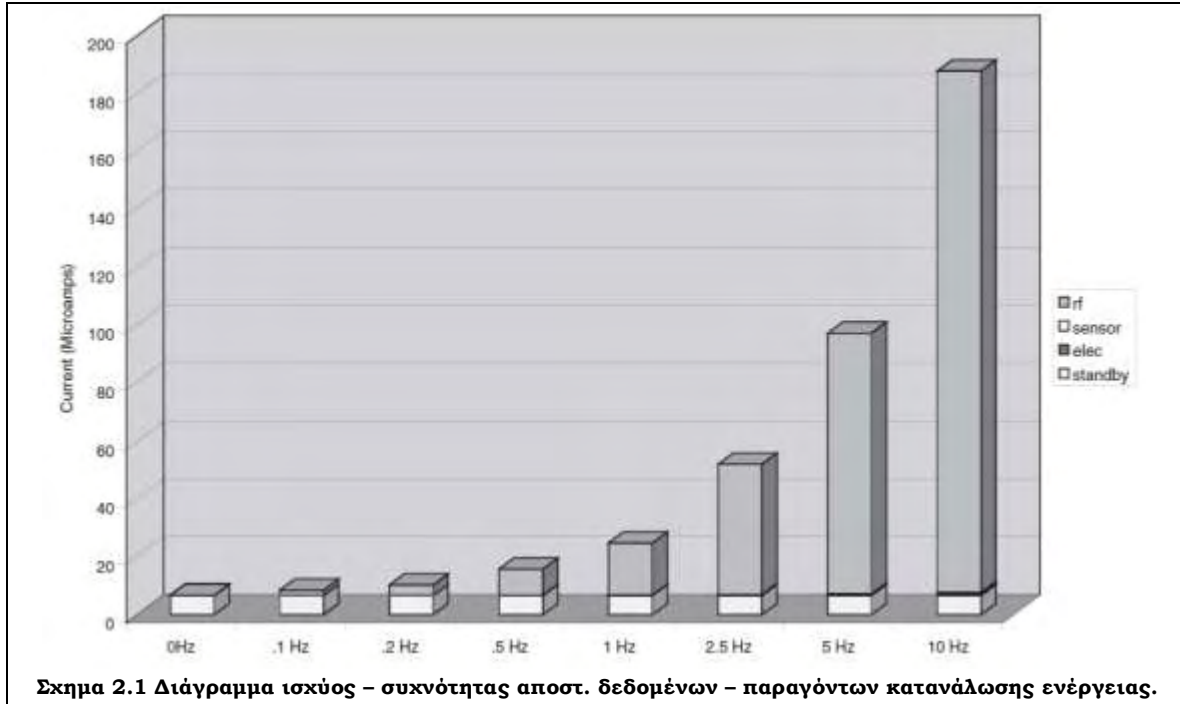
Το NTP πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό ρολογιών. Το να τοποθετήσουμε σε κάθε κόμβο ένα σύστημα GPS είναι πολύ ακριβή διαδικασία. Χαρακτηριστικά πρωτόκολλα για το συγχρονισμό είναι: τα RBS, TPSN και FTSP.

2 Το πρόβλημα της πεπερασμένης ενέργειας στα WSN και εναλλακτική λύση

2.1 Ενεργειακό περιεχόμενο αισθητήρων.

Όπως θα περίμενε κανείς και μόνο στη σκέψη του συνδυασμού της τεχνολογίας των αισθητήρων με την επιστήμη της πληροφορικής και την εφαρμογή τους σε συστήματα καθημερινής ή εξειδικευμένης χρήσης δημιουργεί κίνητρα για περαιτέρω ανάπτυξη στον τομέα των wsn και εμπνέει για νέες ιδέες και εφαρμογές. Παρόλα αυτά όσο ελκυστικό και αν φαντάζει ο κλάδος των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων ως ιδέα και ως θεωρία, αν είμαστε αναγκασμένοι να αντικαταστήσουμε της πηγές ενέργειας (μπαταρίες συνήθως) των αισθητήρων ανά τακτά χρονικά διαστήματα δύσκολα θα εξαπλωθεί και θα αναπτυχθούν εφαρμογές βασισμένες στα WSN. Για αυτό το λόγο η κατανάλωση όσο το δυνατόν λιγότερης ενέργειας πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ένα διάγραμμα προβολής του ρεύματος που καταναλώνεται σε ένα WSN καθώς αυξάνεται ο ρυθμός ανανέωσης δεδομένων για συγκεκριμένο υλικό εξοπλισμό και τοπολογία στο χώρο. Όπως φαίνεται, ο παράγοντας που σε όλες τις περιπτώσεις, καταναλώνει περισσότερη ισχύ, είναι αυτός της αποστολή – λήψης δεδομένων. Συμπεραίνουμε εύκολα ότι όταν ο πομποδέκτης είναι σε λειτουργία έχουμε τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και μάλιστα όσο

μεγαλώνει ο ρυθμός αποστολής – λήψης των δεδομένων σχεδόν αναλογικά αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας.



Σχημα 2.1 Διάγραμμα ισχύος – συχνότητας αποστ. δεδομένων – παραγόντων κατανάλωσης ενέργειας.

Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές μείωσης που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του ραδιοπομπού. Τέτοιες είναι:

- Μείωση του όγκου των δεδομένων που μεταφέρονται μέσω συμπίεσης δεδομένων
- Μείωση του (duty cycle) και της συχνότητας της μεταγωγής δεδομένων.
- Μείωση των ενεργειακών δαπανών ανά αποστολή
- Υλοποίηση μηχανισμών διαχείρισης ενέργειας απενεργοποίηση motes (power down) ή ενεργοποίηση κατάστασης αναμονής (sleep mode)
- Υλοποίηση στρατηγικών αποστολής δεδομένων μόνο όταν συμβαίνει κάποια αλλαγή στην κατάσταση του αισθητήρα (προφανώς σηματοδοτεί λήψη κάποιας νέας τιμής δεδομένων)

2.2 Συλλογή ενέργειας

Όπως είδαμε είναι πρωταρχικής σημασίας η επίλυση του ζητήματος της παροχής ενέργειας στους αισθητήρες. Εύλογα με τη σημερινή ανάπτυξη στο χώρο των φωτοβολταϊκών και με την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναλογίζεται κανείς αν μπορεί να λύσει το μείζον πρόβλημα της ενέργειας τοποθετώντας στους αισθητήρες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και χρησιμοποιώντας μηχανισμούς επαναφόρτισης. Πράγματι είναι μία ιδέα που έχει ήδη πραγματοποιηθεί και προωθείται όλο και περισσότερο, αν και είναι δεδομένο ότι δεν μπορούμε πάντα να εφαρμόσουμε αυτή την τεχνική στους αισθητήρες. Ο λόγος είναι ότι πολλές φορές οι εφαρμογές δε μας το επιτρέπουν είτε λόγω μεγέθους, είτε λόγω συνθηκών. Αν αναλογιστούμε ότι τέτοιες τεχνολογίες (WSN) υποκινούνται και αρχικά εφαρμόζονται για στρατιωτικούς σκοπούς και θέλαμε να συλλέξουμε πληροφορίες για τους «εχθρούς» όντας αόρατοι, θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε αισθητήρες μικρού μεγέθους. Αντίθετα ο μηχανισμός φόρτισης θα χρειαζόταν μεγάλη επιφάνεια για να είναι αποδοτικός.

Το μέγεθος παρόλα αυτά δεν είναι ο μόνος περιοριστικός παράγοντας. Ας θεωρήσουμε ότι WSN χρησιμοποιούνται για την εξέλιξη της βιοϊατρικής. Ενσωματώνοντας τους αισθητήρες στον ασθενή πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι ο ασθενής δεν κινείται, δεν εκτίθεται στο ηλιακό φως ούτε στον αέρα, γενικά δε δέχεται επιρροή τρίτων δυνάμεων στο σώμα του ή τον περιβάλλοντα χώρο του ώστε να εκμεταλλευτούμε την παραγόμενη ενέργεια, επομένως και πάλι δεν είναι εφικτή η επαναφόρτιση των μπαταριών ανεξαρτήτως μεγέθους.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου δεν είναι να προτείνουμε τον καλύτερο τρόπο επίλυσης του ενεργειακού προβλήματος των αισθητήρων, ούτως η άλλως είδαμε ότι δεν είναι πάντα εφικτή η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου, αλλά να παρουσιαστούν οι πιθανές λύσεις και οι υπαρκτές εναλλακτικές υλοποιήσεις που εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να τη συμπεριλάβουμε στις πιθανές λύσεις ενός προβλήματος αισθητήρων. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν δύο πολύ σημαντικά εγγενή πλεονεκτήματα: δε χρειάζονται συντήρηση και δε μολύνουν το περιβάλλον.

Όπως φαίνεται στο ν πίνακα του σχήματος 2.2 η πιο επικερδής ενέργεια είναι η ηλιακή. Οποιαδήποτε μορφή και αν χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας, αυτή είναι διαθέσιμη μόνο υπό ορισμένες συνθήκες, όπως : ηλιοφάνεια, συνεχής κίνηση ή δονήσεις, υψηλή θερμοκρασία και θόρυβος.

Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι δυνατή η συνεχής τροφοδότηση του συστήματος, γι' αυτό πρέπει να υπάρχουν μπαταρίες επαναφορτιζόμενες και ένας μηχανισμός συλλογής της ενέργειας (scavenging technology). Έχουν εξετασθεί πολλές μορφές ενέργειας αλλά παρακάτω φαίνονται μόνο οι πιο κατάλληλες για εφαρμογή στα WSN

Τεχνολογία συλλογής ενέργειας	Ενεργειακό κέρδος
Φωτοβολταϊκά στοιχεία	15 mW/cm ²
Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία	330 μW/cm ³
Στοιχεία εκμετάλλευσης δονήσεων	116 μW/cm ³
Θερμοηλεκτρικά πεδία	40 μW/cm ⁱ
Στοιχεία εκμετάλλευσης θορύβου (100 dB)	960 nW/cm ³

Σχήμα 3.2: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και απόδοση/cm³.

2.3 Ενεργειακή απόδοση και διαχείριση ενέργειας στα WSN

Κάθε μηχανισμός που προστίθεται σε επιτεύγματα τεχνολογίας μπορεί να είναι λειτουργικός και να ωφελεί στην βελτίωση του επιτεύγματος αλλά πάντα παράλληλα αυξάνει την πολυπλοκότητα του συνολικού μηχανισμού. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά έχει θετικά αποτελέσματα αλλά πρέπει να προβλέψουμε τις περιπτώσεις δυσλειτουργίας που προσθέτει στο όλο σύστημα. Έτσι θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση των αισθητήρων τους οποίους τροφοδοτούμε με ενέργεια μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας π.χ.: φωτοβολταϊκά, μπορεί να μειωθεί, λόγω της απευθείας σύνδεσης του ενεργειακού δέκτη με τον ενεργειακό αποθηκευτικό χώρο. Μείωση της απόδοσης μπορεί να προκληθεί είτε κατά τη μετατροπή της λαμβανόμενης ενέργειας στη μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον αισθητήρα, είτε κατά τη μεταφορά της ενέργειας από το δέκτη στο αποθηκευτικό μέσο, είτε κατά τη διαδικασία της αποθήκευσης, είτε τέλος λόγω κατανάλωσης.

Πρώτα από όλα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν λόγω των αποκλίσεων στα volt. Είναι πιθανό να μην έχουμε τη δυνατότητα να ενεργοποιήσουμε το σύστημα ή να μην είναι εφικτή η φόρτιση της συσκευής. Τέτοιου είδους συστήματα όπως τα WSN

είναι σχεδιασμένα με αναλογικά στοιχεία και συστήματα επικοινωνίας μέσω RF τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της ενέργειας τροφοδοσίας τους. Χρειάζεται να γίνει μετατροπή της ενέργειας σε μία γνωστή πλήρως ελέγξιμη μορφή για να εξασφαλίσουμε το αποτέλεσμα.

Τον ισορροπιστή αυτής της κατάστασης τον καλύπτει το κύκλωμα του κανονικοποιητή τάσης. Ο γραμμικός κανονικοποιητής (linear regulator) τάσης παρέχει καθαρή και σταθερή ενέργεια η οποία απαιτείται από τα στοιχεία που προαναφέραμε. Οι ψηφιακοί κανονικοποιητές (switching regulators) είναι αρκετά πιο αποδοτικοί και χρησιμοποιούνται κυρίως για να τροφοδοτήσουν τα ψηφιακά υποκυκλώματα τα οποία έχουν μεγαλύτερη ανοχή στα σφάλματα.

2.4 Ενέργεια (Πλατφόρμες συλλογής Ενέργειας για WSN)

Platform	Goal or Application	System Composition	Harvesting Technology
Everlast [101]	Operating on supecaps, lifetime, low cost, high performance, durable WSN	Everlast node	Solar radiation
Heliomote [93]	Simplicity, ecosystem sensing	Mica2 [43] + heliomote board	Solar radiation
Prometheus [68]	Perpetual operation and prove of concepts	TelosB [43] + prometheus board	Solar radiation
Trio [52]	Sustainable, flexible, scalable WSN, experimentation purpose	TelosB [43] + XSM [51] + prometheus platform	Solar radiation
ZebraNet [116]	Efficient power management, miniaturization, zebra's movement tracking	ZebraNet node	Solar radiation
VIBES [110]	Lifetime, acceleration data measuring	VIBES node	Vibration
PMG Perpetuum [15]	Battery-free sensor system, condition monitoring, industrial, aerospace	PMG sensor node	Vibration

PicoCube [38]	Small volume, tire pressure monitoring	Five stacked boards	Vibration
AmbiMax [89]	Multiple harvesting components adoption	Eco node	Wind, solar radiation, thermal, vibration
Electro acoustic liner system [90]	The suppression of aircraft engine noise	Self-powered node	Acoustic noise
Cymbet CBC-EVAL-08 [44]	Quick development of energy harvesting applications, commercial sensor node	Cymbet CBC-EVAL-08 module	Solar radiation, AC-based energy

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε τις πιο πρόσφατες πλατφόρμες που χρησιμοποιούν το μηχανισμό ανανέωσης ενέργειας.

2.4.1 Everlast και ZebraNet

Το everlast και το ZebraNet είναι από τις πλατφόρμες που σχεδιάστηκαν αυτοτελείς .

Το everlast έχει στη διάθεσή του μόνο μία πηγή ισχύος, γιατί κατά τον σχεδιασμό του θεωρήθηκε ότι η τοποθέτηση επαναφορτιζόμενων μπαταριών θα έθετε όρια στην διάρκεια ζωής του αισθητήρα. Πέρα από αυτό η ευρηματικότητα της συγκεκριμένης πλατφόρμας βρίσκεται στην τοποθέτηση ιδιαίτερα μεγάλων πυκνωτών των οποίων η φόρτιση γινόταν μέσω μιας μονάδας προσαρμογής συχνότητας (PFM) καθώς και μέσω ενός κυκλώματος φωτοβολταϊκών που το διοχέτευε με το μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ενέργειας που κατέστη δυνατό. Η διάρκεια ζωής του everlast υπολογίζεται στα 20 χρόνια χωρίς καμία συντήρηση.

Το ZebraNet είναι WSN με έμφαση στην τοποθεσία από την οποία έρχονται τα δεδομένα, γι' αυτό και έχει προσαρτημένη μία μονάδα GPS. Αν και αρχικά αναπτύχθηκε για στρατιωτικούς σκοπούς τελικά χρησιμοποιήθηκε για πληροφορίες σε σχέση με τις μετακινήσεις και τις μεταναστεύσεις των ζώων της άγριας φύσης. Ένας κόμβος αισθητήρα έχει μία και μοναδική παροχή ενέργειας, μικρο-ελεγκτές με δυνατότητα να

ακούν σε 2 χρονισμούς, διαφορετικές πηγές ενέργειας για κάθε μηχανισμό ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καταναλωση ενέργειας, ενώ η μνήμη δεν είναι πάνω στο chip δεδομένου ότι το σύστημα πρέπει να κάνει λεπτομερή καταγραφή θέσεως. Το middleware του SN έχει ως προτεραιότητες τα γεγονότα που συμβαίνουν και αφορούν το GPS καθώς και τη ραδιοεπικοινωνία. Τα υπόλοιπα γεγονότα είναι ένας συνδυασμός από προγραμματισμένα και μη γεγονότα. Για να επιτύχουν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, οι σχεδιαστές του οργάνωσαν 3 τεχνικές χαμηλού επιπέδου: έγκαιρη χρήση των μηχανισμών, άμεση επεξεργασία εντολών και ένα σύστημα με 2-πλό ρολόι το οποίο δίνει τη δυνατότητα να πέσει η ισχύς αφού χρησιμοποιούνται ρολόγια χαμηλότερου χρονισμού.

2.4.2 Heliomote, Prometheus, και Trio Platforms

Σε αυτή την υπό-ενότητα αναφέρουμε τις πλατφόρμες οι οποίες εκτός των μηχανισμών σύλληψης ενέργειας από το περιβάλλον περιέχουν και άλλες βοηθητικές υπο-μονάδες.

Ο «Prometheus» είναι μία πλατφόρμα που εμπεριέχει την ομώνυμη ενεργειακή πλακέτα και την «Telos». Ολόκληρο το σύστημα τροφοδοτείται από την πλακέτα «Prometheus» η οποία υλοποιείται με σύστημα αποθήκευσης 2 επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο αποτελείται από δύο πυκνωτές τεράστιας χωρητικότητας ως πρώτο επίπεδο και από μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου ως 2^ο επίπεδο. Οι δύο αυτοί πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι σε σειρά για να μειωθεί η διαρροή ρεύματος. Η μπαταρία λιθίου φορτίζεται μόνο από τον πρώτο πυκνωτή που ο παλμός είναι σταθερός και η ισχύς αρκετή. Το λογισμικό εκτελείται στην άλλη πλακέτα την «Telos». Η πλατφόρμα αυτή μπορεί να λειτουργήσει για 43 χρόνια εάν λειτουργεί με φόρτο εργασίας λιγότερο από 1%, 4 χρόνια με φόρτο εργασίας λιγότερο από 10% και 1 χρόνο με πλήρη φόρτο εργασίας.

Το «Prometheus», το «Telos» και το «XSM»() συνδυάζονται για να σχηματίσουν μία νέα πλατφόρμα τον κόμβο «Trio». Το «Telos» είναι απαραίτητο για την όσο το δυνατόν μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Το «Prometheus» είναι υπεύθυνο για τη δέσμευση ηλιακής ενέργειας και την παροχή ενέργειας στο όλο κύκλωμα και το «XSM» είναι ένα σύνολο από τους απαραίτητους αισθητήρες. Το «Prometheus» σε αυτή την έκδοση έχει παραμετροποιηθεί για να βελτιωθεί η απόδοσή του και να προστεθεί μία

λειτουργία «έκτακτης ανάγκης». Το σύστημα είναι σχεδιασμένο σε 4 επίπεδα. Στο 1^ο επίπεδο γίνονται όλες οι λήψεις δεδομένων από τους αισθητήρες, όλοι οι υπολογισμοί και οι επικοινωνίες, στο 2^ο επίπεδο γίνεται η προώθηση των δεδομένων στο Server, στο 3^ο επίπεδο ο Server συγκεντρώνει στατιστικά, πολυπλέκει τα δεδομένα από διάφορους κόμβους και στο 4^ο επίπεδο τρέχουν οι εφαρμογές υψηλότερου επιπέδου.

Η πλατφόρμα «Helio mote» έχει μία και μοναδική μπαταρία, επαναφορτιζόμενη, ως πηγή ενέργειας. Η υλική υποδομή για την εκτεταμένη χρήση μπαταριών παρέχει επιλογές λειτουργίας υπερφόρτισης και υποφόρτισης, καθώς επίσης και κύκλωμα επίβλεψης της ενέργειας.

2.4.3 VIBES, PMG Perpetuum και PicoCube Platforms

Οι VIBES, PMG Perpetuum και PicoCube είναι πλατφόρμες που αποτελούνται από μικροσυστήματα που τροφοδοτούνται ενεργειακά από τις περιβαλλοντικές δονήσεις. Η αρχική εφαρμογή για την οποία προοριζόταν το VIBES ήταν μία μονάδα συμπίεσης αέρος, αλλά οι μετρήσεις δονήσεων και συχνοτήτων κατέδειξαν μία νέα ευκαιρία εκμετάλλευσης βιομηχανικής εφαρμογής για το σύστημα αυτό. Ως υλικός εξοπλισμός το σύστημα αυτό περιέχει τρεις δομικές μονάδες: microgenerator, η οποία μετατρέπει τους κραδασμούς σε ενέργεια, τον πολλαπλασιαστή τάσης, που μετατρέπει και αποθηκεύει την ενέργεια σε έναν τεράστιο πυκνωτή, και ένα υποσύστημα που αποτελείται από ένα επιταχυνσιόμετρο και ένα ραδιοπομπό. Η πλατφόρμα VIBES είναι ένα σύστημα σχεδιασμένο για βέλτιστη ενεργειακή απόδοση και για αυτό έχει τη δυνατότητα να αυξομειώνει το “duty cycle” του ανάλογα με τη διαθέσιμη ενέργεια.

Η δεύτερη πλατφόρμα που λειτουργεί με ανάλογους μηχανισμούς με την παραπάνω είναι η PMG. Η PMG έχει τριών ειδών αισθητήρες, ο καθένας για διαφορετικό σκοπό. Αυτοί οι αισθητήρες είναι οι PMG-17, PMG-27, PMG-37. Η πλατφόρμα αυτή έχει μία κυρίως πηγή ενέργειας για βελτιωμένη ευελιξία, ενώ δε χρειάζεται καθόλου συντήρηση. Αναλόγως με την εφαρμογή ένα PGM σύστημα μπορεί να μεταδώσει μεγάλα ποσά πληροφορίας ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα, ή να μεταδίδει μικρότερο όγκο δεδομένων πιο συχνά σε ένα δυναμικό περιβάλλον.

Η πλατφόρμα PicoCube έχει συνολικά μέγεθος 1cm³ και αποτελείται από 5 υποσυστήματα: το ραδιοπομπό, τον αισθητήρα, το μικροελεγκτή, το χώρο αποθήκευσης δεδομένων και το κύκλωμα διακοπής. Αν και δεν

περιέχει ενδιάμεσο κύκλωμα εγκλωβισμού ενέργειας, η συλλεγόμενη ενέργεια αποθηκεύεται σε μία μπαταρία NI-MH

Το “Electroacoustic Liner System” σχεδιάστηκε ειδικά για την καταστολή του θορύβου των μαχητικών αεροπλάνων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα μηχανισμό συγκομιδής της ενέργειας, έναν μηχανισμό επικοινωνιών και ένα ρυθμιστή εμπέδησης. Το ένα από τα 2 αντηχεία χρησιμοποιείται για να καταστείλει το θόρυβο, ενώ το άλλο για να δεσμεύσει ενέργεια. Βέβαια μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότερα αντηχεία εάν χρειάζεται περισσότερη ενέργεια λειτουργίας το σύστημα. Ως εφεδρεία του συστήματος υπάρχει μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία.

Η πλατφόρμα «AmbiMax Platform» είναι η πρώτη που βλέπουμε ότι έχει περισσότερους από δύο μηχανισμούς εγκλωβισμού ενέργειας από το περιβάλλον. Είναι σχεδιασμένη για να μπορεί να συλλέξει την ηλιακή ενέργεια, τη θερμική, την αιολική και την ενέργεια λόγω δονήσεων. Αποτελείται από ένα σύστημα πρόσληψης ενέργειας, ένα σύνολο πυκνωτών μεγάλης χωρητικότητας και μία υπομονάδα ελέγχου φόρτισης. Ο κάθε μηχανισμός πρόσληψης ενέργειας από τους παραπάνω διαθέτει ένα σύνολο πυκνωτών, τους οποίους φορτίζει κατά την πρόσληψη ενέργειας. Όλοι αυτοί οι πυκνωτές δημιουργούν τον πίνακα πυκνωτών (capacity array). Η σχεδίαση όμως της πλατφόρμας εμπεριέχει και εφεδρικό ενεργειακό χώρο όταν όλοι οι παραπάνω πυκνωτές δεν είναι φορτισμένοι και υπάρχει έλλειψη ενέργειας.

Τέλος η πλατφόρμα CBC-EVAL-08 είναι ένα σύστημα σχεδιασμένο να συγκρατεί ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα μικρό μόνο μηχανισμό με φωτοβολταϊκά στοιχεία, αλλά μπορεί να συνδεθεί πάνω στην πλατφόρμα μία εξωτερική μονάδα προσληψης ηλιακής ενέργειας. Για την αποθήκευση της συλλεγόμενης ενέργειας υπάρχουν 2 μπαταρίες χωρητικότητας 50uAh. Για την εξοικονόμηση ενέργειας στην πλατφόρμα αυτή υπάρχει η μονάδα διαχείρισης ενέργειας η οποία αποτρέπει την πλήρη αποφόρτιση των μπαταριών και επιβλέπει σε περιπτώσεις λειτουργίας με ισχυρή ένταση ρεύματος. Παρά τις μικρές μπαταρίες που διαθέτει οι σχεδιαστές της πλατφόρμας ισχυρίζονται ότι μπορεί να λειτουργήσει για 10 χρόνια λειτουργίας.

2.5 Επισκόπηση για τις ενεργειακές πλατφόρμες

Είδαμε πιο πάνω σχεδόν όλες τις πιθανές επιλογές μέχρι σήμερα για να αποφύγουμε το πρόβλημα του πεπερασμένου ποσού ενέργειας και να χρησιμοποιήσουμε τα WSN με πλήρεις δυνατότητες προσπαθώντας να επιτύχουμε ακόμα μεγαλύτερη απόδοση. Όπως φαίνεται σε αρκετές περιπτώσεις όπως αυτή της βιοϊατρικής δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε αυτούς τους μηχανισμούς. Η επιστήμη των WSN δε σταματά να ασχολείται με τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των αισθητήρων και την εξοικονόμηση ενέργειας. Στο επόμενο κεφάλαιο βλέπουμε πως μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την κατανάλωση ενέργειας και πώς να ελαχιστοποιήσουμε τις διαρροές σε όλα τα επίπεδα ώστε ο χρόνος ζωής του κάθε SN να είναι μέγιστος.

3 Ενεργειακοί παράγοντες εξάρτησης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων

3.1 Ο ρόλος της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα Αισθητήρων

Μία από τις κύριες κινητήριες δυνάμεις στην εξέλιξη της τεχνολογίας είναι οι περιορισμοί, η πρόκληση για να ξεπεράσουμε τα γνωστά όρια, τα προβλήματα στα οποία προσπαθούμε να βρούμε λύση ή οι λύσεις που ζητούν βελτιστοποίηση έχοντας ήδη κάποιο όριο στην απόδοσή τους. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων το ρόλο αυτό τον αποδίδουμε στην ενέργεια. Λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας και της επαλήθευσης του νόμου του Moore έχει καταστεί εφικτό να δημιουργηθούν αισθητήρες στο μέγεθος ενός δακτυλιδιού ή και μικρότεροι, ενώ έχουν δημιουργηθεί πολλές εφαρμογές και λειτουργικές πλατφόρμες ούτως ώστε να αξιοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι πόροι. Παρόλα αυτά το πιο κρίσιμο ζήτημα κομβικής σημασίας είναι αυτό της εξοικονόμησης ενέργειας λόγω της αδυναμίας να αντικαταστήσουμε της πηγές ενέργειας του κάθε αισθητήρα.

Στη συνέχεια εξετάζουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική ενέργεια σε ένα δίκτυο ασυρμάτων αισθητήρων καθώς και ενδεικτικούς τρόπους βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσής του.



3.2 Παράγοντες ενέργειας.

Όπως μπορεί να διαπιστώσει εύκολα κανείς από την ενασχόλησή του με τα WSN δεν υπάρχει γενικός κανόνας για την ενέργεια σε όλα τα δίκτυα ή ακόμα και για την τοπολογία ή τη δρομολόγηση των δεδομένων. Θα λέγαμε ότι τα WSN σχεδιάζονται με βάση συγκεκριμένο τύπο προβλημάτων ή και συγκεκριμένο πρόβλημα πολλές φορές. Εξάγοντας έναν κανόνα ή μια έρευνα βελτιστοποίησης από κάποιο συγκεκριμένο δίκτυο δε συνεπάγεται άμεσα ότι ισχύει το ίδιο συμπέρασμα και για οποιοδήποτε άλλο WSN. Θα πρέπει ερευνώντας κατά περίπτωση να θέσουμε τις παραμέτρους εκείνες που διαφοροποιούν το κάθε δίκτυο από τα υπόλοιπα και να κάνουμε μια στοιχειώδη ανάλυση θεωρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους ή κάποιες από αυτές ως σταθερές, για να καταστήσουμε εφικτή τη δημιουργία κανόνων μεγαλύτερης κλίμακας.

Τέτοιες παράμετροι είναι : η απόσταση των motes μεταξύ τους, η τοπολογία του δικτύου, ο/οι αλγόριθμος/οι δρομολόγησης, η συνολική χωρητικότητα του δικτύου, η κωδικοποίηση των δεδομένων, οι επιπρόσθετες λειτουργικές μονάδες, το εύρος του καναλιού το οποίο χρησιμοποιείται για να γίνει η μεταγωγή των δεδομένων, καθώς και η προσβασιμότητα στο κανάλι.

Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των motes επειδή, όπως είπαμε οι αισθητήρες τοποθετούνται με βάση τις πληροφορίες που θέλουμε να συλλέξουμε, οι ακριβείς θέσεις των motes ορίζονται από το ίδιο το πρόβλημα. Οι σημαντικότερες παράμετροι για την εξοικονόμηση ενέργειας αναλύονται παρακάτω.

3.3 Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω βελτίωσης στην τεχνολογία υλικού εξοπλισμού.



Η τεχνολογική ανάπτυξη των ασυρμάτων δικτύων δεδομένων αλλά και το χαμηλό κόστος κατασκευής τους, ενθάρρυναν την ανάπτυξη όλο και περισσότερων εφαρμογών για WSN. Παράλληλα λόγω των διαφόρων συνθηκών και σταθερών απαιτείται η εφεύρεση μη συμβατικών τεχνικών για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων. Δεδομένης της χαμηλής πολυπλοκότητας κυκλωμάτων που απαιτείται σε συνδυασμό με την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, πρέπει να βρεθεί εκείνη η χρυσή τομή που ισορροπεί την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων (η επικοινωνία RF είναι η λειτουργία που καταναλώνει το περισσότερο ρεύμα) και τις δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων που ενσωματώνονται στις πλατφόρμες τους. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η εξέλιξη της τεχνολογίας αισθητήρων με ποιοτικά χαρακτηριστικά, ενώ το Σχήμα 3.2 δείχνει τα motes που παράχθηκαν για βιομηχανικούς σκοπούς με την πάροδο του χρόνου. Έχει αποδειχθεί εκ του αποτελέσματος ότι ο νόμος του Moore ισχύει για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έτσι με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν δημιουργηθεί οι υποδομές και οι τεχνολογίες που αξιοποιούν στο μέγιστο βαθμό την εξέλιξη των τρανζίστορ και την κατανάλωση όσο το δυνατόν λιγότερης ενέργειας από κατασκευής τους. Αυτό συνεπάγεται είτε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για τους αισθητήρες, είτε περισσότερες δυνατότητες καταναλώνοντας την ίδια ενέργεια π.χ.: μεγαλύτερη απόσταση αποστολής των δεδομένων για την ίδια κατανάλωση ισχύος. Όλη αυτή εξέλιξη δε θα μπορούσε να είναι εκμεταλλεύσιμη στο έπακρο εάν δεν υπάρχουν τεχνικές διαχείρισης ενέργειας. Η εφαρμογή τέτοιων τεχνικών υλοποιείται μέσω μιας αρχιτεκτονικής δομής, γνωστής ως (ΑΔΕ).

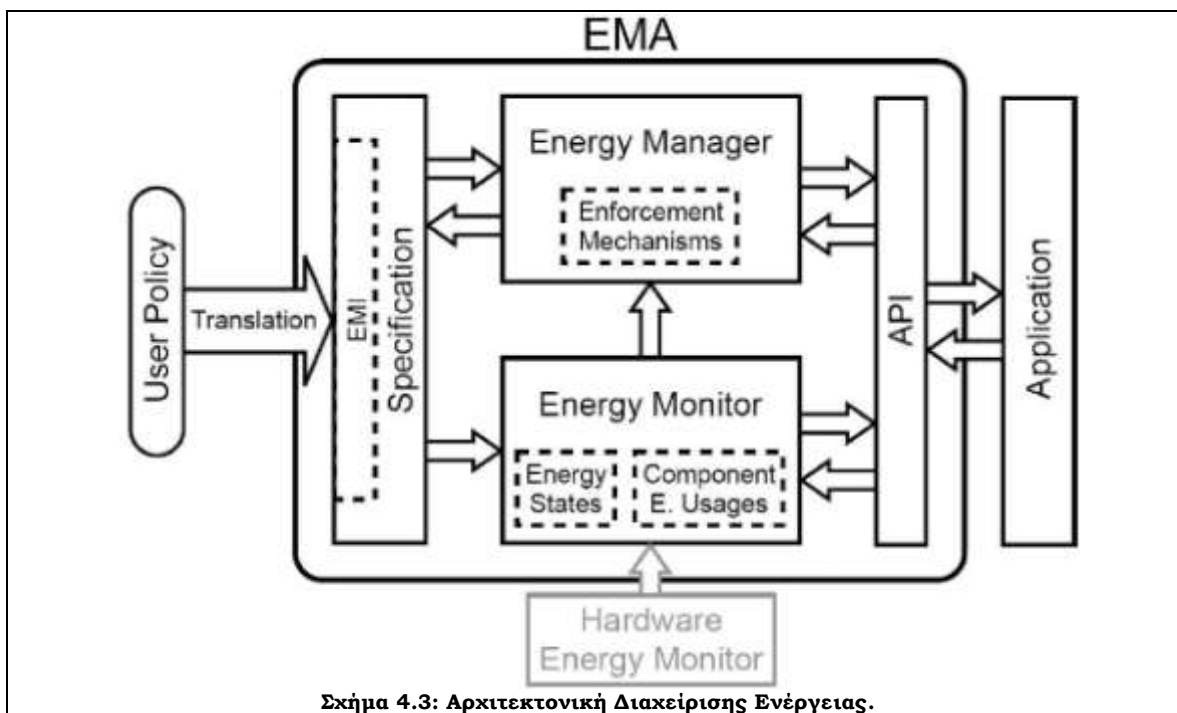
Size of Sensor	Mobility of Sensor	Power of Sensor	Computation Logic; Storage Capability of Sensor	Sensor Mode	Communication Apparatus; Lower-Layer Protocols	Communication Apparatus; Upper-Layer Protocols
Very large (10^3 mm^3)	Fully mobile at deployment; fully mobile postdeployment	Self-replenishable, continuous	High-end processor (e.g., 64-bit micro); high-end storage (e.g., 100 GB)	High-end multimodal; physics	Multihop/mesh; hops in 10^1 - 10^2 m; IEEE MAC	Dynamic routing; data-centric
Large (10^2 mm^3)	Fully mobile at deployment; semimobile postdeployment	Self-replenishable, sporadic	Midrange processor (e.g., 16- or 32-bit micro); high-end storage	High-end multimodal; chemistry-biology	Multihop/mesh; hops in 10^2 to 10^4 m; IEEE MAC	Dynamic routing; hierarchical
Medium (10^1 mm^3)	Fully mobile at deployment; immobile postdeployment	Battery, 10^1 hours	Low-end processor (e.g., 8-bit micro); high-end storage	High-end multimodal; physics-chemistry-biology	Multihop/mesh; hops in 10^4 or more meters; IEEE MAC	Dynamic routing; location-based
Small (10^0 mm^3)	Semimobile at deployment; fully mobile postdeployment	Battery, 10^2 hours	High-end processor (e.g., 64-bit micro); midrange storage (e.g., 1 GB)	Midrange multimodal; physics	Multihop/mesh; hops in 10^1 to 10^2 m; special MAC	Dynamic routing; QOS-based
Very small (10^{-1} mm^3)	Semimobile at deployment; semimobile postdeployment	Battery, 10^3 hours	Midrange processor (e.g., 16- or 32-bit micro); midrange storage	Midrange multimodal; chemistry-biology	Multihop/mesh; hops in 10^2 to 10^4 m; special MAC	Static routing (single hop)
Ultrasmall (10^{-2} mm^3)	Semimobile at deployment; immobile postdeployment	Battery, 10^4 hours	Low-end processor (e.g., 8-bit micro); Midrange storage	Midrange multimodal; physics-chemistry-biology	Multihop/mesh; hops in 10^4 or more meters; special MAC	
Microscale (10^{-3} mm^3)	Immobile at deployment; fully mobile postdeployment	Battery, 10^5 hours	High-end processor (e.g., 64-bit micro); low-end storage (e.g., 0.01 GB)	Single function; physics	Single hop; hops in 10^1 to 10^2 m; IEEE MAC	
Nanoscale ($<10^{-4} \text{ mm}^3$)	Immobile at deployment; semimobile postdeployment		Midrange processor (e.g., 16- or 32-bit micro); low-end storage	Single function; chemistry-biology	Single hop; hops in 10^2 to 10^4 m; IEEE MAC	
	Immobile at deployment; immobile postdeployment		Low-end processor (e.g., 8-bit micro); low-end storage	Single function; physics-chemistry-biology	Single hop; hops in 10^4 or more meters; IEEE MAC Single hop; special MAC	

Σχήμα 3.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά και τεχνολογίες SN.

Mote	WeC	rene	dot	mica	mica2	mica2 dot	iMote [26]	btNode[25]
Released	1999	2000	2001	2002	2003	2003	2003	2003
Processor	4 MHz			7 MHz		4 MHz	12 Mhz	7 Mhz
Flash (code, kB)	8	8	16	128	128	128	512	128
RAM (kB)	0.5	0.5	1	4	4	4	64	4
Radio (kBaud)	10	10	10	40	40	40	460	460
Radio Type	RFM			ChipCon	ChipCon	Zeevo BT	Ericson BT	
μcontroller	Atmel						ARM	Atmel
Expandable	no	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes

Σχήμα 3.2: Εξέλιξη της τεχνολογίας αισθητήρων.

Η Αρχιτεκτονική Διαχείρισης Ενέργειας (ΑΔΕ) σε ένα WSN βασίζεται στις δοκιμαστικές μετρήσεις και στα ιστορικά δεδομένα του συστήματος, ώστε να προσαρμοστεί επάνω σε αυτές τις πληροφορίες μία πιο αποδοτική τεχνική διαχείρισης του Duty Cycle. Η ΑΔΕ βασίζεται στην πολιτική του συστήματος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η αρχιτεκτονική δομή της Διαχείρισης της ενέργειας.



Σχήμα 4.3: Αρχιτεκτονική Διαχείρισης Ενέργειας.

Η ΑΔΕ διαχειρίζεται την ενέργεια ως ένα πολύ κρίσιμο στοιχείο για τα WSN και για το σκοπό αυτό απαρτίζεται από τρία βασικά συστατικά: ένα για τον προσδιορισμό των προδιαγραφών και των αναγκών του συστήματος, ένα

επίβλεψης ενέργειας και ένα διαχείρισης ενέργειας. Σκοπός του στοιχείου ορισμού των προδιαγραφών είναι να παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές και να διασυνδέει την ενεργειακή πολιτική που ορίζεται από την εφαρμογή ή το χρήστη με το στοιχείο επίβλεψης ενέργειας καθώς και με αυτό της διαχείρισής της. Το στοιχείο επίβλεψης της ενέργειας επιβλέπει τη χρήση της ενέργειας από όλο το σύστημα κατά τη λειτουργία του με βάση ένα σύνολο από διεπαφές για την κάθε εφαρμογή. Εκτός από αυτό εποπτεύει και τις ενεργειακές εφεδρείες του συστήματος, όπως τις μπαταρίες ως προς την υπολειπόμενη ενέργεια που διαθέτουν καθώς και την εισερχόμενη ενέργεια όταν υπάρχουν μηχανισμοί πρόσληψης ενέργειας από το περιβάλλον. Το στοιχείο διαχείριση της ενέργειας δέχεται τις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί από αυτό της επίβλεψης και στέλνει τα ανάλογα σήματα για να ενεργοποιήσει μέσω των διεπαφών τις πολιτικές που ορίζονται από την εφαρμογή ως προς το ποιες διεργασίες θα εκτελεστούν και ποιες όχι.

Όπως είδαμε λοιπόν η τεχνολογική εξέλιξη ευνοεί την εξοικονόμηση ενέργειας, αναπτύσσοντας νέους μηχανισμούς. Παρόλα αυτά αφορά μόνο τον κάθε κόμβο SN ξεχωριστά και όχι ολόκληρο το δίκτυο. Ουσιαστικά μπορεί αν θεωρήσουμε πολύ γενικευμένα ότι ο κύκλος λειτουργίας των αισθητήρων είναι «Λήψη πληροφοριών -> Μετάδοση -> Επεξεργασία» ή «Λήψη πληροφοριών -> Επεξεργασία -> Μετάδοση στο δίκτυο», η βελτίωση του υλικού μπορεί να βοηθήσει μέχρι το σημείο της λήψης πληροφοριών και της εκπομπής τους από *mote* σε ένα άλλο μέσω της βελτίωσης του ραδιοπομπού. Η περαιτέρω βελτίωση φαίνεται παρακάτω.

3.4 Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Όπως αναφέραμε απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης προκειμένου η πληροφορία να φθάσει από το φαινόμενο στους τελικούς χρήστες. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με κάποιες παραμέτρους:

α. Τρόπος δρομολόγησης:

- Προδραστική δρομολόγηση (*proactive routing*): Το επίπεδο δικτύου έχει υπολογίσει όλες τις πιθανές διαδρομές χωρίς να έχουν ζητηθεί και τις

ανανεώνει περιοδικά. Έτσι, έχει μια συνολική εικόνα του δικτύου και των καλύτερων διαδρομών.

- Αντιδραστική δρομολόγηση (reactive routing): Το δίκτυο βρίσκει την ζητούμενη διαδρομή μόνο όταν την χρειάζεται. Έτσι, δεν δημιουργείται επιπλέον κίνηση όταν αλλάζει το δίκτυο, αλλά για κάθε δεδομένο που δημιουργείται υπάρχει μεγαλύτερο overhead.
- Υβριδική δρομολόγηση (hybrid routing): Είναι ένας συνδυασμός και των δύο. Κάνοντας χρήση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε άλλους τρόπους δρομολόγησης που βασίζονται στην διάδοση ερωτημάτων που αφορούν είτε πληροφορίες περιεχομένου είτε πληροφορία θέσης.

Όταν έχουμε επικοινωνία μεταξύ λίγων κόμβων και σε μη τακτά διαστήματα η αντιδραστική δρομολόγηση είναι προτιμότερη, ενώ αν έχουμε συχνή επικοινωνία με υψηλούς ρυθμούς και με όλους τους κόμβους είναι προτιμότερη η προδραστική δρομολόγηση.

β. Γνώση της θέσης:

- Δρομολόγηση με γνώση της θέσης του κάθε κόμβου: όπου η απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ισχύ των εισερχόμενων σημάτων. Ανταλλάσσοντας αυτού του είδους την πληροφορία οι γειτονικοί κόμβοι μπορούν να αποκτήσουν παραπλήσιες συντεταγμένες. Ένας άλλος τρόπος για την έρευνα της θέσης ενός κόμβου είναι χρησιμοποιώντας ένα GPS σε κάθε κόμβο.
- Δρομολόγηση χωρίς γνώση της θέσης του κάθε κόμβου

γ. Τρόπος συμμετοχής των κόμβων:

- Άμεση επικοινωνία (direct communication): η οποία δεν είναι εφικτή μιας και οι απαιτήσεις σε ενέργεια αυξάνουν με την έκταση του δικτύου.
- Επίπεδη δρομολόγηση (flat routing): οι γειτονικοί κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους προκειμένου να μεταδώσουν την πληροφορία. Οι κόμβοι κοντά στον sink έχουν μεγάλη απαίτηση σε ενέργεια, αφού διακινούν όλη την πληροφορία μεταξύ του δικτύου και του sink.

- Πρωτόκολλα δρομολόγησης με ομάδες (clustering routing protocols): είναι τα καταλληλότερα για τα δίκτυα αισθητήρων, αφού έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Οι κόμβοι χρειάζεται να αποθηκεύουν πληροφορία μόνο για τον επικεφαλής της ομάδας, οπότε το δίκτυο μπορεί εύκολα να επεκταθεί. Οι διαδρομές ανακαλύπτονται και συντηρούνται εύκολα και έχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας, αφού τα δεδομένα συγκεντρώνονται στους επικεφαλείς των ομάδων, όπου γίνεται η επεξεργασία τους.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε:

- Δεδομένο-κεντρικά
- Ιεραρχικά
- Βασισμένα στη θέση
- Βασισμένα στην ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας

Τα δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα βασίζονται σε ερωτήματα όπως συμβαίνει σε μια βάση δεδομένων και εξαρτώνται από την ονομασία των επιθυμητών δεδομένων. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα στοχεύουν στην ομαδοποίηση των κόμβων. Οι επικεφαλείς κόμβοι συγκεντρώνουν τα δεδομένα της κάθε ομάδας έτσι ώστε να μειώσουν τα δεδομένα που πρόκειται να εκπεμφθούν με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στην γνώση της θέσης των κόμβων χρησιμοποιούν αυτή την πληροφορία για να αναμεταδώσουν τα δεδομένα σε επιθυμητές περιοχές αντί σε όλο το δίκτυο. Τέλος, τα πρωτόκολλα της τελευταίας ομάδας επιλέγουν διαδρομές για την μετάδοση των δεδομένων οι οποίες έχουν σαν στόχο να αυξήσουν την διάρκεια ζωής του δικτύου και να παρέχουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.

3.4.1 Ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Οι τεχνικές ιεραρχικής δρομολόγησης χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για ενεργειακά αποτελεσματική δρομολόγηση. Οι κόμβοι με υψηλά ενεργειακά αποθέματα χρησιμοποιούνται για να επεξεργαστούν και να στείλουν πληροφορίες, ενώ οι χαμηλής ενέργειας κόμβοι χρησιμοποιούνται για να λαμβάνουν δεδομένα.

Η δημιουργία ομάδων κόμβων αισθητήρων (clusters) και η ανάθεση ιδιαίτερων διεργασιών στους επικεφαλείς κόμβους των ομάδων (cluster

heads) μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη συνολική κλιμάκωση του συστήματος, στον χρόνο ζωής και στη σωστή χρήση της ενέργειας. Η ιεραρχική δρομολόγηση είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας μέσα σε ένα cluster διεξάγοντας συγκέντρωση και συγχώνευση δεδομένων με στόχο τη μείωση των μεταδιδόμενων πακέτων.

3.4.1.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Το LEACH είναι ένα από τα πιο διάσημα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων. Η λειτουργία του βασίζεται στην δημιουργία clusters, που βασίζονται στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος και στην χρήση των cluster heads σαν δρομολογητών μεταξύ των κόμβων και του sink. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας, αφού η εκπομπή δεδομένων προς τον sink γίνεται μόνο από τους cluster heads και όχι από όλους τους κόμβους. Ο βέλτιστος (optimal) αριθμός των cluster heads είναι το 5% των συνολικών κόμβων. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται στους cluster heads. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου έχει 2 φάσεις: α) την *φάση εγκατάστασης* και β) την *σταθερή φάση*. Κατά την α) φάση επιλέγονται οι cluster heads. Προκειμένου να γίνει εξισορρόπηση της απώλειας ενέργειας μεταξύ των κόμβων, οι cluster heads αλλάζουν τυχαία στο χρόνο. Ο τρόπος της αλλαγής γίνεται με τον κόμβο να επιλέγει ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Ο κόμβος γίνεται cluster head, αν ο αριθμός που επέλεξε είναι μικρότερος από μία τιμή κατωφλίου που προκύπτει από τη συνάρτηση $T(n)$. Μόλις επιλεγούν οι cluster heads, στέλνουν μηνύματα (advertise) προς όλους τους κόμβους του δικτύου ότι είναι cluster heads πλέον. Όταν οι κόμβοι αισθητήρων λαμβάνουν αυτό το μήνυμα, αποφασίζουν για το cluster στο οποίο θέλουν να ανήκουν βασιζόμενοι στην ένταση του σήματος του μηνύματος που έλαβαν. Κατόπιν ειδοποιούν τον αντίστοιχο cluster head ότι θα ανήκουν στο cluster του. Τέλος, ο cluster head ορίζει τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να στέλνουν δεδομένα, βασιζόμενος σε μια προσέγγιση TDMA. Κατά τη διάρκεια της σταθερής φάσης, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα από το περιβάλλον και να τα εκπέμπουν προς τους cluster heads.

Το πρωτόκολλο LEACH επιτυγχάνει μείωση ως και 7 φορές στην κατανάλωση της ενέργειας σε σχέση με την απ' ευθείας μετάδοση και μείωση 4-8 φορές σε σχέση με την μέθοδο μετάδοσης της μικρότερης ενέργειας. Το LEACH χρησιμοποιεί δρομολόγηση single-hop, όπου ο κάθε

κόμβος μπορεί να εκπέμψει κατευθείαν στον cluster head και στον sink. Το τελευταίο αποτελεί και μειονέκτημα, γιατί δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα που εγκαθίστανται σε μεγάλες περιοχές. Ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί και η δυναμική αλλαγή των clusters που επιφέρει επιπλέον κατανάλωση ενέργειας λόγω αλλαγής του cluster head, της επιπλέον διαφήμισης κ.α.

3.4.1.2 PEGASIS & Ιεραρχικό PEGASIS

- **PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)**

Πρόκειται για μια βελτίωση του πρωτοκόλλου LEACH. Η διαφορά του με το πρωτόκολλο LEACH είναι η χρήση δρομολόγησης multi-hop με την δημιουργία αλυσίδων και με την επιλογή ενός μόνο κόμβου που θα εκπέμψει προς το σταθμό βάσης (sink) αντί της χρήσης πολλαπλών κόμβων. Τα συλλεγμένα δεδομένα κινούνται από κόμβο σε κόμβο, αθροίζονται (aggregated) και τελικώς στέλνονται $s \rightarrow c_0 \rightarrow c_1 \rightarrow c_2 \leftarrow c_3 \leftarrow c_4$ Σταθμός Βάσης (sink)

προς τον sink. Η κατασκευή της αλυσίδας γίνεται με άπληστο τρόπο. Πλεονέκτημα του είναι ότι έχει αποδειχτεί ότι ξεπερνάει σε απόδοση το LEACH περίπου 100-300% για διάφορα μεγέθη δικτύου και διάφορες τοπολογίες. Μειονέκτημα του είναι ότι επιφέρει μεγάλη καθυστέρηση για απομακρυσμένους κόμβους στην αλυσίδα. Επίσης, όλη η κίνηση του δικτύου συνωστιάζεται στον μοναδικό αρχηγό της αλυσίδας γεγονός που επιφέρει μεγάλη καθυστέρηση στην μετάδοση των δεδομένων.

- **Ιεραρχικό PEGASIS**

Είναι μια επέκταση του απλού PEGASIS. Προκειμένου να μειωθεί η καθυστέρηση και να προταθεί μια λύση στην συγκέντρωση των δεδομένων. Προκειμένου να αποφύγει συγκρούσεις και πιθανές παρεμβολές από κόμβους που εκπέμπουν σε κοντινή απόσταση έχουν ερευνηθεί 2 τεχνικές. Η 1^η μέθοδος αφορά την κωδικοποίηση του σήματος π.χ. CDMA, ενώ στη 2^η μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα μόνο οι κόμβοι που απέχουν ίση απόσταση.

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο το βασισμένο σε αλυσίδα πρωτόκολλο (chain-based protocol) με κωδικοποίηση σήματος CDMA, κατασκευάζει μια αλυσίδα κόμβων που σχηματίζουν μια δενδροειδή ιεραρχία, και κάθε επιλεγμένος κόμβος στο κάθε επίπεδο στέλνει τα δεδομένα στον κόμβο στο

επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας. Αυτή η μέθοδος εγγυάται την αποστολή δεδομένων με παράλληλο τρόπο και μειώνει σημαντικά τις καθυστερήσεις.

Η 2η μέθοδος δημιουργεί μια ιεραρχία 3 επιπέδων (στους κόμβους) και οι παρεμβολές μειώνονται με προσεκτικό προγραμματισμό των ταυτόχρονων εκπομπών.

Το Ιεραρχικό PEGASIS έχει αποδειχτεί ότι λειτουργεί καλύτερα από ότι η απλή έκδοση κατά ένα παράγοντα 60%. Σε σχέση με το LEACH, το PEGASIS αποφεύγει το επιπλέον κόστος της ομαδοποίησης, αλλά απαιτεί δυναμική ρύθμιση της τοπολογίας καθώς δεν μπορεί να ανιχνευθεί η ενέργεια των αισθητήρων. Για παράδειγμα, κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει την κατάσταση του γείτονά του, ώστε να ξέρει που θα δρομολογήσει τα δεδομένα. Τέτοια ρύθμιση στην τοπολογία μπορεί να επιφέρει μεγάλα έξοδα για υψηλώς χρησιμοποιούμενα δίκτυα.

3.4.1.3 TEEN & APTEEN

- **TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol)**

Σχεδιάστηκε για να ανταποκρίνεται σε ξαφνικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων γεγονότων, όπως είναι η θερμοκρασία. Είναι σημαντικό να υπάρχει άμεση ανταπόκριση για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων βασίζεται σε μια ιεραρχική ομαδοποίηση, όπου οι κοντινότεροι κόμβοι δημιουργούν clusters και αυτή η λειτουργία συνεχίζεται και σε 2ο επίπεδο μέχρις ότου φθάσουμε στον sink. Χρησιμοποιεί 2 τιμές κατωφλίου την σκληρή και την μαλακή (hard and soft threshold) με αποτέλεσμα να έχουμε συνεχή παρακολούθηση του γεγονότος, αλλά και μείωση των εκπομπών και διατήρηση της ενέργειας. Το TEEN δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται η λήψη δεδομένων περιοδικά, αφού υπάρχει περίπτωση να μην φθάσουμε ποτέ στην καθορισμένη τιμή κατωφλίου και άρα να μην αποσταλούν τα δεδομένα.

- **APTEEN (AdaPtive TEEN)**

Πρόκειται για μια επέκταση του TEEN που στοχεύει στο να μπορεί να λειτουργήσει και για εφαρμογές λήψης δεδομένων περιοδικά και να αντιδρά σε χρήσιμα χρονικά γεγονότα. Η χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική είναι

ίδια με του απλού TEEN. Σε σχέση με το απλό TEEN, υποστηρίζει 3 διαφορετικούς τύπους ερωτημάτων: 1) *ιστορικά*, για να αναλύσει παρελθοντικές τιμές δεδομένων, 2) *μιας χρονικής στιγμής*, για να λάβει μια άποψη των παρατηρούμενων γεγονότων εκείνη τη στιγμή και 3) *συνεχόμενων* για να παρακολουθήσει ένα γεγονός για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Προσομοιώσεις έδειξαν ότι το TEEN και το APTEEN ξεπερνούν σε απόδοση το LEACH. Η απόδοση του APTEEN όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στην ζωή του δικτύου, βρίσκεται μεταξύ του TEEN και του LEACH, με το TEEN να βρίσκεται στην κορυφή. Μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος και η αυξημένη πολυπλοκότητα της δημιουργίας ομάδων σε πολλαπλά επίπεδα, η υλοποίηση των εξισώσεων που βασίζονται στα κατώφλια καθώς και η υλοποίηση ερωτημάτων που βασίζονται σε ονοματοδοσία των χαρακτηριστικών.

3.4.1.4 Energy – Aware routing for cluster based sensor networks

Το πρωτόκολλο αυτό αφορά σε ένα ιεραρχικό αλγόριθμο που εμπεριέχει επικεφαλείς ομάδων, γνωστές εξόδους (gateways) οι οποίες έχουν λιγότερους περιορισμούς στην ενέργεια από ότι οι αισθητήρες, και που υποθέτει ότι η θέση των αισθητήριων κόμβων είναι γνωστή. Οι gateways διατηρούν την κατάσταση των αισθητήρων και εγκαθιστούν μονοπάτια πολλαπλών αλμάτων για την συλλογή των αισθητήριων δεδομένων. Στο επίπεδο ζεύξης χρησιμοποιείται τεχνική TDMA. Η gateway πληροφορεί κάθε κόμβο για τις χρονοθυρίδες στις οποίες μπορεί να εκπέμψει και γι' αυτές που πρέπει να «ακούει». Ο sink που δίνει και τις εντολές επικοινωνεί μόνο με τις gateways.

Οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε ενεργή κατάσταση είτε σε κατάσταση αναμονής χαμηλής ενέργειας. Οι μονάδες αισθήσεως και επεξεργασίας του κόμβου μπορούν να τίθενται ή όχι σε λειτουργία. Επιπλέον, είναι δυνατόν να τίθενται εντός και εκτός λειτουργίας ο πομπός και ο δέκτης ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, και να προγραμματίζεται η ενέργεια εκπομπής βασιζόμενη στην απαιτούμενη ακτίνα. Οι αισθητήριοι κόμβοι σε μια ομάδα (cluster) μπορούν να βρίσκονται σε μία εκ των καταστάσεων: αισθήσεως μόνο, αναμετάδοσης μόνο, αισθήσεως και αναμετάδοσης, και εκτός ενεργείας (inactive). Οι πρώτες τρεις λειτουργούν όπως και το όνομά τους προδίδει. Στην 4^η κατάσταση ο εκτός ενεργείας

κόμβος μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας τα κυκλώματα αισθήσεως και επικοινωνίας.

Μεταξύ δύο κόμβων ορίζεται μια συνάρτηση κόστους, που βασίζεται στην κατανάλωση ενέργειας, βελτιστοποίηση καθυστερήσεων, και άλλες μετρικές παραμέτρους απόδοσης. Από αυτή τη συνάρτηση εξάγεται το κόστος ζεύξης, το οποίο και χρησιμοποιείται για να βρεθεί το μονοπάτι με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας (least-cost path), μεταξύ των αισθητήριων κόμβων και της gateway. Η τελευταία παρακολουθεί συνεχώς την εναπομένουσα ενέργεια σε κάθε ενεργό κόμβο που βρίσκεται σε μια εκ των 3 πρώτων καταστάσεων λειτουργίας (βλέπε παραπάνω). Επαναδρομολόγηση έχουμε όταν: 1) ένα συμβάν στην εφαρμογή απαιτεί διαφορετικό σύνολο αισθητήρων να συλλέξουν δεδομένα από το περιβάλλον και 2) όταν μια μπαταρία ενεργού κόμβου εξαντλείται.

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται αρκετά καλά όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στην ζωή του δικτύου, αλλά και όσον αφορά στην καθυστέρηση διάδοσης και την διαμεταγωγή. Επίσης, ο συνδυασμός της δρομολόγησης με το TDMA του επιπέδου ζεύξης μπορεί να παρατείνει την επιπλέον τη ζωή του δικτύου κατά μία φορά. Μειονέκτημα είναι ότι μια τέτοια μέθοδος μπορεί να απαιτεί την εξάπλωση πολλών gateways και να εξασφαλιστεί η κάλυψη από αισθητήρες.

3.4.1.5 Self-organizing Protocol

Το πρωτόκολλο αυτό υποστηρίζει μια διαφορετική αρχιτεκτονική για τη δημιουργία εφαρμογών, που υποστηρίζει ανομοιογενείς αισθητήρες που μπορούν να είναι είτε κινητοί είτε στάσιμοι. Κάποιοι κόμβοι εξετάζουν το περιβάλλον και προωθούν τα συλλεγμένα δεδομένα σε ένα σύνολο κόμβων που δρουν σαν δρομολογητές. Αυτοί οι κόμβοι είναι στάσιμοι και σχηματίζουν την ραχοκοκαλιά (backbone) για την επικοινωνία. Τα δεδομένα με αυτό τον τρόπο φθάνουν σε πιο ισχυρούς κόμβους συγκεντρωτές (more powerful sink nodes). Κάθε αισθητήριος κόμβος θα πρέπει να είναι σε ικανή απόσταση επικοινωνίας από ένα δρομολογητή προκειμένου να ανήκει στο δίκτυο. Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι αναγνωρίσιμοι μέσω της διεύθυνσης των δρομολογητών με τους οποίους είναι συνδεδεμένοι. Η αρχιτεκτονική δρομολόγησης είναι ιεραρχική με σχηματισμό ομάδων 60 κόμβων και ένωση τους, όποτε αυτό είναι αναγκαίο.

Προκειμένου να έχουμε αύξηση αντοχής σε λάθη χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Local Markov Loops LML.

Οι φάσεις λειτουργίας του αλγόριθμου είναι οι εξής :

- *Φάση Εύρεσης.* Ανακαλύπτονται οι γειτονικοί κόμβοι κάθε αισθητήριου κόμβου.
- *Φάση Οργάνωσης.* Δημιουργούνται ομάδες και ενώνονται για τον σχηματισμό μιας ιεραρχίας. Κάθε κόμβος έχει μια διεύθυνση που εξαρτάται από τη θέση του στην ιεραρχία. Δημιουργούνται πίνακες δρομολόγησης για κάθε κόμβο. Επίσης κατασκευάζονται δέντρα που εκτείνονται σε όλους τους κόμβους.
- *Φάση Συντήρησης.* Σε αυτή τη φάση λαμβάνει χώρα η ανανέωση των πινάκων δρομολόγησης καθώς και των επιπέδων εναπομένουσας ενέργειας. Κάθε κόμβος πληροφορεί το γείτονά του για τον πίνακα δρομολόγησης του και την εναπομένουσα ενέργειά του. Ο αλγόριθμος LML χρησιμοποιείται για να διατηρήσει τα δέντρα.
- *Φάση Αυτό-οργάνωσης.* Σε περίπτωση κομματιάσματος ή αστοχίας κάποιων κόμβων, εκτελείται αναδιοργάνωση των ομάδων.

Εφαρμογές του είναι μπορεί να είναι δίκτυα αισθητήρων που παρακολουθούν ένα Parking αυτοκινήτων εξαιτίας της δυνατότητας του να αναφέρεται σε συγκεκριμένους κόμβους. Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι το μικρό κόστος της διατήρησης των πινάκων δρομολόγησης και η ισορροπημένη ιεραρχία της δρομολόγησης. Επιπλέον, η ενέργεια για την αποστολή ενός καθολικού μηνύματος είναι μικρότερη από αυτήν που απαιτείται στο πρωτόκολλο SPIN εξαιτίας των δέντρων που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος. Επίσης, η αντοχή σε λάθη είναι αυξημένη λόγω του LML αλγορίθμου που εφαρμόζεται σε δέντρα. Μειονεκτήματα είναι η φάση της οργάνωσης που επιφέρει ένα επιπλέον κόστος αφού δεν γίνεται κατ' απαίτηση, και η φάση υλοποίησης της ιεραρχίας όταν υπάρχουν πολλά κοψίματα στο δίκτυο οπότε και μπορεί να χρειαστεί να εκτελεστεί η φάση της αυτό-οργάνωσης.

3.4.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη θέση

Σε αυτή την κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης όποιος θέλει να επικοινωνήσει με τους κόμβους το κάνει σε σχέση με την τοποθεσία τους. Η απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ισχύ των εισερχόμενων σημάτων. Ανταλλάσσοντας αυτού του είδους την πληροφορία οι γειτονικοί κόμβοι μπορούν να αποκτήσουν παραπλήσιες συντεταγμένες. Εναλλακτικά, η θέση των κόμβων μπορεί να είναι διαθέσιμη απευθείας μέσω επικοινωνίας με δορυφόρο που χρησιμοποιεί GPS, εάν οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με χαμηλής ισχύος GPS δέκτη. Για εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιείται σε αρκετά σχήματα η περιοδική sleep λειτουργία των κόμβων, δηλαδή οι κόμβοι περιοδικά να είναι εκτός λειτουργίας και κάποιες φορές θέλουμε όσο το δυνατόν πιο πολλοί κόμβοι να βρίσκονται στην κατάσταση αυτή.

3.4.2.1 MECN & SMECN

- **MECN (Minimum Energy Communication Network)**

Φτιάχνει και διατηρεί ένα δίκτυο ελάχιστης ενέργειας για ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας ένα χαμηλής ισχύος GPS . Το MECN βρίσκει μια περιοχή αναμετάδοσης (relay region) για κάθε κόμβο. Αυτή η περιοχή αποτελείται από κόμβους στην γύρω από τον κόμβο περιοχή, μέσω των οποίων η μετάδοση είναι πιο αποτελεσματική ενεργειακά, από ότι η απ' ευθείας μετάδοση. Στη συνέχεια δημιουργείται η «εμβέλεια» του κόμβου i από τις ενώσεις όλων των περιοχών αναμετάδοσης τις οποίες μπορεί να φθάσει ο κόμβος i . Η κύρια ιδέα του MECN είναι η εύρεση ενός υποδικτύου, το οποίο έχει μικρότερο αριθμό κόμβων και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για εκπομπή μεταξύ δύο οποιοδήποτε κόμβων. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται μονοπάτια ελάχιστης ενέργειας, χωρίς να λαμβάνει υπόψη όλους τους κόμβους του δικτύου. Αυτό είναι δυνατόν χρησιμοποιώντας μια τοπική έρευνα για κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή αναμετάδοσης του. Το πρωτόκολλο έχει 2 φάσεις :

- ο Λαμβάνει τις θέσεις ενός επιπέδου 2 διαστάσεων και κατασκευάζει μια αραιή γραφική παράσταση (enclosure graph), που αποτελείται από όλες τις εμβέλειες κάθε ενός κόμβου που εκπέμπει. Αυτό απαιτεί τοπικούς υπολογισμούς εντός των κόμβων. Το enclosure

graph περιλαμβάνει καθολικές βέλτιστες συνδέσεις όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

- ο Βρίσκει τα βέλτιστα μονοπάτια εντός του γράφου. Χρησιμοποιεί τον κατανεμημένο αλγόριθμο Belmann-Ford της συντομότερης διαδρομής με μέτρο την κατανάλωση ενέργειας. Σε περίπτωση κινητικότητας οι συντεταγμένες της θέσης ενημερώνονται μέσω του GPS.

Το MECN είναι αυτορρυθμιζόμενο και έτσι μπορεί δυναμικά να προσαρμοστεί σε αποτυχίες κάποιων κόμβων ή στην εξάπλωση νέων κόμβων.

- **SMECN (Small MECN)**

Είναι μια επέκταση του MECN. Στο MECN δεν είναι δυνατόν κάθε κόμβος να εκπέμπει σε άλλον κόμβο κάθε στιγμή. Το SMECN υποθέτει ότι μπορεί να υπάρχουν πιθανά εμπόδια μεταξύ των κόμβων, αλλά ότι το δίκτυο παραμένει πλήρως συνδεδεμένο. Το υποδίκτυο που κατασκευάζεται από το SMECN είναι μικρότερο από ότι στο MECN με την προϋπόθεση ότι μια καθολική εκπομπή είναι ικανή να φτάσει προς όλους τους κόμβους σε μια κυκλική περιοχή γύρω από τον κόμβο που εκπέμπει προς όλους. Αποτέλεσμα είναι ο αριθμός των αλμάτων για επικοινωνία να είναι μειωμένος. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το SMECN χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από το MECN και το κόστος συντήρησης των δεσμών είναι μικρότερο. Το μειονέκτημά του είναι ότι το να βρεις ένα υποδίκτυο με μικρότερο αριθμό άκρων εισάγει επιπλέον κόστος στον αλγόριθμο.

3.4.2.2 GAF (Geographical Adaptive Fidelity)

Είναι ένας αλγόριθμος δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη την ενέργεια που καταναλώνεται και την θέση που βρίσκεται ο αισθητήρας, ο οποίος σχεδιάστηκε αρχικά για κινούμενα ad-hoc δίκτυα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε δίκτυα αισθητήρων. Το GAF διατηρεί την ενέργεια θέτοντας εκτός λειτουργίας τους μη αναγκαίους κόμβους του δικτύου χωρίς όμως να επηρεάζει το επίπεδο πιστότητας της δρομολόγησης. Δημιουργεί ένα εικονικό πλέγμα της καλυπτόμενης περιοχής. Οι κόμβοι που ανήκουν στο ίδιο σημείο στο πλέγμα θεωρούνται ισοδύναμοι χρησιμοποιώντας ως μέτρο την ενέργεια που καταναλώνεται για την δρομολόγηση ενός πακέτου.

Έτσι, μόνο ένας κόμβος από όλους μένει ενεργός σε κάθε σημείο του πλέγματος, ενώ όλοι οι υπόλοιποι τίθενται εκτός λειτουργίας.

Οι κόμβοι στο πρωτόκολλο GAF αλλάζουν την κατάσταση τους από μη ενεργοί (sleeping) σε ενεργούς (active), έτσι ώστε το φορτίο να είναι ισορροπημένο. Οι κόμβοι

μπορούν να βρίσκονται σε 3 καταστάσεις, όπως το πρωτόκολλο ορίζει. Αυτές είναι: α)Ανακάλυψης (discovery): όπου βρίσκονται οι γείτονες στο πλέγμα, β) Ενεργή (active) που αντιπροσωπεύει την συμμετοχή στην δρομολόγηση και γ)Μη ενεργή (sleep) όπου ο ασύρματος είναι εκτός λειτουργίας. Η εκάστοτε εφαρμογή είναι αυτή που αποφασίζει για το ποιος και το πόσο ένας κόμβος θα βρίσκεται εκτός λειτουργίας (sleep state). Προκειμένου να μπορεί να χειριστεί την κινητικότητα το GAF κάθε κόμβος στο πλέγμα υπολογίζει το χρόνο αποχώρησης του και ενημερώνει τους γείτονές του. Οι μη ενεργοί γείτονες ρυθμίζουν ανάλογα τη διάρκεια που θα είναι σε μη ενεργή κατάσταση, προκειμένου να διατηρηθεί η αξιοπιστία της δρομολόγησης. Πριν την αποχώρηση ενός ενεργού κόμβου, οι ανενεργοί κόμβοι γίνονται ενεργοί και ένας από αυτούς παραμένει σε αυτήν την κατάσταση, ενώ οι υπόλοιποι επανέρχονται στην προηγούμενη (ανενεργή κατάσταση).

Το GAF αγωνίζεται προκειμένου να κρατήσει το δίκτυο συνδεδεμένο τηρώντας ένα αντιπροσωπευτικό κόμβο σε ενεργή κατάσταση για κάθε περιοχή μέσα στο πλέγμα. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το GAF λειτουργεί το ίδιο καλά σαν ένα κανονικό πρωτόκολλο δρομολόγησης ad-hoc όσον αφορά στην καθυστέρηση και στην απώλεια πακέτων, ενώ αυξάνει και την ζωή του δικτύου με την εξοικονόμηση της ενέργειας. Παρόλο ότι είναι πρωτόκολλο που βασίζεται στη θέση των αισθητήρων (location-based protocol) , μπορεί επίσης να θεωρηθεί και σαν ιεραρχικό πρωτόκολλο όπου η δημιουργία των clusters βασίζεται στην γεωγραφική θέση. Σε κάθε περιοχή ο αντιπροσωπευτικός κόμβος λειτουργεί σαν αρχηγός της ομάδας που εκπέμπει τα δεδομένα στους άλλους κόμβους. Η διαφορά είναι ότι στο GAF ο κόμβος αυτός δεν εκτελεί οποιαδήποτε άθροιση ή διάχυση των δεδομένων, όπως στην περίπτωση των άλλων ιεραρχικών πρωτοκόλλων.

3.4.2.3 GEAR (Geografically and Energy Aware Routing)

Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί πληροφορίες ενέργειας και θέσης των γειτονικών κόμβων για να δρομολογήσει τα πακέτα προς την περιοχή του στόχου. Σκοπός είναι να μειωθεί ο αριθμός των ενδιαφερόμενων κόμβων

όπως συμβαίνει με την δρομολόγηση Directed Diffusion, χρησιμοποιώντας μια μόνο περιοχή για αποστολή των μηνυμάτων , από το να στέλνει το ενδιαφέρον σε όλο το δίκτυο. Το GEAR με αυτόν τον τρόπο συμπληρώνει το πρωτόκολλο Directed Diffusion καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια.

Στο GEAR κάθε κόμβος διατηρεί μια πληροφορία για το κόστος που απαιτείται (με μέτρο την καταναλισκόμενη ενέργεια) για να φθάσει ένα πακέτο στον προορισμό του μέσω των γειτόνων του. Αυτή η πληροφορία περιλαμβάνει 2 κόστη α) ένα εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) και β) ένα γνωστό κόστος το οποίο μαθαίνεται (learning cost). Το εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) υπολογίζεται από το συνδυασμό της υπάρχουσας ενέργειας στον κόμβο και της απόστασης μέχρι τον προορισμό. Το γνωστό κόστος (learned cost) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη εκτός από το εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) και τη δρομολόγηση γύρω από τυχόν κενά (holes) του δικτύου. Ένα κενό (hole) στο δίκτυο δημιουργείται όταν ένας κόμβος δεν έχει κάποιον άλλον πλησιέστερο γείτονα προς την περιοχή του στόχου παρά μόνο τον εαυτό του. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν τρύπες (holes) στο δίκτυο τότε το εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) είναι ίδιο με το γνωστό (learned cost). Το γνωστό κόστος διαδίδεται κάθε φορά ένα άλμα προς τα πίσω, κάθε φορά που ένα πακέτο φθάνει στον προορισμό του, έτσι ώστε να ρυθμιστεί η εγκατάσταση του δρομολογίου (route setup-up) για το επόμενο πακέτο.

Υπάρχουν δύο φάσεις στον αλγόριθμο :

- ο Προώθηση πακέτων προς την περιοχή του στόχου: Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο, ελέγχει αν κάποιος από τους γείτονές του είναι πιο κοντά στον στόχο από τον ίδιο. Αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας, επιλέγεται ο κοντινότερος. Αν δεν υπάρχει κανείς κοντινότερα στην περιοχή του στόχου, τότε δημιουργείται το φαινόμενο της τρύπας. Τότε επιλέγεται κάποιος από τους γείτονες για να προωθήσει το πακέτο βασισμένος στην μαθησιακή συνάρτηση. Αυτή η επιλογή μπορεί μετά να ανανεωθεί καθώς τα μαθησιακά κόστη συγκλίνουν κατά την παράδοση του πακέτου.
- ο Προώθηση των πακέτων μέσα στην περιοχή του στόχου: αν το πακέτο φθάσει στην περιοχή του στόχου, τότε μπορεί να διαχυθεί είτε με αναδρομική γεωγραφική προώθηση είτε με περιορισμένη διάχυση (flooding). Η τελευταία μέθοδος είναι καλή όταν οι αισθητήρες δεν είναι εγκατεστημένοι πυκνά. Σε διαφορετική

περίπτωση χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος και η περιοχή του στόχου χωρίζεται σε 4 υπό-περιοχές και δημιουργούνται 4 αντίγραφα του πακέτου. Αυτός ο διαμοιρασμός συνεχίζεται μέχρις ότου μείνει η υπό-περιοχή με ένα κόμβο.

Το GEAR συγκρίνεται με το GPSR το οποίο χρησιμοποιεί ένα δυσδιάστατο γράφο για να λύσει το πρόβλημα με τις τρύπες στο δίκτυο. Προσομοιώσεις όμως έδειξαν ότι το GEAR λειτουργεί καλύτερα γιατί όχι μόνο μειώνει την κατανάλωση της ενέργειας για την εγκαθίδρυση της διαδρομής αλλά λειτουργεί πιο αποτελεσματικά στην παράδοση των πακέτων. Έτσι, για ανομοιόμορφη κίνηση το GEAR παραδίδει 70-80% περισσότερα πακέτα από το GPSR και για ομοιόμορφη κίνηση παραδίδει 2-35% περισσότερα πακέτα.

Τεχνικές εύρεσης θέσης

Οι τρεις βασικές τεχνικές για εύρεση της θέσης είναι ο τριγωνισμός (triangulation), η ανάλυση του σκηνικού (scene analysis) και η εγγύτητα (proximity).

- Τριγωνισμός (Triangulation)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τις γεωμετρικές ιδιότητες των τριγώνων για να υπολογίσει τις θέσεις των αντικειμένων. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες τριγωνισμού είναι το lateration που χρησιμοποιεί μέτρηση αποστάσεων, και γωνιακή θέση (angulation) που χρησιμοποιεί μέτρηση γωνιών ή αζιμουθίων (bearing measurement).

- Lateration

Προκειμένου να βρεθεί η θέση ενός αντικειμένου πρέπει να μετρηθούν οι αποστάσεις από πολλαπλά γνωστά σημεία ή σημεία αναφοράς. Προκειμένου να βρεθεί η θέση σε 2 διαστάσεις απαιτείται η μέτρηση αποστάσεων από 3 μη ομοαξονικά σημεία, ενώ για εύρεση θέσης σε 3 διαστάσεις απαιτούνται 4 μη ομοεπίπεδα σημεία. Είναι δυνατόν αυτά τα σημεία να μειωθούν με τη βοήθεια ενός συστήματος εύρεσης θέσης χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος.

Γενικά χρησιμοποιούνται 3 τεχνικές για την μέτρηση αποστάσεων.

1. *Απευθείας*. Αυτό γίνεται με τη χρήση μια φυσικής πράξης ή κίνησης. Για παράδειγμα ένα ρομπότ μπορεί να μετρήσει μια απόσταση εκτεινώντας

ένα μεταλλικό άκρο μέχρι να έχει φυσική επαφή με το προς μέτρηση αντικείμενο.

2. *Χρόνος «Πτήσης» (Time-of-Flight)*. Είναι τεχνική που βασίζεται στο χρόνο και μετρά το χρόνο άφιξης ή τη διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης σημάτων. Πιο αναλυτικά

για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ ενός αντικειμένου και ενός σημείου P, μετριέται ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψει ένα σήμα με γνωστή ταχύτητα μεταξύ των 2 αυτών σημείων. Σήματα που μπορεί να χρησιμοποιούνται είναι είτε ο ήχος είτε το φως και τα ραδιοκύματα τα οποία όμως απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, λόγω της ταχύτητας διάδοσης. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σε τέτοιου είδους μετρήσεων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι μπορεί το σήμα λόγω πολυδιόδευσων να φτάσει στο δέκτη και από διαφορετική, μη άμεση, διαδρομή. Επίσης, ένα άλλο θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η συμφωνία σε ότι αφορά στο χρόνο. Μπορεί το αντικείμενο και το σημείο P να έχουν διαφορετική αντίληψη για το χρόνο με αποτέλεσμα αν το αντικείμενο βασίζει την μέτρηση στο χρόνο του σημείου P, να εκτιμά τελικά λάθος την απόσταση. Αν βέβαια το αντικείμενο είναι αυτό που εκπέμπει και λαμβάνει την αντανάκλαση του σήματος τότε είναι στην απόλυτη ευθύνη του να μετρήσει την απόσταση, ανάλογα και με την ακρίβεια των οργάνων που διαθέτει. Τη χρήση της τεχνικής αυτής τη χρησιμοποιούν αρκετά συστήματα όπως το GPS, Active Bat, Cricket κ.α.

3. *Εξασθένιση (Attenuation)*. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η ένταση ενός εκπεμπόμενου σήματος μειώνεται καθώς η απόσταση από το σημείο εκπομπής αυξάνεται. Αναφέρεται στην βιβλιογραφία και ως *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*. Αν δοθεί μια συνάρτηση που συνδέει την εξασθένιση με την απόσταση για κάποιον συγκεκριμένο τύπο εκπομπής, και είναι γνωστή η ένταση του εκπεμπόμενου σήματος, είναι δυνατόν να μετρηθεί η απόσταση ενός αντικειμένου από ένα σημείο P. Σε περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια η χρήση αυτής της τεχνικής είναι συνήθως λιγότερο ακριβής από ότι η προαναφερθείσα μέθοδος του χρόνου «πτήσης». Τα προβλήματα διάδοσης όπως οι ανακλάσεις και η πολυδιόδευση κάνουν δύσκολη την σύνδεση της εξασθένισης και της απόστασης, με αποτέλεσμα να έχουμε ανακριβείς εκτιμήσεις της απόστασης μεταξύ των σημείων. Βέβαια αυτό στα δίκτυα αισθητήρων δεν είναι υπαρκτό ως πρόβλημα αρκεί να έχουμε μεγάλη πυκνότητα στην εγκατάστασή τους. Ίσως σαν τεχνική να

είναι καλύτερη από ότι η προηγούμενη αφού δεν χρειάζεται γνώση του χρόνου του ενός από τον άλλο κόμβο και απαιτείται μόνο μία εκπομπή από τον έναν και μία λήψη από τον άλλο, προκειμένου να βρεθεί η θέση. Το σύστημα SpotON χρησιμοποιεί αυτή την τεχνική.

- *Angulation*

Πρόκειται για παρόμοια τεχνική με την lateration μόνο που αντί για αποστάσεις μετρώνται γωνίες, προκειμένου να βρεθεί η θέση ενός αντικειμένου. Συνήθως, απαιτείται η μέτρηση 2 γωνιών και μιας απόστασης για εύρεση θέσης σε 2 διαστάσεις ενώ για τις 3 διαστάσεις χρειάζεται επιπρόσθετα και η μέτρηση ενός αζιμουθίου. Συνήθως, σε αυτή την τεχνική, χρησιμοποιείται και ένα άνυσμα αναφοράς (π.χ. ο μαγνητικός βορράς) ως η θέση 0. Στην βιβλιογραφία η τεχνική ονομάζεται και *angle of arrival (AoA)*.

Οι πολλαπλές κεραιές με διαφορετική φάση είναι μια τεχνολογία στην οποία εφαρμόζεται η τεχνική. Οι πολλαπλές κεραιές μετρούν το χρόνο άφιξης του σήματος. Έχοντας γνωστά τις διαφορετικές χρονικές στιγμές που το σήμα έφτασε στις διαφορετικές κεραιές καθώς και την γωνία λήψης κάθε κεραιάς, είναι δυνατόν να βρεθεί η γωνία με την οποία εκπέμφθηκε το σήμα. Άλλο σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική είναι το VHF Omnidirectional Ranging (VOR) για την ναυσιπλοΐα των αεροσκαφών.

- **Ανάλυση του πεδίου (Scene Analysis)**

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά ενός περιβάλλοντος που παρατηρήθηκαν από κάποιο κατάλληλα επιλεγμένο σημείο, είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για την θέση του παρατηρητή ή των αντικειμένων στο περιβάλλον. Συνήθως τα παρατηρούμενα περιβάλλοντα απλοποιούνται προκειμένου να είναι εύκολο να αναπαρασταθούν και να συγκριθούν.

Στα *στατικά* περιβάλλοντα η ανάλυση του πεδίου βασίζεται σε προσχεδιασμένα σύνολα αντικειμένων που έχουν παρατηρηθεί και έχουν αναπαρασταθεί σε τοποθεσίες αντικειμένων. Σε αντίθεση στα *δυναμικά* περιβάλλοντα η ανάλυση του πεδίου παρακολουθεί τις διαφορές μεταξύ των διαδοχικών σκηνών προκειμένου να κάνει εκτίμηση της τοποθεσίας. Οι διαφορές στο πεδίο ανταποκρίνονται στον τρόπο που ο παρατηρητής βλέπει το περιβάλλον καθώς αυτός κινείται. Αν υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι θέσεις είναι γνωστές, ο παρατηρητής μπορεί να υπολογίσει τη θέση του σε σχέση με αυτά.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η θέση των αντικειμένων μπορεί να συναχθεί χρησιμοποιώντας παθητική παρατήρηση και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, χωρίς να είναι αναγκαία η χρήση γεωμετρικών αποστάσεων και γωνιών. Σε περίπτωση που γίνει κάποια αλλαγή στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος συνήθως αναγκαία είναι η επανάκτηση κάποιων σημείων του συνόλου ή ανάκτηση ενός καινούριου συνόλου σημείων. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική αυτή είναι το RADAR.

- **Εγγύτητα (Proximity)**

Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί την ανίχνευση της παρουσίας ενός αντικειμένου με τη χρήση ενός φυσικού φαινομένου περιορισμένης ακτίνας. Υπάρχουν 3 διαφορετικές προσεγγίσεις γι' αυτή την τεχνική:

- *Ανίχνευση φυσικής επαφής.* Είναι η πιο βασική τεχνική και χρησιμοποιεί αισθητήρες πίεσης, αίσθησης και ανιχνευτές χώρου.
- *Παρακολούθηση ασύρματων κυψελωτών σημείων πρόσβασης.* Συνήθως, χρησιμοποιείται στα κινητά τηλέφωνα χωρίς να αποκλείει τη χρήση της από δίκτυα αισθητήρων. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ανίχνευση της κινητής συσκευής όταν αυτή εισέρχεται στην ακτίνα κάλυψης της κυψέλης.
- *Παρακολούθηση συστημάτων αυτόματου αριθμού αναγνώρισης (automatic ID systems).* Όπως προδίδει και η ονομασία η εύρεση της θέσης χρησιμοποιεί συστήματα αυτόματης αναγνώρισης όπως τερματικά συναλλαγών με πιστωτικές κάρτες.

Συνήθως, τέτοια συστήματα αναγνώρισης θέσης με χρήση της εγγύτητας μπορεί να χρειάζεται να συνδυαστούν με κάποιο σύστημα αναγνώρισης, αν δεν διαθέτουν τέτοια δυνατότητα.

3.4.3 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας

Τα πρωτόκολλα που περιγράφονται σε αυτή την ενότητα ομαδοποιούνται σύμφωνα με τη ροή του δικτύου και την ποιότητα της υπηρεσίας. Σε κάποιες προσεγγίσεις, η εγκατάσταση μιας διαδρομής μοντελοποιείται και επιλύεται σαν πρόβλημα ροής του δικτύου. Τα πρωτόκολλα που είναι

βασισμένα στην ποιότητα της υπηρεσίας λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση, ενώ εγκαθιστούν μονοπάτια μέσα στο δίκτυο.

3.4.3.1 Maximun lifetime energy routing

Είναι πρωτόκολλο δρομολόγησης που αφορά στην ροή του δικτύου. Ο κύριος σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου με τον προσεκτικό σχεδιασμό του κόστους ζεύξης σαν συνάρτηση της εναπομένουσας ενέργειας του κόμβου και της απαιτούμενης ενέργειας εκπομπής χρησιμοποιώντας αυτή τη ζεύξη. Από εκεί προέρχεται και το όνομα του πρωτοκόλλου. Υπάρχουν δύο αλγόριθμοι που υπολογίζουν την μέγιστη εναπομένουσα ενέργεια. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι διαφέρουν στον ορισμό του κόστους της ζεύξης και στο ενσωματωμένο κόστος της εναπομένουσας ενέργειας. Αντί να χρησιμοποιηθεί το κόστος e_{ij} , που είναι η ενέργεια που καταναλώνεται όταν ένα πακέτο εκπέμπεται στην ζεύξη $i-j$, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κόστη: C_{ij} και C_{ij}

$$C_{ij} = \frac{1}{E_i - e_{ij}} \quad \text{και} \quad C_{ij} = \frac{e_{ij}}{E_i}$$

όπου είναι η εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου E_i

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Bellman-Ford της συντομότερης διαδρομής για τα παραπάνω κόστη, βρίσκουμε τα ελάχιστα κόστη των μονοπατιών προς τον προορισμό (gateway). Το επιλεγόμενο μονοπάτι με το ελάχιστο κόστος είναι αυτό με τη μεγαλύτερη εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να συγκριθούν με τον αλγόριθμο της ελάχιστης εκπεμπόμενης ενέργειας (Minimum Transmitted Energy MTE) πλην όμως, οι πρώτοι έχουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά στην διάρκεια ζωής του δικτύου από τον τελευταίο.

3.4.3.2 Energy Aware QoS Routing Protocol

Πρόκειται για ένα σχετικά νέο πρωτόκολλο το οποίο βρίσκει ένα μονοπάτι το οποίο έχει το μικρότερο κόστος και είναι και αποτελεσματικό ενεργειακά, ενώ ταυτόχρονα εγγυάται συγκεκριμένη καθυστέρηση από άκρη σε άκρη. Το κόστος της ζεύξης που χρησιμοποιείται είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη την εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου, την ενέργεια εκπομπής, τον ρυθμό των λαθών και άλλες επικοινωνιακές παραμέτρους.

Προκειμένου να έχουμε ταυτόχρονα κίνηση με την καλύτερη προσπάθεια και πραγματικού χρόνου κίνηση, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ταξινόμησης ουράς. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την ταξινόμηση της κίνησης σε ροή πραγματικού και μη χρόνου. Ο λόγος r του εύρους ζώνης, ορίζεται σε μια αρχική τιμή καθοριζόμενη από τον κόμβο gateway και αναπαριστά το μέγεθος του εύρους ζώνης που θα αφιερωθεί στην κίνηση πραγματικού και μη χρόνου. Το πρωτόκολλο βρίσκει το καλύτερο μονοπάτι χρησιμοποιώντας μια εκτεταμένη έκδοση του Dijkstra. Ως καλύτερο μονοπάτι επιλέγεται αυτό που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που έχουν τεθεί όσον αφορά στην καθυστέρηση.

3.4.3.3 Maximun lifetime data gathering

Ένας άλλος προτεινόμενος αλγόριθμος αναφέρεται στη μέγιστη ζωή του δικτύου για τη συλλογή δεδομένων. Η ζωή « T » του συστήματος ορίζεται ως ο αριθμός των γύρων ή των περιοδικών λήψεων δεδομένων από τους αισθητήρες μέχρις ότου βγει εκτός λειτουργίας ο πρώτος αισθητήρας. Ένας αλγόριθμος που βασίζεται στα παραπάνω είναι ο «Συγκερασμός Δεδομένων για μέγιστη ζωή» (Maximum Lifetime Data Aggregation MLDA). Ο αλγόριθμος θεωρεί ότι γίνεται συγκερασμός των δεδομένων (data aggregation) καθώς ορίζονται τα μονοπάτια δρομολόγησης που αυξάνουν την ζωή του δικτύου στο μέγιστο. Σε αυτήν την περίπτωση αν θεωρηθεί ένας προγραμματισμός « S » για « T » γύρους, περιλαμβάνεται μια ροή δικτύου « G ». Η ροή « G » που δίνει την μέγιστη ζωή στο δίκτυο, υπολογιζόμενης και των ενεργειακών περιορισμών των αισθητήριων κόμβων ορίζεται ως η καταλληλότερη αποδεκτή ροή. Κατόπιν πάνω σε αυτήν την ροή κατασκευάζεται ένας προγραμματισμός « S ».

Μια παραλλαγή του προβλήματος περιλαμβάνει τον αλγόριθμο «Δρομολόγηση δεδομένων για μέγιστη ζωή» (Maximum Lifetime Data Routing MLDR), και χρησιμοποιείται για δίκτυα όπου δεν είναι δυνατός ο συγκερασμός των δεδομένων π.χ. ροές δεδομένων από αισθητήρες βίντεο.

Και οι δύο αλγόριθμοι συγκρινόμενοι με το ιεραρχικό PEGASIS όσον αφορά στην μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου, απέδωσαν καλύτερα. Στην περίπτωση του MLDA έχουμε μια καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων από ότι το ιεραρχικό PEGASIS. Επίσης, αν και το MLDA αποδίδει καλά οι υπολογισμοί για την καλύτερη διαδρομή είναι δύσκολοι για μεγάλα δίκτυα, γι' αυτό και προτείνεται μια λύση που είναι η ομαδοποίηση

(clustering) (CMLDA αλγόριθμος) ώστε να εξασφαλιστεί η δυνατότητα επέκτασης του αλγορίθμου σε μεγάλα δίκτυα.

3.4.3.4 Minimum Cost Forwarding

Το πρωτόκολλο αυτό στοχεύει στο να βρει τη διαδρομή με το ελάχιστο δυνατό κόστος σε ένα μεγάλο δίκτυο αισθητήρων. Δεν είναι ακριβώς βασισμένο στην ροή του δικτύου, αλλά επειδή τα δεδομένα ρέουν στο μονοπάτι με το μικρότερο κόστος και οι πόροι των αισθητήριων κόμβων ανανεώνονται σε κάθε ροή, μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει σε αυτήν την ομάδα.

Η συνάρτηση κόστους του πρωτοκόλλου υπολογίζει το φαινόμενο της καθυστέρησης, την διαμεταγωγή και την κατανάλωση της ενέργειας από κάθε κόμβο προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η φάση της εγκατάστασης, όπου και τίθεται το κόστος για κάθε κόμβο. Ένα μήνυμα ξεκινάει από τον κόμβο δεξαμενή (sink) και διαχέεται σε όλο το δίκτυο. Ο κάθε κόμβος διαμορφώνει το κόστος του προσθέτοντας το κόστος του κόμβου από τον οποίο έλαβε το μήνυμα και το κόστος της ζεύξης. Προκειμένου να περιοριστεί ο αριθμός των μηνυμάτων που διαχέονται, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος οπισθοχώρησης (back-off based algorithm). Η προώθηση του μηνύματος παρατείνεται σε μια εξαρχής ορισμένη διάρκεια, προκειμένου να επιτρέψει στα μηνύματα με το μικρότερο κόστος να φθάσουν σε κάθε κόμβο. Έτσι, ο αλγόριθμος λειτουργεί με ένα μόνο μήνυμα ανά κόμβο.

Στην επόμενη φάση του αλγορίθμου, η πηγή μεταδίδει ταυτόχρονα προς όλους τους γείτονές της δεδομένα. Οι κόμβοι που λαμβάνουν προσθέτουν το κόστος εκπομπής τους (αυτό που βρέθηκε από την πρώτη φάση) στο κόστος του πακέτου. Έπειτα, ο κόμβος ελέγχει το υπόλοιπο κόστος του πακέτου. Αν το κόστος αυτό δεν είναι αρκετό προκειμένου να φθάσει στον κόμβο δεξαμενή (sink), το πακέτο απορρίπτεται. Διαφορετικά αναμεταδίδεται προς τους γείτονές του όπως προηγουμένως κοκ. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται όπως και η «πλημμύρα» (flooding). Με τον αλγόριθμο οπισθοχώρησης τα εκπεμπόμενα μηνύματα κατά την πρώτη φάση μειώνονται στο μισό σε σχέση με το flooding.

3.4.3.5 Sequential Assignment Routing SAR

Είναι το πρώτο πρωτόκολλο για δίκτυα αισθητήρων το οποίο περιλαμβάνει την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), στις αποφάσεις της δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο αυτό δημιουργεί πολλά δέντρα των οποίων η ρίζες είναι οι άμεσοι γείτονες προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Το κάθε δέντρο επεκτείνεται μακριά από τον κόμβο δεξαμενή (sink), αποφεύγοντας να συμπεριλάβει σε αυτό κόμβους με πολύ χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) ή μικρή εναπομένουσα ενέργεια. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας οι περισσότεροι κόμβοι ανήκουν σε πολλαπλά δέντρα. Αυτό επιτρέπει στον κόμβο να επιλέγει το καταλληλότερο δέντρο προκειμένου να αναμεταδώσει προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Σε κάθε μονοπάτι υπάρχουν δύο παράμετροι, που χρησιμοποιούν οι κόμβοι προκειμένου να επιλέξουν το καταλληλότερο μονοπάτι. *α) Η εναπομένουσα ενέργεια*, που υπολογίζεται από τον αριθμό των πακέτων που μπορεί να στείλει ένας κόμβος σε μια διαδρομή αν έχει αποκλειστική χρήση και *β) η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS)*. Οι κόμβοι επιλέγουν το καταλληλότερη διαδρομή βασιζόμενοι στις δύο παραπάνω παραμέτρους καθώς και στον βαθμό προτεραιότητας του πακέτου. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το SAR προσφέρει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από ότι ο αλγόριθμος της ελάχιστης εκπεμπόμενης ενέργειας (Minimum Transmitted Energy MTE). Το πρωτόκολλο SAR τηρεί ταυτόχρονα πολλαπλά μονοπάτια από τους κόμβους προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Αν και έτσι έχουμε αντοχή σε λάθη και εύκολη επαναφορά μετά από δυσλειτουργία κάποιου κόμβου, έχουμε δυσκολία στην διατήρηση των πινάκων δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, ειδικά όταν το δίκτυο είναι μεγάλο.

3.4.3.6 Speed

Το πρωτόκολλο αυτό απαιτεί από τον κάθε κόμβο να διατηρεί πληροφορία για τους γείτονές του και χρησιμοποιεί γεωγραφική προώθηση των πακέτων για να βρει τα μονοπάτια. Επιπλέον, το πρωτόκολλο αυτό προσπαθεί να επιτύχει μια σταθερή ταχύτητα για κάθε πακέτο που κινείται στο δίκτυο, έτσι ώστε η κάθε εφαρμογή να μπορεί να εκτιμήσει την από άκρη σε άκρη καθυστέρηση. Επίσης, το πρωτόκολλο μπορεί να αποφύγει την συμφόρηση όταν συμβαίνει αυτό στο δίκτυο. Το συστατικό (module) δρομολόγησης του πρωτοκόλλου ονομάζεται Stateless Non-Deterministic forwarding (SNFG), και συνεργάζεται με τέσσερα άλλα συστατικά στο επίπεδο του δικτύου.

Ο μηχανισμός ανταλλαγής σηματοδοσίας (beacon exchange) συλλέγει πληροφορίες για τους κόμβους και για την θέση τους. Ο υπολογισμός της καθυστέρησης (delay estimation) σε κάθε κόμβο γίνεται υπολογίζοντας τον χρόνο που πέρασε μέχρι να ληφθεί μια θετική αναγνώριση (ACK) από τον γειτονικό κόμβο σαν απάντηση σε ένα μεταδιδόμενο πακέτο. Εξετάζοντας τις τιμές της καθυστέρησης το SNFG επιλέγει τον κόμβο, που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ταχύτητας που έχουν τεθεί. Αν δεν μπορεί να βρεθεί τέτοιος κόμβος, τότε εξετάζεται ο λόγος αναμετάδοσης του κόμβου. Το συστατικό Neighborhood Feedback Loop είναι υπεύθυνο για να παρέχει την τιμή του λόγου αναμετάδοσης, ο οποίος υπολογίζεται ελέγχοντας τους κόμβους που δεν μπορούν να παρέχουν την επιθυμητή ταχύτητα στα πακέτα κατά την αναμετάδοση. Αν η τιμή αυτού του λόγου είναι μικρότερη από μια τυχαία παραγόμενη τιμή μεταξύ του 0 και του 1, το πακέτο απορρίπτεται. Τέλος, το τελευταίο συστατικό του σχήματος είναι το backpressure-rerouting module, που χρησιμοποιείται για να αποτρέψει κενά, όταν ένας κόμβος αποτύχει να βρει τον γειτονικό κόμβο και επίσης για να εξαφανίσει την συμφόρηση στέλνοντας μηνύματα πίσω στους κόμβους που απέστειλαν τα πακέτα, προκειμένου να αναζητήσουν νέες διαδρομές.

Συγκρίνοντας το με το Dynamic Source Routing (DSR) και το Ad-hoc on-demand vector routing (AODV), το SPEED λειτουργεί καλύτερα όσον αφορά στην καθυστέρηση από άκρη σε άκρη. Επιπλέον, η ολική εκπεμπόμενη ενέργεια είναι λιγότερη λόγω της απλότητας του αλγορίθμου, δηλαδή το κόστος ελέγχου του πακέτου είναι μικρότερο και στην ισόρροπη διανομή της κίνησης. Τέτοιο καταμερισμός του φορτίου επιτυγχάνεται χάρη στο μηχανισμό SNFG. Ανάλογος καταμερισμός της κίνησης εκτελείται και στο GBR, με την κατανομή της κίνησης ομοιόμορφα μέσα στο δίκτυο.

3.4.4 Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω πρωτοκόλλων δρομολόγησης με βάση τα δεδομένα.

Δεδομενο-κεντρικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Σε αυτή την ομάδα πρωτοκόλλων δρομολόγησης ο sink στέλνει ερωτήματα σε συγκεκριμένες περιοχές και περιμένει τα δεδομένα από τους αισθητήρες που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές. Επειδή τα δεδομένα ζητούνται μέσω ερωτημάτων θα πρέπει να υπάρχει ονοματοδοσία βασισμένη

σε χαρακτηριστικά προκειμένου να καθοριστούν πλήρως οι ιδιότητες των δεδομένων.

3.4.4.1 Flooding και Gossiping

Δύο πολύ αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι το flooding και το gossiping. Στο flooding κάθε κόμβος όταν λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων το στέλνει με broadcast σε όλους τους γείτονες του και αυτό συμβαίνει μέχρι το πακέτο να φθάσει στον προορισμό ή να ξεπεραστεί ο μέγιστος αριθμός των hops για το πακέτο. Από την άλλη μεριά το gossiping είναι και αυτό ένα είδος flooding μόνο που εδώ ο κόμβος στέλνει το πακέτο τυχαία σε έναν γείτονα και αυτός με τη σειρά του σε έναν άλλο κ.ο.κ.

Το flooding έχει πολύ εύκολη υλοποίηση, αλλά έχει τρία μειονεκτήματα. Πρώτον, έχουμε μεγάλη συγκέντρωση από αντίγραφα μηνυμάτων που στέλνονται από τον ίδιο κόμβο (implosion). Δεύτερον, υπάρχει επικάλυψη (overlap) όταν δύο ή περισσότεροι κόμβοι που ανιχνεύουν το ίδιο γεγονός στέλνουν παρόμοια πακέτα πληροφορίας στον ίδιο γείτονα και τρίτο καταναλώνει πολύ ενέργεια χωρίς να λαμβάνει υπόψη της τους ενεργειακούς περιορισμούς.

Το gossiping αποφεύγει το implosion, καθώς κάθε φορά το πακέτο στέλνεται σε έναν κόμβο. Το μειονέκτημα του πρωτοκόλλου είναι ότι έχει προβλήματα καθυστερήσεων στη διάδοση της πληροφορίας.

3.4.4.2 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)

Το SPIN δημιουργήθηκε για να διορθώσει τα προβλήματα του flooding και πετυχαίνει αποτελεσματική χρήση της ενέργειας. Η ιδέα πίσω από το SPIN είναι η ονοματοδοσία των δεδομένων χρησιμοποιώντας υψηλού επιπέδου περιγραφείς ή μετα-δεδομένα. Πριν την μετάδοση γίνεται η διαφήμιση των υπάρχοντων δεδομένων, αλλά και των αναγκών σε νέα δεδομένα. Υπάρχουν τρία είδη μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων το μήνυμα ADV που επιτρέπει τον αισθητήρα να διαφημίσει τα δεδομένα του, το μήνυμα REQ για να ζητήσει συγκεκριμένα δεδομένα και το μήνυμα DATA για να μεταφέρει τα πραγματικά δεδομένα. Στην Το πρωτόκολλο αυτό πετυχαίνει 3,5 φορές μικρότερη απώλεια ενέργειας σε σχέση με το flooding και μείωση στο μισό (50%) των περιπτώσεων δεδομένων (μικρότερος πλεονασμός). Οι οποιεσδήποτε αλλαγές στην τοπολογία

παραμένουν σε τοπικό επίπεδο, αφού ο κάθε κόμβος είναι απαραίτητο να γνωρίζει τους γείτονες του και μόνο.

Ο μηχανισμός που χρησιμοποιεί το SPIN δεν μπορεί να εγγυηθεί την παράδοση των δεδομένων, γιατί μεταξύ των κόμβων που ενδιαφέρονται για συγκεκριμένη πληροφορία και αυτών που την διαθέτουν μπορεί να παρεμβάλλονται κόμβοι οι οποίοι δεν ενδιαφέρονται για την συγκεκριμένη πληροφορία. Γενικώς, δεν ενδείκνυται η χρήση του σε κρίσιμες εφαρμογές όπως, σύστημα συναγερμού για ανίχνευση παραβιάσεων όπου απαιτείται αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων σε τακτά χρονικά διαστήματα.

3.4.4.3 Directed Diffusion

Το πρωτόκολλο Directed Diffusion σχεδιάστηκε για να προωθήσει την εντός του δικτύου επεξεργασία δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το πρωτόκολλο προβλέπει ότι κάθε αισθητήρας-παραλήπτης (sink) εκπέμπει στο δίκτυο ένα μήνυμα interest, το οποίο περιγράφει τα δεδομένα που θέλει ο παραλήπτης. Καθώς το interest μεταδίδεται διαμέσου του δικτύου εγκαθίσταται μία διαδρομή από την πηγή (source) στον παραλήπτη (sink). Κάθε κόμβος του δικτύου αποθηκεύει τα interests στην μνήμη του. Όταν η πηγή έχει τα δεδομένα, που δηλώνονται από το interest, τα στέλνει διαμέσου της εγκατεστημένης διαδρομής στον παραλήπτη. Η συνάθροιση και η μετάδοση των δεδομένων γίνεται από τους ενδιάμεσους κόμβους. Επίσης, ο παραλήπτης πρέπει να ενημερώσει το μήνυμα interest όταν ξεκινήσει να δέχεται δεδομένα από την πηγή. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε, ότι και τα δυο μέρη αναγνωρίζουν τα δεδομένα από χαρακτηριστικά - γνωρίσματα (attributes), όπως «νοτιοανατολικά» ή «ακουστικοί αισθητήρες». Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ένας απλός μηχανισμός ονοματολογίας και κωδικοποίησης των χαρακτηριστικών με βάση απλούς κανόνες. Τα δεδομένα διαχωρίζονται από την ταυτότητα του κόμβου που τα συλλέγει.

Στο πρωτόκολλο SPIN είδαμε ότι οι κόμβοι διαφημίζουν τα διαθέσιμα δεδομένα επιτρέποντας στους ενδιαφερόμενους κόμβους να ζητήσουν τα δεδομένα. Αντίθετα στο Directed Diffusion ο sink είναι αυτός που ρωτά τους κόμβους αισθητήρων αν τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Το Directed Diffusion έχει μερικά ακόμα πλεονεκτήματα. Επειδή είναι δεδομένο-κεντρικό όλη η επικοινωνία γίνεται γείτονα προς γείτονα χωρίς την ανάγκη για ύπαρξη μηχανισμού που θα απευθύνεται σε συγκεκριμένο

κόμβο. Ο κάθε κόμβος, εκτός από την εργασία της αίσθησης, μπορεί να κάνει συνάθροιση των δεδομένων και προσωρινή αποθήκευση (caching). Η προσωρινή αποθήκευση προσφέρει μεγάλο πλεονέκτημα λόγω της αποτελεσματικής χρήσης της ενέργειας και της μικρής καθυστέρησης. Επίσης, η κατανάλωση της ενέργειας μειώνεται, αφού η πληροφορία δίνεται κατ' απαίτηση και δεν υπάρχει ανάγκη για την διατήρηση γνώσης για την τοπολογία του δικτύου.

Ωστόσο, το πρωτόκολλο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές γιατί βασίζεται σε ένα μοντέλο παράδοσης της πληροφορίας κατ' απαίτηση. Συνεπώς, δεν είναι κατάλληλο για συνεχή παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ονοματοδοσία των ερωτημάτων, αφού εξαρτάται από την εφαρμογή και πρέπει κάθε φορά τα ερωτήματα να καθορίζονται εξ' αρχής. Τέλος η διαδικασία του ταιριάσματος, δηλαδή ποιες απαντήσεις απευθύνονται σε ποια ερωτήματα, μπορεί να απαιτεί επιπλέον χώρο στην επικεφαλίδα των ερωτημάτων.

3.4.4.4 Energy Aware Routing

Το πρωτόκολλο Energy Aware Routing είναι παρόμοιο με το Directed Diffusion γιατί ανακαλύπτονται πολλαπλά μονοπάτια από την πηγή μέχρι τον προορισμό (sink). Τα μονοπάτια αυτά επιλέγονται από μια συνάρτηση πιθανοτήτων, η οποία εξαρτάται από την ενεργειακή κατανάλωση στον κάθε κόμβο. Το πρωτόκολλο αυτό θεωρεί ότι χρησιμοποιώντας συνέχεια το μονοπάτι με το μικρότερο κόστος συνεχώς θα έχει ως αποτέλεσμα να εξαντληθεί η ενέργεια των κόμβων. Για να αποφευχθεί αυτό, το κάθε ένα από τα πολλαπλά μονοπάτια χρησιμοποιούνται με μια συγκεκριμένη πιθανότητα έτσι ώστε να αυξηθεί η ζωή του δικτύου.

Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε 3 φάσεις :

- *Φάση εγκατάστασης (Setup Phase)*, όπου ξεκινά με μια τοπική εύρεση των δρομολογίων από τους κόμβους και δημιουργούν τους πίνακες δρομολόγησης. Ταυτόχρονα υπολογίζεται το ενεργειακό κόστος σε κάθε κόμβο, που αφορά στην εκπομπή και την λήψη μηνυμάτων καθώς επίσης και την απομένουσα ενέργεια των κόμβων. Η πιθανότητα επιλογής για το μονοπάτι είναι αντιστρόφως ανάλογη του κόστους.

- *Φάση Επικοινωνίας* (Data Communication Phase). Κάθε κόμβος προωθεί τα πακέτα επιλέγοντας τυχαία ένα κόμβο από τον πίνακα δρομολόγησης χρησιμοποιώντας την συνάρτηση των πιθανοτήτων.
- *Φάση συντήρησης των διαδρομών* (Route maintenance phase). Γίνεται τοπική εύρεση μονοπατιών προκειμένου να κρατηθούν αυτά τα μονοπάτια ενεργά.

Το Directed Diffusion στέλνει τα δεδομένα μέσα από πολλαπλά μονοπάτια, και ένα από αυτά εξαναγκάζεται να στέλνει δεδομένα σε υψηλότερους ρυθμούς. Σε αντίθεση, το πρωτόκολλο αυτό διαλέγει ένα τυχαίο μονοπάτι προκειμένου να εξοικονομήσει ενέργεια. Αποτέλεσμα να υπάρχει 21.5% οικονομία ενέργειας παραπάνω από ότι το Directed Diffusion και 44% αύξηση στην ζωή του δικτύου.

Αυτή η μέθοδος όμως έχει και μειονεκτήματα, όπως είναι η ικανότητα επαναφοράς (recover) μετά από κάποιο σφάλμα ενός κόμβου, αφού χρησιμοποιείται ένα μονοπάτι σε αντίθεση με το Directed Diffusion. Επίσης, είναι αναγκαία η ύπαρξη πληροφορίας σε σχέση με την θέση των κόμβων και η εγκατάσταση ενός μηχανισμού διευθυνοδότησης των κόμβων που περιπλέκει την δρομολόγηση.

3.4.4.5 Rumor Routing

Το Rumor Routing είναι μια παραλλαγή του Directed Diffusion για εφαρμογή σε περιβάλλοντα όπου δεν εφαρμόζονται κριτήρια γεωγραφικής δρομολόγησης. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύσει ένα συμβάν στέλνει στο δίκτυο ένα πακέτο πληροφορίας (agent), που αφορά αυτό το συμβάν, προς τους απομακρυσμένους κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το κόστος της «πλημμύρας» (flooding) προς όλο το δίκτυο. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι σε σχέση με το flooding έχουμε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και επίσης μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η αστοχία (καταστροφή ή βλάβη) κάποιων κόμβων.

Η διαφορά του από το Directed Diffusion είναι ότι το πρωτόκολλο Rumor Routing διατηρεί ένα μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού σε αντίθεση με το πρώτο όπου τα δεδομένα μπορούν να σταλούν μέσω διαφορετικών μονοπατιών σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί αποτελεσματικά όταν το πλήθος των συμβάντων είναι μικρό. Αν έχουμε μεγάλο πλήθος συμβάντων και δεν

υπάρχει το απαιτούμενο ενδιαφέρον από μέρους της πηγής, τότε το κόστος διατήρησης των πακέτων πληροφορίας (agent) καθώς και των πινάκων με τα δεδομένα είναι μεγάλο, χωρίς να προσφέρει αντίστοιχο όφελος.

3.4.4.6 Gradient Based Routing

Το Gradient Based Routing αποτελεί μια μικρή παραλλαγή του Directed Diffusion. Η ιδέα είναι ο κάθε κόμβος να κρατάει τον αριθμό των αλμάτων προς τους γείτονές του κατά την φάση της διάχυσης ενδιαφέροντος. Έτσι, ο κάθε κόμβος γνωρίζει πόσο απέχει από τον κόμβο δεξαμενή (sink) σε άλματα το οποίο ονομάζεται και ύψος του κόμβου. Η διαφορά ύψους ενός κόμβου από ένα γειτονικό του κόμβο ονομάζεται κλίση του κόμβου. Τα πακέτα προωθούνται σε μια ζεύξη με τη μεγαλύτερη κλίση. Χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως ο συγκερασμός των δεδομένων και η εξάπλωση τους πετυχαίνει να εξισορροπήσει την κίνηση ομοιόμορφα. Όσον αφορά την εξάπλωση των δεδομένων χρησιμοποιούνται 3 τεχνικές:

- *Stochastic Scheme*, όταν υπάρχουν περισσότερες ζεύξεις με την ίδια κλίση, ο κόμβος επιλέγει μία τυχαία.
- *Energy-Based Routing*, όταν η ενέργεια ενός κόμβου μειωθεί κάτω από μια τιμή, τότε αυτός αυξάνει την κλίση του έτσι ώστε να αποτρέψει άλλους κόμβους στο να τον επιλέξουν για αποστολή δεδομένων και
- *Stream-Based scheme*, όπου η ιδέα είναι να εκτρέπονται οι νέες ροές δεδομένων μακριά από κόμβους που διακινούν κάποια ροή δεδομένων.

Έχει αποδειχτεί ότι η δρομολόγηση με το πρωτόκολλο αυτό υπερτερεί έναντι της δρομολόγησης Directed Diffusion όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά την φάση της επικοινωνίας.

3.4.4.7 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing)

Το CADR αποτελεί και αυτό μια παραλλαγή του Directed Diffusion. Με την δρομολόγηση αυτή προτείνονται 2 τεχνικές. Η μία είναι ερωτήσεις κατευθυνόμενες προς τους αισθητήρες με βάση την πληροφορία και η άλλη είναι η περιορισμένη μη ιστροπική διάχυση. Η όλη ιδέα αφορά στην ερώτηση των αισθητήρων και στην δρομολόγηση των δεδομένων στο δίκτυο προκειμένου να έχουμε κέρδος στην πληροφορία και ταυτόχρονα μείωση των καθυστερήσεων και του χρησιμοποιούμενου εύρους συχνοτήτων. Αυτή

είναι και η μεγάλη διαφορά από το Directed Diffusion. Κάθε κόμβος αξιολογεί την πληροφορία και το κόστος διάδοσής της βασιζόμενος σε πληροφορίες που διαθέτει τοπικά, αλλά και στις απαιτήσεις των χρηστών. Επίσης, χρησιμοποιείται και μια άλλη συμπληρωματική τεχνική, σύμφωνα με την οποία ο κάθε κόμβος μπορεί να επιλέγει ποιος κόμβος μπορεί να παρέχει την ζητούμενη πληροφορία με το λιγότερο ενεργειακό κόστος. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι είναι πιο αποτελεσματικό ενεργειακά από ότι το Directed Diffusion.

4 Ενεργειακό Μοντέλο

οδηγούμενο από τα δεδομένα Data-Driven Power Management Framework (DDPM)

4.1 Παρούσα κατάσταση

Η παροχή διαρκών υπηρεσιών συνάθροισης δεδομένων, ιδιαίτερα αποδοτικές ενεργειακά έχουν τεράστια σημασία για τις εφαρμογές που τρέχουν σε ένα WSN . Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε ένα μοντέλο-πλαίσιο (framework) διαχείρισης ενέργειας αλλά οδηγούμενο από τα δεδομένα (Data-Driven Power Management, “DDPM”). Αυτό το framework μπορεί να αποτελεί την υποδομή για να αναπτυχθούν και να στηριχτούν επάνω του διάφορες τεχνικές ενεργειακής βελτιστοποίησης, όπως «approximate querying» και «sleep scheduling». Αν συνδυάσουμε τα πλεονεκτήματα αυτών των 2 μεθόδων μπορούμε να επιτύχουμε, εκτός από την ενεργειακή βελτίωση του συστήματος, ακρίβεια στα μεταφερόμενα δεδομένα και εγκυρότητα στο χρόνο αποστολής τους στον κεντρικό κόμβο. Το στοιχείο που κάνει το DDPM να διαφέρει είναι ότι κάνει μία εκτίμηση συγκεκριμένης ακριβείας ως προς το μέγιστο χρόνο που μπορεί κάθε κόμβος να μείνει σε κατάσταση αδράνειας (sleep time) και έτσι μπορεί να δημιουργήσει ντετερμινιστικούς χρονοπρογραμματισμούς. Από τα πειράματα έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά μεγαλύτεροι χρόνοι αδράνειας, το οποίο σημαίνει μεγαλύτερο ενεργειακό κέρδος , ενώ η καθυστέρηση στη μεταγωγή των δεδομένων είναι ελάχιστα μεγαλύτερη.

4.2 Μηχανισμοί χρήσης

Ένα από τα κυριότερα ζητήματα στη διαχείριση της ενέργειας των WSN είναι η μείωση των εσωτερικών αναμεταδόσεων των μηνυμάτων, αφού όπως είδαμε η χρήση του ραδιοπομπού είναι αυτή που καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα ρεύματος σε ένα WSN. Η μέθοδος των προσεγγιστικών ερωτο-απαντήσεων (approximate querying) είναι μία από τις πιο γνωστές μεθόδους που εκμεταλλεύεται τη φυσική ισορροπία μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ακρίβειας στα δεδομένα. Η τεχνική αυτή βασίζεται στα συγκεκριμένα βάρη λάθους που διαμορφώνονται μέσα στο δίκτυο κατά τη μετάδοση της πληροφορίας και στο γεγονός ότι τα σφάλματα αυτά αφορούν τις εφαρμογές του WSN. Η λογική πίσω από αυτή την τεχνική είναι ότι τα δεδομένα που συλλέγονται μετά από μία ερώτηση «query» επιστρέφουν στο σταθμό βάσης αν δύο συνεχόμενες τιμές αισθητήρων ξεπερνούν τα όρια λάθους που έχουν τεθεί κατά τον προγραμματισμό της εφαρμογής από το χρήστη. Αν και είναι μία πολύ καλή τεχνική διαχείρισης ενέργειας για WSN οι υπάρχουσες προσεγγίσεις δεν έχουν εξετάσει τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας που μας προσφέρει για τους κόμβους που έχουν διαπεραστεί.

Άλλη μία πολύ σημαντική παράμετρος που χρήζει διαχείρισης είναι αυτή της κατανάλωσης ενέργειας στην κατάσταση αναμονής. Από τα πειραματικά δεδομένα είναι φανερό ότι η ενέργεια που καταναλώνεται όταν ο αισθητήρας είναι σε αναμονή είναι σχεδόν ίση με την ενέργεια που καταναλώνεται όταν ο αισθητήρας είναι σε ενεργή κατάσταση λειτουργίας. Για να καταφέρουμε να επιμηκύνουμε τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων είναι αναγκαίο να μπορέσουμε να χρονοπρογραμματίσουμε το κύκλο ενεργοποίησης και απενεργοποίησης (sleep mode) του κάθε κόμβου ξεχωριστά (sleep schedule). Αν και έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα πρωτόκολλα sleep schedule έχουν περιορισμένες δυνατότητες προγραμματισμού λόγω κάποιων εγγενών προβλημάτων, όπως την έλλειψη επικοινωνίας με το επίπεδο εφαρμογής.

4.3 Μοντελοποίηση του DDPM

4.3.1 Η τοπολογία του δικτύου

Η τοπολογία στην οποία αναφέρεται το DDPM είναι η τοπολογία ενός τυπικού WSN. Όλα τα motes στέλνουν τις συλλεγόμενες πληροφορίες είτε κατευθείαν στο σταθμό βάσης είτε έχουν να επιλέξουν από ένα σύνολο

υποψηφίων γειτόνων ποιον θα χρησιμοποιήσουν ως εφελτήριο για να μεταπηδήσουν ένα επίπεδο πιο κοντά στο σταθμό βάσης. Έτσι δημιουργούμε μία δομή ιεραρχικού δικτύου, αναθέτοντας σε κάθε κόμβο έναν αριθμό. Ο αριθμός αυτός δηλώνει την απόσταση σε άλματα “hops” από την παρούσα θέση στο σταθμό βάσης, κοινώς ο αριθμός 4 σημαίνει ότι χρειάζονται 4 άλματα για να φτάσουμε στο σταθμό βάσης, δηλαδή, 4 μεταβιβάσεις δεδομένων από έναν κόμβο σε έναν γειτονικό και σύνολο 3 ενδιάμεσοι κόμβοι. Ο κάθε κόμβος που μεταβιβάζει τα δεδομένα-πληροφορίες σε έναν γειτονικό του θα θεωρείται παιδί του κόμβου στον οποίο μεταβαίνουν τα δεδομένα-πληροφορίες και συμβολίζεται ως “ch”, ενώ ο κόμβος ο οποίος δέχεται τα δεδομένα θα ονομάζεται γονικός κόμβος και θα συμβολίζεται ως “PA”.

4.3.2 Η επικοινωνία του Δικτύου

Θέτουμε δύο νέες παραμέτρους για να συμβολίσουμε την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων στο DDPM. Η μία είναι η “RL” Reachable Link και η άλλη η “CL” Communication Link. Ο κάθε κόμβος έχει τις δικές του τιμές “RL” και “CL” για τη ζεύξη του με κάθε άλλο κόμβο μέσα στο δίκτυο. Το “RL” μεταξύ δύο κόμβων συμβολίζει ουσιαστικά αν οι κόμβοι αυτοί είναι γείτονες, πρακτικά, αν ο ένας κόμβος είναι μέσα στην εμβέλεια του άλλου και είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ τους. Το κάθε παιδί “ch” μπορεί να έχει πολλούς “RL”. Το “CL” αφορά τα πραγματικά δεδομένα και δείχνει ποιος κόμβος από τους γείτονες “PA” έχει επιλεγεί από το “ch” ως μέρος του μονοπατιού προς το σταθμό βάσης. Όπως καταλαβαίνουμε κάθε κόμβος “ch” έχει ένα “CL”. Κατά το σχεδιασμό κάθε “RL” είναι υποψήφιο για να γίνει “CL” στη συνέχεια όμως στρατηγικά επιλέγεται ο κόμβος που θα αποτελέσει το “CL” του κάθε “ch”. Αξίζει να τονίσουμε ότι θα μπορούσε ο κάθε κόμβος να διαφημίζει την πληροφορία του κάνοντας Broadcasting σε όλους τους “PA” κόμβους του αλλά αυτό θα προκαλούσε πολλές περιττές εκπομπές προς άλλους κόμβους “PA”. Αυτό θα βοηθούσε στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος, θα χρειαζόταν όμως παράλληλα μεγάλη σπατάλη ενέργειας.

4.3.3 Αίτηση δεδομένων από το WSN

Μία απαίτηση δεδομένων έχει την παρακάτω μορφή
 $\langle \{Attribute\} \rangle \langle Range \rangle \langle Time Window \rangle \langle Interval \rangle \langle Error \rangle$

Τα πρώτα τέσσερα στοιχεία που απαρτίζουν την ερώτηση στο WSN είναι τυπικές παράμετροι τις μεθόδου Approximate Queries αλλά έχει προστεθεί άλλη μία παράμετρος η “Error” που αντιπροσωπεύει την ανοχή στα σφάλματα που μπορεί να αντέξει η εφαρμογή. Όταν γίνεται η αποστολή μίας ερώτησης ή του αποτελέσματός της, διαπερνά κάποιους “PA” μέχρι να φτάσει στον προορισμό της. Στη συνέχεια αφού διαπεραστούν οι κόμβοι ανατίθεται στον κάθε ένα μία διαφορετική τιμή ει η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να διαπιστώσουμε εάν αυτός ο κόμβος μπορεί να αποτελέσει μέρος του μονοπατιού προς το σταθμό βάσης η όχι.

4.3.4 Ο ορισμός του προβλήματος

Καθώς είπαμε η υλοποίηση του framework αποτελεί το αποτέλεσμα των δύο τεχνικών που αναφέρθηκαν, του Approximate Querying και του Sleep Scheduling. Ολοκληρώνοντας το συνδυασμό αυτών των δύο τεχνικών μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση ενώ παράλληλα τηρούνται οι περιορισμοί που μπορεί να τίθενται από τις εφαρμογές όπως ποιοτική και χρονική συνέπεια δεδομένων. Βέβαια ως τώρα έχουμε παραθέσει μόνο τα αποτελέσματα χωρίς να εμφανίζουμε τη διαδικασία. Σε αυτή την ενότητα λοιπόν γίνεται μοντελοποίηση του προβλήματος και παρουσιάζουμε πώς θα εκμεταλλευτούμε τα συνδυαζόμενα πλεονεκτήματα αυτών των τεχνικών.

Ας θεωρήσουμε μία αίτηση δεδομένων από το WSN και το όριο ανοχής σφάλματος που τίθεται από την εφαρμογή έστω E . Τότε αυτό το E θα πρέπει να κατανέμεται στους κόμβους που αποτελούν το μονοπάτι από τον κόμβο “ch” προς το σταθμό βάσης. Έτσι για να είναι εφικτή η λήψη του αποτελέσματος θα πρέπει:

$$\sum e(n_i) \leq E \quad , \quad 1 \leq i \leq n$$

Η βέλτιστη ανάθεση των $e(n_i)$ είναι μία έρευνα και εξετάζεται ξεχωριστά. Στο παρών σημείο προκειμένου να απλοποιήσουμε τα δεδομένα θα θεωρούμε ότι το σφάλμα σε κάθε κόμβο είναι :

$$\forall i: e(n_i) = E/n, 1 \leq i \leq n$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές σφάλματος ο κάθε κόμβος μπορεί να προβλέψει πόσο χρόνο μπορεί να βρίσκεται σε sleep mode μέχρι τα δεδομένα που έχει στείλει να ξεπεράσουν τα όρια ανοχής λάθους που έχουν τέθει από την εφαρμογή. Βέβαια για να πραγματοποιηθεί αυτή η λειτουργία θα πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε κόμβο ένας μηχανισμός πρόβλεψης διακοπών “IP, Interval Predictor”, τον οποίο θα αναλύσουμε στη συνέχεια όπως και τους υπόλοιπους μηχανισμούς. Σε αυτό το σημείο απλά θεωρούμε την πρόβλεψη που κάνει ο “IP” ως μία συνάρτηση που δέχεται ως δεδομένα εισόδου τα $e(n_i)$ και παράγει ένα αποτέλεσμα $P(e(n_i))$. Αυτή η τιμή δηλώνει το μέγιστο χρόνο αδράνειας του κόμβου n_i (sleep time) $S_{max}(n_i)$ καθώς τα δεδομένα που έχει στείλει δεν έχουν ακόμα υπερβεί τα όρια ανοχής σφάλματος της εφαρμογής. Έτσι ισχύει το ακόλουθο:

$$\text{Max: } \sum S_{max}(n_i), 1 \leq i \leq n$$

Μέχρι αυτό το σημείο έχουμε ασχοληθεί με την τοπική συμπεριφορά του WSN αξιοποιώντας τις τοπικές πληροφορίες του κάθε κόμβου. Αυτή η τοπική πολιτική αδρανισμού των κόμβων όμως μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αυξήσεις στην καθυστέρηση των επικοινωνιών. Ο λόγος για να συμβεί αυτό είναι ότι όταν ένας κόμβος μεταβαίνει σε κατάσταση “sleep” τότε αναβάλλονται όλες οι επικοινωνίες-μεταγωγές δεδομένων που διέρχονται από αυτό τον κόμβο και εκπληρώνονται όταν ο κόμβος εισέλθει και πάλι σε ενεργή κατάσταση. Αυτές οι τιμές των $S_{max}(n_i)$ μπορεί να είναι πλήρως κατανομημένες, οπότε σε μία πολυεπίπεδη δομή δρομολόγησης η μη-στοχευμένη χρήση του “sleep scheduling” μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καθυστερήσεις στην αποστολή δεδομένων προς το σταθμό βάσης από τους κόμβους των χαμηλότερων επιπέδων. Στη χειρότερη περίπτωση η εξοικονόμηση στην ενέργεια που θα έχει επιτευχθεί μέσω αυτής της μεθόδου θα έχει ισοσταθμιστεί από την καθυστέρηση που θα έχει προκληθεί, βέβαια σε περίπτωση που τρέχουν στο WSN εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή εφαρμογές στις οποίες η χρονική ακρίβεια αποστολή-λήψης των δεδομένων παίζει σημαντικό ρόλο, δε θα μπορέσουν να διαχειριστούν αυτή την επιπρόσθετη καθυστέρηση.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, το αποτέλεσμα του συνδυασμού των δύο μεθόδων που επιζητούμε είναι να μεγιστοποιήσουμε το χρόνο αδράνειας για κάθε κόμβο με την ελάχιστη, όμως δυνατή καθυστέρηση στην επικοινωνία των κόμβων μεταξύ τους και με το σταθμό βάσης «MaxSMinL». Τα WSN απεικονίζεται ως ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα $G(N,E)$ όπου N είναι το σύνολο των κόμβων συμπεριλαμβανομένου του σταθμού βάσης, ενώ E είναι το σύνολο των ακμών που αντιπροσωπεύει το σύνολο των “RL” για κάθε κόμβο. Ο σταθμός βάσης συμβολίζεται ως n_0 , ενώ το γράφημα μπορεί να αποθηκευθεί ως ένας πίνακας $M \in \{0, 1\} N * N$. Το κάθε στοιχείο m_{ij} καθορίζεται ως εξής: 0 σε περίπτωση που δεν υπάρχει RL μεταξύ των στοιχείων i, j 1 σε περίπτωση που υπάρχει RL.

Στη συνέχεια θεωρούμε ότι υπάρχει μία συνάρτηση TF η οποία δέχεται ως είσοδο τον πίνακα M και παράγει ως αποτέλεσμα ένα πίνακα $N * N$ όπου η τιμή του κάθε στοιχείου m_{ij} είναι 1 εάν υπάρχει “CL” μεταξύ των i, j , ενώ 0 σε κάθε άλλη περίπτωση. Τελικά το πρόβλημα μοντελοποιείται ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum \sum \text{Syn}(S_{\max}(i), S_{\max}(j)) \times m_{ij} \quad , 1 \leq i, j \leq N \quad (1)$$

$$\text{Minimize } \sum \sum L(i, j) \times m_{ij} \quad , 1 \leq i, j \leq N \quad (2)$$

$$|\text{Deg}|$$

Ενώ παράλληλα ισχύουν οι περιορισμοί:

$$\sum \sum m_{ij} = 2 \times (|N| - 1) \quad , \quad 1 \leq i, j \leq |V| \quad (3)$$

$$\forall i : S_{\max}(i) \geq 1 \quad , \quad 1 \leq i \leq N \quad (4)$$

Κατ’ αρχήν η συνάρτηση TF μπορεί να παίξει διάφορους ρόλους ανάλογα με τη στρατηγική που θέλουμε να ακολουθήσουμε και γι’ αυτό δεν την αναλύουμε περαιτέρω σε αυτή την ενότητα. Η συνάρτηση $\text{Syn}(i, j)$ καθορίζει το μέγιστο χρόνο αδράνειας των κόμβων i, j ενώ τους κρατά

συγχρονισμένους. Η $L(i, j)$ μετρά την καθυστέρηση στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων i, j . Η σταθερά Deg θα μπορούσε να γραφτεί ως $Deg(n_0)$, αφορά το βαθμό της κορυφής n_0 και χρησιμοποιείται για να κοινωνικοποιήσει την καθυστέρηση για κάθε διαδρομή που οδηγεί στο σταθμό βάσης.

Η συνάρτηση (1) περιγράφει το 1^ο ζητούμενο της MaxSMinL, όπου μεγιστοποιείται ο χρόνος αδράνειας για κάθε κόμβο. Το 2^ο ζητούμενο περιγράφεται στη συνάρτηση (2), ενώ οι περιορισμοί (3) και (4) αφορούν αντίστοιχα ότι κάθε “ch” μπορεί να έχει μόνο ένα “CL” και ότι οι προβλεπόμενες τιμές-χρόνοι αδράνειας είναι μεγαλύτεροι του 1. Αν ο χρόνος αδράνειας είναι 1 τότε σημαίνει ότι ο χρόνος αδράνειας αυτού του κόμβου έχει φτάσει στο ελάχιστο.

Επειδή το περιγραφόμενο πρόβλημα MaxSMinL είναι λίγο πολύπλοκο και δύσκολο να λυθεί, μετατρέπουμε το πρόβλημα σε κάτι λίγο πιο εύκολο αλλά και πιο ρεαλιστικό. Το πρόβλημα γίνεται MaxS διατηρώντας το ζητούμενο της συνάρτησης (1) ενώ η (2) γίνεται πλέον από ζητούμενο, σταθερά του προβλήματος:

Πρέπει:

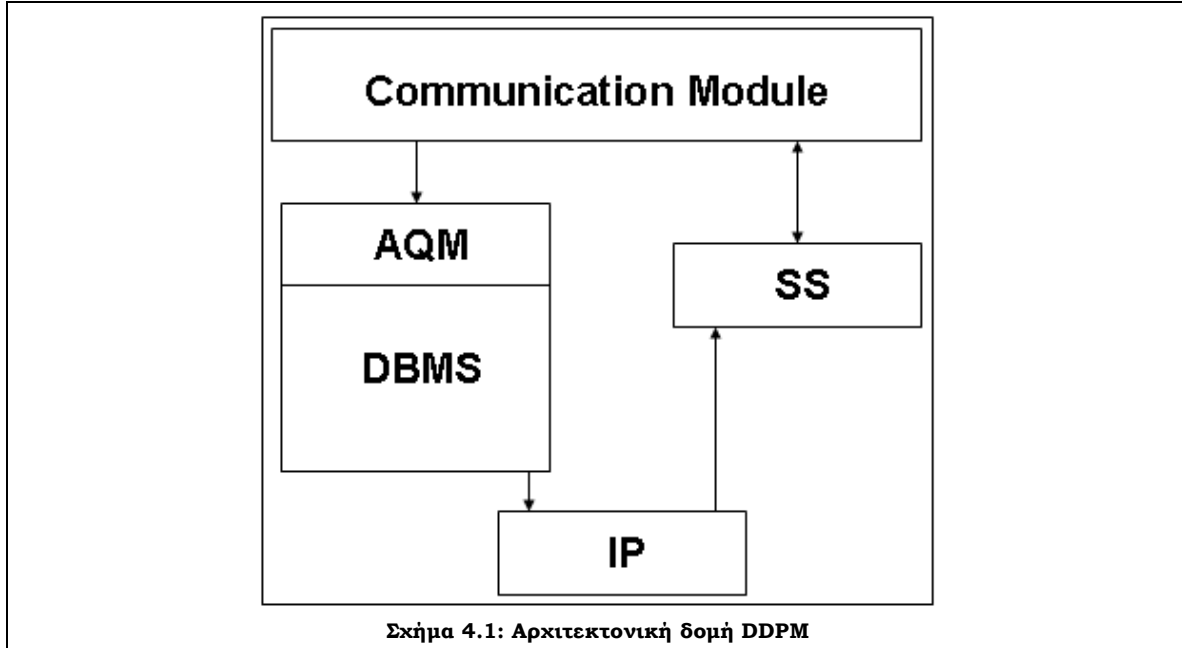
$$(2) \leq \varepsilon, \quad \varepsilon \geq 0$$

η σταθερά «ε» είναι μία σταθερά που τίθεται από το χρήστη ή την εφαρμογή και είναι ουσιαστικά η τιμή που προσδιορίζει την αναλογία μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της καθυστέρησης στην επικοινωνία. Είναι προφανές ότι υπάρχει πάντα λύση για αρκετά μεγάλο «ε», αν και υπάρχουν εφικτές λύσεις ακόμα και για $\varepsilon=0$ σε κάποιες περιπτώσεις.

4.4 Η Λειτουργία του DDPM

4.4.1 Συνολική επισκόπηση

Μπορούμε πλέον να δείξουμε πώς λειτουργεί το DDPM στο σύνολό του, συνολικά ως μηχανισμός με όλα τα πλεονεκτήματα που προαναφέραμε. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η αρχιτεκτονική δομή του DDPM



Σχήμα 4.1: Αρχιτεκτονική δομή DDPM

Το DDPM μπορεί να εγκατασταθεί σε όποιον αισθητήρα του δικτύου εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης κόμβων, όχι μόνο πρόσληψη και μεταφορά δεδομένων. Το DDPM αποτελείται από τις παρακάτω υπομονάδες:

Approximate Query Manager (AQM): Το AQM αποτελεί την ενδιάμεση διεπαφή που συνδέει τις απαιτήσεις για δεδομένα με την πηγή παροχής των δεδομένων. Παράλληλα αποθηκεύει τις τιμές ανοχής σφάλματος για κάθε επερώτηση που είναι ενεργή. Κυρίως όμως είναι υπεύθυνο για την παροχή αποδοτικών υπηρεσιών ανάκτησης δεδομένων.

Interval Predictor (IP): Η μονάδα IP συνεργάζεται με την AQM, από την οποία ζητάει πληροφορίες για συγκεκριμένο επερώτημα. Οι πληροφορίες αυτές είναι η δεσμευμένη ανοχή στα σφάλματα που έχει αποθηκεύσει η AQM. Στη συνέχεια με βάση αυτές τις πληροφορίες υπολογίζει το μέγιστο χρονικό διαστήμα για το οποίο ο κόμβος μπορεί να μείνει ανενεργός, ενώ η μεταδιδόμενη τιμή παραμένει εντός ορίων ανοχής σφάλματος. Αυτή η δυνατότητα αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του κόμβου, ενώ συνεχίζει να να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής για ακρίβεια στα δεδομένα αποστολής.

Sleep Scheduler (SS): Αφού έχει παραχθεί η πρόβλεψη, το αποτέλεσμα το παραλαμβάνει η υπό-μονάδα SS, η οποία χρησιμοποιεί το δεδομένο αυτό για να χρονοπρογραμματίσει τη διάρκεια απενεργοποίησης του

κόμβου, «sleep time», καθώς και τη χρονική στιγμή ενεργοποίησης του κάθε κόμβου.

4.4.2 Interval Predictor (IP)

Ο σκοπός που αναπτύχθηκε μία τέτοια υπο-μονάδα είναι για να κάνει εκτιμήσεις – προβλέψεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα, για το πότε είναι ασφαλές ένας κόμβος να μεταβεί σε κατάσταση αδράνειας. Για αυτό, και οι δυνατότητες που έχει η IP βασίζονται κυρίως στην τεχνική πρόβλεψης που χρησιμοποιεί. Έχουν γίνει εξειδικευμένες έρευνες πάνω σε αυτό το κομμάτι για να αναπτυχθεί ένας αποδοτικός και αξιόπιστος μηχανισμός πρόβλεψης. Όλες οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν μοιράζονται μία κοινή ιδέα να καταγράψουν τις διαδρομές που ακολουθούν τα δεδομένα από τους αισθητήρες στο σταθμό βάσης και να εκμεταλλευτούν τη χωρική και χρονική συσχέτιση μεταξύ τους. Οι τροχιές χρησιμοποιούνται για να εξαγάγουμε άλλες τιμές. Οπότε πρέπει να σταλούν τα αποτελέσματα όταν θα έχουν προβλεφτεί από τις ούτως η άλλως προβλεπόμενες τιμές. Συνεπώς μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια αν σταλούν ΜΗ προβλεπόμενες τιμές.

Έχουν γίνει αρκετές έρευνες για να αναπτυχθεί ένας αξιόπιστος αλγόριθμος πρόβλεψης των τιμών από τη μονάδα IP. Αν και έχουν ήδη αναπτυχθεί αξιολογες μέθοδοι, όπως αυτή του «Kalman Filter», πιστεύεται ότι υπάρχουν ακόμα πολλά περιθώρια βελτίωσης και γι' αυτό οι αλγόριθμοι πρόβλεψης βρίσκονται ακόμα στο πεδίο έρευνας των επιστημόνων.

4.4.3 Sleep Schedule

Η σχεδίαση του DDPM του δίνει τη δυνατότητα να επεκτείνεται πολύ εύκολα αφού χρειάζεται μόνο τοπικά δεδομένα του κόμβου για να τρέξει, όπως τα όρια ανοχής σφάλματος του κόμβου καθώς και τις τιμές που «αισθάνεται» ο αισθητήρας από το περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται. Παρόλα αυτά, λόγω αυτής της εγγενούς επεκτασιμότητας μπορεί να εμφανιστούν πολύ μεγάλες καθυστερήσεις σε μία πολυεπίπεδη δομή WSN. Για να μετριαστεί το πρόβλημα αυτό, αναπτύχθηκε ένα ειδικό στοιχείο οργάνωσης μέσα στον «SS» που επιτυγχάνει αυτό ακριβώς, να μεγιστοποιεί τους χρόνους αδρανοποίησης των κόμβων εξασφαλίζοντας ότι δε θα υπάρχει μεγάλη καθυστέρηση στους χρόνους επικοινωνίας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε διαφορετικούς στόχους ποιότητας σε ένα WSN.

Οργάνωση και βελτιστοποίηση: Επειδή είναι σχετικά δύσκολο να βελτιστοποιήσουμε και την απόδοση στην ενέργεια και την ταχύτητα στην επικοινωνία του WSN ταυτοχρόνως, προτείνονται μερικοί ευρεστικοί αλγόριθμοι που εξάγουν διαφορετικές ισορροπίες μεταξύ τους. Αυτοί οι αλγόριθμοι επίσης χρησιμοποιούν διαφορετικές στρατηγικές για να υλοποιήσουν την TF συνάρτηση που είδαμε νωρίτερα. Έχοντας ως στόχο να μη καθεί η εύκολη επεκτασιμότητα του DDPM οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μόνο τοπικά δεδομένα και πληροφορίες.

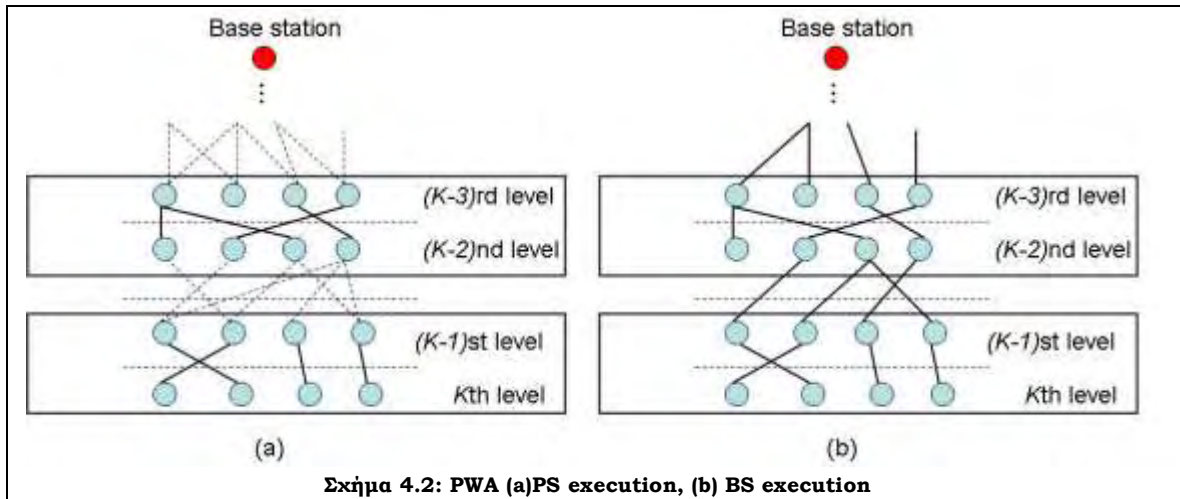
Sleep Time Maximization: Στη χρήση αυτής της μεθόδου θεωρούμε ότι ο κάθε κόμβος γνωρίζει πληροφορίες για τους γείτονές του. Έτσι χωρίς να επιβαρύνει καθόλου το «sleep time» του κόμβου, διαλέγει τον κόμβο που θα τον οδηγήσει προς το σταθμό βάσης, μέσω της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης, συνάρτηση «L()». Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

- 1) Ο σταθμός “s” που θέλει να στείλει τα δεδομένα στη βάση, «μαθαίνει» τους χρόνους αδράνειας των γειτόνων του.
- 2) Εκτελούμε τη συνάρτηση $L(N_i, s)$: $N_i \rightarrow$ ο γείτονας του s με το μικρότερο id.
- 3) Θέτουμε τον κόμβο N_i ως το “CL” του s.
- 4) Εκτελούμε τη συνάρτηση L μεταξύ του s και όλων των γειτόνων του.
- 5) Στο τέλος ο κόμβος με τη χαμηλότερη τιμή $L(N_i, s)$ επιλέγεται ως ο επόμενος κόμβος μεταφοράς των δεδομένων προς το σταθμό βάσης. Σε περίπτωση που η συνάρτηση L() έχει ως αποτέλεσμα την ίδια τιμή για διαφορετικούς κόμβους, τότε επιλέγεται ο κόμβος με το μικρότερο id.

Στη συνέχεια όταν ο επόμενος κόμβος προσπαθήσει να βρει τον επόμενο κόμβο μεταπήδησης των δεδομένων εκτελείται και πάλι η παραπάνω διαδικασία.

Pairwise-based Algorithm (PWA): Το μειονέκτημα του STM είναι η μεγάλη καθυστέρηση που έχει και για αυτό το λόγο δεν είναι κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές που ο χρόνος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα λειτουργίας. Αλλά μπορούμε να εξετάσουμε αν μπορούμε να θυσιάσουμε μερικές μονάδες “sleep time” για να επιτύχουμε πολύ μεγαλύτερη μείωση στην καθυστέρηση των επικοινωνιών. Όμως είναι απαγορευτικά μη αποδοτικό, να δοκιμάσουμε το “sleep time” κάθε κόμβου με όλους τους άλλους για να

καταλήξουμε σε ένα σχέδιο οργάνωσης των κόμβων με τις χαμηλότερες καθυστερήσεις. Εδώ υπεισέρχεται ο PWA για να επιλύσει το πρόβλημα. Ο αλγόριθμος PWA αποτελείται από δύο στάδια. Το ένα ονομάζεται PS, “Pairing Stage” και το άλλο BS, “Bridging Stage”. Κατά την εκτέλεση του PS δημιουργούνται ζευγάρια επιπέδων σύμφωνα με κάποιους πολύ χαλαρούς κανόνες που ορίζονται από την εφαρμογή. Στο πρώτο αυτό στάδιο ανακαλύπτεται ο κόμβος που βρίσκεται στο πιο «μακρινό» επίπεδο από το σταθμό βάσης, έστω κόμβος κ-επίπεδο. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα ζευγάρι επιπέδων του (κ,κ-1)-επίπεδο. Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία «ζευγαρώματος» του (κ-2, κ-3) κ.ο.κ. Στο τέλος είναι πιθανό ο σταθμός βάσης να αποτελεί από μόνος του το επίπεδο-0 αν ο συνολικός αριθμός των επιπέδων είναι μόνος αριθμός και ένα επίπεδο θα πρέπει να μείνει μόνο του. Αφού δημιουργηθούν όλα τα ζευγάρια επιπέδων πρέπει να αρχίσει να ρυθμίζεται ο χρονισμός μεταξύ των κόμβων σε σχέση με το “sleep time” και τα επιτρεπόμενα όρια καθυστέρησης που είναι αποδεκτά από την εφαρμογή. Το τελικό αποτέλεσμα μετά το πέρας του PS φαίνεται στο Σχήμα 4.2(a), όπου ο κάθε κόμβος “ch” από κάθε ζευγάρι ενισχύει κάποιο RL για να γίνει CL έτσι ώστε να είναι εντός των απαιτήσεων εφαρμογής (π.χ.: μηδενική καθυστέρηση). Παράλληλα ο χρόνος αδράνειας προσαρμόζεται ανάλογα αν χρειαστεί. Αφού τελειώσει ο PS ο αλγόριθμος μπαίνει στο στάδιο του BS όπου τα ζευγάρια συνδέονται μεταξύ τους για να δημιουργηθεί εντέλει το σχέδιο οργάνωσης του WSN όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2(b). Ο τρόπος για να γίνει αυτό είναι παρόμοιος με τον STM αλγόριθμο. Η κεντρική ιδέα είναι να μην χρειαστεί να αλλάξουμε τις σχέσεις “CL” εντός των ζευγών που δημιουργήθηκαν κατά τη φάση εκτέλεσης του PS γιατί έτσι ουσιαστικά θα είχαμε και πάλι τις καθυστερήσεις που εμφανίζονται στον PS αλγόριθμο.



Σχήμα 4.2: PWA (a) PS execution, (b) BS execution

Σε αυτό το σημείο είναι που χρησιμοποιείται η συνάρτηση $Syn()$, η οποία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία του σχεδίου οργάνωσης των “CL” σχέσεων εντός του κάθε ζευγαριού επιπέδων. Βέβαια από την άλλη διαφορετικές σχέσεις “CL” οδηγούν σε διαφορετικές στρατηγικές οργάνωσης. Βασισόμενη σε αυτή την παρατήρηση λοιπόν γίνεται αντιληπτό ότι η βελτιστοποίηση του αποτελέσματος της συνάρτησης $Syn()$ έγκειται στο μοντέλο “ch” – “PA” που θα δημιουργηθεί.

Η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δύο ειδών σχέσεις: α) ως ένας “PA” με πολλά παιδιά, ή β) πολλοί “PA” με πολλά παιδιά. Η β) περίπτωση μπορεί να μετατραπεί στην α) εξετάζουμε μόνο την α) περίπτωση σχέση “CL”.

Θεωρούμε ένα κόμβο γονέα “PA” ο οποίος έχει m παιδιά “ch”

$$ch_j, \quad 1 \leq j \leq m \text{ και}$$

$S_{max}(PA)$ και $S_{max}(ch_j)$ οι “sleep time” αντίστοιχα. Ας θεωρήσουμε ότι το μικρότερο $S_{max}()$ από τα “ch” το έχει ο κόμβος που συμβολίζεται με (ch_{min}) , όπου το $1 \leq min \leq m$ η ακόλουθη παράμετρος «λ» είναι αυτή που χρειαζόμαστε για να προγραμματίσουμε το σύστημα:

$$\lambda = S_{max}(PA) - S_{max}(ch_{min})$$

Αν $\lambda \leq 0$ τότε όλα τα παιδιά του “PA” έχουν μεγαλύτερους χρόνους αδράνειας από τον “PA”. Το αποτέλεσμα είναι ότι όλα τα “ch” πρέπει να

μειώσουν τους “sleep time” τους για να συγχρονιστούν με τον PA. Ο βέλτιστος προσαρμοζόμενος “sleep time” μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$S_{opt}(S_{max}(PA)), S_{max}(CH) = S_{max}(PA) + \sum (S_{max}(ch_j) - \text{Mod}(S_{max}(ch_j), S_{max}(PA)))$$

Είναι φανερό ότι μόνο αν η πράξη mod() δίνει αποτέλεσμα 0 έχουμε φτάσει στη βέλτιστη λύση, εφόσον τότε “ch” και “PA” είναι πλήρως συγχρονισμένοι. Διαφορετικά θα πρέπει να μειώσουμε το χρόνο κάποιων “ch” κόμβων σε ποσό όσο εξάγεται ως αποτέλεσμα από το Mod(ch , PA).

Αν $\lambda > 0$ τότε θα πρέπει να μειώσουμε το $S_{max}(PA)$ και κάποια από τα $S_{max}(ch)$ για να επιτύχουμε το συγχρονισμό. Η νέα τιμή $S_{max}(PA)$ μπορεί να είναι ίση με την τιμή $S_{max}(ch_{min})$ και οι τιμές $S_{max}(ch_j)$ μπορούν να προσαρμοστούν σύμφωνα με την παρακάτω παράσταση:

$$S_{adj}(ch_j) = S_{max}(ch_j) - \text{Mod}(S_{max}(ch_j), S_{max}(ch_{min}))$$

$$S_{opt}(S_{max}(PA)), S_{max}(CH) = S_{max}(ch_{min}) + \sum S_{adj}(ch_j)$$

Όπως παρατηρούμε η βέλτιστη περίπτωση είναι όταν η τιμή της συνάρτησης Mod υπολογίζεται δίνει αποτέλεσμα 0 το οποίο σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι “ch” είναι συγχρονισμένοι με τον κόμβο “ch_{min}”. Προφανώς ο κόμβος “ch_{min}” κάθε φορά θα διαλέγει εκείνους τους PA για γονείς που θα δημιουργήσουν το βέλτιστο S_{opt} , αλλά κάποιες φορές αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μείωση στο “sleep time” κάποιου κόμβου χωρίς λόγο. Έτσι θέτουμε μία νέα μεταβλητή απόδοσης «a» η οποία υπολογίζει το ποσοστό μείωσης του αρχικού S_{max} σε σχέση με το S_{opt} , οπότε σε περίπτωση που πρέπει να διαλέξουμε ανάμεσα σε δύο PA με κοινό S_{opt} υπολογίζουμε τις μεταβλητές απόδοσης για το καθένα ξεχωριστά και έχουμε:

$$a_1 = S_{opt} / (S_{max}(PA_1) + S_{max}(ch_1))$$

$$a_2 = S_{opt} / (S_{max}(PA_2) + S_{max}(ch_1))$$

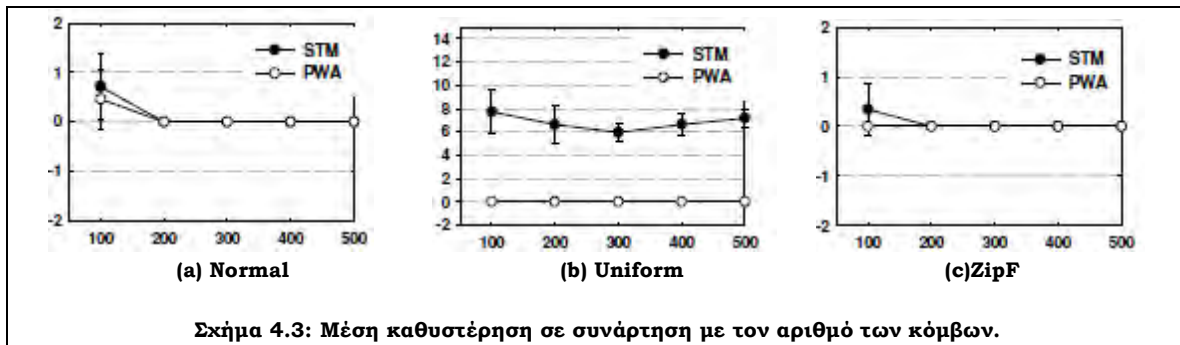
Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιλέγουμε εκείνο με το μεγαλύτερο a . Μεγαλύτερο « a » σημαίνει ότι θυσιάζεται λιγότερος “sleep time” άρα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Σε περίπτωση που και τα “ a ” προκύψουν ίσα τότε επιλέγεται ο κόμβος με το μικρότερο ID.

4.5 Αξιολόγηση της λύσης DDPM

Αφού εξετάσαμε τον τρόπο διαχείρισης του συστήματος WSN με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ενέργειας με μικρή απώλεια στην καθυστέρηση, σε αυτή την ενότητα θα δείξουμε ότι πράγματι το ζητούμενο έχει επιτευχθεί. Οι αλγόριθμοι που περιγράφηκαν PWA και STM συγκρίνονται μεταξύ τους, μέσω μετρήσεων προσομοίωσης, ενώ μεταβάλλονται ο αριθμός των κόμβων και η τοπολογία του δικτύου. Για να απλοποιηθεί το αποτέλεσμα των μετρήσεων, το εύρος πρόβλεψης που γίνεται από το μηχανισμό IP οριοθετείται μεταξύ 2-5.

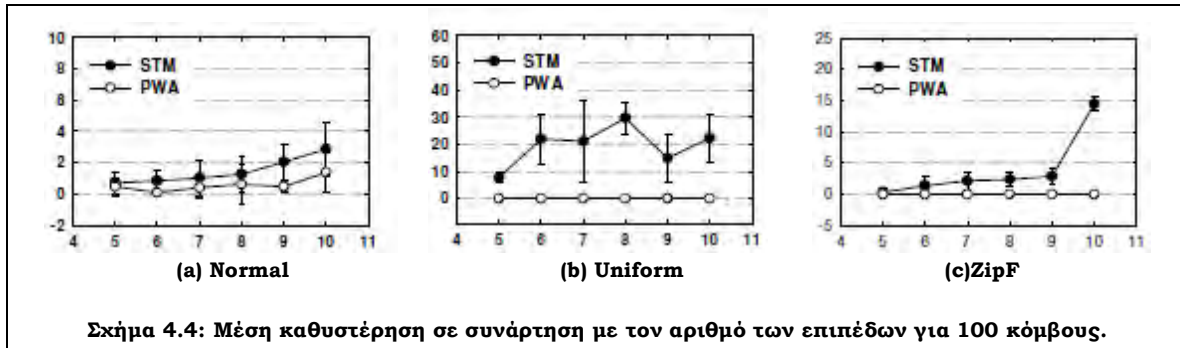
4.5.1 Αξιολόγηση ως προς την καθυστέρηση

Στα σχήματα 4.3 (a), (b), (c) φαίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην καθυστέρηση για 3 διαφορετικές τοπολογίες καθώς αυξάνει ο αριθμός των κόμβων. Η τοπολογία του δικτύου φτάνει μέχρι 5 επίπεδα.



Όπως βλέπουμε καθώς αυξάνει ο αριθμός των κόμβων η μέση καθυστέρηση μειώνεται και στους 2 αλγορίθμους, καθώς ο κάθε κόμβος έχει περισσότερες επιλογές για να προωθήσει τα δεδομένα του προς το σταθμό βάσης. Είναι εμφανές βέβαια ότι ο PWA επιτυγχάνει πολύ μικρότερες καθυστερήσεις και στις τρεις διαφορετικές τοπολογίες.

Στη συνέχεια γίνονται μετρήσεις για διαφορετικές τοπολογίες σε σχέση με τον αριθμό των επιπέδων του δικτύου αλλά για συγκεκριμένο αριθμό κόμβων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.4 (a), (b), (c)

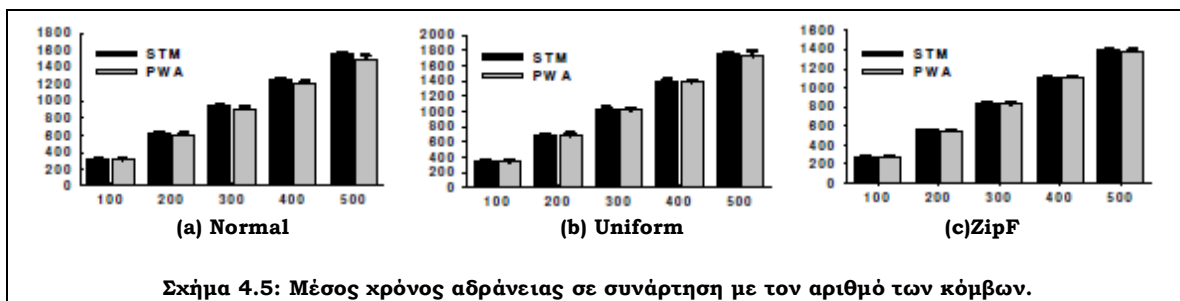


Σχήμα 4.4: Μέση καθυστέρηση σε συνάρτηση με τον αριθμό των επιπέδων για 100 κόμβους.

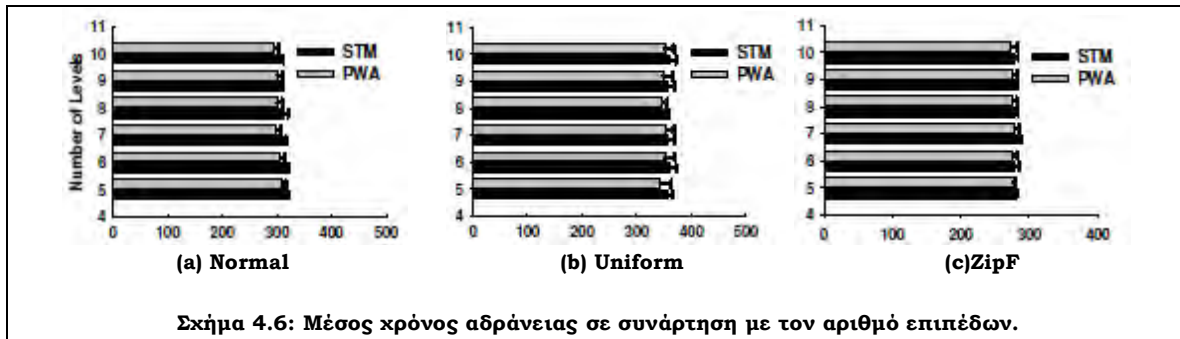
Εδώ φαίνεται ότι ο STM μεταβάλλεται αρκετά έντονα σε σχέση με τις αλλαγές στον αριθμό των επιπέδων, ενώ ο PWA μένει σχεδόν αμετάβλητος ανεξαρτήτως επιπέδων. Οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για δίκτυα περισσότερων επιπέδων επιλέγουμε τη χρήση του αλγορίθμου PWA

4.5.2 Αξιολόγηση του DDPM ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι μετρήσεις μέσου χρόνου αδράνειας του WSN σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων (Σχ. 4.5) και τον αριθμό των επιπέδων (Σχ. 4.6) της μεθόδου DDPM χρησιμοποιώντας τους 2 αλγορίθμους PWA και STM.



Σχήμα 4.5: Μέσος χρόνος αδράνειας σε συνάρτηση με τον αριθμό των κόμβων.



Εφόσον περιγράψαμε τη λειτουργία του αλγορίθμου και γνωρίζουμε ότι ο STM μεγιστοποιεί το χρόνο αδράνειας, μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε σαν κριτήριο αξιολόγησης για τον PWA. Ο PWA όπως είδαμε είναι πιο αποδοτικός από τον STM σε όλες τις περιπτώσεις και μάλιστα είναι ιδιαίτερα πιο αποδοτικός όσο πιο πολύπλοκο γίνεται το δίκτυο. Απομένει να διαπιστώσουμε το μέγεθος απώλειας της ενέργειας που θυσιάζουμε για τη βελτίωση αυτή. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος βρίσκεται πάρα πολύ κοντά στη βέλτιστη δυνατή, ανεξαρτήτως της τοπολογίας του δικτύου που εφαρμόζουμε.

5 Συμπεράσματα–Προοπτικές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών παγκοσμίως και ήδη γίνονται αρκετές μελέτες με σκοπό την βελτίωση της απόδοσής τους και την αξιοποίησή τους σε νέες εφαρμογές. Στη βιοϊατρική χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την πρόληψη ή και την ταχύτερη ίαση των διαφόρων παθήσεων. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα όπου για την ταχύτερη ίαση κατάγματος τοποθετείται ένα ευφύες σύστημα αισθητήρων στον ασθενή το οποίο αφενός εκπέμπει υπερήχους για την ταχύτερη θρέψη του κατάγματος σε ποσοστό 20% - 40% και αφετέρου στέλνει πληροφορίες στον ιατρό. Παράλληλα βρίσκεται υπό εξέλιξη το «έξυπνο γιλέκο» το οποίο είναι ένα γιλέκο στο οποίο βρίσκονται προσαρμοσμένοι αισθητήρες διαφόρων τύπων. Το σύστημα εποπτεύει όλες τις λειτουργίες του ασθενούς και τις στέλνει στο σταθμό βάσης και από εκεί στέλνονται αυτόματα, μέσω ιντερνέτ, στον επιβλέποντα ιατρό που μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε. Στη γεωργία έχουν αναπτυχθεί ήδη μηχανισμοί αυτοματισμού για το πότισμα, το ράντισμα και την εποπτεία των γεωργικών προϊόντων. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον θα ήταν να γνωρίζαμε τι μπορεί να μελετάται στις στρατιωτικές εφαρμογές δεδομένου

ότι υπάρχει μεγαλύτερη χρηματοδότηση και αλματώδης εξέλιξη αλλά η μυστικότητα είναι σημαντική για την επιτυχή εφαρμογή τους.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι βρισκόμαστε εν μέσω μίας τεχνολογικής περιόδου που υπόσχεται ακόμη πολλές προοπτικές εξέλιξης. Αν μάλιστα αναλογιστούμε ότι πλέον δεν αναφερόμαστε σε αισθητήρες ή σε WSN αλλά σε ευφυή συστήματα καταλαβαίνουμε ότι έχει ήδη γίνει το 1^ο βήμα για την ένταξη προηγμένων WSN στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Το μόνο που μπορεί να προβλέψει κανείς είναι ότι η εξέλιξη των WSN και οι νέες εφαρμογές τους θα είναι πρωτεύοντος σημασίας στο εγγύς μέλλον. Η ενέργεια και η μεγιστοποίηση της μακροζωίας των αισθητήρων μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο, αποδεδειγμένα πλέον, λόγω της εξέλιξης στην τεχνολογία τόσο σε υλικό όσο και σε επίπεδο διαχείρισης (πρωτόκολλα, τοπολογία...).

Το πιο σημαντικό βέβαια είναι ότι χρησιμοποιώντας δύο γνωστές μεθόδους εφαρμογής σε WSN και συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματά τους δημιουργήθηκε ένα νέο Framework που επιτυγχάνει σημαντικό βήμα εξέλιξης στο κρίσιμο πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας δημιουργώντας νέες προοπτικές. Αν με ένα πρωτόκολλο διαχείρισης μπορούμε να εξοικονομήσουμε αυτά τα ποσοστά ενέργειας που περιγράφονται παραπάνω ως αναλογιστούμε το μέγεθος της βελτίωσης που μπορεί να επιτευχθεί εάν γίνει ένα βήμα βελτίωσης σε κάθε παράγοντα του δικτύου που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] ΑΡΓΥΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ: Επεξεργασία ερωτήσεων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με μνήμες στερεάς κατάστασης NAND
- [2] ΔΕΛΛΑΠΟΡΤΑΣ ΠΕΤΡΟΣ : «Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Αξιολόγηση Απόδοσης και Θέματα Υλοποίησης.»
- [3] ΛΟΙΖΟΣ ΛΟΙΖΟΥ: Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για τη μη επεμβατική παρακολούθηση βιοσήματος.
- [4] Παπαβασιλείου Χριστίνα : Συλλογή και Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Χρήση Ενεργειακά Αποδοτικού Πρωτοκόλλου.
- [5] Jussi Haapola, Zach Shelby, Carlos Pomalaza-R´aez and Petri Mahonen: Cross-layer Energy Analysis of Multi-hop Wireless Sensor Networks.
- [6] Sokwoo Rhee, Deva Seetharam and Sheng Liu
Millennial Net: Techniques for Minimizing Power Consumption in Low Data-Rate Wireless Sensor Networks
- [7] Prof.Roopam Gupta: Optimization of Power Consumption in Wireless Sensor Networks
- [8] Andrey Somov: Power Management and Power Consumption Optimization Techniques in Wireless Sensor Networks
- [9] *Chris Townsend, Steven Arms: Wireless Sensor Networks: Principles and Applications*
- [10] KAZEM SOHRABY, DANIEL MINOLI, TAIEB ZNATI:
WIRELESS SENSOR NETWORKS,
Technology, Protocols, and Applications

- [11] Ayad Salhieh, Jennifer Weinmann, Manish Kochhal, Loren Schwiebert: Efficient Topologies for Wireless Sensor Networks □
- [12] MingJian Tang, Jinli Cao: An Energy-Efficient Data-Driven Power Management for Wireless Sensor Networks
- [13] VIVEK KUMAR GANGWAR, Saurabh verma, Shyam Lal Rao LOW POWER WIRELESS SENSOR NETWORK
- [14] Yunbo Wang, Mehmet C. Vuran and Steve Goddard: Stochastic Analysis of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks
- [15] Mario Cagalj: Wireless Sensor Networks: Communication Mechanisms for Power-Aware Data Dissemination
- [16] Jaein Jeong, David Culler, Jae-Hyuk Oh: Empirical Analysis of Transmission Power Control Algorithms for Wireless Sensor Networks
- [17] Olivier Powell, Pierre Leone, Jost Rolim: Energy optimal data propagation in wireless sensor networks
- [18] Lidan Wang and Amol Deshpande: Predictive Modeling-Based Data Collection in Wireless Sensor Networks
- [19] <http://en.wikipedia.org/wiki/Wsn>