

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

*Μοντελοποίηση και μελέτη της απόδοσης τεχνικών  
συνάθροισης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων*

Επιμέλεια

**ΣΤΑΥΡΟΥΛΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

Εξεταστική Επιτροπή:

**ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Καθηγητής Τ.Μ.Η.Υ.Τ.Δ – Π.Θ

**ΚΙΚΙΡΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

Συμβασιούχος Διδάσκων ΠΔ 407/80

**ΒΟΛΟΣ  
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011**

## Περίληψη

Η πρώτη δεκαετία του 21 πρώτου αιώνα έχει πάρει το τίτλο ως η «Δεκαετία του Αισθητήρα». Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αλματώδους ανάπτυξης στην τεχνολογία των αισθητήρων, καθιστά τους αισθητήρες στην ίδια θέση της εξέλιξης με την δημιουργία της τεχνολογίας των μικροϋπολογιστών το 1980. Μέχρι στιγμής, έχουν πραγματοποιηθεί τεράστιες αλλαγές στην τεχνολογία των αισθητήρων αλλά πολύ περισσότερες είναι στο προσκήνιο.

Στην εργασία αυτή θα αναφερθούμε γενικά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, την αρχιτεκτονική, τα δομικά μέρη των κόμβων των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, και τις εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς.

Επίσης, θα αναφερθούμε συνοπτικά για τη συνάθροιση δεδομένων και θα παρουσιάσουμε κάποιες τεχνικές συνάθροισης δεδομένων.

Τέλος, θα προτείνουμε έναν αποδοτικό αλγόριθμο συνάθροισης δεδομένων καθώς και θα παρουσιάσουμε και πειράματα που έγιναν πάνω σε αυτόν για την απόδειξη της αποδοτικότητάς του.

**Λέξεις Κλειδιά:** αισθητήρες, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, συνάθροιση δεδομένων

## Ευχαριστίες

Χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους αυτούς που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπεύθυνους για την παρούσα εργασία διδάσκοντες, κ. Σταμούλη Γεώργιο και κ. Παναγιώτη Κίικρα, οι οποίοι με την εμπειρία και τη γνώση τους, μου ενέπνευσαν νέες ιδέες και προτάσεις καθ'όλη την διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Ευχαριστώ θερμά τον συνάδελφο Αποστόλη Ξενάκη για την πολύτιμη βοήθεια και παρατηρήσεις του στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου Νικόλαο και Μαριάννα καθώς και τα κοντινά μου πρόσωπα για την υποστήριξή τους.

---

Παναγιώτης Ν. Σταυρουλης

Διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Copyright © Παναγιώτης Ν. Σταυρουλης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	2
Ευχαριστίες .....	3
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> – Εισαγωγή .....	7
1.1 Εισαγωγή στα δίκτυα αισθητήρων .....	7
1.2 Στόχοι σχεδιασμού δικτύου αισθητήρων .....	8
1.3 Προκλήσεις σχεδιασμού δικτύου αισθητήρων .....	11
1.4 Τεχνολογικό υπόβαθρο .....	12
1.4.1 Τεχνολογία MEMS .....	12
1.4.2 Τεχνολογία Ασύρματης επικοινωνίας .....	13
1.4.3 Σύγκριση “Ad-Hoc” Δικτύων και Δικτύων Αισθητήρων .....	14
1.4.4 Πλατφόρμες software και hardware .....	16
1.4.4.1 Λειτουργικό σύστημα .....	17
1.4.4.2 Hardware .....	17
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> – Χαρακτηριστικά των WSNs .....	19
2.1 Δομή αισθητήρα .....	19
2.2 Τύποι αισθητήρα .....	20
2.3 Δομή στοίβας πρωτοκόλλων για WSNs .....	21
2.3.1 Φυσικό επίπεδο .....	22
2.3.2 Επίπεδο δεδομένων .....	23
2.3.3 Επίπεδο δικτύου .....	25
2.3.4 Επίπεδο μεταφοράς .....	26
2.3.5 Επίπεδο εφαρμογής .....	27
2.4 Αρχιτεκτονικές δικτύου .....	27
2.4.1 Επίπεδη αρχιτεκτονική .....	28
2.4.2 Ιεραρχική αρχιτεκτονική .....	28
2.5 Κατανάλωση ενέργειας .....	29
2.5.1 Επικοινωνία .....	29

2.5.2 Επεξεργασία δεδομένων .....	30
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> –Εφαρμογές των WSNs.....	31
3.1 Στρατιωτικές εφαρμογές.....	31
3.1.1 Ιχνηλάτηση στρατιωτικών οχημάτων.....	31
3.1.2 Ανίχνευση ελεύθερων σκοπευτών.....	32
3.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές .....	32
3.2.1 Παρακολούθηση πτηνών.....	32
3.2.2 Ανίχνευση πλημμυρών.....	33
3.2.3 Ανίχνευση πυρκαγιάς.....	33
3.2.4 Έλεγχος κοπαδιού.....	33
3.2.5 Έλεγχος ποιότητας νερού και ανέμου.....	33
3.3 Εφαρμογές υγείας .....	34
3.3.1 Διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομείο .....	34
3.3.2 Τεχνητή όραση .....	34
3.3.3 Ιατρική Τήλε-παρακολούθηση.....	35
3.4 Άλλες εφαρμογές.....	35
3.4.1 Έξυπνο σπίτι.....	35
3.4.2 Έξυπνη διαχείριση αποθήκης.....	35
3.4.3 Παρακολούθηση αντοχής κτηρίων.....	36
3.4.4 Μελέτη καιρικών φαινομένων στον πλανήτη Άρη .....	36
3.4.5 Εικονικό πληκτρολόγιο.....	36
3.4.6 Έξυπνο παρκάρισμα.....	37
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> –Data Aggregation.....	38
4.1 Συνάρτηση συνάθροισης.....	38
4.1.1 Τι είναι η συνάρτηση συνάθροισης.....	38
4.1.2 Κλάσεις συναρτήσεων συνάθροισης.....	39
4.1.2.1 Μέση τιμή.....	39
4.1.2.2 Συνδυαστικές και διαζευκτικές συναρτήσεις.....	39
4.1.2.3 Συνδυασμός πολλών συναρτήσεων συνάθροισης.....	40
4.1.3 Επιλογή συνάρτησης συνάθροισης.....	40
4.2 Συνάθροιση Δεδομένων .....	41

4.2.1 Προκλήσεις στην συνάθροιση δεδομένων .....	42
4.2.2 Τεχνικές συνάθροισης δεδομένων .....	42
4.2.2.1 Ενεργειακά αποδοτική συνάθροιση δεδομένων .....	43
4.2.2.1.1 Συνάθροιση με χρησιμοποίηση απλών μαθηματικών ορών .....	43
4.2.2.1.2 Ένα ενεργειακά αποδοτικό σχήμα συνάθροισης.....	43
4.2.2.1.3 Μια αρχιτεκτονική συνάθροισης δεδομένων τεσσάρων επιπέδων .....	46
4.2.2.1.4 Μια ενεργειακά αποδοτική τεχνική(in network) συνάθροισης δεδομένων .....	48
4.2.2.2 Βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα συνάθροιση δεδομένων .....	51
4.2.2.3 Συναρτήσεις συνάθροισης περιορισμένες όσο αφορά την καθυστέρηση .....	54
4.2.2.4 Συναρτήσεις συνάθροισης με περιορισμό QoS.....	56
4.2.2.5 Συναρτήσεις συνάθροισης για απομακρυσμένα ερωτήματα .....	58
4.2.2.6 Συναρτήσεις συνάθροισης χωρίς κάποια δομή .....	59
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> - Μελέτη αλγορίθμου .....	62
5.1 Περιγραφή συστήματος υπό μελέτη.....	62
5.2 Περιγραφή αλγορίθμου.....	64
5.3 Περιγραφή ψευδοκώδικα .....	65
5.4 Διεξαγωγή Πειραμάτων .....	69
5.4.1 Περιγραφή μοντέλου πειράματος.....	70
5.4.2 Αποτελέσματα .....	71
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> - Επίλογος-Συμπεράσματα.....	78
Βιβλιογραφία .....	80

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> – Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή στα δίκτυα αισθητήρων

Η πρόσφατη πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες και στο τομέα της ηλεκτρονικής έχουν δώσει τη δυνατότητα της ανάπτυξης μικρού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας σε πολυλειτουργικούς κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι είναι μικροί σε μέγεθος και επικοινωνούν αυτόνομα (χωρίς την παρέμβαση ανθρώπου) μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Αυτοί οι μικροσκοπικοί κόμβοι αισθητήρων, αποτελούνται από ένα υποσύστημα αίσθησης, ένα υποσύστημα επεξεργασίας δεδομένων και ένα υποσύστημα επικοινωνίας. Τα δίκτυα αισθητήρων είναι μια εξέλιξη σε σχέση με τους παραδοσιακούς αισθητήρες.

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι αναπτύσσονται σε πυκνή κατανομή σε ένα χώρο, είτε μέσα στο πεδίο του φαινομένου που μελετάνε ή πολύ κοντά σε αυτό. Η θέση των κόμβων αισθητήρων δεν είναι υποχρεωτικό να έχει προσχεδιαστεί. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα τυχαίας κατανομής σε ένα μη προσπελάσιμο από άνθρωπο περιβάλλον ή σε μια επιχείρηση αντιμετώπισης καταστροφών. Από την άλλη πλευρά, αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι των δικτύων αισθητήρων είναι σκόπιμο να χαρακτηρίζονται από δυνατότητες αυτό-οργάνωσης. Ένα επιπλέον μοναδικό γνώρισμα των δικτύων αισθητήρων είναι η συνεργατική λειτουργία των κόμβων. Οι κομβίοι αισθητήρων διαθέτουν ένα ενσωματωμένο επεξεργαστή και αντί να στέλνουν τα δεδομένα σε άλλους κόμβους υπεύθυνους για τη συγχώνευση, χρησιμοποιούν την ικανότητα επεξεργασίας δεδομένων για να διασπάσουν και να μεταφέρουν μόνο τα δεδομένα που χρειάζονται ή τμήμα αυτών.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών για τα δίκτυα αισθητήρων. Μερικά πεδία εφαρμογών είναι η υγεία, ο στρατός και η οικία. Στα πλαίσια των στρατιωτικών εφαρμογών, η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης των κόμβων και η ανεκτικότητα σε σφάλματα έκανε τα δίκτυα αισθητήρων μια αρκετά υποσχόμενη τεχνική για στρατιωτική διοίκηση, έλεγχο, επικοινωνία, υπολογισμό, παρακολούθηση, αναγνώριση και σκόπευση. Στο τομέα της υγείας για παράδειγμα, οι κομβίοι αισθητήρων μπορούν να τοποθετηθούν για να παρακολουθούν τους ασθενείς και να βοηθούν τους ανθρώπους με ειδικές ανάγκες.

Για να υλοποιηθούν οι παραπάνω εφαρμογές αλλά και οι περαιτέρω εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων απαιτούνται τεχνικές ad hoc δικτύων. Παρόλο της σχετικής ομοιότητας των δικτύων τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι που έχουν προταθεί για τα παραδοσιακά ad hoc δίκτυα, δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα αισθητήρων εξαιτίας των μοναδικών χαρακτηριστικών και απαιτήσεων που έχουν τα δίκτυα αισθητήρων. Για περαιτέρω κατανόηση των διαφορών δίνονται περιληπτικά οι διαφορές μεταξύ αυτών των δικτύων:

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι πολλές φορές πιο μεγάλος από ότι σε ένα ad hoc δίκτυο.
- Η χωρική πυκνότητα των δικτύων αισθητήρων είναι συχνά μεγάλη.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι επιρρεπής στο γεγονός να καταστραφούν.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά.
- Οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν κυρίως επικοινωνία “broadcast” ενώ τα περισσότερα ad hoc δίκτυα βασίζονται στην επικοινωνία σημείου προς σημείο.
- Οι κόμβοι αισθητήρων διακρίνονται για τους σημαντικούς περιορισμούς που έχουν, από κατασκευής, στους τομείς της ενέργειας, της υπολογιστικής ισχύος και της μνήμης.
- Οι κόμβοι αισθητήρων συνήθως δεν έχουν κάποιο παγκόσμιο αναγνωριστικό (ID), εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους της επικεφαλίδας που απαιτεί μια τέτοια ιδιότητα, καθώς και του μεγάλου αριθμού των κόμβων

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSNs) αποτελούν, τα τελευταία χρόνια, μία περιοχή με μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα. Οι ιδιαιτερότητες αυτών των δικτύων καθιστούν τη μελέτη τους ξεχωριστή από τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων (όπως Ad – Hoc ή IEEE 802.11). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από μικρού μεγέθους κόμβους που έχουν περιορισμένη αυτονομία και υπολογιστικές δυνατότητες.

## 1.2 Στόχοι σχεδιασμού δικτύου αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων και οι απαιτήσεις των διαφορετικών εφαρμογών αποτελέσαν ένα κρίσιμο ζήτημα στο σχεδιασμό ενός δικτύου όσο αφορά στις ικανότητες και στην απόδοση του δικτύου. Οι κύριοι στόχοι σχεδιασμού ενός δικτύου είναι οι εξής:



- **Μικρό μέγεθος κόμβου:** Η μείωση του μεγέθους του κόμβου είναι ένας από τους κυρίους στόχους σχεδιασμού ενός δικτύου αισθητήρων. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι συνήθως τοποθετημένοι σε ένα δύσβατο ή εχθρικό περιβάλλον σε μεγάλο αριθμό. Μειώνοντας το μέγεθος του κόμβου διευκολύνεται η τοποθέτηση των κόμβων ενώ επίσης μειώνεται το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας.
- **Μικρό κόστος κόμβου:** Η μείωση του κόστους του κόμβου είναι ένας άλλος βασικός στόχος σχεδιασμού δικτύου αισθητήρων. Λόγω του ότι οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι σε μεγάλο αριθμό σε δύσβατα σημεία ή σε εχθρικά περιβάλλοντα δεν μπορούν σε περίπτωση βλάβης να ξανά-χρησιμοποιηθούν. Στα πλαίσια αυτά, είναι σημαντικό να μειώσουμε το κόστος καθενός από τους κόμβους ώστε να είναι χαμηλό το κόστος όλου του δικτύου.
- **Μικρή κατανάλωση ενέργειας:** Η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού ενός τέτοιου δικτύου. Δεδομένου ότι οι κόμβοι αισθητήρων παίρνουν ενέργεια από τις μπαταρίες που διαθέτουν, είναι αρκετά δύσκολο, έως ακατόρθωτο, να αλλάξουμε ή να επαναφορτίσουμε τις μπαταρίες στους κόμβους που είναι τοποθετημένοι. Επίσης, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι με τη μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας μεγαλώνει η διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων.
- **Αυτό-διαμόρφωση:** Στα δίκτυα αισθητήρων οι αισθητήρες τοποθετούνται στο πεδίο που μελετάμε χωρίς περαιτέρω σχεδιασμό ή προσύμφωνια. Όταν τοποθετηθεί ένας κόμβος, αυτός πρέπει αυτόματα να οργανωθεί με τους υπολοίπους δημιουργώντας ένα δίκτυο επικοινωνίας. Επιπρόσθετα, σε αλλαγή τοπολογίας πρέπει να είναι σε θέση να επαναπροσαρμοστεί σε σχέση με τους υπολοίπους και ένα επανέρθει σε επικοινωνία.
- **Κλιμάκωση:** Τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να αποτελούνται από μερικές δεκάδες, εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κόμβους. Το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στα πρωτοκόλλα δικτύου ούτως ώστε να υποστηρίξουν μια μεγάλη γκάμα μεγέθους δικτύων.
- **Προσαρμοστικότητα:** Στα δίκτυα αισθητήρων ένας αισθητήρας μπορεί να παρουσιάσει μια βλάβη, να εισέλθει στο δίκτυο ή ακόμα και να μετακινηθεί. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου και της

κατανομής πυκνότητας των κόμβων. Τα πρωτόκολλα δικτύου πρέπει να είναι σχεδιασμένα για κάποιο τέτοιο γεγονός και να προσαρμόζονται στις αλλαγές.

- **Αξιοπιστία:** Για πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο το γεγονός της αξιόπιστης αποστολής δεδομένων, δεδομένου του θορύβου, της πιθανότητας λάθους και του συγχρονισμού του ασύρματου καναλιού. Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις αυτές χρειάζεται τα πρωτόκολλα δικτύου να είναι σχεδιασμένα ώστε να παρέχουν έλεγχο σφάλματος και μηχανισμούς διόρθωσής τους ώστε να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία μετάδοσης δεδομένων.
- **Ανεκτικότητα σε σφάλματα:** Οι κομβίοι αισθητήρων είναι επιρρεπής σε σφάλματα λόγω της τυχαίας τοποθέτησής τους και της μη επιτήρησης. Για αυτό πρέπει οι κομβίοι να είναι ανεκτικοί σε σφάλματα και να έχουν μηχανισμούς αυτό-ελέγχου, αυτό-συντονισμού, αυτό-διόρθωσης και αυτό-επαναφοράς.
- **Ασφάλεια:** Σε αρκετές εφαρμογές στρατιωτικού χαρακτήρα, οι κόμβοι αισθητήρων είναι τοποθετημένοι σε εχθρικό περιβάλλον και για αυτό είναι ευάλωτοι σε επιθέσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι σκόπιμο να υπάρχουν στο δίκτυο αποτελεσματικοί μηχανισμοί ασφάλειας που θα αποτρέψουν πιθανές επιθετικές ενέργειες.
- **Ωφελιμότητα Καναλιού:** Τα δίκτυα αισθητήρων διαθέτουν περιορισμένο εύρος ζώνης (bandwidth) και για αυτό τα πρωτόκολλα επικοινωνίας πρέπει να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το εύρος ώστε να βελτιώνουν την ωφελιμότητα του καναλιού.
- **QoS(quality of service) :** Στα δίκτυα αισθητήρων διαφορετικές εφαρμογές έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS αναφορικά με την καθυστέρηση παράδοσης και το χάσιμο πακέτων. Για παράδειγμα, μια εφαρμογή παρακολούθησης φωτιάς είναι ευαίσθητη στη καθυστέρηση μετάδοσης (ώστε να είναι αποτελεσματική) και για αυτό χρειάζεται δεδομένα με χρονοσφραγίδες.

Η δημιουργία δικτύου αισθητήρων γίνεται με βάση κάποια εφαρμογή. Έτσι, είναι πρακτικά αδύνατο να ληφθούν υπόψη όλοι αυτοί οι στόχοι σε μια εφαρμογή. Κάθε εφαρμογή θα λαμβάνει υπόψη της ένα μέρος αυτών των στόχων.

### 1.3 Προκλήσεις σχεδιασμού δικτύου αισθητήρων

Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων, τα οποία αναφέραμε παραπάνω, παρουσιάζουν αρκετές προκλήσεις στο σχεδιασμό τους. Κάποιες από τις προκλήσεις αυτές είναι:

- **Περιορισμένη Ενεργειακή χωρητικότητα.** Οι αισθητήρες αντλούν ενέργεια από τις μπαταρίες που διαθέτουν με αποτέλεσμα αυτό να μας περιορίζει στη διάρκεια ζωής ενός κόμβου. Ο περιορισμός αυτός είναι σκόπιμο να γίνει κατανοητός ώστε να δημιουργηθούν ενεργειακά αποδοτικά πρωτοκόλλα.
- **Περιορισμένα Αποθέματα Υλικού.** Οι κομβοί αισθητήρων έχουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ αλλά και χωρητικότητα δίσκου. Για τον λόγο αυτό έχουν περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες. Οι περιορισμοί στο τομέα του υλικού παρουσιάζουν αρκετές προκλήσεις στο σχεδιασμό του software και στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων δικτύου, καθώς, πέρα από το περιορισμό στην κατανάλωση ενέργειας, έχουμε και την περιορισμένη υπολογιστική ισχύ κάθε κόμβου.
- **Καθολική και τυχαία τοποθέτηση.** Τα περισσότερα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό δεκάδων η και εκατοντάδων αισθητήρων. Η τοποθέτηση τους σχετίζεται κυρίως με την εφαρμογή που υλοποιούν η οποία μπορεί να είναι τυχαία ή προσυμφωνημένη. Επιπρόσθετα, δύναται να είναι σε εχθρικό ή σε δύσβατο περιβάλλον. Οι κόμβοι αισθητήρων πρέπει αφού τοποθετηθούν να αυτό-οργανωθούν σε ένα δίκτυο και να εδραιώσουν επικοινωνία προτού ξεκινήσουν την ανίχνευση.
- **Δυναμικό και μη αξιόπιστο περιβάλλον.** Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να λειτουργεί σε ένα δυναμικό και μη αξιόπιστο περιβάλλον. Από την μια πλευρά μπορεί η τοπολογία ενός δικτύου να δέχεται συχνές αλλαγές, λόγω της δυσλειτουργίας ενός κόμβου, των προσθέσεων νέων κόμβων, της βλάβη κάποιου κόμβου ή και λόγω πιθανής εξάντλησης του αποθέματος ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, λόγω της ασύρματης επικοινωνίας, μπορεί να αντιμετωπίσουμε προβλήματα θορύβου, χαμένα πακέτα και προβλήματα συγχρονισμού στο κανάλι επικοινωνίας. Η συνδεσιμότητα του δικτύου είναι πιθανό να διακοπεί λόγω φαινομένων διαλείψεων στο κανάλι ή και εξασθένησης σήματος.
- **Διαφορετικότητα εφαρμογών.** Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να υλοποιήσουν ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών εφαρμογών. Οι απαιτήσεις κάθε εφαρμογής

μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις απαιτήσεις μια άλλης. Κανένα πρωτόκολλο δεν μπορεί να δημιουργηθεί και να είναι για όλες τις εφαρμογές εκατό τις εκατό ακριβές.

## 1.4 Τεχνολογικό υπόβαθρο

Η φιλοσοφία των WSN (ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων) αρχικά είχε πρωτοειπωθεί τριάντα χρόνια πριν. Τότε, το εν λόγω σενάριο υπήρξε περισσότερο ένα όραμα παρά μια τεχνολογία, η οποία θα μπορούσε καθολικά να χρησιμοποιηθεί λόγω των πολλών δυνατοτήτων της. Το παραπάνω είχε ως αποτέλεσμα να περιοριστούν τα εν λόγω δίκτυα στις στρατιωτικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά, πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις σε MEMS (μικρό-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων), στο τομέα της ασύρματης επικοινωνίας και στην κατασκευή χαμηλού κόστους τεχνολογιών έχουν καταστήσει εφικτό το γεγονός της δημιουργίας μικροσκοπικών, φθηνών και έξυπνων αισθητήρων με δυνατότητες ανίχνευσης, υπολογισμού και επικοινωνίας, οι οποίοι με τη σειρά τους κατέστησαν εφικτό τη δημιουργία ολόκληρων δικτύων από αισθητήρες και χιλιάδων εφαρμογών.

### 1.4.1 Τεχνολογία MEMS

Η τεχνολογία MEMS αποτελεί κύριο συστατικό στη δημιουργία μικροσκοπικών, χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας κόμβων αισθητήρων. Βασίζετε σε μικρό-μηχανικές τεχνικές, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί για τη κατασκευή μικρής-κλίμακας μηχανικών εξαρτημάτων, τα οποία ελέγχονται ηλεκτρικά. Διαμέσου υψηλού επιπέδου ολοκληρωμένων διαδικασιών, αυτά τα ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα μπορούν να κατασκευαστούν εργοστασιακά με την βοήθεια μικροηλεκτρονικών ολοκληρωμένων συστημάτων. Υπάρχουν διαφορετικές μικρό-μηχανικές τεχνικές, για παράδειγμα, όσο αφορά τον όγκο, όσο αφορά την επιφάνεια ή την διάσταση, λόγω των οποίων για κάθε μια μέθοδο χρησιμοποιείτε διαφορετική κατασκευαστική διαδικασία. Οι περισσότερες μικρό-μηχανικές διαδικασίες ξεκινούν με ένα υπόστρωμα πάχους 100-100μm, όπου συνήθως είναι από σιλικόνη, ή κάποιο άλλο ημιαγώγιμο υλικό στο οποίο έχουν γίνει ένας αριθμός από ημίχρονα στάδια, για παράδειγμα, εικονολιθογραφία, οξειδωση, ηλεκτρόλυση, ταιριάσματος και υδρο-δεσμών. Διαφορετικές διαδικασίες συμπεριλαμβάνουν διαφορετικά συγκεκριμένα στάδια. Με την ενσωμάτωση διαφορετικών εξαρτημάτων

σε ένα σύστημα, το μέγεθος ενός κόμβου αισθητήρα μειώνετε σημαντικά. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος αποτελούν οι διαδικασίες που ενσωματώνουν σε CMOS τρανζίστορ μικρό-μηχανικές δυνατότητες. Χρησιμοποιώντας τη τεχνολογία MEMS, σε πολλά εξαρτήματα του κόμβου των αισθητήρων μπορεί το μέγεθος τους να ελαχιστοποιηθεί κατά πολύ, για παράδειγμα, οι αισθητήρες, τα στρώματα επικοινωνίας και η μονάδα παροχής ρεύματος οποία με την σειρά της οδηγεί σε περαιτέρω μείωση σε κόστος και σε κατανάλωση ενέργειας.

### 1.4.2 Τεχνολογία Ασύρματης επικοινωνίας

Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι μια τεχνολογία-κλειδί για τη λειτουργία των δικτύων αισθητήρων. Στο φυσικό επίπεδο, μια ποικιλία σχεδιασμών, συγχρονισμού και τεχνικές κεραίας έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικά σενάρια εφαρμογών. Σε υψηλότερα επίπεδα, αποδοτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας έχουν δημιουργηθεί ώστε να δίνουν λύση σε πολλά προβλήματα δικτύων. Τέτοια παραδείγματα είναι τα προβλήματα διευθυνσιοδότησης, QoS και τα προβλήματα δρομολόγησης και ασφάλειας. Αυτές οι τεχνικές επικοινωνίας και τα πρωτόκολλα αποτελούν ένα πλούσιο υπόβαθρο για το σχεδιασμό της ασύρματης επικοινωνίας σε WSNs.

Σήμερα, τα πιο εξελιγμένα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν την τεχνολογία των ραδιοσυχνοτήτων (RF) για τη επικοινωνία, συμπεριλαμβάνοντας και μικροκύματα. Ο κύριος λόγος χρησιμοποίησης των ραδιοσυχνοτήτων είναι το ότι δεν χρειάζονται line of sight (LoS) και παρέχουν ομοιο-κατευθυντικές ζεύξεις. Παρόλα αυτά, οι ραδιοσυχνότητες έχουν και ορισμένους περιορισμούς, για παράδειγμα τις μεγάλες εστίες εκπομπών και τις χαμηλές ικανότητες μετάδοσης, οι οποίες καταστούν το RF όχι την καλύτερη λύση για επικοινωνία για μικροσκοπικούς ενεργειακά περιορισμένους κόμβους αισθητήρων.

Μια άλλη πιθανή λύση για την επικοινωνία είναι η ελεύθερου χώρου οπτική επικοινωνία, η οποία έχει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την επικοινωνία με RF. Για παράδειγμα, η οπτική επικοινωνία παρέχει μεγάλο κέρδος κεραίας, στοιχείο που οδηγεί σε υψηλές ικανότητες μετάδοσης. Η υψηλή ικανότητα κατεύθυνσης της οπτικής επικοινωνίας μας δίνει δυνατότητα χρησιμοποίησης του SDMA (spatial division multiple access), το οποίο δεν έχει επιπλέον επιβαρύνσεις στην επικοινωνία ενώ έχει τη δυνατότητα να είναι ενεργειακά πιο αποδοτικό από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο RF (TDMA, CDMA, FDMA). Παρόλα αυτά, η οπτική

επικοινωνία χρειάζεται LoS και ακριβής δεικτοδότηση για μετάδοση δεδομένων, γεγονός που περιορίζει τη χρησιμότητα σε πολλά δίκτυα αισθητήρων.

Από την άλλη πλευρά, τα περισσότερα πρωτόκολλα για συμβατικά ασύρματα δίκτυα, για παράδειγμα, τα κυψελοειδή δίκτυα, τα WLANS και τα MANET δεν χαρακτηρίζονται από τις μοναδικές ιδιότητες των δικτύων αισθητήρων. Για αυτό το λόγο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς κάποια τροποποίηση.

### **1.4.3 Σύγκριση “Ad-Hoc” Δικτύων και Δικτύων Αισθητήρων**

Τόσο τα δίκτυα «κατ’ απαίτηση» όσο και τα δίκτυα αισθητήρων είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ασύρματα δίκτυα. Η εξάπλωση του Internet τα τελευταία χρόνια υπήρξε ραγδαία. Ο βασικός τρόπος πρόσβασης είναι είτε με καλώδιο ή οπτική ίνα. Παρόλα αυτά, όμως, ένα όλο και αυξανόμενο κοινό απαιτεί πλέον κινητή, αδιάλειπτη σύνδεση είτε βρίσκεται στη δουλειά, στο σπίτι ή στο δρόμο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διάφορων τεχνολογιών και πρωτοκόλλων που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια και με τα οποία είναι εξοπλισμένες πλέον οι περισσότερες μικρές συσκευές χειρός (κινητά τηλέφωνα, PDA, mp3 players κ.α.) καθώς και το σύνολο των φορητών υπολογιστών.

Όταν ο σκοπός είναι η σύνδεση στο Internet ή γενικότερα σε κάποιο σταθερό σταθμό βάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ήδη υπάρχουσα υποδομή δικτύου για την πραγματοποίηση της σύνδεσης και οι περιπτώσεις αυτές συνήθως έχουν απλή υλοποίηση. Το ίδιο συμβαίνει όταν έχουμε σύνδεση μεταξύ δύο και μόνο συσκευών. Στην περίπτωση, όμως, που μία ομάδα χρηστών θέλει να επικοινωνήσει με μοναδικό μέσο μέσω των φορητών συσκευών που διαθέτει χωρίς τη χρήση κάποιας υπάρχουσας υποδομής, απαιτείται ένα νέο σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας ώστε να επιτευχθεί η επικοινωνία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του “ad – hoc” δικτύου.

Μια άλλη κατηγορία ασύρματου δικτύου, η οποία φαίνεται να κερδίζει συνεχώς έδαφος και αφορά στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται, είναι το δίκτυο αισθητήρων. Και σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται μόνο η ασύρματη υλοποίηση, καθώς ενσύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν υλοποιούνται, τουλάχιστον όχι με την κλασική έννοια του όρου δίκτυα. Οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις ενσύρματων αισθητήρων χρησιμοποιούν στην πλειονότητά τους ηλεκτρικά μεγέθη για τη μεταφορά των μετρήσεων στο σταθμό βάσης, χωρίς τη χρήση δικτυακού πρωτοκόλλου, αλλά κυρίως με τη χρήση βιομηχανικών προτύπων μεταφοράς



δεδομένων. Ευρεία εφαρμογή έχει το πρότυπο 4 – 20mA, το οποίο εκμεταλλεύεται ηλεκτρικές ιδιότητες για τη μεταφορά των μετρήσεων στο σταθμό βάσης. Στην περίπτωση, όμως, όπου πρέπει να ικανοποιηθεί ασύρματη μεταφορά μετρήσεων και επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου αισθητήρων μεταξύ τους και όχι μόνο με το σταθμό βάσης, απαιτείται ειδική αντιμετώπιση. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα σύνολο πρωτοκόλλων και τεχνολογιών ώστε να γίνει εφικτή η παραπάνω επικοινωνία, τα οποία θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Κάθε δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών. Τέτοια είναι το μέγεθος του δικτύου (αριθμός κόμβων), το είδος των κόμβων, ο χώρος που καταλαμβάνει, η τοπολογία του, το μέσο μετάδοσης και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε τα δίκτυα «κατ' απαίτηση» και τα δίκτυα αισθητήρων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά αυτά. Και στα δύο είδη δικτύων που εξετάζουμε το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι κυριότερες διαφορές των δικτύων αυτών, που αν και είναι και τα δύο ασύρματα και έχουν σκοπό τη διασύνδεση πολλών συσκευών, διαφέρουν, ωστόσο, σε όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά.

<b>Ad – hoc Δίκτυα</b>	<b>Δίκτυα Αισθητήρων</b>
Δεν έχουν συμπεριφορά μετρητικής διάταξης και η επικοινωνία καθορίζεται από τις ανάγκες των εφαρμογών.	Οι κόμβοι κάνουν μετρήσεις στο περιβάλλον, και γεγονότα που συμβαίνουν σ' αυτό μπορούν να ενεργοποιήσουν συγκεκριμένη μεταφορά δεδομένων στο δίκτυο.
Οι κόμβοι είναι πολλών και διαφόρων μεγεθών.	Οι κόμβοι είναι συνήθως μικροί σε μέγεθος και όμοιοι.
Ανανεώσιμες και μεγαλύτερες πηγές ενέργειας.	Πηγές ενέργειας περιορισμένης αντοχής.
Σχετικά ακριβοί κόμβοι.	Σχετικά φθηνοί κόμβοι.
Δυνατότητα εύρεσης και αποκατάστασης σφαλμάτων και αλλαγής μπαταρίας.	Οι κόμβοι μπορεί να τοποθετηθούν και να μείνουν χωρίς επιτήρηση ή συντήρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα.
Ο χρόνος ζωής των κόμβων δεν εξαρτάται από τη διάρκεια της μπαταρίας αφού αυτή αντικαθίσταται εύκολα.	Ο χρόνος ζωής των κόμβων εξαρτάται από τη χρήση.
Μικρή πυκνότητα κόμβων.	Μεγάλη πυκνότητα κόμβων.
Περιοχή μετάδοσης που φτάνει τα 500μ.	Περιοχή μετάδοσης που δεν ξεπερνά τα 30μ.
Ισχυρή υπολογιστική ισχύς και μεγάλη μνήμη.	Μικρή υπολογιστική ισχύς και περιορισμένη μνήμη.
Οι κόμβοι επικοινωνίας με το δίκτυο σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης.	Οι κόμβοι μπορεί να μην έχουν καμία δραστηριότητα για μεγάλο χρονικό

	διάστημα.
Η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων όταν απαιτηθεί από τους χρήστες.	Η επικοινωνία βασίζεται στα δεδομένα.
Συνεχόμενη ροή πληροφορίας.	Μικρή ροή κυκλοφορίας, κυρίως κατά την εμφάνιση συγκεκριμένων γεγονότων.
Μεγάλο εύρος ζώνης	Εύρος ζώνης που δεν ξεπερνά τα 100Kbs.
Η λειτουργία του δικτύου είναι ίδια για όλες τις εφαρμογές.	Η λειτουργία του δικτύου καθορίζεται από την εργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί

*Εικόνα 1*

#### 1.4.4 Πλατφόρμες software και hardware

Η ανάπτυξη των δικτύων αισθητήρων εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα των χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας software και hardware πλατφορμών. Με τη τεχνολογία MEMS το μέγεθος και το κόστος ενός αισθητήρα έχει μειωθεί δραματικά. Για να επιτευχθεί η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο κόμβου αισθητήρα, είναι απαραίτητο να ενσωματωθεί μηχανισμός ενεργειακής επίγνωσης και να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας στο σχεδιασμό του hardware. Χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης κυκλώματα και κατάλληλος σχεδιασμός μας έχει δώσει τη δυνατότητα να μπορούμε να κατασκευάζουμε ιδιαίτερα χαμηλής κατανάλωσης εξαρτήματα, όπως μικροεπεξεργαστές.

Παράλληλα η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί περαιτέρω μέσω μια ενεργειακά αποδοτικής μεθόδου, η οποία χρησιμοποιεί τεχνικές δυναμικής διαχείρισης της ενέργειας (DPM). Για παράδειγμα, μια συνήθης μέθοδο DPM είναι εκείνη που απενεργοποιεί τμήματα που βρίσκονται σε κατάσταση idle ή τα βάζει σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας όταν δεν υπάρχει κάτι να επεξεργαστούν. Επιπρόσθετα, επιπλέον ενέργεια μπορεί να εξοικονομηθεί χρησιμοποιώντας στην ενεργή κατάσταση του κυκλώματος δυναμική κλιμάκωση τάσης (DVS). Έχει αποδειχθεί ότι η διαχείριση ενέργειας μέσω DVS είναι ενεργειακά πιο αποδοτική σε σχέση με την προαναφερθείσα τεχνική της απενεργοποίησης.

Από την άλλη πλευρά, κέρδος στην ενεργεία μπορεί να έχουμε αν χρησιμοποιήσουμε ένα ενεργειακά αποδοτικό software. Στον πυρήνα ενός λειτουργικού συστήματος είναι ένας προγραμματιστής ενεργειών, ο οποίος είναι



υπεύθυνος για το προγραμματισμό εργασιών κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς χρόνου. Η διάρκεια ζωής ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να μεγιστοποιηθεί εάν έχει ενσωματωθεί στον μηχανισμό προγραμματισμού διεργασιών ενεργειακή επίγνωση.

#### 1.4.4.1 Λειτουργικό σύστημα

Τα λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούν οι κόμβοι των δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων είναι λιγότερο πολύπλοκα από τα λειτουργικά συστήματα γενικής χρήσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω των περιορισμών ενέργειας και πόρων που έχουν οι αισθητήρες, πρέπει το λειτουργικό τους σύστημα να είναι φτιαγμένο πάνω στις ανάγκες και τις δυνατότητες τους.

Το TinyOS είναι ένα λειτουργικό σύστημα που σχεδιάστηκε αποκλειστικά για δίκτυα αισθητήρων. Σε αντίθεση με άλλα λειτουργικά συστήματα, το TinyOS βασίζεται σε event-driven προγραμματισμό (οδηγημένο από γεγονότα). Όταν συμβεί ένα εξωτερικό event, όπως είναι ένα εισερχόμενο πακέτο δεδομένων ή έρθει μια νέα μέτρηση στον αισθητήρα, το TinyOS καλεί τον κατάλληλο event handler για να χειριστεί το event. Το σύστημα του TinyOS και τα προγράμματά του είναι γραμμένα στη γλώσσα nesC, που αποτελεί μια επέκταση της C.

Άλλα λειτουργικά συστήματα είναι τα Condiki, MANTIS, BTnut, SOS και Nano-RK. Το Contiki είναι επίσης event-driven, όπως το TinyOS, υποστηρίζει όμως και multithreading στις εφαρμογές του. Επίσης event-driven είναι και το SOS, το οποίο ξεχωρίζει για τη δυνατότητα φόρτωσης νέων modules-ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποτελείται από πολλά μικρά modules. Το MANTIS και το Nano-RK χρησιμοποιούν αποκλειστικά multithreading, όπως και το BTnut.

#### 1.4.4.2 Hardware

Στη συνέχεια, θα αναφέρουμε ενδεικτικά τρεις από τις διάφορες ομάδες πλατφορμών hardware:

- **Τα επαυξημένα γενικής χρήσης υπολογιστικά συστήματα.** Αυτός ο τύπος πλατφορμών περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών ενσωματωμένων PCs (πχ PC104) και PDAs.
- **Οι αφωσιωμενοι κόμβοι αισθητήρων.** Αυτή η κατηγορία πλατφορμών περιλαμβάνει τους μικροσκοπικούς αισθητήρες Berkley, τους UCLA Medusa και του MIT mAMP.

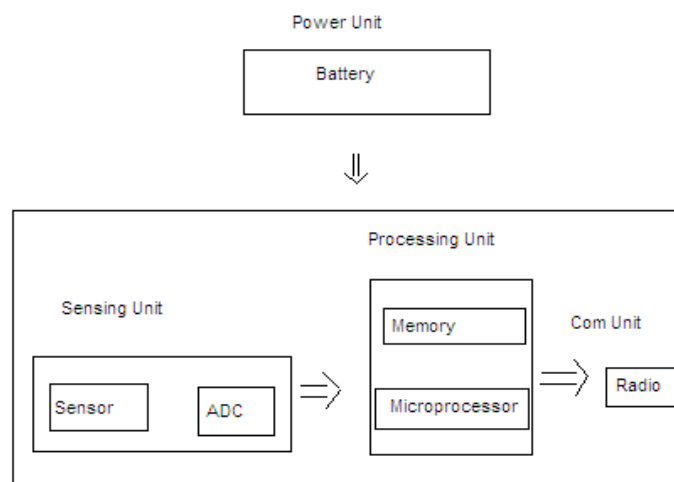
- **Τα συστήματα -σε -τσιπ κόμβων αισθητήρων.** Αυτή η οικογένεια περιλαμβάνει τους αισθητήρες smartdust και τους BWRC PicoNode.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Χαρακτηριστικά των WSNs

### 2.1 Δομή αισθητήρα

Ένας αισθητήρας αποτελείται από τέσσερα βασικά εξαρτήματα: τη μονάδα ανίχνευσης, τη μονάδα επεξεργασίας, τη μονάδα επικοινωνίας και τη μονάδα παροχής ενέργειας. Η μονάδα ανίχνευσης αποτελείται συνήθως από έναν ή περισσότερους αισθητήρες και από έναν μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (ADC). Οι αισθητήρες παρατηρούν ένα φυσικό φαινόμενο και παράγουν αναλογικά σήματα που είναι βασισμένα στα φαινόμενα που παρατηρούν.

Ο ADC μετατροπέας, αφού κάνει τη μετατροπή σήματος, στέλνει τα αποτελέσματα στη μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα επεξεργασίας αποτελείται από ένα μικροεπεξεργαστή μαζί με κάποια μνήμη. Η μονάδα επικοινωνίας αποτελείται από μια μικρής εμβέλειας ραδιοσυχνότητα για μεταφορά δεδομένων αλλά και λήψη αυτών. Η μονάδα παροχής ενέργειας αποτελείται από μια μπαταρία για τη παροχή ρεύματος ώστε να λειτουργούν τα υπόλοιπα τμήματα. Επιπλέον, ένας κόμβος αισθητήρα μπορεί να είναι εξοπλισμένος με κάποιες άλλες μονάδες εξαρτώμενες φυσικά από τη λειτουργία του. Για παράδειγμα, αν η εφαρμογή περιλαμβάνει γεωγραφική θέση θα μπορούσαμε να προσθέσουμε GPS στους κόμβους. Οτιδήποτε προσθέσουμε θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο σε μικρή κλίμακα και με γνώμονα το ελάχιστο κόστος και την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 2

## 2.2 Τύποι αισθητήρα

Από τους διάφορους τύπους αισθητήρων που κυκλοφορούν θα μπορούσαμε να ξεχωρίσουμε δυο, τους Motes από την Crossbow και τους αισθητήρες της Micro strain.

Οι αισθητήρες Motes είναι ίσως οι πιο ευέλικτοι ασύρματοι αισθητήρες που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή, με επεξεργαστή MPR2400, βασισμένο στον ATMEL ATmega128L. Έχουν θύρα επέκτασης για σύνδεση με αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας, βαρομετρικής πίεσης, επιτάχυνσης και άλλους αισθητήρες της ίδιας εταιρίας. Έτσι, καθίστανται κατάλληλοι για δίκτυα επιτήρησης. Το μικρό τους μέγεθος και η περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας επιτρέπουν την τοποθέτησή τους σε όλα τα πιθανά σημεία. Όλοι οι κομβοί μπορούν να λειτουργήσουν ως σταθμοί βάσης, οπότε αυτό δίνει στο δίκτυο τη δυνατότητα να αυτοδιαμορφωθεί και να έχει multihop δυνατότητες δρομολόγησης. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 2,4 GHz, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 250Kbits/sec και εμβέλεια από 20 μέχρι 100 μέτρα. Κάθε κόμβος αποτελείται από μικροεπεξεργαστή, μια μνήμη flash μεγέθους 128Kb και μνήμη EEPROM των 4Kb. Το λειτουργικό σύστημα είναι το TinyOS, ενώ προγραμματίζονται με γλώσσα NesC.

Το σύστημα μέτρησης Microstrain διακρίνεται για την ευκολία που παρουσιάζει στον προγραμματισμό και τη λειτουργία του. Η συχνότητα που χρησιμοποιεί είναι τα 2,4 GHz. Οι κομβοί είναι πολυκάναλοι, με κάθε ασύρματο κόμβο να υποστηρίζει μέχρι οχτώ αισθητήρες. Υπάρχουν τρεις τύποι κόμβων: SG-link (μετρητής τάνυσης), G-link (μετρητής επιτάχυνσης), V-link (υποστηρίζει αισθητήρες που δίνουν σήμα τάσης) και TC-link (μέτρηση θερμοκρασίας). Οι κομβοί διαθέτουν προγραμματισμένη μνήμη EEPROM, οπότε δεν απαιτείται ιδιαίτερος προγραμματισμός από το χρήστη. Ο χώρος που προσφέρεται για αποθήκευση δεδομένων είναι 2MB. Οι εν λόγω κόμβοι τροφοδοτούνται με εσωτερική μπαταρία λιθίου 3,6V, ενώ υποστηρίζεται και η τροφοδοσία τους με εξωτερική επαναφορτιζόμενη μπαταρία 9V. Κάθε κόμβος έχει μια μοναδική διεύθυνση(16-bit), οπότε ο σταθμός βάσης μπορεί να υποστηρίξει  $2^{16}$  κόμβους. Η RF σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και των κόμβων είναι αμφίδρομη, με εμβέλεια εβδομήντα μέτρων και μετάδοση δεδομένων 19200 bps.

Παρακάτω παραθέτουμε απεικονίσεις του αισθητήρα micAZ 2,4Ghz (εικόνα 3) και του αισθητήρα SG-link (εικόνα 4).



*Εικόνα 3 (Αισθητήρας micAZ 2,4Gh)*



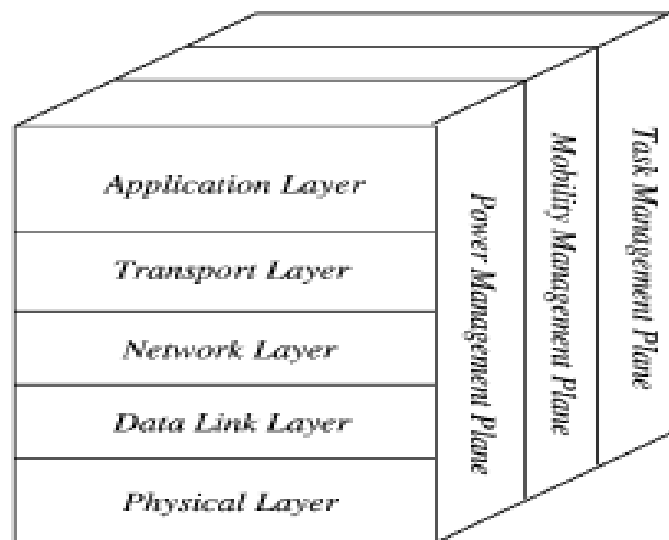
*Εικόνα 4 (Αισθητήρας SG-link)*

### **2.3 Δομή στοίβας πρωτοκόλλων για WSNs**

Οι στοίβα πρωτοκόλλων για τα δίκτυα αισθητήρων αποτελείται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, από το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο δεδομένων, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο μεταφοράς, το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο διαχείρισης ισχύς, το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας και το επίπεδο διαχείρισης ασχολιών. Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την εύρωστη εναρμόνιση των τεχνικών παραλαβής και αποστολής. Εφόσον το περιβάλλον είναι θορυβώδες και οι αισθητήρες πολλές φορές μετακινούνται, το πρωτόκολλο Mac πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικά σχεδιασμένο και ικανό να λύσει οποιαδήποτε σύγκρουση

μετάδοσης γειτονών. Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση των δεδομένων. Το επίπεδο μεταφοράς είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση της ροής των δεδομένων εφόσον η εφαρμογή το χρειάζεται. Επιπρόσθετα, τα επίπεδα διαχείρισης ενέργειας, κίνησης και εργασιών είναι υπεύθυνα για την κατανάλωση ενέργειας, για την κίνηση και το διαμοιρασμό των εργασιών αντίστοιχα.

Το επίπεδο διαχείρισης ενέργειας διαχειρίζεται τα ενεργειακά αποθέματα του κόμβου. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να απενεργοποιήσει το δέκτη του μετά από την παραλαβή ενός μηνύματος από ένα γείτονα. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να αποφύγει τα διπλά μηνύματα ή όταν τα ενεργειακά αποθέματα είναι χαμηλά. Το επίπεδο κίνησης ανιχνεύει και καταχωρεί την κίνηση των κόμβων ώστε να κρατιέται πάντα η πληροφορία δρομολόγησης πίσω στο χρήστη και ο αισθητήρας να γνωρίζει πάντα τους γείτονές του. Το επίπεδο διαχείρισης εργασιών μοιράζει τις εργασίες στους κόμβους ανάλογα με τη θέση τους, τα ενεργειακά τους αποθέματα και τη γειτονιά τους. Αυτά τα τρία επίπεδα διαχείρισης χρθεωρούνται απαραίτητα προκειμένου οι κομβοί να λειτουργούν μεταξύ τους με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και να μοιράζονται τα δεδομένα με εγγύηση.



Εικόνα 5

### 2.3.1 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την επιλογή συχνότητας, τη δημιουργία συχνότητας μεταφοράς, τον εντοπισμό σήματος τη διαμόρφωση και κωδικοποίηση πληροφορίας. Μέχρι στιγμής, τα 915MHz έχουν ευρέως αποδεχτεί για εφαρμογές

δικτύων αισθητήρων. Η παραγωγή συχνοτήτων και η ανίχνευση σημάτων σχετίζονται περισσότερο με το υλικό και το σχεδιασμό του δεκτη. Είναι ευρέως αποδεκτό το ότι μεγάλης απόστασης ασύρματες επικοινωνίες είναι αρκετά κοστοβόρες, αναφορικά με την ενέργεια και τη δυσκολία υλοποίησης. Κατά το σχεδιασμό του εν λόγω επιπέδου οφείλουμε να λαμβάνουμε περισσότερο υπόψιν μας την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και λιγότερο τα φαινόμενα διαλείψεων και καθυστέρησης μετάδοσης. Γενικά, το ελάχιστο ποσό ενέργειας που χρειάζεται για τη μετάδοση ενός σήματος σε μια απόσταση  $d$  είναι της τάξης του  $d^n$ , όπου το  $n$  είναι  $2 \leq n < 4$ . Ο εκθέτης είναι συνήθως 4 για χαμηλές κεραιές και κανάλια κοντά στο έδαφος.

Το παραπάνω οφείλεται στη μερική ακύρωση σήματος από ανακλώμενες ακτίνες στο έδαφος. Διάφορες μετρήσεις έχουν δείξει ότι η ενέργεια μειώνεται λιγότερο με εκθέτη μεγαλύτερο σε μικρότερες αποστάσεις για χαμηλού ύψους κεραιές. Ένας σχεδιαστής είναι σκόπιμο να σέβεται και την κατανομή που σχηματίζουν οι κομβίοι, για παράδειγμα, οι επικοινωνίες multihop σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορούν να ξεπεράσουν φαινόμενα shadowing και path loss effects, εάν η κατανομή των κόμβων είναι πυκνή.

Ένα καλό σχήμα διαμόρφωσης είναι κρίσιμος παράγοντας για την επικοινωνία σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Υπάρχουν δύο τεχνικές διαμόρφωσης, η δυαδική και η M-δική. Η τεχνική διαμόρφωσης M-ary μειώνει το χρόνο μετάδοσης στέλλοντας πολλαπλά bit για κάθε σύμβολο, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Η δυαδική διαμόρφωση είναι πιο ενεργειακά αποδοτική.

### **2.3.2 Επίπεδο δεδομένων**

Το επίπεδο δεδομένων είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία ροής δεδομένων, για τη δημιουργία πλαισίων δεδομένων και ανίχνευσής τους, medium access, και για τον έλεγχο λάθους ώστε να παρέχει αξιόπιστη επικοινωνία σε σημείο προς σημείο ή σημείο προς πολλά σημεία μετάδοσης. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι το MAC (medium access control). Ο βασικός σκοπός του MAC είναι να μοιράσει δίκαια και αποδοτικά τους πόρους επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους αισθητήρων και να δημιουργήσει μια αποδοτική υποδομή δικτύου, όσο αφορά στην ενεργειακή κατανάλωση. Παρόλα αυτά, τα πρωτόκολλα MAC χρειάζονται κάποιες τροποποιήσεις για να έχουν εφαρμογή σε δίκτυα αισθητήρων. Οι τροποποιήσεις ως επί το πλείστον αφορούν στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας. Για

παράδειγμα κυρία πρόκληση σε κυψελοειδή δίκτυα είναι η προσφορά ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στους χρήστες.

Η αποδοτικότητα όσο αφορά στην ενεργεία είναι δεύτερης σημασίας λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει περιορισμός ενέργειας, καθώς τόσο ο σταθμός βάσης όσο και οι χρήστες μπορούν να ανανεώσουν τις μπαταρίες. Στα δίκτυα MANET, οι κινητοί κόμβοι είναι εφοδιασμένοι με φορητές συσκευές που λαμβάνουν ενέργεια από μια μπαταρία, η οποία μπορεί και να αντικατασταθεί. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, η βασική πρόκληση για τα δίκτυα αισθητήρων είναι η εξοικονόμηση ενέργειας για να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου.

Μια ακόμη σημαντική λειτουργία το επιπέδου δεδομένων είναι ο έλεγχος λαθών στη μετάδοση δεδομένων. Σε αρκετές εφαρμογές, ένα δίκτυο αισθητήρων είναι εγκαταστημένο σε ένα δύσβατο περιβάλλον όπου η ασύρματη επικοινωνία είναι πολύ εύκολο να αποτύχει. Σε αυτή τη περίπτωση, ο έλεγχος λαθών είναι ζωτικής σημασίας για να επιτύχει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Γενικότερα, υπάρχουν δύο μηχανισμοί ελέγχου λαθών: η προώθηση διόρθωσης λάθους (FEC) και η αυτόματη επανάληψη αίτησης (ARQ). Η ARQ επιτυγχάνει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ξαναστέλλοντας τα χαμένα πακέτα. Είναι προφανές ότι με αυτό το τρόπο δημιουργείται επιπλέον φόρτος στο σύστημα και επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, στοιχείο που δεν είναι αξιόλογο για ένα δίκτυο αισθητήρων.

Η τεχνική FEC επιτυγχάνει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, χρησιμοποιώντας κώδικες ελέγχου λαθών στη μετάδοση δεδομένων, όπου προσδίδουν επιπλέον λειτουργίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Το παραπάνω, βέβαια, έχει ως αποτέλεσμα την επιπλέον κατανάλωση πόρων του κόμβου. Παρόλα αυτά, η τεχνική FEC μπορεί να μειώσει σημαντικά το BER (bit error rate). Δεδομένου του περιορισμού κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε αισθητήρα, η τεχνική FEC είναι η πλέον βέλτιστη λύση για τον έλεγχο λαθών στα δίκτυα αισθητήρων.

Για το σχεδιασμό της τεχνικής FEC η επιλογή του κώδικα ελέγχου λαθών είναι πολύ σημαντική καθώς ένας καλά διαλεγμένος κώδικας ελέγχου λαθών προσφέρει γενικό κέρδος και μείωση του BER. Η επιπλέον υπολογιστική λειτουργία για την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση πρέπει να ληφθεί υποψιν. Στα πλαίσια αυτά, είναι σκόπιμο να βρεθεί μια χρυσή τομή ανάμεσα στην επιπλέον υπολογιστική ισχύ που απαιτείται και το κέρδος που προσφέρει η μέθοδος αυτή, ούτως ώστε το δίκτυο να είναι αξιόπιστο και με όσο το δυνατό μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



### 2.3.3 Επίπεδο δικτύου

Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση των δεδομένων από τη πηγή έως την καταβόθρα. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, οι κόμβοι αισθητήρων είναι τοποθετημένοι σε μια περιοχή με σκοπό να μελετάνε ένα φαινόμενο που ενδιαφέρει την εφαρμογή. Το παρατηρούμενο φαινόμενο ή τα δεδομένα πρέπει να μεταδοθούν στην καταβόθρα. Γενικά, ένας κόμβος αισθητήρα μπορεί να μεταδώσει τα δεδομένα μέσω ενός hop μακρινής απόστασης ασύρματης επικοινωνίας ή μέσω αρκετών hop μικρής απόστασης. Παρόλα αυτά, η μακρινής απόστασης ασύρματη επικοινωνία είναι κοστοβόρα, όσο αφορά στην κατανάλωση ενέργειας ενώ υπάρχει δυσκολία και στην υλοποίηση της επικοινωνίας των κόμβων αισθητήρων. Σε αντίθεση, η ασύρματη επικοινωνία με βάση πολλών hop μικρής απόστασης όχι μόνο δεν μειώνει την κατανάλωση ενέργειας αλλά μειώνει σημαντικά την πιθανή καθυστέρηση σήματος. Επίσης, με την ασύρματη επικοινωνία πολλών hop μικρής απόστασης ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα διαλείψεων του καναλιού, για αυτό και προτιμάται.

Εφόσον οι κόμβοι αισθητήρων είναι πυκνά τοποθετημένοι και οι κόμβοι των γειτόνων είναι κοντά ο ένας στον άλλο, είναι πιθανό να χρησιμοποιούν μικρής απόστασης επικοινωνία με πολλά hop. Σε αυτή την περίπτωση, για να στείλει ένας κόμβος τα δεδομένα στην καταβόθρα, οι ενδιάμεσοι κόμβοι πρέπει να έχουν υλοποιημένο ένα πρωτόκολλο για να βρεθεί ένα πολλών hop ενεργειακά αποδοτικό μονοπάτι από τον κόμβο αυτόν, μέχρι τη καταβόθρα. Παρόλα αυτά, τα κλασικά πρωτοκόλλα δρομολόγησης δεν έχουν ισχύ εδώ καθώς δεν έχουν σαν βασικό στόχο την μείωση κατανάλωσης ενέργειας από τους αισθητήρες. Επίσης, από την περιοχή ανίχνευσης και κατά μήκος της καταβόθρας υπάρχει ένα μοναδικό μοτίβο κίνησης ενός προς πολλών στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ο συνδυασμός των multi-hop και της επικοινωνίας πολλών σε ένα, έχει αποτέλεσμα την αύξηση κίνησης στο δίκτυο και αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα τη συμφόρηση πακέτων, τις συγκρούσεις, το χάσιμο πακέτων, τη καθυστέρηση και την ενεργειακή κατανάλωση όσο μετακινούμαστε προς τη καταβόθρα. Οι κόμβοι αισθητήρων που είναι κοντά στη καταβόθρα, κατά ένα μικρό αριθμό hop, θεωρητικά υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να χάσουν πολλά πακέτα και να καταναλώσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε σχέση με τους αισθητήρες που είναι πιο μακριά. Για αυτό το λόγο είναι αρκετά σημαντικό να ληφθεί υπόψιν ο

περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και το μοναδικό μοτίβο κίνησης για το σχεδιασμό του επιπέδου δικτύου και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

### 2.3.4 Επίπεδο μεταφοράς

Γενικά, το επίπεδο μεταφοράς είναι υπεύθυνο για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων και της καταβόθρας. Δεδομένου της ενέργειας, των υπολογιστικών λειτουργιών, του περιορισμού της αποθήκευσης, τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς κάποιες τροποποιήσεις. Για παράδειγμα, η συμβατική end-to-end αποστολή, βασισμένη στον έλεγχο λαθών, και ο μηχανισμός με βάση την αποστολή με χρήση παραθύρου που χρησιμοποιείται στο συμβατικό πρωτόκολλο ελέγχου μεταφοράς (TCP), δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα αισθητήρων χωρίς τροποποιήσεις επειδή δεν είναι αποδοτικά αναφορικά με τη χρησιμοποίηση των πόρων.

Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα αισθητήρων σχεδιάζονται με βάση κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένα δίκτυο αισθητήρων συνήθως τοποθετείται σε ένα περιβάλλον στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο που μελετά. Για παράδειγμα, έλεγχος αποθήκης, παρακολούθηση ζωής και παρακολούθηση στρατευμάτων. Διαφορετικές εφαρμογές είναι πιθανό να έχουν και διαφορετικές ανάγκες σε υλικό και σε επίπεδο αξιοπιστίας. Τα γεγονότα αυτά έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου. Επιπρόσθετα, η μεταφορά δεδομένων σε ένα δίκτυο αισθητήρων πραγματοποιείται με δύο βασικές κατευθύνσεις: το ανέβασμα (upstream) και το κατέβασμα (downstream).

Στο upstream, ο αισθητήρας μεταδίδει τα δεδομένα στην καταβόθρα ενώ στο downstream τα δεδομένα προέρχονται από την πηγή. Για παράδειγμα, εντολές, ερωτήσεις, σήματα, στέλνονται από την πηγή στους αισθητήρες. Τα δεδομένα που ρέουν και προς τις δυο κατευθύνσεις μπορούν να έχουν διαφορετικές προκλήσεις αξιοπιστίας. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που ρέουν στην κατεύθυνση upstream είναι ανεκτικά σε χάσιμο πακέτων επειδή τα ανιχνεύσιμα δεδομένα είναι συνήθως συσχετισμένα με ένα μεγάλο αριθμό πακέτων ή στέλνονται σε περίσσεια. Στην κατεύθυνση downstream, όπου πάλι τα δεδομένα μπορεί να είναι εντολές, ερωτήσεις, σήματα, είναι αναγκαίο να έχουμε εκατό τις εκατό αξιοπιστία μετάδοσης. Για αυτό το λόγο, τα μοναδικά χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων και οι συγκεκριμένες ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών παρουσιάζουν ένα μεγάλο αριθμό

από προκλήσεις στο σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου επιπέδου μεταφοράς για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

### 2.3.5 Επίπεδο εφαρμογής

Το επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνει μια ποικιλία από πρωτοκόλλα που πραγματοποιούν διαφορετικές λειτουργίες σε ένα δίκτυο αισθητήρων, όπως ασφάλεια δικτύου, διάδοση ερωτήματος, συγχρονισμός ώρας και εντοπισμός κόμβου. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο διαχείρισης αισθητήρων (SMP) είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής το οποίο προσφέρει ένα μεγάλο αριθμό λειτουργιών, όπως συγχρονισμό ανάμεσα σε αισθητήρες, κίνηση αισθητήρων, προγραμματισμό κόμβων αισθητήρων και κάνοντας ερωτήματα για την κατάσταση του αισθητήρα.

Το πρωτόκολλο υποβολής ερωτημάτων και διάδοσης δεδομένων (SQDDP) παρέχει στο χρήστη μια επαφή υποβολής ερωτημάτων και απαντήσεων στα ερωτήματα καθώς και τη συλλογή αυτών. Το πρωτόκολλο SQTL (υποβολής ερωτημάτων και προγραμματισμού γλωσσας) παρέχει μια γλώσσα προγραμματισμού αισθητήρων που χρησιμοποιείται για να υλοποιηθεί το middleware στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

## 2.4 Αρχιτεκτονικές δικτύου

Ένα δίκτυο αισθητήρων τυπικά αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων τοποθετημένους σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, με μία ή περισσότερες καταβόθρες ή σταθμούς βάσης, οι οποίοι βρίσκονται κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η καταβόθρα στέλνει ερωτήματα ή εντολές στους κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι με τη σειρά τους αρχικά συνεργάζονται για να φέρουν εις πέρας τη διεργασία ανίχνευσης και στη συνέχεια στέλνουν τα δεδομένα πίσω στην πηγή. Η πηγή λειτουργεί, επίσης, σαν gateway σε εξωτερικό δίκτυο, για παράδειγμα στο Internet. Συλλέγει δεδομένα από τους κόμβους αισθητήρων, πραγματοποιεί μια υπολογιστική διαδικασία και στη συνέχεια, στέλνει μέσω διαδικτύου τα αποτελέσματα στους χρήστες, οι οποίοι ζήτησαν αυτά τα δεδομένα.

Για την αποστολή δεδομένων στη καταβόθρα, κάθε κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει ενός hop μεγάλης απόστασης μετάδοση, το οποίο οδηγεί σε μια δομή δικτύου ενός hop. Παρόλα αυτά, όμως, η μεγάλης απόστασης μετάδοση είναι κοστοβόρα, όσο αφορά στην κατανάλωση ενέργειας. Πιο ειδικά, η ενέργεια που

καταναλώνεται για την μετάδοση είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την επικοινωνία και η απαιτούμενη ενέργεια μεγαλώνει εκθετικά με την αύξηση της απόστασης μετάδοσης. Γι'αυτό το λόγο τα πολλών hop μικρής απόστασης δίκτυα προτιμώνται. Στην επικοινωνία πολλών hop, ένας κόμβος αισθητήρα μεταδίδει τα δεδομένα διαμέσου της καταβόθρας, μέσω ενός ή περισσοτέρων ενδιάμεσων κόμβων. Το παραπάνω, μπορεί να μειώσει αισθητά την κατανάλωση ενέργειας που σπαταλάται για επικοινωνιακή αρχιτεκτονική των πολλών hop δικτύων. Η εν λόγω αρχιτεκτονική δύναται να οργανωθεί σε δυο κατηγορίες, την επίπεδη και την ιεραρχική.

#### **2.4.1 Επίπεδη αρχιτεκτονική**

Στην επίπεδη αρχιτεκτονική, κάθε κόμβος έχει ένα απλό ρολό να ανιχνεύει και όλοι οι κομβοί λειτουργούν σαν να είναι ομότιμοι. Δεδομένου του μεγάλου αριθμού αισθητήρων, δεν είναι εφικτό να θέσουμε ένα καθολικό αναγνωριστικό για κάθε κόμβο αισθητήρα. Για αυτό το λόγο, η συλλογή δεδομένων επιτυγχάνεται συνήθως από δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση, όπου η πηγή δεδομένων μεταδίδει ένα ερώτημα σε όλους τους κόμβους, στη φάση ανίχνευσης μέσω πλημμύρας και μόνο ο κόμβος αισθητήρα που έχει την απάντηση θα ανταποκριθεί. Κάθε κόμβος αισθητήρα επικοινωνεί με την καταβόθρα μέσω ενός πολλών hop μονοπατιού.

#### **2.4.2 Ιεραρχική αρχιτεκτονική**

Στην ιεραρχική δομή, κάθε κόμβος είναι οργανωμένος σε συστάδες, όπου τα μέλη των συστάδων στέλνουν τα δεδομένα στον αρχηγό της συστάδας, όπου κάθε αρχηγός της συστάδας λειτουργεί σαν αναμεταδότης για τη μετάδοση των δεδομένων στην καταβόθρα. Ένας κόμβος με χαμηλά αποθέματα ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιήσει την ανίχνευση και για να στείλει τα δεδομένα στον αρχηγό της συστάδας που βρίσκεται σε μικρή απόσταση, καθώς ένας κόμβος, με μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας μπορεί να επιλεγεί σαν αρχηγός της συστάδας, ώστε να κάνει κάποιο υπολογισμό και να στείλει τα δεδομένα στη καταβόθρα. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο μειώνει την ενέργεια που καταναλώνεται για επικοινωνία, αλλά ισορροπεί το φόρτο κίνησης του δικτύου και επιτυγχάνει καλή κλιμάκωση, όταν το δίκτυο μεγαλώσει. Εφόσον όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια δυνατότητα μετάδοσης, η δομή των συστάδων πρέπει να αλλάζει περιοδικά ώστε να ισορροπεί το φόρτο κίνησης του

δικτύου. Επιπρόσθετα, η συνάθροιση δεδομένων μπορεί να λάβει χώρα με στόχο να μειωθεί το πλήθος δεδομένων που πρέπει να εκπεμφθεί και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην συσταδοποίηση είναι ο τρόπος με τον οποίο θα επιλεγεί ο αρχηγός της συστάδας και αλλά και με ποιο τρόπο θα οργανωθούν σε συστάδες οι κόμβοι. Υπάρχουν αρκετές στρατηγικές πραγματοποίησης συσταδοποίησης. Με βάση την απόσταση μεταξύ των μελών της συστάδας και του αρχηγού μπορούν να οργανωθούν με μια αρχιτεκτονική ενός hop συστάδας ή ενός πολλών hop συστάδας. Με βάση των επιπέδων της ιεραρχίας της συστάδας ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να οργανωθεί με ενός επιπέδου αρχιτεκτονική συστάδας ή πολλών επιπέδων αρχιτεκτονική συστάδας.

## 2.5 Κατανάλωση ενέργειας

Ο ασύρματος κόμβος αισθητήρα, αφού είναι μια μικρό-ηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να εφοδιαστεί με μια περιορισμένη πηγή ενέργειας (<0.5 Ah, 1.2V). Η αντικατάσταση αυτής της πηγής ενέργειας συνήθως είναι αδύνατη, συνεπώς η ζωή του κόμβου αισθητήρα εξαρτάται εξ ολοκλήρου από αυτήν. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων ο κάθε κόμβος παίζει το ρόλο του αποστολέα αλλά και του δρομολογητή. Τυχόν βλάβες σε κάποιους από τους κόμβους δημιουργούν ανάγκη για αναδιοργάνωση του δικτύου και επαναδρομολόγηση των μηνυμάτων. Συνεπώς, η σωστή διαχείριση της ενέργειας των κόμβων παίζει μεγάλο ρόλο. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποδοθεί σε τρεις λειτουργίες, στην αίσθηση, την επικοινωνία και την επεξεργασία δεδομένων.

### 2.5.1 Επικοινωνία

Η πιο απαιτητική λειτουργία από άποψη κατανάλωσης ενέργειας είναι η επικοινωνία. Για τις μικρές αποστάσεις που λειτουργούν οι αισθητήριοι κόμβοι η κατανάλωση ως επί το πλείστον είναι ίδια κατά την εκπομπή και τη λήψη. Βεβαίως, εκτός από αυτό, σοβαρό ρόλο διαδραματίζει και το άνοιγμα και κλείσιμο του κυκλώματος του πομποδέκτη. Η εξίσωση για την κατανάλωση της ενέργειας κατά την ασύρματη επικοινωνία είναι η ακόλουθη :

$$P_c = N_T [P_T (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_R [P_R (R_{on} + R_{st})]$$

όπου  $P_{T/R}$  είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό/ δέκτη,  $P_{out}$  η ενέργεια εξόδου του πομπού,  $T/R_{on}$  ο χρόνος που ο πομπός/δέκτης είναι ενεργός,  $T/R_{st}$  ο χρόνος έναρξης του πομπού/δέκτη και  $N_{T/R}$  ο αριθμός των φορών που ο πομπός/δέκτης ανοίγει στην μονάδα του χρόνου, ο οποίος εξαρτάται από το ανατιθέμενο σκοπό αλλά και το πρωτόκολλο στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (“MAC Layer”). Οι σημερινοί πομποδέκτες έχουν τυπικές τιμές  $P_T$  και  $P_R$  περίπου στα 20 dbm και  $P_{out}$  κοντά στα 0 dbm.

## 2.5.2 Επεξεργασία δεδομένων

Η ενέργεια που καταναλώνεται είναι μικρότερη κατά τη φάση της επεξεργασίας των δεδομένων σε σύγκριση με την επικοινωνία. Συνεπώς, ο κόμβος είναι σκόπιμο να διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα επεξεργασίας προκειμένου να επεξεργάζεται τα δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο θα έχει τη δυνατότητα να στέλνει όσο το δυνατόν λιγότερα πακέτα κατά τη φάση της επικοινωνίας. Η ενέργεια που καταναλώνει ένας επεξεργαστής εξαρτάται από την τάση και τη συχνότητα λειτουργίας. Συνεπώς, αν μειώσουμε τους δύο αυτούς παράγοντες θα έχουμε και μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Βέβαια, θα πρέπει να αποδεχτούμε το γεγονός ότι η ικανότητα επεξεργασίας θα μειωθεί. Μια άλλη εναλλακτική είναι να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι ο επεξεργαστής εργάζεται λίγες φορές στο μέγιστο της απόδοσής του και έτσι μπορούμε να έχουμε ένα δυναμικό τρόπο αυξομείωσης του ρεύματος και της συχνότητας λειτουργίας του. Υπάρχουν τρόποι προκειμένου η δυναμική λειτουργία του επεξεργαστή να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις απαιτήσεις και να μειωθεί η απαιτούμενη ενέργεια.

Η ενέργεια που σπαταλάτε μπορεί να δοθεί ως εξής :

$$P_p = CV_{dd}^2 f_T + V_{dd} I_0 e^{\frac{V_{dd}}{nV_T}}$$

όπου  $C$  είναι η ολική χωρητικότητα μεταγωγής (“total switching capacitance”),  $V_{dd}$  η τάση και  $f$  η συχνότητα αλλαγής.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> –Εφαρμογές των WSNs

### 3.1 Στρατιωτικές εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αποτελούν ένα ενσωματωμένο κομμάτι των στρατιωτικών συστημάτων διαταγών, ελέγχου, επικοινωνιών, υπολογισμού, ευφυΐας, παρακολούθησης, αναγνώρισεων και στόχευσης. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων, όπως η ταχεία εγκατάσταση, η αυτό-οργάνωση και η αντοχή σε λάθη, τους κατατάσσουν σε ένα πολύ υποσχόμενο αισθητήριο μέσο για τα παραπάνω συστήματα. Καθώς τα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην πυκνή χωρική εγκατάσταση, η καταστροφή μερικών κόμβων από εχθρικές δυνάμεις δεν επηρεάζει μια στρατιωτική επιχείρηση σε τέτοιο βαθμό όσο η καταστροφή των παραδοσιακών αισθητήρων, κάνοντας την χρήση των δικτύων αισθητήρων ιδανική για τα πεδία των μαχών.

Κάποιες από τις στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι η παρακολούθηση των φιλικών δυνάμεων, του εξοπλισμού και των πυρομαχικών τους, η παρακολούθηση του πεδίου της μάχης, η αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων και του εδάφους, η στόχευση, η αποτίμηση των ζημιών της μάχης, καθώς και η ανίχνευση και αναγνώριση μιας Ράδιο-Βιολογικής-Χημικής και Πυρηνικής απειλής.

#### 3.1.1 Ιχνηλάτηση στρατιωτικών οχημάτων

Μια από τις στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι η ιχνηλάτηση εχθρικών οχημάτων. Το δίκτυο αυτό πρέπει να μην γίνεται αντιληπτό, καθώς μπορεί εύκολα να καταστραφεί. Οι αισθητήρες ρίχνονται από μη επανδρωμένο αεροσκάφος και μέσω αισθητήρων μέτρησης μαγνητικού πεδίου μπορούν να υπολογίσουν την απόστασή τους από τα εχθρικά οχήματα. Από τα στοιχεία που αναφέρονται από τους κόμβους υπολογίζεται η διαδρομή και η ταχύτητα των οχημάτων. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα στέλλονται πίσω στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως μικροσκοπικοί ώστε να μην εντοπίζονται, ενώ ανήκουν στην τεχνολογία smartdust.



### 3.1.2 Ανίχνευση ελεύθερων σκοπευτών

Μια άλλη στρατιωτική εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι ο εντοπισμός των ελεύθερων σκοπευτών και της τροχιάς των βλημάτων, παρέχοντας έτσι στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δικαιοσύνη. Το σύστημα αποτελείται από κόμβους που μετρούν τον ήχο που προκύπτει από την εκτυρσοκρότηση του όπλου μέσω ακουστικών αισθητήρων, οι οποίοι αποτελούν ένα multi-hop δίκτυο. Συγκρίνοντας το χρόνο άφιξης του ήχου στους διαφόρους κόμβους, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του ελεύθερου σκοπευτή με ακρίβεια ενός μέτρου μέσα σε χρόνο μικρότερο από δύο δευτερόλεπτα.

## 3.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

### 3.2.1 Παρακολούθηση πτηνών

Μια περιβαλλοντική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στο Great Duck Island της Αμερικής, όπου είχε εγκατασταθεί ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για την παρακολούθηση της αναπαραγωγής ενός είδους πτηνού του Leach Storm Petrel. Πιο συγκεκριμένα οι βιολόγοι ενδιαφέρονταν για τρία ζητήματα:

- Σχετικά με το ποιο είναι το μοτίβο χρήσης της φωλιάς σε ένα κύκλο 24-72 ωρών όταν ένας ή και οι δυο γονείς αλλάζουν τα καθήκοντα επώασης των μικρών ταΐζοντάς τα από τη θάλασσα.
- Σχετικά με το ποιες αλλαγές μπορούν να παρατηρηθούν στη φωλιά μέσα και έξω σε ένα διάστημα επτά μηνών (Απρίλιο έως Οκτώβριο).
- Σχετικά με το τί αλλάζει στην συμπεριφορά των πτηνών όταν υπάρχουν αρκετές φωλιές κοντά τους, τί όταν είναι μονά τους, αλλά και σχετικά με τα προτεινόμενα σημεία αναπαραγωγής.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν μέσα και έξω από τη φωλιά, ήταν εξοπλισμένοι με αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας και σχημάτιζαν ένα multi-hop ad hoc δίκτυο. Μέσω της κεραίας που διέθεταν έπαιρναν μετρήσεις από τους υπολοίπους και επικοινωνούσαν με το σταθμό βάσης, όπου διαμέσου δορυφόρου συνδεόταν με τη βάση δεδομένων.



### 3.2.2 Ανίχνευση πλημμυρών

Ένα παράδειγμα συστήματος ανίχνευσης πλημμυρών είναι το σύστημα ALERT το οποίο αναπτύχθηκε στην Αμερική. Το πρόγραμμα ALERT παρέχει σημαντικές πραγματικού χρόνου πληροφορίες για βροχοπτώσεις και μετρήσεις για το επίπεδο στάθμης του νερού, παρέχοντας έτσι μια πιθανότητα μιας υποκείμενης πλημμύρας. Οι αισθητήρες τύπου ALERT είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες υγρασίας και καιρικών φαινομένων και οι πληροφορίες μεταδίδονται μέσω ραδιοσυχνοτήτων σε ένα σταθμό βάσης. Στο σταθμό βάσης χρησιμοποιείται ένα μοντέλο διαχείρισης πλημμύρας το οποίο μπορεί να εκπέμψει σχετικό σήμα σε περίπτωση κινδύνου.

### 3.2.3 Ανίχνευση πυρκαγιάς

Για την ανίχνευση πυρκαγιάς χρησιμοποιείται ένα χαμηλού κόστους καταναμημένο ασύρματο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από αισθητήρες που είναι στο έδαφος ή σε ψηλά σημεία ελέγχοντας τα επίπεδα υγρασίας, την ταχύτητα ανέμου και τη θερμοκρασία. Με αυτό το τρόπο μπορούμε να γνωρίζουμε την πιθανότητα φωτιάς στην περιοχή που είναι τοποθετημένο το δίκτυο αλλά και την κατεύθυνση της φωτιάς. Με αυτό το σύστημα βοηθούνται οι πυροσβέστες και μπορούν και σβήσουν τη φωτιά άμεσα καθώς ειδοποιούνται έγκαιρα όταν αυτή ξεκινήσει και είναι σε μικρή έκταση.

### 3.2.4 Έλεγχος κοπαδιού

Μια εφαρμογή στον τομέα της αγροτικής ανάπτυξης είναι η κατασκευή εικονικού φράκτη, μέσω ενός ακουστικού ερεθίσματος που δίνεται στα ζώα όταν πλησιάζουν τα όρια του εικονικού φράκτη. Το σύστημα αποτελείται από μια κάρτα WLAN, ένα ηχείο για την αναπαραγωγή του ακουστικού σήματος και ένα μικρό αριθμό ασυρμάτων αισθητήρων. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στο λαιμό του ζώου και όταν φτάνει στα όρια του εικονικού φράκτη παράγεται το σήμα και το ζώο αποφεύγει έτσι να ξεφύγει από το κοπάδι.

### 3.2.5 Έλεγχος ποιότητας νερού και ανέμου

Οι αισθητήρες μπορούν να μπουν κάτω από το νερό ή στην επιφάνεια του νερού και να ελέγχουν την ποιότητα του αέρα ή του νερού. Για παράδειγμα, για τον έλεγχο

του νερού χρειάζεται ο αισθητήρας να περιέχει έναν αλγόριθμο βασισμένο στον τομέα της υδροχημείας ούτως ώστε να «αποφασίζει» αν είναι πόσιμο ή όχι. Για τον έλεγχο του αέρα οι αισθητήρες δύνανται να είναι εξοπλισμένοι με κάποιες ανώτατες τιμές μόλυνσης αέρα και με βάση κάποιου αλγορίθμου να ειδοποιούν όταν ο αέρας είναι μολυσμένος.

### **3.3 Εφαρμογές υγείας**

Κάποιες από τις εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων στο τομέα της υγείας είναι η παροχή μέσων αλληλεπίδρασης για άτομα με ειδικές ανάγκες, η παρακολούθηση ασθενών, η διάγνωση και η διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομεία.

#### **3.3.1 Διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομείο**

Με την εγκατάσταση αισθητήριων κόμβων σε φάρμακα μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα να πάρει κάποιος ασθενής λάθος φαρμακευτική αγωγή. Η ελαχιστοποίηση της παραπάνω πιθανότητας μπορεί να επιτευχθεί με το να έχουν οι ασθενείς αισθητήριους κόμβους οι οποίοι να αναγνωρίζουν τις αλλεργίες και τις απαιτούμενες θεραπείες τους. Υπολογιστικά συστήματα έχουν δείξει ότι μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση των επιρροών από λάθος φάρμακα.

#### **3.3.2 Τεχνητή όραση**

Στα πλαίσια ενός βίο-ιατρικού project με τη βοήθεια εκατό έξυπνων μικροαισθητήρων και με τη βοήθεια ενσωματωμένων επεξεργαστών δημιουργήθηκε ένα βοήθημα για την όραση. Αυτό βοηθά τους ασθενείς με καθόλου ή περιορισμένη όραση να δουν με αξιосέβαστα αποτελέσματα. Η ασύρματη επικοινωνία θεωρείται απαραίτητη ώστε να παρέχονται οι σωστές αντιδράσεις, η ανίχνευση εικόνων, και η εξακρίβωση αυτών. Το μοτίβο της επικοινωνίας είναι ντετερμινιστικό και περιοδικό. Κατάλληλο για αυτήν εφαρμογή είναι το TDMA πρωτόκολλο όσο αφορά την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Έχουν μελετηθεί μέχρι στιγμής δύο σχήματα επικοινωνίας, το ένα είναι βασισμένο σε συστάδες με αρχηγό συστάδας ενώ το άλλο έχει δένδρου.

### 3.3.3 Ιατρική Τήλε-παρακολούθηση

Οι φορητοί αισθητήρες μπορούν να δημιουργήσουν ένα ασύρματο ανθρωπίνου σώματος δίκτυο, με τη βοήθεια του οποίου παρακολουθείται η υγεία του ασθενή, οι περιβαλλοντικές παράμετροι και η γεωγραφική τοποθεσία. Με αυτό το τρόπο επιτρέπεται γενικότερα στους ασθενείς να έχουν γνωμάτευση από απόσταση ή ειδικότερα, στους ηλικιωμένους, οι οποίοι δεν μπορούν να μετακινηθούν, να ειδοποιούνται για την κατάσταση της υγείας τους, χωρίς να απαιτείται να μεταφερθούν στο γιατρό.

## 3.4 Άλλες εφαρμογές

### 3.4.1 Έξυπνο σπίτι

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι έξυπνοι μικροσκοπικοί αισθητήρες ενσωματώνονται σε όλες τις συσκευές που ο άνθρωπος χρησιμοποιεί στην καθημερινή του ζωή. Ανάμεσα σε τέτοιες συσκευές οικιακής χρήσης είναι οι φούρνοι μικροκυμάτων, οι τηλεοράσεις, τα βίντεο, τα κλιματιστικά, μέχρι και η ντουζιέρα. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς και με ένα εξωτερικό δίκτυο μέσω διαδικτύου ή δορυφόρου, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη διαχείριση τους από απόσταση από τους χρηστές ή ακόμα και την πρωτοβουλία των δικών τους κινήσεων. Για παραδειγμα, το κλιματιστικό θα μπορούσε με τη βοήθεια ενός αισθητήρα θερμοκρασίας, όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σπιτιού φτάνει στους 30 βαθμούς Κελσίου να ανοίγει και να ψύχει το χώρο.

### 3.4.2 Έξυπνη διαχείριση αποθήκης

Κάθε αντικείμενο σε μια αποθήκη μπορεί να έχει ένα κόμβο αισθητήρα προσκολλημένο πάνω του. Ο τελικός χρήστης μπορεί να εντοπίσει την ακριβή θέση του αντικειμένου και να μετρήσει τα αντικείμενα της ίδιας κατηγορίας. Αν οι τελικοί χρήστες επιθυμούν να εισάγουν νέα αποθέματα, το μόνο που χρειάζεται να κάνουν είναι να προσκολλήσουν τους κατάλληλους κόμβους αισθητήρων στα αποθέματα αυτά. Οι τελικοί χρήστες μπορούν να εντοπίσουν και να παρακολουθήσουν σε ποιο σημείο βρίσκονται τα αποθέματα κάθε χρονική στιγμή. Ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσω επικοινωνίας με RFID.

### 3.4.3 Παρακολούθηση αντοχής κτηρίων

Το SHM (Structure Health Monitoring) αποτελεί έναν σημαντικό τομέα στις εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων. Οι εφαρμογές SHM αποτελούν σημαντικό μέσο πρόγνωσης και έχουν τεράστια οικονομική και κοινωνική απήχηση. Οι στόχοι αυτού του προγράμματος είναι η ανίχνευση καταστροφής, η εύρεση του σημείου καταστροφής, η εκτίμηση της ζημιάς αλλά και της διάρκειας ζωής του κτηρίου. Το πρόγραμμα αυτό, καθώς εφαρμόζει αισθητήρες χαμηλού κόστους, και καθώς καλύπτει μεγάλη περιοχή, χωρίς να χρειαστεί να τοποθετηθούν ιδιαίτερα πολλοί αισθητήρες, εμφανίζει αυξημένη εφαρμογή. Η επικοινωνία, και στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιείται μέσω ασυρμάτων πρωτοκόλλων.

### 3.4.4 Μελέτη καιρικών φαινομένων στον πλανήτη Άρη

Μια ακόμα εφαρμογή έγινε από το John Barker, έναν ερευνητή του πανεπιστημίου της Γλασκόβης, ο οποίος αποφάσισε να ερευνήσει το εάν ένα σύννεφο από κόκκους έξυπνης σκόνης (smartdust) μπορεί να μεταφέρεται πάνω από την επιφάνεια του Άρη από ένα σημείο σε ένα άλλο απλά αλλάζοντας τη μορφή του. Στο πείραμά του χρησιμοποιήθηκαν 30000 κόκκοι που αφέθηκαν σε ένα προσομοιωμένο περιβάλλον όμοιο με εκείνο του πλανήτη Άρη.

Κάθε συσκευή στη προσομοίωση μπορούσε να καταλάβει την τοποθεσία του και το εάν είχε αλλάξει μεταξύ δύο διαφορετικών μορφών- εάν ήταν δηλαδή απαλό ή τραχύ. Οι απαλοί κόκκοι μπορούσαν να μεταφερθούν εύκολα με το Αριανό άνεμο ενώ οι τραχείς έπεσαν στην επιφάνεια. Αυτό επιτρέπει τους κόκκους να πλοηγούνται ανάλογα με τη μορφή τους. Στην προσομοίωση ο Barker ανακάλυψε ότι το 70% των κόκκων του σύννεφου ήταν ικανό να ταξιδέψει είκοσι χιλιόμετρα πάνω στην επιφάνεια του Άρη.

### 3.4.5 Εικονικό πληκτρολόγιο

Μια εφαρμογή της έξυπνης σκόνης (smartdust)- η οποία είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι βρίσκεται στα σχέδια ακόμα και δεν έχει υλοποιηθεί- είναι το εικονικό πληκτρολόγιο. Σύμφωνα με την εφαρμογή αυτή, εάν σκονίσουμε κάθε ένα δάκτυλό μας, τα ταχύμετρα θα ανιχνεύσουν την οριοθέτηση και την κίνηση και θα στείλουν σήματα στο pc. Το qwerty είναι το πρώτο βήμα στην απόδειξη της θεωρίας,

αλλά μπορούμε να συλλογιστούμε πολύ πιο σημαντικούς τρόπους να χρησιμοποιήσουμε αυτή την εφαρμογή εάν γνωρίζει το pc κάθε κίνηση των δακτύλων μας. Για παράδειγμα, αυτό θα μπορεί να μας μιμηθεί όταν παίζουμε πιάνο και να το αναπαράγει, να αποθηκεύσει τις συνήθειές μας και να μας βοηθήσει να τις κόψουμε ή ακόμα και να παράγει τη γλώσσα των κωφάλαλων.

### **3.4.6 Έξυπνο παρκάρισμα**

Η εταιρία Street line Inc έχει σχεδιάσει ένα έξυπνο σύστημα για παρκάρισμα στις πόλεις του San Francisco και Los Angeles. Η εταιρία έχει τοποθετήσει κόκκους (κόμβοι αισθητήρων) πάνω στην επιφάνεια των χώρων πάρκινγκ ούτως ώστε οι οδηγοί, με σχετικούς κωδικούς, να μπορούν να ενεργοποιήσουν το σύστημα και αυτό να ψάξει για μια ελεύθερη θέση παρκινγκ. Οι υπεύθυνοι για την κίνηση μπορούν να το χρησιμοποιήσουν για να παρακολουθούν και να βελτιώνουν την ροή της κίνησης και να βελτιώνουν την τωρινή κατάσταση για το παρκάρισμα.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> –Data Aggregation

### 4.1 Συνάρτηση συνάθροισης

#### 4.1.1 Τι είναι η συνάρτηση συνάθροισης

Μια μαθηματική συνάρτηση είναι ένας κανόνας, ο οποίος παίρνει μια είσοδο –μία τιμή που ονομάζεται παράμετρος, και παράγει ένα αποτέλεσμα-μια άλλη τιμή. Κάθε έξοδος έχει μια μοναδική είσοδο. Μια συνάρτηση της μορφής  $y=f(x)$ , όπου  $x$  είναι η παράμετρος και  $y$  το αποτέλεσμα. Το  $x$  μπορεί να είναι ένα διάνυσμα. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι η  $f$  μπορεί να αναπαρασταθεί με πολλούς τρόπους, μερικοί από τους οποίους είναι οι παρακάτω:

- A) ως μία αλγεβρική φόρμουλα ( $f(x)=x^1+x^2$ )
- B) ως ένας γράφος μιας συνάρτησης
- Γ) ως μια ακολουθία από βήματα ή, πιο επίσημα, ένας αλγόριθμος
- Δ) ένας πίνακας
- E) μία λύση μιας συνάρτησης κτλ.

Οι συναρτήσεις συνάθροισης είναι συναρτήσεις με ειδικές ιδιότητες. Ο σκοπός των συναρτήσεων συνάθροισης είναι να συνδυάσουν τις εισόδους, οι οποίες τυπικά ερμηνεύονται ως βαθμοί προτιμήσεων, ενίσχυση πειστηρίων, βοήθεια μιας υπόθεσης ή ακόμα και απλές τιμές.

Η μονοτονικότητα των παραμέτρων και η διατήρηση των ορίων αποτελούν δύο θεμελιώδεις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν γενικές συναρτήσεις συνάθροισης. Εάν κάποια από αυτές τις ιδιότητες αποτύχει, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε μια συνάρτηση ως συνάρτηση συνάθροισης, καθώς θα μας παρέχει μια ασυσχέτιστη έξοδο. Παραδείγματα απλών συναρτήσεων συνάθροισης είναι:

1) Η μέση τιμή:  $f_n(x) = \frac{1}{n}(x_1 + \dots + x_n)$

2) Ο γεωμετρικός μέσος  $f_n(x) = \sqrt[n]{x_1 * \dots * x_n}$

3) Το ελάχιστο  $\min(x)$

4) Το μέγιστο  $\max(x)$

5) Το Product  $f_n(x) = \prod_{i=1}^n x_i$

## 4.1.2 Κλάσεις συναρτήσεων συνάθροισης

Υπάρχουν αρκετές κλάσεις συνάθροισης με διαφορετική σημασιολογία, εξάλλου οι κλάσεις καθορίζονται κυρίως από τη σημασιολογία της συνάθροισης. Σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανάγκη τις υψηλές και τις χαμηλές τιμές να τις κάνουμε μια ενιαία, δηλαδή το μέσο όρο αυτών. Σε άλλες περιπτώσεις συναρτήσεων συνάθροισης υπάρχουν λογικές συσχετίσεις (συνδυασμός, διαζευγμός), έτσι ώστε οι είσοδοι της συνάρτησης να ενισχύουν η μια την άλλη. Μερικές πάλι φορές η συμπεριφορά της συνάρτησης συνάθροισης εξαρτάται από τις εισόδους. Υπάρχουν τέσσερις κλάσεις συναρτήσεων συνάθροισης:

- Μέση τιμή
- Συνδυαστικές(Conjunctive)
- Διαζευκτικές(Disjunctive)
- Συνδυασμοί πολλών(Mixed)

### 4.1.2.1 Μέση τιμή

Οποιαδήποτε συνάρτηση μέσου ανήκει στην κλάση της μέσης τιμής. Τυπικά, μια συνάρτηση μέσου είναι μία συνάρτηση για την οποία ισχύει το  $\min(x) \leq f(x) \leq \max(x)$ . Παραδείγματα μέσου είναι ο αριθμητικός μέσος, το διάνυσμα με βάρος, ο γεωμετρικός μέσος, η εύρεση διαμέσου αριθμητικού μέσου με βάρος, υπολογισμός μεσοδιαστήματος κτλ.

### 4.1.2.2 Συνδυαστικές και διαζευκτικές συναρτήσεις

Ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα συνδυαστικών και διαζευκτικών συναρτήσεων συνάθροισης είναι οι υπονομαζόμενες τριγωνικές νόρμες (t-norms, t-co norms). Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα συνδυαστικής συνάρτησης συνάθροισης είναι το  $\text{product}(f_n(x) = \prod_{i=1}^n x_i)$ . Επίσης, το άθροισμα του Einstein είναι μια μορφή

διαζευκτικής συνάρτησης συνάθροισης  $(f(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2}{1 + x_1 x_2})$ .

### 4.1.2.3 Συνδυασμός πολλών συναρτήσεων συνάθροισης

Σε μερικές περιπτώσεις, οι υψηλές τιμές εισόδου χρειάζονται για να ενισχύσουν η μια την άλλη, και οι χαμηλές τιμές για να μειώσουν το αποτέλεσμα. Για αυτό, η συνάρτηση συνάθροισης πρέπει να είναι διαζευκτική για μεγάλες τιμές, συνδυαστική για μικρές τιμές, και μάλλον να χρησιμοποιεί το μέσο όρο όταν περιέχονται υψηλές αλλά και χαμηλές. Μια διαφορετική συμπεριφορά μπορεί να χρειαστεί όταν μαζί οι υψηλές τιμές με τις χαμηλές οδηγούν το αποτέλεσμα προς μια ενδιάμεση τιμή. Αυτό σε διαφορετικά διαστήματα η συνάρτηση μπορεί να αλλάζει σημασιολογία. Παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι η μηδενικές νόρμες. Ένα άλλο παράδειγμα είναι, η συνάρτηση :

$$f(x) = \frac{\prod_{i=1}^n x_i}{\prod_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n (1-x_i)}$$

Με σύγκλιση στο 0. Είναι conjunctive στο  $[0, 1/2]$ , disjunctive στο  $[1/2, 1]$  και αλλού είναι averaging.

### 4.1.3 Επιλογή συνάρτησης συνάθροισης

Υπάρχουν άπειρες συναρτήσεις συνάθροισης και είναι συγκεντρωμένες σε διάφορες κλάσεις. Η απορία έγκειται στο πώς να διαλέξουμε μια συνάρτηση συνάθροισης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Η απάντηση στο παραπάνω έχει δύο βασικά μέρη. Πρώτα από όλα, η συνάρτηση συνάθροισης πρέπει να είναι συνεπής με τις ιδιαιτερότητες της διαδικασίας συνάθροισης. Εφόσον δεν ανήκει σε μια κατηγορία πρώτης όψεως, πρέπει να αναλογιστούμε το γεγονός αν πρέπει να είναι συμμετρική και εάν αλλάζουν οι εισοδοί. Επιπρόσθετα, καλούμαστε να αναρωτηθούμε κάθε πότε αλλάζουν. Εάν απαντήσει σε αυτά τα ερωτήματα ο σχεδιαστής του συστήματος έρχεται πιο κοντά στο να απαντήσει τη συνάρτηση την οποία πρέπει να επιλέξει.

Το δεύτερο ζήτημα είναι να διαλέξει την κατάλληλη κλάση συναρτήσεων, και αν αυτή τελικά κάνει αυτό που πρέπει στην λειτουργικότητα της εφαρμογής. Επίσης, ο σχεδιαστής πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει ή να είναι προϊδεασμένος στο τι εισόδους θα έχει η συνάρτηση. Τα δεδομένα μπορεί να έρχονται από διαφορετικές πηγές και σε διαφορετικούς τύπους. Στη συνέχεια, καλό θα ήταν ο



σχεδιαστής να ρωτούσε τους παραγωγούς δεδομένων πάνω στο τομέα αυτό τι εισόδους και εξόδους πρέπει να έχει και να συσχετίσει τα αποτελέσματα με τα δικά του. Το να προσαρμόσει την συνάρτηση συνάθροισης ο σχεδιαστής στα δεδομένα θα τον οδηγήσει σε προβλήματα όπως προβλήματα προσέγγισης και παρεμβολής.

Όπως είναι δυνατόν είναι πολλά ακόμη κριτήρια για να διαλέξεις τη συνάρτηση όπως απλότητα, ευκολία στην υλοποίηση, αποδοτικότητα κτλ. Το πιο σημαντικό κριτήριο από όλα είναι να μην ξεφύγει από το τομέα της εφαρμογής και να είναι λειτουργικό.

## **4.2 Συνάθροιση Δεδομένων**

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ένας αισθητήρας είναι μία συσκευή η οποία μπορεί να ανιχνεύσει φυσικές παραμέτρους ενός συστήματος ή μιας περιοχής του ενδιαφέροντός μας, να μετατρέψει τα ανιχνεύσιμα δεδομένα σε ηλεκτρικά σήματα και να μεταδώσει τα σήματα στο σταθμό βάσης. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αισθητήρες, οι ασύρματοι αισθητήρες έχουν περιορισμένη ενεργεία επειδή παίρνουν ισχύ από μικρές μπαταρίες και είναι δύσκολο ή ακόμα και απίθανο να Τηλεφορτιστούν από απόσταση σε εχθρικά ή απομακρυσμένα περιβάλλοντα. Επιπρόσθετα, έχουν πολύ μικρότερη μνήμη και οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές είναι σχετικά πιο αργοί. Για τους παραπάνω λόγους, οι περισσότερες ερευνητικές ενέργειες έχουν γίνει προς την κατεύθυνση της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου.

Οι κόμβοι αισθητήρων συνήθως τοποθετούνται σε μεγάλο ή ακόμα και σε τεράστιο αριθμό στην περιοχή ενδιαφέροντός μας. Λόγω του μοτίβου πυκνής τοποθέτησης κόμβων, γειτονικοί κόμβοι μπορεί να ανιχνεύσουν όμοια δεδομένα πάνω σε ένα φαινόμενο που μελετούν. Το παραπάνω ονομάζεται χωρική συσχέτιση. Εφόσον οι κόμβοι αισθητήρων τροφοδοτούνται με ισχύ από μια μπαταρία, είναι σημαντικό να πραγματοποιούν κάθε λειτουργία τους ενεργειακά αποδοτικά. Για αυτό το σκοπό, είναι σημαντικό ο κάθε κόμβος αισθητήρων να αφαιρέσει την περιττή πληροφορία στα δεδομένα που λαμβάνει από τους γειτονικούς κόμβους προτού εκπέμψει τα τελικά δεδομένα στο σταθμό βάσης. Η συνάθροιση δεδομένων είναι μια αποτελεσματική τεχνική για την αφαίρεση της περιττής πληροφορίας και την βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Η βασική ιδέα είναι ο συνδυασμός των δεδομένων από διαφορετικές πηγές ώστε η

περιττή πληροφορία να έχει ελαχιστοποιηθεί όπως και η κατανάλωση της ενέργειας για την μετάδοση των δεδομένων. Η δεδομένο-κεντρική φύση των δικτύων αισθητήρων κάνει τη συνάθροιση δεδομένων ένα αρκετά σημαντικό ζήτημα για τη λειτουργία τους.

#### 4.2.1 Προκλήσεις στην συνάθροιση δεδομένων

Οι προκλήσεις στην συνάθροιση δεδομένων συμπεριλαμβάνουν 4 μεγάλα ζητήματα, την ενεργειακή αποδοτικότητα, τον έλεγχο συγχρονισμού, την οριοθέτηση της εφαρμογής και το QoS. Πιο συγκεκριμένα:

- **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Εφόσον ο κάθε αισθητήρας έχει περιορισμένη ισχύ λόγω μπαταρίας, θα πρέπει να υποστηριχτεί κάποιος αποδοτικός σχεδιασμός ύπνου για τη διατήρηση των ενεργειακών αποθεμάτων. Εφόσον οι περισσότεροι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι σε κοντινή απόσταση, τα δεδομένα που ανιχνεύονται από γειτονικούς κόμβους είναι παρόμοια, ειδικά σε μια περιβαλλοντολογική εφαρμογή.
- **Έλεγχος συγχρονισμού:** Επιπρόσθετα, στη διατήρηση των ενεργειακών αποθεμάτων σε υψηλά επίπεδα, είναι σημαντικό να πραγματοποιείται συνάθροιση δεδομένων μέσα σε εύλογο χρονικό περιθώριο.
- **Οριοθέτηση εφαρμογής:** Ένα δίκτυο αισθητήρων είναι σχεδιασμένο με βάση κάποια εφαρμογή. Για τις εφαρμογές που χρειάζονται μονάχα μια «περίληψη» τιμών σε μια μεγάλη περιοχή η συνάθροιση δεδομένων είναι αναγκαία για τη μείωση του κόστους επικοινωνίας όσο αφορά το εύρος ζώνης και την ενέργεια.
- **QoS :** Επιπλέον, στην ενεργειακή αποδοτικότητα, στον έλεγχο συγχρονισμού, μερικές φορές είναι αναγκαίο να πλοιρεί μια εφαρμογή τις ανάγκες όσο αφορά στην παροχή υπηρεσιών κατά τη συνάθροιση δεδομένων.

#### 4.2.2 Τεχνικές συνάθροισης δεδομένων

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη συνάθροιση δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Εφόσον η μείωση κατανάλωσης ενέργειας είναι ένα από τα πλέον σημαντικά ζητήματα στη συνάθροιση δεδομένων, μια αποδοτική τεχνική συνάθροισης δεδομένων θα πρέπει να κρατά σε ισορροπία το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται από κάθε αισθητήρα σε κάθε στάδιο της συνάθροισης. Με βάση τις

ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής, υπάρχουν κάποιες QoS μετρικές που πρέπει να εγγραφούν, όπως το χάσιμο πακέτων και η καθυστέρηση. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούν κάποιες κατηγορίες τεχνικών συνάθροισης συμπεριλαμβανομένου της ενεργειακά αποδοτικής συνάθροισης δεδομένων, της οριοθετημένες –εφαρμογής συνάθροιση δεδομένων και τις QoS περιορισμένης συνάθροισης δεδομένων.

#### **4.2.2.1 Ενεργειακά αποδοτική συνάθροιση δεδομένων**

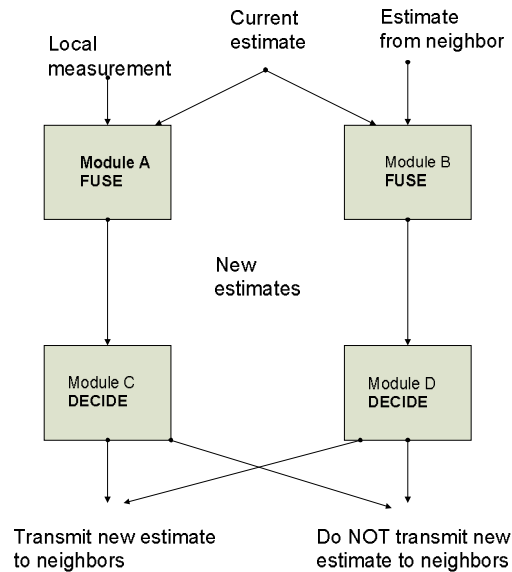
##### **4.2.2.1.1 Συνάθροιση με χρησιμοποίηση απλών μαθηματικών ορών**

Εφόσον η ενέργεια είναι ένα από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, οι περισσότερες έρευνες έχουν γίνει προς αυτή την κατεύθυνση. Ένα παράδειγμα συστήματος που χρησιμοποιεί τέτοια συνάθροιση είναι η εκτίμηση ενός πληθυσμού. Στον αλγόριθμο εκτίμησης πληθυσμού όροι όπως μέτρηση και άθροισμα είναι ευαίσθητοι ως προς την αναγνώριση ίδιων τιμών. Κάθε εκτίμηση πληθυσμού χρησιμοποιεί τον όρο άθροισμα για τον υπολογισμό του συνολικού πληθυσμού. Για αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντική η απόρριψη των ίδιων τιμών, ιδιαίτερα σε επικαλυπτόμενες περιοχές ανίχνευσης. Ο αλγόριθμος αυτός πρέπει να ξεχωρίζει το είδος που μελετάει η εφαρμογή και σε αυτό βοηθά η τεχνολογία RFID. Έτσι σχηματίζεται ένα δένδρο από ανιχνεύσιμες τιμές που φτάνουν μέσω συνάθροισης στο σταθμό βάσης.

##### **4.2.2.1.2 Ένα ενεργειακά αποδοτικό σχήμα συνάθροισης**

Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 6) κάθε κόμβος διατηρεί και μεταδίδει μια εκτίμηση της καθολικής συναθροίζομενης τιμής. Η καθολική συναθροίζομενη τιμή έχει τη μορφή ενός διανύσματος. Μια εκτίμηση στην ολοκληρωμένη της μορφή είναι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τιμής που εκτιμάται. Τα στοιχεία του διανύσματος είναι της μορφής  $(A, P_{AA})$  όπου A είναι η μέση τιμή και το  $P_{AA}$  ο πίνακας απόκλισης της εκτιμωμένης τιμής. Στο εν λόγω σχήμα συνάθροισης κάθε κόμβος δέχεται τις εκτιμήσεις από τους γείτονές του. Με αυτό το τρόπο έχει γνώση για την καθολική κατάσταση και μπορεί να αποφασίσει εάν οι δικές του πληροφορίες είναι χρήσιμες στους άλλους κόμβους ή όχι. Από τα πλέον σημαντικά στοιχεία του σχήματος είναι ότι δεν χρειάζεται να διατηρούμε μια ιεραρχική δομή γονέα-παιδιού, καθώς κάθε κόμβος έχει πληροφορία για την καθολική συναθροίζομενη τιμή. Όταν

έναν κόμβο κάνει μια τοπική μέτρηση ανανεώνει την εκτίμησή του για την καθολική τιμή και στην συνέχεια αποφασίζει εάν αξίζει να τη στείλει στους γείτονές του. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει μια εκτίμηση από κάποιο γείτονα, συνδυάζει την εκτίμηση που έλαβε με την δικιά του καθολική εκτίμηση και αποφασίζει πάλι εάν αξίζει να τη στείλει στους γείτονες του.



Modules of the generic algorithm.

### Εικόνα 6

## Συνάθροιση 2 καθολικών εκτιμήσεων

Αυτή η πράξη γίνεται στο κουτί B. Ο καλύτερος αλγόριθμος για την περίπτωση του σχήματος είναι ο CI (Covariance Intersection). Πρόκειται για μια γενικοποίηση των φίλτρων του Kalman και το βασικό πλεονέκτημα είναι το ότι επιτρέπει το φιλτράρισμα και τη συνάθροιση δεδομένων σε πιθανοτικά ορισμένες εκτιμήσεις χωρίς να γνωρίζει το βαθμό συσχέτισης των εκτιμήσεων. Ο CI δεν κοιτάει ανεξαρτησία εκτιμωμένων τιμών. Δεδομένων δύο εκτιμήσεων  $(A, P_{AA})$  και  $(B, P_{BB})$  του CI η συνδυασμένη εκτίμηση  $(C, P_{CC})$  ορίζεται ως

$$P_{CC} = (\omega P_{AA}^{-1} + (1 - \omega) P_{BB}^{-1})^{-1}$$

$$C = P_{CC} (\omega P_{AA}^{-1} A + (1 - \omega) P_{BB}^{-1} B)$$

Όπου  $P_{AA}$ ,  $P_{BB}$ ,  $P_{CC}$  είναι οι πίνακες τυπικής απόκλισης των A, B, C αντίστοιχα.

Το μόνο υπολογιστικό πρόβλημα του CI είναι ο υπολογισμός του  $\omega$ ,  $0 \leq \omega \leq 1$ , ώστε το  $P_{CC}$  να είναι ελάχιστο.

### Συνάθροιση μιας καθολικής εκτίμησης με μια τοπική μέτρηση

Αυτή η πράξη γίνεται στο κουτί A. Η λειτουργικότητα αυτού του μοντέλου-κουτιού βασίζεται στη συνάρτηση συνάθροισης που θα χρησιμοποιηθεί. Εφόσον οι ποσότητες που θέλουμε να συνδυάσουμε είναι τόσο διαφορετικές, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας να εφαρμοστεί, οπότε θα χρειαστεί να βασιστούμε σε ευριστικές τεχνικές. Ξεκινώντας, γίνεται μοντελοποίηση της πραγματικής τιμής μέτρησης ως μέσης τιμής και απόκλιση. Ως μέση τιμή θέτουμε την τιμή μέτρησης και ως απόκλιση τη διαφορά της μέτρησης θορύβου. Λόγω της διαφορετικότητας των δυο τιμών, η καλύτερη λύση είναι η χρησιμοποίηση της Gaussian κατανομής. Θέτουμε την κατανομή της τοπικής μέτρησης ως  $l(x)$  και την κατανομή της καθολικής εκτίμησης ως  $g(x)$ .

Στη συνέχεια, υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι η τοπική μέτρηση να είναι μεγαλύτερη από τη μέση καθολική εκτίμηση. Τότε, το αποτέλεσμα προκύπτει από τη συνάρτηση  $g_{new}(x) = \{w_1(x) * g(x)\} + l(x)$ , με  $0 \leq w_1(x) \leq 1$ . Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέση τιμή και απόκλιση για να την έρθει σε μορφή διανύσματος. Η δεύτερη περίπτωση είναι η μέτρηση να είναι μικρότερη της μέσης καθολικής εκτίμησης. Στην περίπτωση αυτή, το αποτέλεσμα υπολογίζεται από τη συνάρτηση  $g_{new}(x) = \{w_2(x) * l(x)\} + g(x)$ , με  $0 \leq w_2(x) \leq 1$ . Αυτή η συνάρτηση όμως δεν αποδίδει όταν η εκτίμηση για την καθολική τιμή πέφτει κατακόρυφα. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, εάν η προηγούμενη τοπική μέτρηση ήταν κοντά στην τιμή της καθολικής εκτίμησης, θέτουμε μεγαλύτερο βάρος στη τοπική μέτρηση.

Το βάρος  $w_1(x)$  και  $w_2(x)$  είναι Gaussian κατανομές με διάστημα  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  και υπολογίζονται ως:

$$w_1(x) = 0, \text{ για κάθε } x \leq \mu_1 - 3\sigma_1 \text{ και } w_1(x) = 1 \text{ για κάθε } x > \mu_1 - 3\sigma_1 \text{ και}$$

$$w_2(x) = 0 \text{ για κάθε } x \leq \max(\mu_1 - 3\sigma_1, \mu_2 - 3\sigma_2) \text{ και } w_2(x) = 1 \text{ για κάθε } x > \max(\mu_1 - 3\sigma_1, \mu_2 - 3\sigma_2).$$

## Λήψη απόφασης

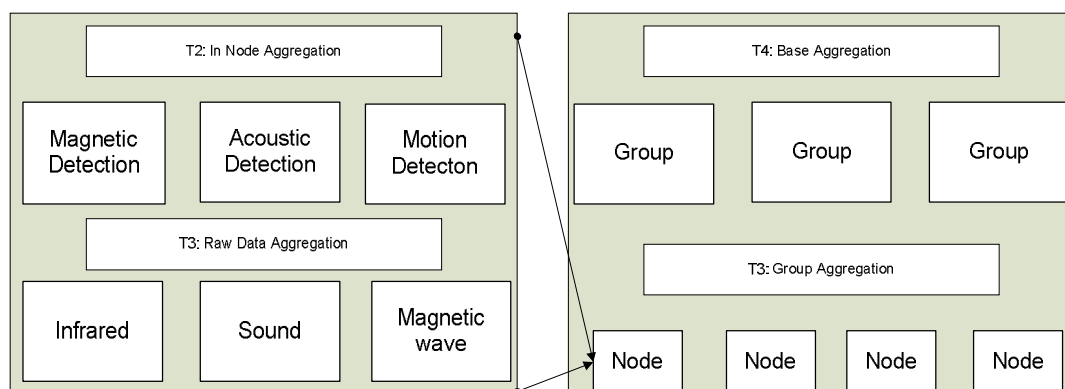
Αυτή η λειτουργία αναφέρεται στα κουτιά D, C. Όταν ένας κόμβος υπολογίσει μια νέα εκτίμηση δεν πρέπει απαραίτητα να τη μεταδώσει. Στην πραγματικότητα πρέπει να το μεταδώσει μοναχά εάν πρόκειται να επιφέρει σημαντική αλλαγή στον γείτονα την εκτίμηση. Για να αποφασίσει ένα κόμβος χρησιμοποιεί ένα πίνακα που κρατά τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις των γειτόνων του. Όταν ένας κόμβος υπολογίσει μια νέα εκτίμηση, συνδυάζει αυτή τη τιμή με όλες τις εκτιμήσεις από το πίνακα που έχει, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του κουτιού στο B. Ο κόμβος υπολογίζει τις διαφορές μεταξύ τις τιμές του και των τιμών του πίνακα. Εάν η διαφορά είναι παραπάνω από ένα κατώφλι για κάθε τιμή του πίνακα τότε θα μετάδιδε την τιμή που εκτίμησε. Εάν θέσουμε το κατώφλι 0,05 τότε οποιοσδήποτε αλλαγές πέρα του 5% θα παραμένουν μη ανιχνεύσιμες. Όσο μεγαλύτερο είναι το κατώφλι τόσο μικραίνει και η επιθυμητή ακρίβεια που θέλουμε\*.

### 4.2.2.1.3 Μια αρχιτεκτονική συνάθροισης δεδομένων τεσσάρων επιπέδων

Θεωρητικά ο ρυθμός συνάρτησης δεδομένων προκύπτει από τη διαίρεση των δεδομένων προς τα συναθροισμένα. Μια συνηθισμένη στρατηγική συνάθροισης δεν είναι ευέλικτη ή επαρκής όσο μια επιθετική ώστε να καταφέρει 1000:1 ρυθμό συνάθροισης. Εάν η συνάθροιση γίνει σε επίπεδο κόμβου υπάρχει πιθανότητα να χαθεί πληροφορία νωρίς που θα ήταν σημαντική. Εάν γίνει η συνάθροιση σε κεντρικό σημείο στη δίκτυο υπάρχει πιθανότητα συγκρούσεων, χάσιμο πακέτων και πολύ πιθανό να χρειάζεται και περισσότερη ενεργεία. Για την ισοστάθμιση όλων των παραπάνω δημιουργήθηκε το παρακάτω πρωτόκολλο.

---

\* [16] A. Boulis, S. Ganeriwal, M. Srivastava, “Agregation in sensor networks: an energy-accuracy trade-off”.



**Εικόνα 7**

Στο πρώτο επίπεδο είναι το επίπεδο της λήψης των δεδομένων και της απλής συνάθροισής τους. Σε αυτό το επίπεδο λαμβάνει τα ανιχνεύσιμα δεδομένα από τους αισθητήρες και τα μετατρέπει σε τιμές εμπιστοσύνης που ποικίλουν από 0 έως 1, υποδηλώνοντας κατά ποσό σίγουρος είναι ο αλγόριθμος για την ύπαρξη ενός στόχου. Ο ρυθμός μετατροπής της συνάθροισης σε αυτό το επίπεδο χαρακτηρίζεται από την πιο αργή παραγωγή δεδομένων και την συχνότητα παραγωγής διανυσμάτων εμπιστοσύνης. Σε αυτό το επίπεδο με τη βοήθεια του VigilNet επιτυγχάνεται ρυθμός 50~100:1.

Στο δεύτερο επίπεδο, ένας κόμβος παίρνει τις τιμές εμπιστοσύνης από διάφορους αισθητήρες και δημιουργεί απλό διάνυσμα ταξινόμησης, το οποίο δεικνύει τον τύπο του στόχου και τις αντίστοιχες τιμές εμπιστοσύνης. Με τρεις αισθητήρες αυτό το επίπεδο επιτυγχάνει 3:1 ρυθμό συνάθροισης.

Στο τρίτο επίπεδο, όλοι οι κόμβοι που ανιχνεύουν τον ίδιο στόχο ενσωματώνονται σε μια ομάδα για να παρακολουθούν τον ίδιο στόχο. Κάθε ομάδα αντιπροσωπεύεται από ένα αρχηγό, οποίος διατηρεί συνεχώς επαφή με το στόχο κάνοντας συνάθροιση όλες τις αναφορές από τους κόμβους-μέλη της ομάδας. Ο αρχηγός δεν κάνει μόνο συνάθροιση τις τοποθεσίες που βρίσκονται οι κόμβοι αλλά και τα διανύσματα εμπιστοσύνης τους.

Περιοδικά ο αρχηγός στέλνει μια αναφορά, αποτελούμενη από μια χρονοσφραγίδα, τη θέση συνάθροισης και ένα διάνυσμα εμπιστοσύνης στη βάση. Η πυκνότητα ανίχνευσης καθορίζει και το ρυθμό συνάθροισης. Με το VirgilNet αυτό ποικίλει από 3:1 έως 10:1. Αναφορικά με τη λειτουργία του αρχηγού, στην αρχική φάση ένα υποσύνολο κόμβων έχει εκλεχτεί να είναι οι υποψήφιοι αρχηγοί με την προϋπόθεση να προσφέρουν 100% κάλυψη του στόχου. Αργότερα, στη φάση ανίχνευσης, όταν οι κομβοί ανιχνεύσουν το στόχο, στέλνουν αμέσως στον αρχηγό

τους (ένας πιθανός αρχηγός πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση μέχρι δύο φορές από την εμβέλεια ανίχνευσης του κόμβου που ανακάλυψε το στόχο). Αυτές οι αναφορές κρiάτιούνται τοπικά από τους πιθανούς αρχηγούς μέχρι να μαζέψουν αρκετές και να ανιχνεύουν το στόχο. Αυτός ο πιθανός αρχηγός γίνεται πραγματικός εκτιμά την τωρινή θέση του στόχου και στέλνει μια συναθροισμένη αναφορά στην βάση. Οι υπόλοιποι που δεν έγιναν διαγραφούν τα δεδομένα και ξεκινάνε από την αρχή για νέο στόχο.

Το τέταρτο επίπεδο της συνάθροισης συμβαίνει στη βάση. Εκεί συναθροίζονται οι αναφορές από μια λογική ομάδα για να παραχτεί μια τελική αναφορά που περιέχει το τύπο, συμπεριφορά, ταχύτητα και σφραγίδα ανίχνευσης. Ο ρυθμός συνάθροισης σε αυτό το στάδιο είναι από 2:1 έως 10:1. Πιο ειδικά, για τη συνάθροιση του 4 επιπέδου, αρχικά η βάση παίρνει σαν είσοδο τις αναφορές των αρχηγών τους και παράγει λογικούς στόχους με βάση τις χωρικές συσχετίσεις των αναφορών. Στη συνέχεια, με βάση τις πληροφορίες για τους στόχους, η βάση δεν λαμβάνει υπόψη της διπλά μηνύματα, μηνύματα που έχουν μεγάλη καθυστέρηση και λανθασμένους συναγεμμούς. Τέλος, χρησιμοποιεί τα εισερχόμενα μηνύματα για να παρέχει επιπλέον πληροφορία για τους στόχους όπως, ταχύτητα και πληροφορίες για τον τύπο του στόχου.

Πιο συγκεκριμένα, μόλις στην βάση έρχεται μια αναφορά ανίχνευσης, η βάση προσπαθεί να την συνδυάσει με τον πιο κοντινό λογικό στόχο. Εάν η απόσταση από την περιοχή της αποστολής της αναφοράς και του λογικού στόχου ξεπερνά ένα κατώφλι ένας νέος στόχος παράγεται. Διαφορετικά, ενσωματώνεται στο παλιό στόχο και προσφέρει «φρέσκιες» πληροφορίες. Ένας στόχος σταματά να υφίσταται εάν για ένα προσυμφωνημένο διάστημα δεν έχουμε αναφορές για αυτόν. Για την αποφυγή λανθασμένων συναγεμώσεων, συσσωρεύει χωροχρονικές συσχετίσεις για μια προσυμφωνημένη απόσταση μέχρι να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη του στόχου\*.

#### **4.2.2.1.4 Μια ενεργειακά αποδοτική τεχνική(in network) συνάθροισης δεδομένων**

Ο πρώτος στόχος αυτής της τεχνικής είναι η μείωση του μεγέθους των πακέτων. Ο δεύτερος στόχος είναι η μείωση του αριθμού των πακέτων που στέλνονται. Για να

---

\* [17] T. He, L. Gu, L. Luo, T. Yan, J. Stankovic, S. Son, “An Overview of Data Aggregation Architecture for Real-Time Tracking with Sensor Networks”



μειωθεί το μέγεθος των πακέτων κάθε αισθητήρας πρέπει να έχει τιμές, στον buffer, από όλους τους κόμβους-παιδιά του και να πραγματοποιεί μερική συνάθροιση δεδομένων πρώτου στείλει την τιμή του στο κόμβο-γονέα του. Σε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων, η συνάθροιση δεδομένων με μικρού μεγέθους πακέτα, τα οποία έχουν μικρές τιμές, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και μειώνει και το κόστος υπολογισμού. Επιπρόσθετα, με τη χρήση ευρετηρίου σε κάθε κόμβο μειώνεται ο αριθμός των πακέτων που χρειάζονται για την απάντηση οποιουδήποτε ερωτήματος για δεδομένα από τη βάση δεδομένων.

Επιπλέον, για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας έχει υλοποιηθεί ένα 0 ευρετήριο, όπου όταν διαθέτει ένας κόμβος ένα τέτοιο δηλώνει ότι έχει πολύ χαμηλά ενεργειακά αποθέματα. Η τεχνική αυτή αποτελείται από τρεις φάσεις, τη δημιουργία δένδρου δρομολόγησης, τη δημιουργία πίνακα ευρετηρίου του δένδρου και τη συμφωνία κοινής τιμής.

### **Δημιουργία Δένδρου Δρομολόγησης**

Αφού οι κόμβοι τοποθετηθούν τυχαία δημιουργείται ένα δένδρο δρομολόγησης. Αρχικά, ο κοντινότερος κόμβος στη βάση δεδομένων επιλέγεται να είναι η ρίζα του δένδρου (επίπεδο 0). Όταν επιλεγθεί η ρίζα, μεταδίδει αιτήσεις που περιλαμβάνουν τον αριθμό επιπέδου, σε όλους τους ενός hop γείτονες (μέσα στην εμβέλεια μετάδοσης). Όταν ένας κόμβος-γείτονας λάβει αίτηση αυξάνει το επίπεδο του κατά ένα και επιλεγεί τον κόμβο-πατέρα του ώστε να είναι ένα επίπεδο παραπάνω από αυτόν που έστειλε την αίτηση. Στη συνέχεια, ξανάμεταδίδει νέες αιτήσεις που περιλαμβάνουν τον αριθμό του νέου επιπέδου σε όλους τους γείτονες μέχρι να μην υπάρχουν γειτονες. Οι τελευταίοι κομβίοι που βρίσκονται είναι οι κόμβοι- φύλλα του δενδρου.

Όταν ένας κόμβος λάβει δύο αιτήσεις από δύο διαφορετικούς κόμβους, εάν έχει επίπεδο, πετάει τη δεύτερη αίτηση. Εάν δεν έχει επίπεδο επιλεγεί την αίτηση που έλαβε πρώτη. Κάθε κόμβος έχει μόνο ένα γόνεα. Μετά την κατασκευή του δένδρου κάθε κόμβος στέλνει την τιμή που διαθέτει στον κομβο-πατέρα, ξεκινώντας από τους κόμβους-φύλλα. Κάθε κόμβος αποθηκεύει την τελευταία σταλμένη τιμή. Κάθε κόμβος-πατέρας υπολογίζει τη μέση τιμή των τιμών που έχει λάβει και στέλνει το αποτέλεσμα στον κόμβο-γονέα του μέχρι η τιμή αυτή να φτάσει στη βάση δεδομένων.

## Δημιουργία Πίνακα Ευρετηρίου στο Δένδρο Δρομολόγησης

Όταν ο σταθμός βάσης λάβει τις τιμές, στέλνει ένα πακέτο, που περιλαμβάνει το πίνακα ευρετηρίου, σε όλους τους κόμβους. Την πρώτη στιγμή που ο πίνακας ευρετηρίου θα σταλεί, η τιμή της διακύμανσής του ποικίλει μεταξύ μεγάλων αριθμών. Εάν ο πίνακας ευρετηρίου είναι μεγάλος μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις. Όταν ένας κόμβος λάβει τον πίνακα ευρετηρίου συγκρίνει τις εγγραφές του με το πίνακα ευρετηρίου και εγγραφεί και τον εαυτό του.

Στο δεύτερο γύρο ο αριθμός της τιμής διακύμανσης του ευρετηρίου μικραίνει. Μετά από κάποιους γύρους οι τιμές του ευρετηρίου είναι πιο έγκυρες. Ο αριθμός των γύρων εξαρτάται από το μέγεθος του πίνακα ευρετηρίου. Η τιμή της διακύμανσης του ευρετηρίου σχετίζεται κυρίως με το τύπο του κόμβου αισθητήρα. Οι κόμβοι αισθητήρα με εγγραφές που διαφέρουν σε μεγάλες διακυμάνσεις πρέπει να έχουν μεγάλη τιμή διακύμανσης ευρετηρίου. Όταν ένας κόμβος γονέα λάβει ένα ευρετήριο από ένα κόμβο παιδί γονέας συγκρίνει όλες τις εγγραφές του με τις δικές του, εάν είναι όλες παρόμοιες συμπεριλαμβάνει και τον εαυτό του. Παρόλα αυτά εάν όλες οι εγγραφές δεν είναι ίδιες, ο κόμβος εξετάζει το ποσοστό των εγγραφών που είναι παρόμοιες. Εάν το ποσοστό είναι 75% και άνω, τότε περιλαμβάνει τον εαυτό του στο κυρίαρχο ευρετήριο και αγνοεί τα υπόλοιπα. Εάν η ομοιότητα των εγγραφών είναι κάτω από 75% ο κόμβος γονέας περιλαμβάνει τον εαυτό του μεταξύ του μεγαλύτερου και του μικρότερου ευρετηρίου. Μόλις οι κομβοί γονείς και οι κομβοί παιδιά συμπεριληφθούν στο πίνακα ευρετηρίου, συμφωνούν για μια κοινή τιμή.

## Συμφωνία Κοινής Τιμής

Αφού ένας γονέας κόμβος λάβει τιμές από τους κόμβους παιδιά του, αρχικά υπολογίζει τη μέση τιμή των τιμών που έλαβε, την αποθηκεύει και τη στέλνει στα παιδιά του. Αυτή η τιμή ονομάζεται κοινή τιμή και συμβολίζεται ως  $c_n$ . Κάθε κόμβος αποθηκεύει δύο τιμές, το  $c_n$  από το γονέα του και το  $c_n$  από τα παιδιά του. Όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει μια νέα μέτρηση στο γονέα του, αυτός αφαιρεί το  $c_n$  από τη μέτρησή του και προωθεί την τιμή στο γονέα του. Το  $c_n$  θα ενημερωθεί σε περίπτωση που παρατηρηθεί μεγάλη αλλαγή στη μέση τιμή του κόμβου παιδιού. Όταν ένας κόμβος γονέα παρατηρήσει μια τέτοια αλλαγή μεταξύ του κόμβου παιδιού και του  $c_n$ , ξαναστέλνει την τιμή της νέας μέσης τιμής ως το νέο  $c_n$  στον κόμβο παιδί.

## Συνάρτηση Συνάθροισης Μέσης τιμής

Αν ένα ερώτημα τεθεί για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της θερμοκρασίας στο δίκτυο, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για να απαιτηθεί από τον αλγόριθμο. Στην πρώτη προσέγγιση, όταν το ερώτημα φτάσει στο κόμβο ρίζα, ο κόμβος ρίζα δεν προωθεί το ερώτημα στα παιδιά του αλλά επιστρέφει την κοινή τιμή *cn*.

Στη δεύτερη προσέγγιση, όταν το ερώτημα φτάσει ένα κόμβο, ο κόμβος εξετάζει την τρέχουσα τιμή του και το ευρετήριο του. Εάν η τρέχουσα τιμή βρίσκεται στο ίδιο ευρετήριο κόμβος δεν προωθεί καμιά τιμή, καθώς δεν θα προσδώσει καμιά μεγάλη αλλαγή στο τελικό αποτέλεσμα. Εάν η τρέχουσα τιμή δεν βρίσκεται στις εγγραφές του ευρετηρίου, ο κόμβος αλλάζει ευρετήριο και στέλνει την κοινή τιμή του αφαιρουμένη κατά την τιμή του στο κόμβο πατέρα. Αφού λάβει ο πατέρας τη νέα τιμή ανανεώνει την κατάσταση του ευρετηρίου του και του *cn* εάν χρειάζεται.

Τότε ο πατέρας κόμβος υπολογίζει την νέα μέση τιμή. Αν θεωρήσουμε *Avg* την παλαιά μέση τιμή, *Avg<sub>new</sub>* την νέα μέση τιμή, *nv* τη νέα τιμή που στάλθηκε από το παιδί, *p* τον αριθμό των παιδιών που συμπεριληφθήκαν στο ερώτημα. Ο πατέρας κόμβος υπολογίζει τη νέα μέση τιμή ως εξής\*:

$$Avg_{new} = \frac{(Avg * p) + nv}{p}$$

### 4.2.2.2 Βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα συνάθροιση δεδομένων

Η συνάθροιση δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με ένα εμπνευσμένο τρόπο συνδυάζοντας γνώση τεχνητής νοημοσύνης και σενάρια δικτύων. Μια πιθανή τεχνική για να επιτευχθεί απόρριψη περιττών δεδομένων είναι η ελαχιστοποίηση των διαστάσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί σε κάποια σενάρια χρησιμοποιώντας ένα βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα αλγόριθμο, ο οποίος τρέχει σε ένα βηματικό μοτίβο προσαρμόζοντας τα βάρη για να μάθει ασυσχέτιστες εισόδους. Ένας τέτοιος αλγόριθμος μπορεί να υποστηριχθεί σε μονάδες Smart-It (αισθητήρες με μοντελοποίηση επικοινωνίας και με μικρό μέγεθος).

---

\* [15] M. Watfa, W. Daher, H. Azar, “A Sensor Network Data Aggregation Technique”, October 2008

Ένας τυχαίος αριθμός Smart-It αισθητήρων σχηματίζουν μια συστάδα της οποίας οι εισόδοι συλλέγονται από τους αρχηγούς της εκάστοτε συστάδας. Κάθε αρχηγός συστάδας αποτελεί και αυτός μια μονάδα Smart-It και είναι ένα ARTN (δίκτυο προσαρμοσμένης αντιληψης), το οποίο αποτελείται από τρία επίπεδα, F0, F1, F2. Ο πιο υψηλό επιπέδου αρχηγός συστάδας υλοποιεί το ART και εξασφαλίζει τα σήματα που λαμβάνει από τα πιο κάτω επίπεδα.

Το επίπεδο εισόδου του αρχηγού συστάδας, F0, αποθηκεύει τα bit εισόδου που μεταδίδονται στο επίπεδο F2, μέσω του επιπέδου σύγκρισης F1. Κάθε μοτίβο εισόδου συγκρίνεται με τα δεδομένα ανίχνευσης που είναι αποθηκευμένα σε κάθε κόμβο και ένας χρόνος ενεργοποίησης  $T$  υπολογίζεται σε κάθε κόμβο. Ο κόμβος με το μεγαλύτερο χρόνο  $T$  είναι ο νικητής και το βάρος του συγκρίνεται με την εκάστοτε είσοδο του F1. Εάν η συνθήκη ταιριάσματος ικανοποιεί ένα προ-επιλεγμένο κατώφλι που ονομάζετε  $p$  τότε  $p_i$  δεσμεύει τη συγκεκριμένη είσοδο και της ανανεώνει το βάρος.

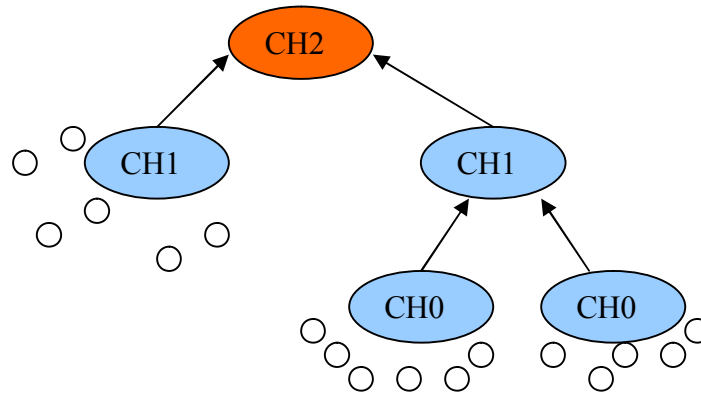
Ο κύκλος σύγκρισης συνεχίζει μέχρι να βρεθεί μια είσοδος που ταιριάζει στο μοτίβο. Εάν όχι, το δίκτυο τότε αυτό-εκπαιδεύεται και θέτει μια νέα κατηγορία στο επίπεδο F2. Με αυτό τον τρόπο, κάθε μοτίβο εισόδου έχει κατηγοριοποιηθεί σε μια συστάδα. Θέτουμε  $n$  τον αριθμό των αισθητήρων που βρίσκονται σε μια συστάδα και  $k$  τον αριθμό των κόμβων που στέλνουν στον αρχηγό της συστάδας. Επίσης, θέτουμε το μέγεθος των «ακατέργαστων» δεδομένων ως  $r$  bytes και τον αριθμό των διαφορετικών κατηγοριών, οποίος είναι ακέραιος, σε  $c$  bytes. Η αποταμίευση ενέργειας στην επικοινωνία  $E$ , μπορεί να υπολογιστεί ως τον λόγο του μεγέθους εισόδου με το μέγεθος εξόδου.

$$E_s = \frac{n * k * r}{k * c} = \frac{n * r}{c}$$

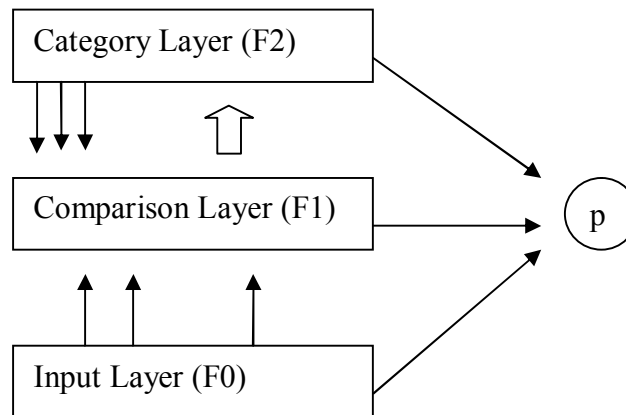
Όπου  $E$  είναι τάξης μεγέθους του  $k$  και αυτή η μεγάλη ποσότητα αποταμίευσης ενεργείας οφείλεται στο γεγονός ότι  $r \gg c$ .

Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 8) βλέπουμε τη συνάθροιση δεδομένων από τους κατώτερους clusterhead. Με άχρωμο κύκλο παρουσιάζονται οι μονάδες Smart-it, με μπλε κύκλο παρουσιάζονται οι πιο κάτω επιπέδου clusterhead που υλοποιούν ένα

δίκτυο Fuzzy ART. Τέλος, με πορτοκαλί κύκλο παρουσιάζουμε την πιο πάνω επιπέδου clustehead που υλοποιεί ένα δίκτυο ART\*.



Εικόνα 8



Εικόνα 9: Εσωτερικά επίπεδα του κάθε CH

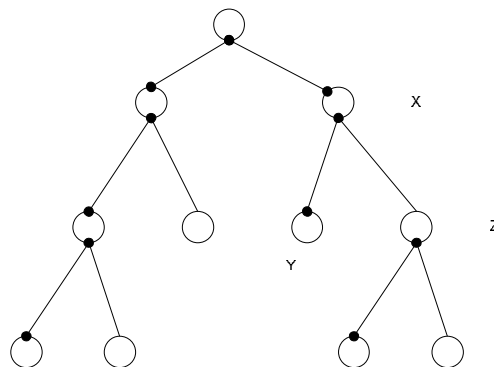
\* [19] A. Kulakov, d. Darcev, G. Trajkovski, “Application of wavelet neural-networks in wireless sensor networks”, in Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference SNPD/SAWN’05.

[20] G. Carpenter, S. Grossberg, “Integrating symbolic and neural processing in a self-organizing architecture for pattern recognition and prediction”

### 4.2.2.3 Συναρτήσεις συνάθροισης περιορισμένες όσο αφορά την καθυστέρηση

Στην συνάθροιση δεδομένων, ένας κόμβος αισθητήρων πρέπει να συνδυάζει τα δικά του δεδομένα και τα δεδομένα που έχει παραλάβει από τους 1 hop γείτονες. Αφού τα συνδυάσει τα μεταφέρει στο σταθμό βάσης. Για αυτό το λόγο, κάθε κόμβος πρέπει να περιμένει τα δεδομένα από τους γείτονες προτού τα στείλει στον σταθμό βάσης. Αυτό το γεγονός προσδίδει μια καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων, γεγονός που αποφέρει πρόβλημα ελέγχου συγχρονισμού στην συνάθροιση δεδομένων. Για τη λύση αυτών των προβλημάτων, ένα δένδρο συνάθροισης δεδομένων πρέπει να ληφθεί υπόψη, στο οποίο κάθε κόμβος δένδρου αποκρίνεται διαφορετικά σε κάθε ερώτημα και η καθυστέρηση απόκρισης οφείλεται στην απόσταση από το επίπεδο που βρίσκεται μέχρι την κορυφή. Η καθυστέρηση αυτή μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας μια μηχανή τελικών καταστάσεων FSM (βασισμένο στις πίσω αναφορές σχήμα).

**Σχήμα με τη λειτουργία FSM:** Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 10), ο χρόνος αναμονής σε κάθε επίπεδο του δένδρου απόκρισης προσαρμόζεται με βάση την απόκριση της μηχανής κατάστασης, έτσι διατηρούμε ένα επίπεδο ακριβείας.



Data Aggregation Tree

**Εικόνα 10**

Για ευκολία θεωρούμε ότι μόνο οι κόμβοι φύλλα παράγουν δεδομένα. Σε αυτό το δένδρο η χρονική καθυστέρηση για συνάθροιση δεδομένων του κόμβου X εξαρτάται από τα δύο του παιδιά, τους κόμβους Y και Z. Εάν ο X περιμένει του Z το πακέτο,

περιμένει πολύ, καθώς ο Z πρέπει πρώτα να κάνει συνάθροιση των δεδομένων από τα παιδιά του, μαζί με τα δικά του δεδομένα, προτού τα στείλει τα δεδομένα στο X, σε αντίθεση με το κόμβο Y όπου δεν θα περιμένει πολύ το πακέτο του, καθώς δεν έχει παιδιά και άρα δεν χρειάζεται να πραγματοποιήσει συνάθροιση. Το αρχικό τμήμα του αλγορίθμου FSM κρατά το χρόνο αναμονής ψηλά ώστε περισσότερες αποκρίσεις σε ερωτήματα να συλλέγουν για καλύτερη ακρίβεια.

Όταν το επίπεδο ακριβείας φτάσει μια επιθυμητή σταθερή τιμή, ο χρόνος αναμονής αναπροσαρμόζεται με βάση την χρονική καθυστέρηση. Μια φάση προσαρμογής ακολουθεί για να καταναίμει τις απαραίτητους παραμέτρους όπως βάθος στους κόμβους αισθητήρων, το οποίο είναι σημαντικό για τη δημιουργία του δένδρου. Βάσει του βάθους του δένδρου, τη μέγιστη λανθάνουσα κατάσταση (latency), και το βέλτιστο πλήθος αποκρίσεων, η ρίζα ή η καταβόθρα υπολογίζει μια προσεγγιστική τιμή για την περίοδο συνάθροισης δεδομένων T.

Μετά τη φάση προσαρμογής η πηγή κάνει broadcast τη μέγιστη περίοδο συνάθροισης T μαζί με διάφορα αιτήματα. Η πληροφορία μετρήματος hop από τα φύλλα μέχρι τη ρίζα του δένδρου διαδίδεται γιατί θα χρειαστεί αργότερα για το υπολογισμό της περιόδου. Ανάλογα με το επίπεδο που βρίσκεται ένας κόμβος προσαρμόζει την περίοδο και περιμένει τόσο ώστε να έρθουν τα δεδομένα.

**Μεταβλητές στο σχήμα βάση FSM:** Με βάση τις αποκρίσεις από τους κόμβους η καταβόθρα υπολογίζει μια πιο σωστή τιμή για την T για την επόμενη περίοδο χρησιμοποιώντας FSM και το βέλτιστο αριθμό αποκρίσεων ( $N_{opt}$ ), όπου είναι με τη σειρά του εξαρτώμενος από την τοπολογία του συστήματος, και εκπέμπει την αίτηση δεδομένων στο δίκτυο μέσα στην περίοδο συνάθροισης δεδομένων.

Στην πρώτη εκδοχή του παραπάνω σχήματος (εικόνα 8) με βάση FSM, σε κάθε βήμα υπολογισμού της περιόδου, συγκρίνεται ο βέλτιστος αριθμός μηνυμάτων που περιμέναμε με το αριθμό μηνυμάτων που πραγματικά ελήφθησαν. Εάν λιγότερα μηνύματα ελήφθησαν, η περίοδος συνάθροισης αυξάνεται για κάθε κόμβο. Εάν ελήφθησαν περισσότερα από το βέλτιστο αριθμό η περίοδος μειώνεται δραματικά. Στην δεύτερη εκδοχή το σχήμα αυτό προσαρμόζεται στην απόδοση του δικτύου και συγκρίνει κάθε φορά τον αριθμό των μηνυμάτων που ελήφθησαν με το επιθυμητό.

Βάσει των παραπάνω πληροφοριών η επόμενη περίοδος συνάθροισης υπολογίζεται ως:

$$T_{n+1} = T_n - 1, \text{ if } N_{rec} > N_{opt}$$

$$T_{n+1} = T_n + 1, \text{ if } N_{rec} < N_{opt}$$

#### 4.2.2.4 Συναρτήσεις συνάθροισης με περιορισμό QoS

Επιπρόσθετα, στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και του χρονικού συγχρονισμού στη συνάθροιση δεδομένων, είναι σημαντικό να εκπληρώσουμε τις ανάγκες της εφαρμογής ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό επίπεδο QoS όταν πραγματοποιούμε συνάθροιση δεδομένων. Με την έννοια «περιορισμούς στο QoS» εννοούμε την καθυστέρηση μετάδοσης, το χάσιμο πακέτων κτλ.

Θα γίνει αναφορά σε ένα απλό σύστημα που δεν περιέχει κάποια δομή δένδρου ή συστάδας και βασίζεται στο περιορισμό end-to-end QoS (με άλλα λόγια end-to-end καθυστέρηση  $D$  μετάδοσης πακέτου, ή αλλιώς αναφοράς). Εάν το πακέτο παραδοθεί στην καταβόθρα μέσα σε  $D$  χρόνο από την αρχική του δημιουργία, θεωρείται μια επιτυχημένη αποστολή. Σε ένα ενδιάμεσο κόμβο, εάν η καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ του κόμβου δημιουργίας και του κόμβου παραλαβής είναι παραπάνω από  $D$ , τότε το πακέτο αποβάλλεται ως άχρηστο. Τρεις περιπτώσεις μπορούν να δημιουργηθούν με βάση το περιορισμό της καθυστέρησης μετάδοσης.

- Εάν ο περιορισμός καθυστέρησης ικανοποιείται, ο συναθροιστής κόμβος αναβάλει την μετάδοση πακέτου για ένα προσχεδιασμένο χρονικό διάστημα με μια γνωστή εκ των προτέρων πιθανότητα, κατά τη διάρκεια της οποίας επεξεργάζεται και συναθροίζει όποιο πακέτο φτάνει και παράγει νέα πακέτα πριν την μετάδοση τους στο επόμενο hop.
- Ο περιορισμός καθυστέρησης ικανοποιείται μόνο εάν η αποστολή του πακέτου δεν αναβληθεί, ο συναθροιστής προσπαθεί να προωθήσει το πακέτο στον επόμενο hop γείτονα.
- Εάν ο περιορισμός καθυστέρησης δεν μπορεί να ικανοποιηθεί με τίποτα, ο συναθροιστής πετάει το πακέτο για να αποφύγει περεταίρω κατανάλωση πόρων του συστήματος.

Το χαμηλό όριο του  $P_{succ}$  (επιτυχημένης μετάδοσης πακέτου στη καταβόθρα με καθυστέρηση  $D$ ) είναι ίσο με την πιθανότητα ένα πακέτο να λάβει  $C$  φορές συνάθροιση δεδομένων και να μεταδοθεί κατά μήκος του μονοπατιού με άνω όριο



χρόνου μετάδοσης  $C$ . Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι ένα μικρό  $D$  έχει αποτέλεσμα μικρό  $P_{succ}$ .

### **Φέρνοντας σε ισορροπία τα trade-offs**

Εκτός από τα παραπάνω, ένα σχήμα συνάθροισης δεδομένων καλείται να ισορροπήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα, την καθυστέρηση, την ακρίβεια και την πιθανότητα υπερχειλίσις μνήμης. Μια περιοδική αναφορά δεδομένων υπάρχει σε κάθε  $t$  μονάδες. Εάν σε κάποιο σημείο η αλλαγή των ανιχνεύσιμων δεδομένων είναι παραπάνω από ένα κατώφλι  $u$ , ένα μόνο δείγμα συλλέγεται, ανεξαρτήτως χρόνου. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος μαζεύει και αποθηκεύει επίσης  $N$  τέτοια δείγματα προτού παράγει ένα πακέτο για μετάδοση στον επόμενο κόμβο. Οι παράμετροι  $t$  και  $u$  καθορίζουν την μέτρηση της ποιότητας ή της ακρίβειας. Καθώς το  $N$  και το  $t$  μειώνονται, η ενεργειακή αποδοτικότητα της συλλογής δεδομένων και της μετάδοσης αυξάνει, καθώς όμως η συσχετισμένη καθυστέρηση και η ανάγκη για αποθήκευση μεγαλώνει επίσης.

Από την άλλη μεριά, η ακρίβεια των συλλεγμένων δεδομένων αυξάνεται καθώς το  $u$  και το  $t$  μειώνονται. Σύμφωνα με μελέτες η πιθανότητα υπερχειλίσις μνήμης αυξάνεται όταν ο φόρτος του δικτύου αυξάνεται ή η κατάσταση του καναλιού χάνει την αρχική του ποιότητα. Επίσης, όταν ο φόρτος του δικτύου αυξάνεται ο χρόνος αναμονής σε κάθε συναθροιστή αυξάνεται, υποδηλώνοντας ότι πραγματοποιώντας συνάθροιση δεδομένων μειώνεται ο φόρτος δικτύου και άρα μειώνεται και η end-to-end καθυστέρηση.

### **Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης**

Έχει παρατηρηθεί ότι η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης με βάση το περιορισμό στη καθυστέρηση μετάδοσης υπό τη στρατηγική Q.o.s. είναι μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης υπό κάποια στρατηγική όπου δεν αποβάλλεται κανένα πακέτο με βάση κάποιο περιορισμό στη μετάδοση. Η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται όσο η παράταση περιόδου αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει καθώς ο μέσος αριθμός πακέτων που χρειάζονται για τη συνάθροιση αυξάνεται με την αύξηση της παράτασης της περιόδου συνάθροισης. Όμοια, ο χρόνος ζωής του δικτύου αυξάνεται με την αύξηση της παράτασης της περιόδου συνάθροισης επειδή η αύξηση υποδηλώνει μείωση της επικοινωνιακής κίνησης λόγω της αύξησης της περιόδου της συνάθροισης. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι η όσο

αυξάνεται η πιθανότητα παράτασης μετάδοσης της αναφοράς, η συνολική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται τη στιγμή της ίδιας περιόδου λειτουργίας καθώς την ίδια στιγμή η μέση καθυστέρηση αυξάνεται. Επιπρόσθετα, το γεγονός του χασίματος πακέτων μειώνεται όταν η τιμή του  $N$  αυξάνεται. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στο γεγονός ότι με τη συνάθροιση ο φόρτος του δικτύου μειώνεται λόγω της κίνησης και της επικοινωνίας\*.

#### 4.2.2.5 Συναρτήσεις συνάθροισης για απομακρυσμένα ερωτήματα

Θα αναφέρουμε ένα πρωτόκολλο το οποίο συνδυάζει την ιδέα της συνάθροισης δεδομένων και τη μετάδοσης δεδομένων σε λογικές και μη λογικές αποστάσεις σε ένα βασισμένο σε πλέγμα δίκτυο αισθητήρων. Το δίκτυο αποτελείται από κινητές καταβόθρες, οι οποίες κάνουν αιτήσεις σε κοντινούς στατικούς αισθητήρες για την ανίχνευση γεγονότος δεδομένων και ένα συγκεκριμένο αισθητήρα στο πλέγμα ο οποίος έχει γνώση για το γεγονός, και έχει σχεδιαστεί σαν αρχηγός του πλέγματος.

Για ένα κανονικού τύπου απόσταση ερώτημα, η κινητή καταβόθρα καθορίζει την εμβέλεια για την συνάθροιση δεδομένων, και στέλνει αίτηση στη πηγή για να συλλέξει τα δεδομένα σε καθορισμένη εμβέλεια. Η κεφαλή του πλέγματος λαμβάνει τα συναθροισμένα δεδομένα από την πηγή και τα στέλνει στην κινητή καταβόθρα. Για αυτό ονομάζεται και πράκτορας. Τα δεδομένα που έχουν συναθροιστεί από μια πηγή, που είναι μια συλλογή από πακέτα και έχουν αναφορές σε όλα τα παιδιά της πηγής.

Για να λάβουμε υπόψιν την κινητικότητα και προκειμένου να διασφαλίσουμε ότι η κινητικότητα δεν θα επηρεάσει την μετάδοση δεδομένων, η κινητή καταβόθρα λαμβάνει συνεχώς δεδομένα από την πηγή. Ελέγχει κάθε δευτερόλεπτο την τοποθεσία και εάν εντοπίσει ότι κινείται εκτός πλέγματος, επιλέγει την κεφαλή του νέου πλέγματος σαν νέο πράκτορα. Ένα μη κανονικού σχήματος ερώτημα χρησιμοποιείται για να παρακολουθεί και να συλλέγει δεδομένα ενός διάχυτου-γεγονότος, το οποίο συνοψίζεται στα δεδομένα ενός γεγονότος από μια άλλη γειτονιά του πλέγματος που μπορεί να διαχύθηκε στη περιοχή του πλέγματος που έγινε η ερώτηση. Ένας μηχανισμός κρυφής μνήμης χρησιμοποιείται για την αναγνώριση

---

\* [21] J. Zhu, S. Papavassiliou, J. Yang. "Adaptive localized Qos-constrained data aggregation and processing in distributed sensor networks", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 17, September 2006.

πανομοιότυπων ερωτημάτων από την κινητή καταβόθρα. Αυτό το πρωτόκολλο συμβάλει στη συνολική μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας του δικτύου\*.

#### 4.2.2.6 Συναρτήσεις συνάθροισης χωρίς κάποια δομή

Η συνάθροιση δεδομένων μπορεί να υλοποιηθεί σε μια δομή συνάθροισης ή σε ένα δένδρο συνάθροισης με ιεραρχική δομή. Παρόλα αυτά η διατήρηση μιας ιεραρχικής δομής εισάγει επιπλέον κόστος, ειδικά σε δυναμικά περιβάλλοντα. Αυτό συμβαίνει επειδή σε ένα δυναμικά περιβάλλον, οι κινητοί αισθητήρες μπορούν να βρεθούν συχνά εκτός εμβέλειας λήψης και θα πρέπει κάθε φορά να δημιουργείται μια νέα δομή, οπότε αυτό θα μας προσέδιδε επιπλέον καθυστέρηση στη συντήρηση αυτού του δικτύου. Το ίδιο πρόβλημα μπορεί να προκύψει και με στατικούς αισθητήρες εάν κάποιος αισθητήρας μείνει χωρίς ενέργεια και αποσυνδεθεί από την τοπολογία.

Υπάρχει ένα σύστημα συνάθροισης, που ονομάζεται ευκαιριακή συνάθροιση (OP), στην οποία τα πακέτα συναθροίζονται στην περίπτωση που συναντηθούν σε ένα αισθητήρα. Αυτό βεβαίως προσδίδει μεγάλη ανακρίβεια στη συνάθροιση δεδομένων. Στην προσέγγιση του OP, δεν υπάρχει προσχεδιασμένος αριθμός κόμβων συνάθροισης για το συνδυασμό των πακέτων, και αυτό οδηγεί σε τελευταίας στιγμής απόφαση δρομολόγησης με αποτέλεσμα να γίνεται αρκετά κοστοβόρο όσο αφορά στο χρόνο.

Για να ενισχυθεί η αποδοτικότητα της συνάθροισης προτάθηκε ένα πρωτόκολλο MAC, το οποίο ονομάζεται DAA (data-aware anycast), επειδή τα πακέτα πρέπει συναθροίζονται νωρίς πριν φτάσουν στο σταθμό βάσης. Έχει παρατηρηθεί ότι εάν οι κόμβοι περιμένουν άλλους κόμβους να στείλουν τα δεδομένα τους, αυτό οδηγεί σε πιο αποδοτική συνάθροιση. Για αυτό το λόγο, έχει μελετηθεί ένας τυχαίος χρόνος αναμονής (RW) για τη βελτιστοποίηση συνάθροισης δεδομένων.

Η χωρική σύγκλιση και η χρονική σύγκλιση κατά τη διάρκεια της μετάδοσης αποτελούν δύο σημαντικοί παράγοντες στην συνάθροιση δεδομένων. Το πρωτόκολλο DAA έχει προταθεί για την βελτιστοποίηση της χωρικής σύγκλισης, καθώς η τεχνική RW έχει προταθεί για την βελτιστοποίηση της χρονικής σύγκλισης. Χωρίς μια

---

\* [22] T Chen, Y. Chang, H. Tsai, C. Chu, "Data aggregation for range query in wireless sensor networks", in Proceedings of 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'07)

καθολική γνώση της τοπολογίας του δικτύου δεν είναι εύκολο να δομηθεί συνάρτηση δεδομένων. Για αυτό το λόγο το DAA πρωτόκολλο θέτει ανεξάρτητες ομάδες από αισθητήρες. Οι κόμβοι σε αυτές τις ομάδες λειτουργούν σαν συναθροιστικές μονάδες και δημιουργούνται αμέσως όταν μεταδοθούν δεδομένα από το σταθμό βάσης. Με αυτό το τρόπο η πληροφορία μπορεί να ακολουθήσει διαφορετικά μονοπάτια και έτσι μειώνεται η καθυστέρηση της δημιουργίας του δικτύου. Το πρωτόκολλο DAA βασίζεται στο anycasting (εάν η διεύθυνση του πακέτου είναι τύπου anycast, δηλαδή εάν δεν έχει ένα συγκεκριμένο προορισμό), στο MAC πρωτόκολλο, αν λυθεί το θέμα της μετάδοσης στο επόμενο hop.

Στο anycast χρησιμοποιούνται RTS (Request To Send) πακέτα για να αποκτηθούν CTS (Clear To Send) πακέτα από τους γείτονες προτού η μετάδοση δεδομένων ξεκινήσει. Υπάρχει ένα ID συνάθροισης σε κάθε πακέτο το οποίο χρησιμοποιείται για μετρική της συνάθροισης (AID). Η μετάδοση RTS περιλαμβάνει το AID του μεταδιδόμενου πακέτου και όποιος γείτονας έχει ένα πακέτο με το ίδιο AID, που τυπικά είναι μια χρονοσφραγίδα, μπορεί να απαντηθεί με ένα CTS πακέτο. Έτσι εάν δύο πακέτα παραχθούν την ίδια στιγμή μπορούν να συναθροιστούν. Εφόσον μπορεί να υπάρχουν πολλαπλοί αποδέκτες που είναι ικανοί για να πραγματοποιήσουν συνάθροιση, οι αποδέκτες καθυστερούν κατά ένα τυχαίο διάστημα τη μετάδοση CTS για να αποφευχθούν συγκρούσεις.

Η χρονική συνάθροιση απαιτεί τα πακέτα να στέλνονται στους ίδιους κόμβους την ίδια στιγμή. Η σειρά μετάδοσης μπορεί να καθοριστεί από πολλούς παράγοντες, για παράδειγμα, παρεμβολές από άλλες ροές δεδομένων και παρεμβολές από την ίδια ροή δεδομένων. Η τεχνική RW (randomized waiting) παράγει ένα τεχνητό χρόνο καθυστέρησης μετάδοσης στα πακέτα αυξάνοντας έτσι την χρονική σύγκλιση. Καθε πηγή καθυστερεί τη μετάδοσή της ένα χρονικό διάστημα μεταξύ 0 εως τα, όπου τα είναι η μέγιστη καθυστέρηση. Η βέλτιστη τιμή για το τα εξαρτάται από το μέγεθος του γεγονότος και από το χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου. Παρολα αυτά, οι αισθητήρες δεν είναι σε θέση να γνωρίζουν την τιμή του τα από πριν, καθώς δεν ξέρουν αρχικά το μέγεθος του γεγονότος. Εφόσον το DAA πρωτόκολλο εφαρμόζεται σε κάθε hop της διαδικασίας aggregation, πρώιμη συνάθροιση χωρίς καθυστέρηση είναι πιθανόν να πραγματοποιηθεί.

Από συγκριτικές μελέτες προκύπτει ότι η απόδοση κέρδους του συνδιασμού DAA και RW είναι μετά από 1.6s, το οποίο αποτελεί το μέσο χρόνο μετάδοσης 40

πακέτων. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ασήμανο για γεγονότα σε μια διάμετρο 400 μέτρων\*.

---

\* [23] K. Fan, S. Liu, P. Sinha, “Structure-free data aggregation in sensor networks”, IEEE Transaction on Mobile Computing, vol 6, no 8, August 2007

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> - Μελέτη αλγορίθμου

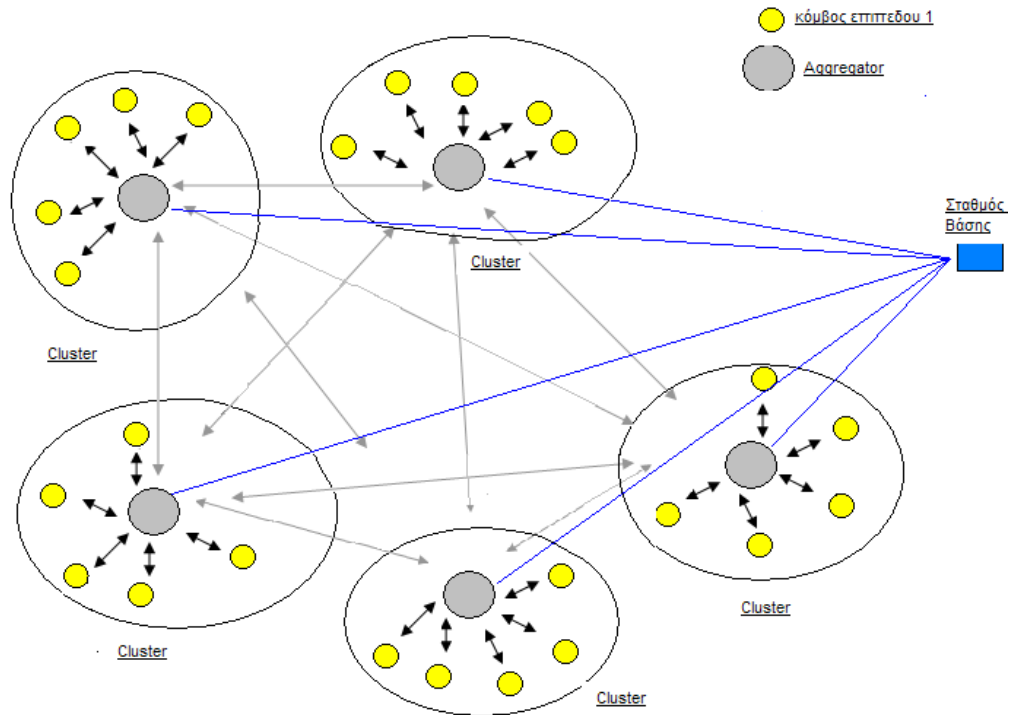
### 5.1 Περιγραφή συστήματος υπό μελέτη

Το υπό μελέτη μοντέλο δικτύου χρησιμοποιεί ιεραρχική δομή πολλών επιπέδων. Αποτελείται από ένα σταθμό βάσης ο οποίος αποτελεί την πύλη διαμέσου της οποίας ο τελικός χρήστης έχει πρόσβαση στα δεδομένα που συλλέγονται από το δίκτυο. Ο σταθμός βάσης δεν έχει κανένα περιορισμό ως προς την ενέργεια που μπορεί να καταναλώσει, έτσι μπορεί να εκτελεί πολύπλοκους υπολογισμούς (π.χ σύντηξη δεδομένων, αποθήκευση σε κατάλληλη βάση δεδομένων των μετρήσεων των κόμβων κ.λ.π ), και να εκπέμπει με τέτοια ισχύ ώστε να μπορεί να φτάσει μέχρι και τον τελευταίο κόμβο του δικτύου. Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι το αντίστροφο δεν ισχύει εξαιτίας των ενεργειακών περιορισμών των κόμβων.

Το δίκτυο αποτελείται επίσης και από κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι έχουν περιορισμό όσο αναφορά στην κατανάλωση ενέργειας που αρχικά λόγω ομοιογενείας του δικτύου έχουν όλοι την ίδια ενέργεια. Ένα σύνολο από κόμβους αισθητήρων δημιουργεί μια συστάδα και σε κάθε συστάδα υπάρχει ένας κόμβος συναθροιστής.

Οι συναθροιστές είναι κόμβοι επιπέδου 2. Έτσι όταν γίνεται κάποια μέτρηση από τους κόμβους όλες οι τιμές στέλνονται στους συναθροιστές. Στη συνέχεια, στο πιο πάνω επίπεδο έχουμε επικοινωνία των συναθροιστών για να ληφθεί απόφαση για το ποιος θα είναι ο αποστολέας του πακέτου στη βάση δεδομένων. Τέλος στη κορυφή της ιεραρχίας βρίσκεται ο σταθμός βάσης που λαμβάνει τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Στη συνέχεια (εικόνα 11), παραθέτουμε σχήμα δικτύου προτεινόμενης αρχιτεκτονικής.



**Εικόνα 11: τμήμα δικτύου προτεινόμενης αρχιτεκτονικής**

Στο παραπάνω σχήμα, όπως προαναφέραμε, απεικονίζεται ένα τμήμα του δικτύου που προτείναμε. Σε αυτό περιγράφονται με κίτρινο κύκλο οι κόμβοι επιπέδου ένα, με γκρι κύκλο οι aggregators (cluster head επιπέδου δυο) και με μπλε απεικονίζεται ο σταθμός βάσης δεδομένων. Σε κάθε γειτονιά κόμβων επιπέδου ένα και aggregator δημιουργείται μια συστάδα. Τα βελάκια με μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύουν την επικοινωνία μεταξύ κόμβων επιπέδου ένα και aggregator. Τα γκρι βελάκια αντιπροσωπεύουν την επικοινωνία μετά aggregator και τα μπλε αναφέρονται στην επικοινωνία μεταξύ aggregator και βάση δεδομένων.

**Τα βασικά χαρακτηριστικά-παραδοχές της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι:**

Η τοπολογία είναι στατική, οπότε γνωρίζουμε τις συντεταγμένες διευθύνσεις

- Θεωρούμε ότι οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι σε ένα  $M*N$  πλέγμα με το σταθμό βάσης να βρίσκεται σε σχετική απόσταση από του κόμβους.
- Θεωρούμε ότι οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι, για ευκολία της ανάλυσης.
- Θεωρούμε ότι η επικοινωνία κόμβου-κόμβου, κόμβου-βάσης δεδομένων είναι point to point και για αυτό το λόγω έχουμε κατανάλωση ενέργειας.

- Η κατανάλωση ενέργειας επικοινωνίας υπολογίζεται από τον αλγεβρικό τύπο απόστασης.
- Θεωρούμε ότι αριθμός των πακέτων που μεταδίδει ο κάθε κόμβος είναι σταθερός.
- Οι κόμβοι επιπέδου 1 γνωρίζουν τις συντεταγμένες των συναθροιστών (η παραδοχή αυτή έχει γίνει για απλοποίηση της μελέτης.)
- Έχει γίνει παραδοχή ότι οι συναθροιστές που βρίσκονται στην ίδια ομάδα λόγω χωρικής σύγκλισης οι τιμές που υπολογίζουν είναι σχεδόν ίδιες.

## 5.2 Περιγραφή αλγορίθμου

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο οποίος αποτελείται από δυο μέρη, τον αλγόριθμο συνάθροισης και τον αλγόριθμο δημιουργίας ομάδων συνάθροισης.

### Προτεινόμενος Αλγόριθμος Aggregation

**Τα βασικά σημεία του προς μελέτη αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:**

1. Οι aggregators στέλνουν ένα πακέτο στη βάση που περιλαμβάνει τις συντεταγμένες τους (χρήση gps) και η βάση υπολογίζει την απόστασή τους.
2. Η βάση δημιουργεί aggregation groups με κριτήριο την απόσταση του κάθε aggregator από αυτή και ενημερώνει τους αισθητήρες.
3. Κάθε aggregator υπολογίζει τη μέση τιμή από τις μετρήσεις που έλαβε από τους απλούς κόμβους της περιοχής του. (Υποθέτουμε ότι ο κάθε aggregator είναι και cluster head στην περιοχή cluster που ορίζει).
  - 3.1. Αν υπάρχει 5% μεταβολή από την προηγούμενη τιμή που υπολόγισε, τότε η τιμή αυτή στέλνεται στη βάση.
  - 3.2. Αν όχι δεν έχουμε αποστολή πακέτου.
4. Επικοινωνία κάθε aggregator μόνο με τους υπόλοιπους στο group που ανήκει. Για να καθοριστεί ποιος aggregator του group θα στείλει ένα νέο πακέτο στη βάση ανταλλάσσονται τιμές που αφορούν τις εναπομείνουσες ενέργειες μεταξύ τους και



στέλνει ο κόμβος που έχει τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα τη χρονική στιγμή της αποστολής πακέτου.

### Αλγόριθμος δημιουργίας aggregation groups

1. Υπολογισμός της μέσης απόστασης των aggregators από τη βάση.
2. Επιλογή των αποστάσεων που είναι μεγαλύτερες από τη μέση απόσταση από τη βάση και τοποθέτηση των αντίστοιχων αισθητήρων στην ομάδα B.
3. Επιλογή των αποστάσεων που είναι μικρότερες από τη μέση απόσταση από τη βάση και τοποθέτηση των αντίστοιχων αισθητήρων στην ομάδα A.

### 5.3 Περιγραφή ψευδοκώδικα

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας (εικόνα 12) που επεξηγεί τα σύμβολα και τα μορφότυπα που έχουν χρησιμοποιηθεί στον ψευδοκώδικα.

<i>Σύμβολα / Μορφότυπα</i>	<i>Επεξήγηση</i>
$\forall$	Για κάθε
$\Sigma$	άθροισμα
#	αριθμός
E(x,y)	Η ενέργεια του κόμβου που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y
teammateID	Οι συντεταγμένες του κόμβου που βρίσκεται στην ίδια ομάδα
E(sense)	Η ενέργεια που απαιτεί η λήψη μέτρησης
temp[x,y]	Η παράμετρος για το αποτέλεσμα της μέσης τιμής
result(x,y)	Η τιμή της μέτρησης
sensor(x,y)	Ο αισθητήρας που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y
aggregator(x,y)	Ο συναθροιστής που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y
newtemp[x,y]	Η παράμετρος για τη νέα μέση τιμή
Es(x,y)	Η εκτιμώμενη ενέργεια του κόμβου που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y
value	Η παράμετρος για τη μέση απόσταση
sense	Η διαδικασία της λήψης μέτρησης
send(base(x,y), <coordinates(x,y)>)	Αποστολή πακέτου στη βάση με τις συντεταγμένες(x,y)
receive(base(x,y), < teammatesID, distance from base, distance of teammates from base>)	Λήψη πακέτου από τη βάση που περιέχει τις συντεταγμένες των συναθροιστών της ομάδας, τις αποστάσεις αυτών από τη

	βάση, την απόσταση του αντίστοιχου συναθροίσις
send(agggregator(x,y),<result>)	Αποστολή πακέτου στον συναθροίσις της περιοχής με το αποτέλεσμα της μέτρησης
Send(base(x,y),<temp[x,y]>)	Αποστολή πακέτου στη βάση που περιέχει τη μέση τιμή
send(agggregator(x,y),Es(x,y))	Αποστολή πακέτου στον συναθροίσις που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y την εκτιμώμενη ενέργεια του αντίστοιχου συναθροίσις που το τρέχει.
receive(agggregator(x,y),<Es(x,y)>)	Λήψη πακέτου στον συναθροίσις που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y την εκτιμώμενη ενέργεια του αντίστοιχου συναθροίσις που το τρέχει.
dist(agggregator(x,y),base(x,y))	Απόσταση του συναθροίσις που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y με την βάση
dist(agggregator(x,y),agggregator(i,j))	Απόσταση του συναθροίσις που βρίσκεται στις συντεταγμένες x,y με το συναθροίσις που βρίσκεται στις συντεταγμένες i,j

**Εικόνα 12**

### **Ψευδοκωδικας Aggregation**

1. Begin
2.  $\forall$  aggregator : { send(base(x,y),<coordinates(x,y)>);
3.  $E(x,y) = E(x,y) - \text{dist}(\text{agggregator}(x,y), \text{base}(x,y))$ ;
4. Receive(base,< teammatesID, distance from base, distance of teammates from base>);
5.  $E(x,y) = E(x,y) - \text{dist}(\text{agggregator}(x,y), \text{base}(x,y))$ ;
6. }
7.  $\forall$  sensor (x,y) in area of aggregator(x,y) : { sense ;
8. send(agggregator(x,y),<result>);
9.  $E(x,y) = E(x,y) - E(\text{sense})$ ;
10. }
11.  $\forall$  aggregator(x,y): {
12. temp[x,y]= $\Sigma$  result(x,y) / #sensor(x,y);
13. If(dist(agggregator(x,y),base(x,y))<dist(teammate,base(x,y))) {
14. Send(base(x,y),<temp[x,y]>);
15.  $E(x,y) = E(x,y) - \text{dist}(\text{agggregator}(x,y), \text{base}(x,y))$ ; }

```

16.           Else{
17.                 break; }
18.           }
19.   ∀ aggregator(x,y) compute ∀ teammate :{
20.           dist[aggregator(x,y),aggregator(i,j)]=[((x-i)^2+(y-j)^2)^(1/2)]; }
21.   While {
22.   ∀ sensor (x,y) in area of aggregator(x,y) : {
23.           if(E(sense) {
24.           Sense; && Send(aggregator(x,y),<result>);
25.           E(x,y)= E(x,y)-E(sense);
26.           }
27.           }
28.   ∀ aggregator(x,y) :{
29.           newtemp[x,y]=Σ result(x,y) / #sensor(x,y);
30.   If((newtemp[x,y]-temp[x,y]) / temp[x,y] > 5%) {
31.           Es(x,y)=Es(x,y)-2*Σ dist(aggregator(x,y),aggregator(i,j)) ;
32.           Send(teammate,<Es(x,y)>);
33.           Receive(teammate,<Es(i,j)>) ;
34.           E(x,y)=E(x,y)-2*Σ dist(aggregator(x,y),aggregator(i,j)) ;
35.   If((Es(x,y)>(from every Es(i,j) of his team) {
36.           Send(base(x,y),<newtemp[x,y]>);
37.           E(x,y)= E(x,y)-dist(aggregator(x,y),base(x,y));
38.           Es(x,y)=E(x,y);           }}
39.   Else {
40.           Goto teammate aggregator(x,y);}
41.
42.   Else {
43.           Break; }
44.   }
45.   }
46.   END

```

### **Ψευδοκωδικας Δημιουργιας Ομαδας**

```

1.   Begin
2.   for every aggregator(x,y) do :{
3.           dist(aggregator(x,y),base(x,y))=[((x-i)^2+(y-j)^2)^(1/2)];
4.           }
5.   value= Σ dist(aggregator(x,y),base(x,y)) / #aggregator(x,y);

```

```
6.   for every aggregator(x,y) do :{
7.           if(dist(aggregator(x,y),base(x,y))> value) {
8.               put it on group B;}
9.           else
10.              { put it on group A;}
11.   END
```

### **Επεξήγηση του ψευδοκωδικα για τη συνάθροιση**

**Γραμμές 1-6:** Κάθε συναθροιστής στέλνει τις συντεταγμένες του στη βάση δεδομένων και η βάση δεδομένων υπολογίζει την απόστασή του. Με βάση την απόσταση κάθε συναθροιστή στέλνει πίσω ένα πακέτο που περιέχει τα ID των συναθροιστών από την αντίστοιχη ομάδα του, τις αποστάσεις των συναθροιστών της ομάδας καθώς και την απόσταση τη δικιά του από τη βάση. Για την κάθε επικοινωνία μειώνεται η ενέργεια των αισθητήρων.

**Γραμμες 7-10:** Κάθε αισθητήρας επιπέδου 1 πραγματοποιεί μέτρηση και την στέλνει στον συναθροιστη που βρίσκεται στην συστάδα του.

**Γραμμές 11-18:** Εδώ περιγράφεται η πρώτη αποστολή πακέτου κάθε ομάδας. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η μέση τιμή από τις μετρήσεις που έχει λάβει κάθε συναθροιστης και στην συνέχεια υπολογίζεται ποιος κόμβος είναι πιο κοντά στη βάση δεδομένων για την αποστολή του πακέτου.

**Γραμμή 19:** Κάθε συναθροιστής υπολογίζει την απόστασή του από τους άλλους συναθροιστες της ομάδας του.

**Γραμμές 21-27:** Εδώ ξεκινάει ο υπολογισμός των υπολοίπων πακέτων. Πιο ειδικά κάθε φορά οι αισθητήρες επιπέδου 1, εφόσον έχουν ενέργεια, λαμβάνουν μετρήσεις και τις στέλνουν στους συναθροιστες της συστάδας τους.

**Γραμμή 28:** Εδώ ξεκινάει η περιγραφή για τις υπόλοιπες αποστολές πακέτων στη βάση.

**Γραμμή 29:** Υπολογίζεται κάθε φορά η μέση τιμή των μετρήσεων που έχει λάβει ο συναθροιστης.

**Γραμμές 30-34:** Εφόσον η νέα μέτρηση που υπολογίστηκε έχει διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη κατά 5% τότε είναι πιθανή προς αποστολή. Στη συνέχεια υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των συναθροιστών στην ομάδα για να βρεθεί αυτός με τα μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας. Σε κάθε επικοινωνία όπως είναι φυσικό μειώνονται τα αποθέματα κάθε συναθροιστή.

**Γραμμές 35-38:** Εάν η ενέργεια του συναθροιστή είναι μεγαλύτερη από των υπολοίπων στην ομάδα τότε στέλνει ο ίδιος το πακέτο στην βάση δεδομένων. Με την αποστολή μειώνεται η ενέργεια του αισθητήρα.

**Γραμμές 39-40:** Εάν δεν έχει τα μεγαλύτερα αποθέματα ενεργείας ο τρέχων συναθροιστής, σε σχέση με τους υπολοίπους στην ομάδα του, τότε βγαίνουμε από την επανάληψη και πηγαίνουμε σε άλλο αισθητήρα της ομάδας.

**Γραμμές 42-43:** Εάν δεν έχει η νέα μέτρηση μέσης τιμής μεταβολή κατά 5% από την προηγούμενη βγαίνουμε εντελώς από την ομάδα.

#### **Επεξήγηση του ψευδοκωδικά για τη δημιουργία ομάδων**

**Γραμμές 2-4:** Υπολογισμός των αποστάσεων κάθε συναθροιστή από τη βάση.

**Γραμμή 5:** Υπολογισμός μέσης απόστασης συναθροιστή από τη βάση για το μετέπειτα χωρισμό σε ομάδες συνάθροισης.

**Γραμμές 6-10:** Διαχωρισμός συναθροιστών σε ομάδες συνάθροισης με βάση την απόσταση τους από τη βάση δεδομένων. Όσων αισθητήρων η απόσταση είναι μεγαλύτερη από την μέση απόσταση μπαίνει στην ομάδα Β. Όσες αποστάσεις είναι μικρότερες από την μέση απόσταση οι αντίστοιχοι αισθητήρες μπαίνουν στην ομάδα Α.

### **5.4 Διεξαγωγή Πειραμάτων**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε σύγκριση του αλγορίθμου που προτάθηκε στην προηγούμενη ενότητα σε σχέση με τον απλό τρόπο δρομολόγησης των πακέτων δεδομένων απευθείας στον σταθμό βάσης, σύγκριση του απλού τρόπου δρομολόγησης δεδομένων απευθείας στον σταθμό βάσης με τον απλό αλγόριθμο συνάθροισης δεδομένων μέσης τιμής και θα γίνει και σύγκριση του προτεινόμενου

αλγόριθμοι σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο συνάθροισης μέσης τιμής. Η αξιολόγηση γίνεται με την μελέτη της συμπεριφοράς των εκάστοτε αλγορίθμων σε διάφορα σενάρια κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

### 5.4.1 Περιγραφή μοντέλου πειράματος

Έστω ότι διαθέτουμε ένα στατικό δίκτυο ασύρματων αισθητήρων που διαθέτει πέντε συναθροιστές (A, B, C, D, E), οπού στην περιοχή καθενός βρίσκονται πέντε απλοί αισθητήρες. Η βάση δεδομένων (G) βρίσκεται σχετικά σε απόσταση από τους αισθητήρες ((50,50)). Επίσης, ο κάθε αισθητήρας έχει αρχικό ποσό ενέργειας  $E(x,y)=1000$ . Ο λόγος που χρησιμοποιούμε ποσό ενέργειας το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο σε αλγεβρική τιμή από την τιμή οποιασδήποτε ευκλείδιας απόστασης από τη βάση είναι για να αποφύγουμε σενάρια απότομης απώλειας ενέργειας κατά την απευθείας αποστολή πακέτου. Όλοι οι αισθητήρες ξεκινούν με το ίδιο ποσό ενέργειας εκτός από τη βάση δεδομένων που θεωρούμε ότι έχει απεριόριστη ενέργεια. Η διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης είναι τόση όση και η διάρκεια ζωής του τελευταίου συναθροιστή. Έχει γίνει παραδοχή ότι οι επικοινωνία μεταξύ συναθροιστών και συναθροιστών με βάση είναι point to point και η κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται από την ευκλείδεια απόσταση των αντιστοίχων κόμβων από τον προορισμό τους σε κάθε αποστολή.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένας πίνακας που αναφέρει τις αποστάσεις από τη βάση κάθε συναθροιστή.

Αποστάσεις από τη βάση	Αποτέλεσμα
Dist(A,G)	63,8
Dist(B,G)	65
Dist(C,G)	68,5
Dist(D,G)	65,9
Dist(E,G)	60,1

**Εικόνα 13**

Παρατηρούμε ότι ο C είναι ο πιο απομακρυσμένος σε σχέση με τους υπολοίπους.

Σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο οι ομάδες συνάθροισης είναι :

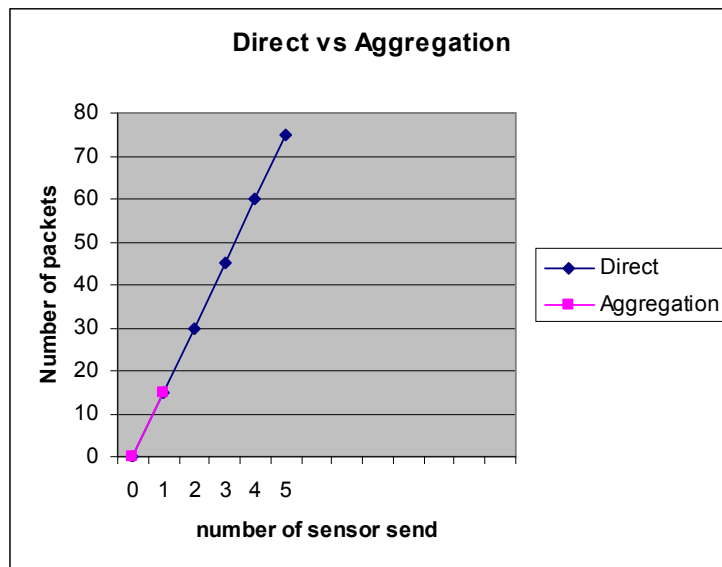
$$\text{Group A}=\{A, E\}$$

Group B={B, C ,D}

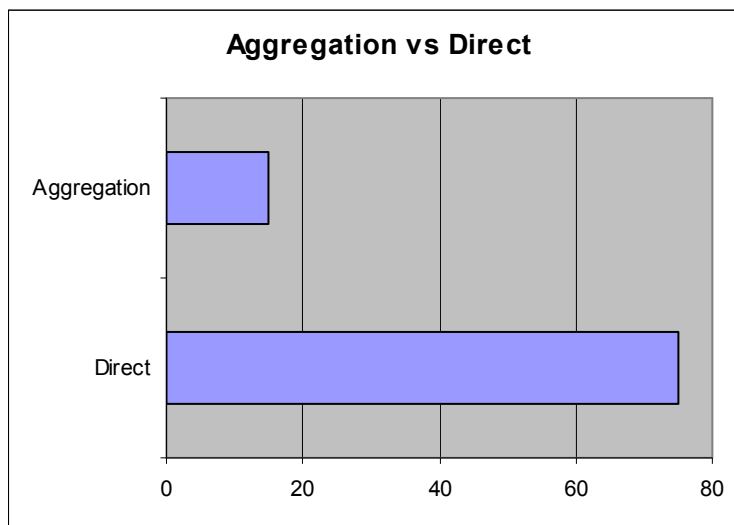
### 5.4.2 Αποτελέσματα

Όπου αναφέρεται στα γραφήματα ως direct εννοείται ο απλός τρόπος μετάδοσης πακέτου απευθείας στη βάση δεδομένων. Όπου αναφέρεται ως aggregation εννοείται ο αλγόριθμος συνάθροισης μέσης τιμής και όπου αναφέρεται ως my approach είναι ο προτεινόμενος αλγόριθμος συνάθροισης δεδομένων.

Στη συνέχεια θα συγκρίνουμε τον απλό τρόπο δρομολόγησης δεδομένων απευθείας στον σταθμό βάσης με τον απλό αλγόριθμο συνάθροισης δεδομένων μέσης τιμής.

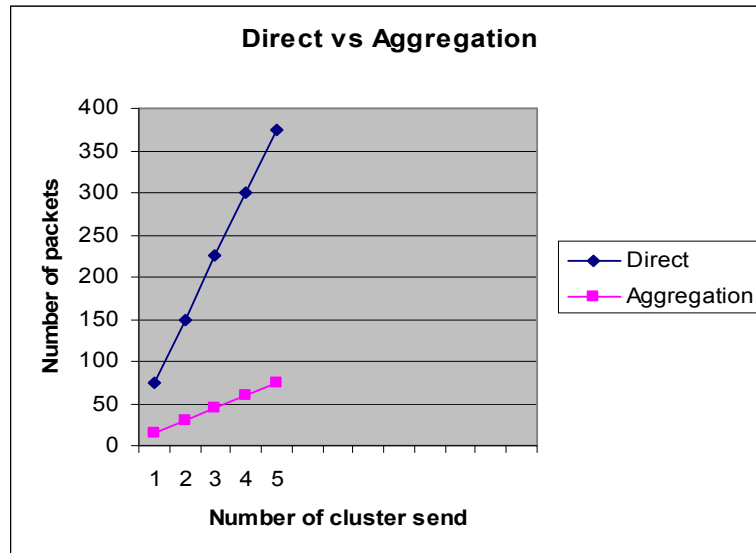


Εικόνα 14: Αριθμός πακέτων που στέλνονται στη βάση ενός συναθροιστη

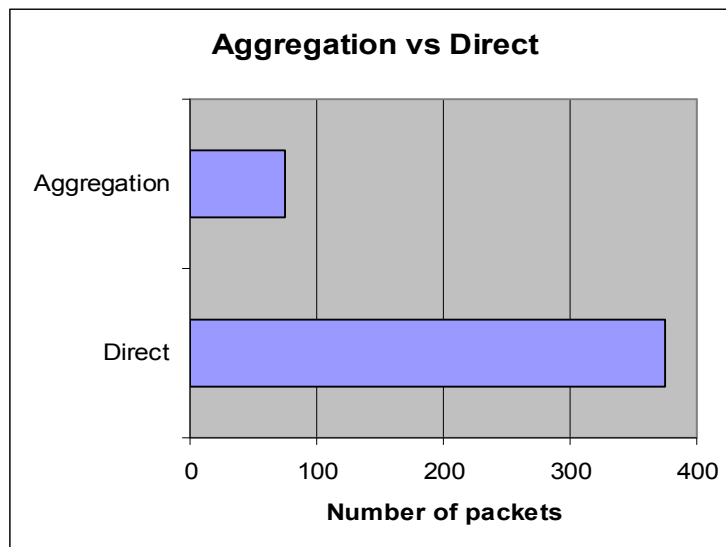


Εικόνα 15: Αριθμός πακέτων που στέλνονται στη βάση ενός συναθροιστη

Στις εικόνες 14 και 15 βλέπουμε πόσα πακέτα στέλνονται στη βάση δεδομένων από μια περιοχή ενός συναθροιστή. Είναι εμφανές ότι με τη χρήση του απλού αλγορίθμου συνάθροισης στέλνονται λιγότερα πακέτα σε σχέση με την απευθείας μετάδοση.



Εικόνα 16: Συνολικός αριθμός πακέτων που στέλνονται στη βάση

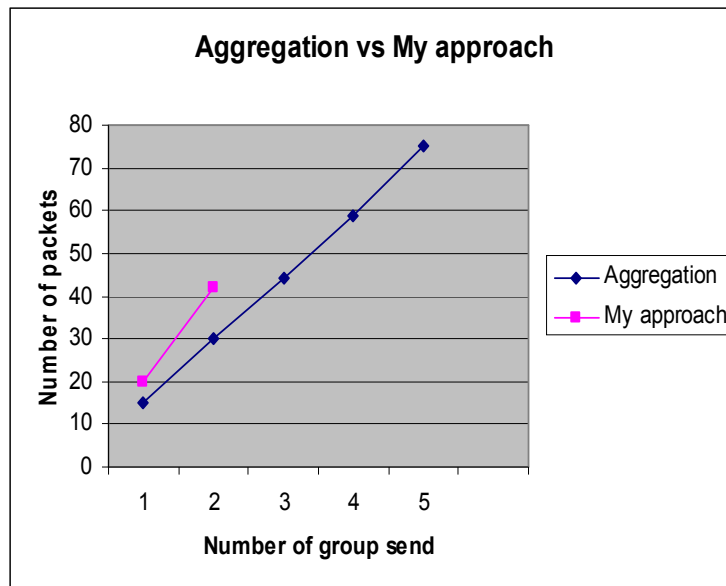


Εικόνα 17: Συνολικός αριθμός πακέτων που στέλνονται στη βάση

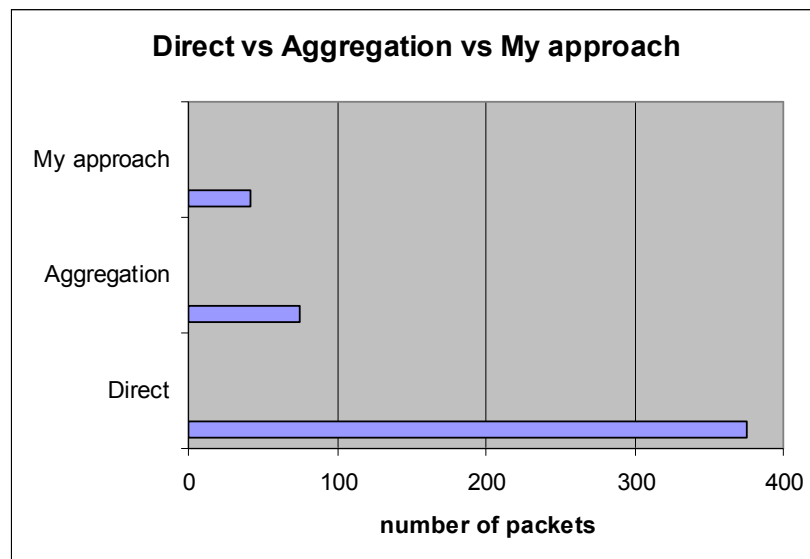
Από την εικόνα 16 και 17 παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος συνάθροισης είναι πιο αποδοτικός καθώς στέλνονται γενικά από όλους τους κόμβους λιγότερα πακέτα στη βάση και αποφεύγονται φαινόμενα συγκρούσεων και χασίματος πακέτων.

Στη συνέχεια θα συγκρίνουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο συνάθροισης μέσης τιμής.





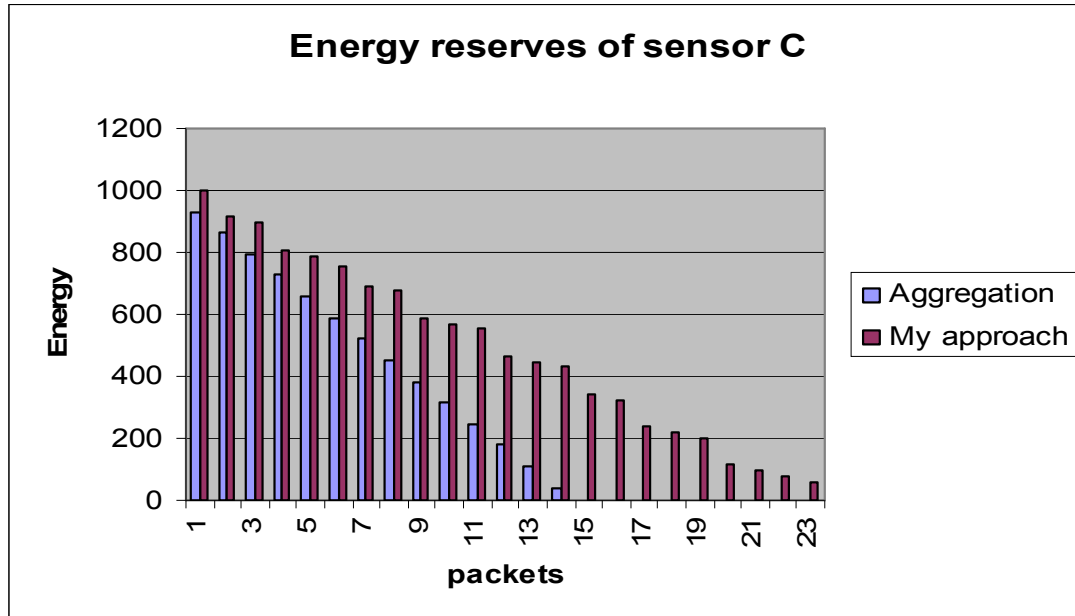
Εικόνα 18: Συνολικός αριθμός πακέτων που στέλνονται στη βάση



Εικόνα 19: Συνολικός αριθμός πακέτων που στέλνονται στη βάση

Από τις εικόνες 18 και 19 διακρίνουμε ότι ο αλγόριθμος που προτάθηκε είναι ακόμα πιο αποδοτικός σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο συνάθροισης καθώς στέλνονται ακόμα λιγότερα πακέτα στη βάση, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται ακόμα περισσότερο φαινόμενα συγκρούσεων και χασίματος πακέτων, όπου τα γεγονότα αυτά έχουν συνέπεια χαμηλότερου q.o.s. αλλά και περισσότερης κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων (αποστολή ξανά χαμένου πακέτου).

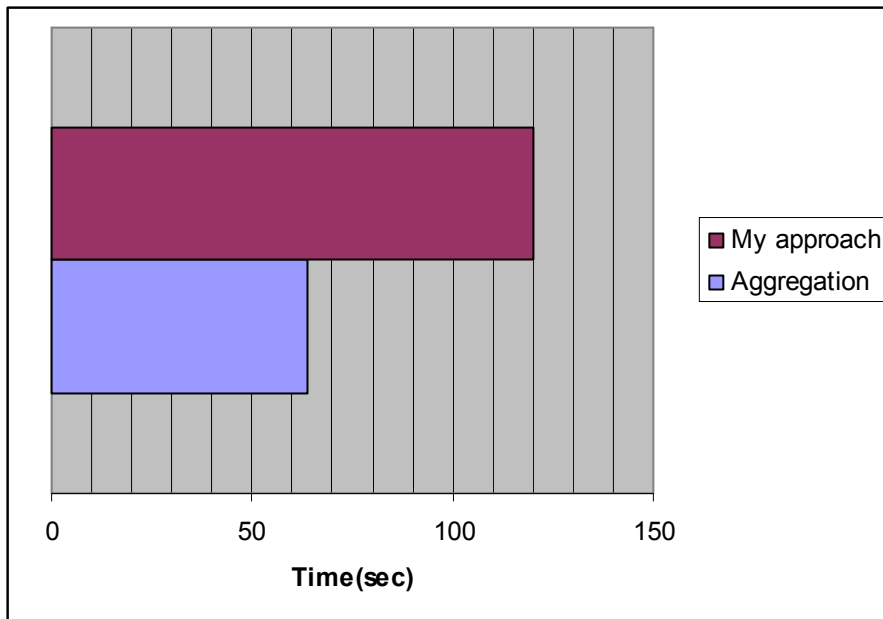
Στο σχήμα της εικόνας που ακολουθεί (εικόνα 20) ,φαίνονται τα ενεργειακά αποθέματα του κόμβου C(2,1) σε κάθε αποστολή πακέτου στη βάση δεδομένων για τις δύο τεχνικές συνάθροισης. Ο αισθητήρας C είναι ο πιο απομακρυσμένος σε σχέση με τη βάση (όπως και διαφαίνεται από τον πίνακα πιο πάνω) άρα θα πεθάνει πρώτος σε σχέση με τους άλλους.



Εικόνα 20: Ενεργειακά αποθέματα κόμβου C

Από την εικόνα 20 βλέπουμε την ικανότητα του αλγορίθμου που προτάθηκε να αυξάνει την διάρκεια ζωής του αισθητήρα. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι στον αλγόριθμο που προτάθηκε ο συναθροιστής C βρίσκεται στην ομάδα B και δεν στέλνει ο ίδιος κάθε φορά πακέτο αλλά ο συναθροιστής που έχει την μεγαλύτερη ενέργεια από την ομάδα του. Έχει γίνει παραδοχή ότι λόγω χωρικής σύγκλισης οι τιμές των 3 κόμβων που βρίσκονται στην ομάδα B του παραδείγματος έχουν τις ίδιες σχεδόν τιμές.

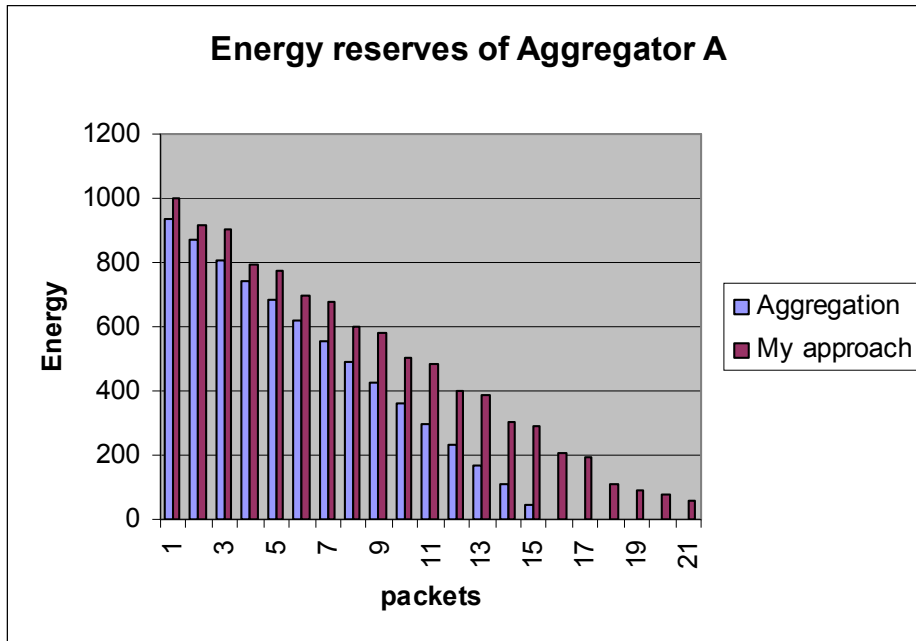
Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 21), φαίνεται ακόμα περισσότερο η ικανότητα που αλγορίθμου που έχει προταθεί να αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Έχουμε θεωρήσει ότι το δίκτυο πεθαίνει όταν πεθάνει και ο τελευταίος κόμβος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πεθαίνει το δίκτυο όταν πεθάνει ο κόμβος E που βρίσκεται πιο κοντά στη βάση δεδομένων σε σχέση με τους άλλους κόμβους.



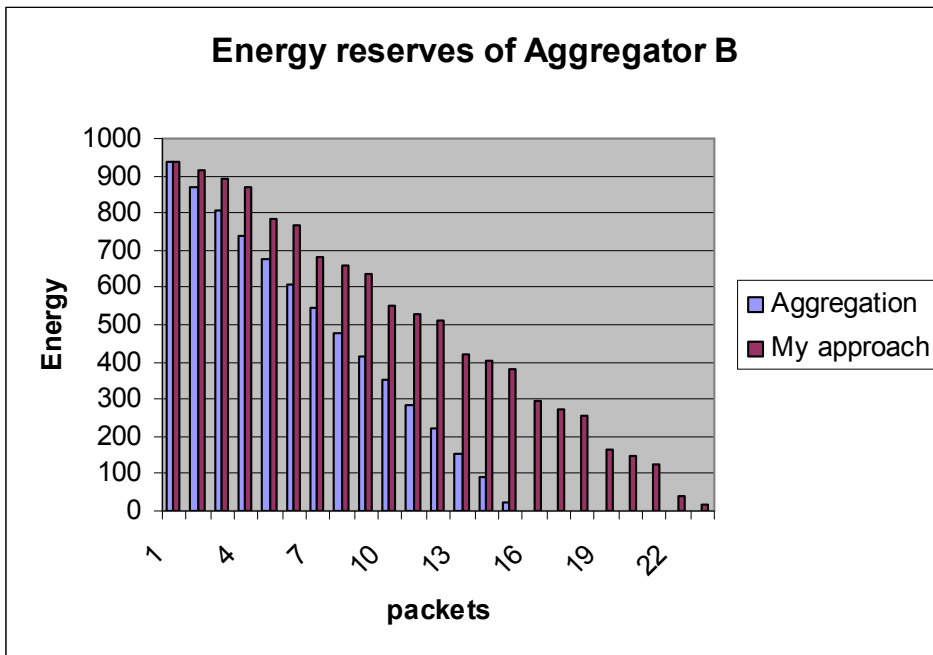
**Εικόνα 21: Διάρκεια ζωής του δικτύου**

Για τον υπολογισμό αυτού του χρόνου λήφθηκε υποψιν ότι: χρειάζεται 1 sec για τον υπολογισμό της μέσης τιμής και 3 sec για την αποστολή του πακέτου στη βάση για τη συνάθροιση μέσης τιμής. Ενώ για τον αλγόριθμο που προτάθηκε χρειάστηκε 1 sec για την λήψη και για την αποστολή τιμών ενέργειας αντίστοιχα 1 sec για την επεξεργασία τιμής και 3 sec για την αποστολή στη βάση. Έχει ληφθεί, επίσης, υποψιν για τον υπολογισμό εάν έχει η τιμή μεταβολή 5% η συνάρτηση random(), όπου μας παρείχε τυχαίους αριθμούς και υπολογίζαμε αν έχει μεταβολή 5% η προηγούμενη τιμή.

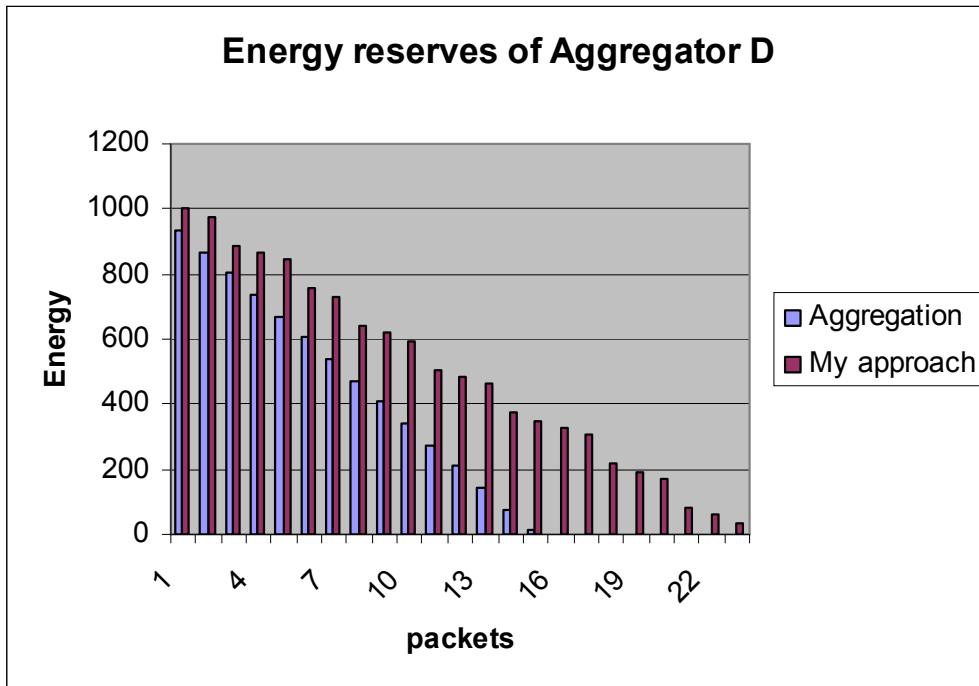
Επιπρόσθετα, στις παρακάτω εικόνες (εικόνες 22, 23, 24, 25) φαίνονται τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων A,B,D,E σε κάθε αποστολή πακέτου στη βάση δεδομένων για τις δύο τεχνικές συνάθροισης.



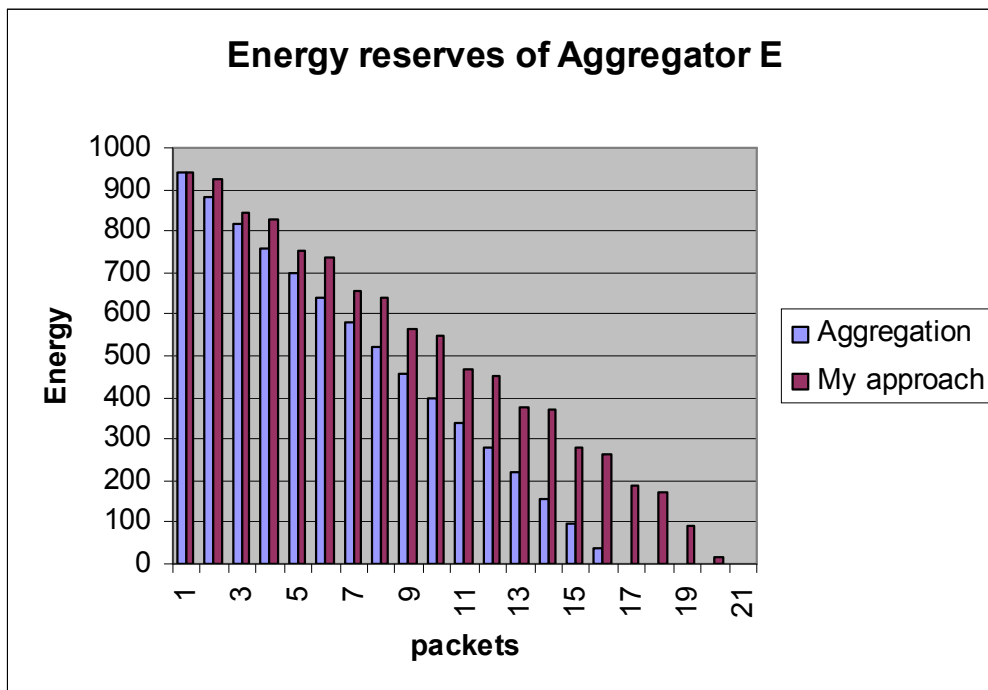
Εικόνα 22: Ενεργειακά αποθέματα κόμβου A



Εικόνα 23: Ενεργειακά αποθέματα κόμβου B



Εικόνα 24: Ενεργειακά αποθέματα κόμβου D



Εικόνα 25: Ενεργειακά αποθέματα κόμβου E

Από τις παραπάνω εικόνες βλέπουμε την ικανότητα του αλγορίθμου που προτάθηκε να αυξάνει την διάρκεια ζωής του αισθητήρα σε σχέση με τον αλγόριθμο συνάθροισης μέσης τιμής.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> - Επίλογος-Συμπεράσματα

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί έναν από τους βασικούς τομείς που παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη σε όλους τους σχετικούς τομείς έρευνας και ανάπτυξης. Σε δέκα χρόνια από τώρα οι ασύρματοι αισθητήρες θα είναι η τεχνολογία που θα είναι υπεύθυνη για κάθε τομέα της ζωής μας. Όλες οι εργοστασιακές και οι μηχανικές εντολές καθώς και τα συστήματα ελέγχου θα μετατραπούν σε ασύρματα δίκτυα ανίχνευσης (με τη βοήθεια αισθητήρων) και σημεία ελέγχου. Τα εκατομμύρια χιλιομέτρων σύρματα που χρειάζονται για την επικοινωνία ανθρώπων και συσκευών θα αντικατασταθούν από ένα αόρατο ασύρματο δίκτυο mesh. Τέτοιου είδους συσκευές θα αποτελούν μέρος από την καθημερινή μας ζωή. Ανάμεσα σε αυτές μπορούμε να αναφέρουμε τον θερμοστάτη ή το διακόπτη του φωτός. Οι αισθητήρες θα είναι ακόμα πιο μικροί και πιο φτηνοί και θα αλληλεπιδρούν με το φυσικό περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία αναφέρθηκε συνοπτικά ο τρόπος λειτουργίας των αισθητήρων καθώς και εφαρμογές αυτών στη σύγχρονη ζωή. Αναφέρθηκε επίσης η έννοια της συνάθροισης δεδομένων και η αναγκαιότητα της στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπρόσθετα περιγράφηκαν συνοπτικά κάποιοι αλγόριθμοι συνάθροισης δεδομένων. Επίσης στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας προτάθηκε ένας αποδοτικός αλγόριθμος συνάθροισης δεδομένων και παρουσιάστηκαν κάποιες γραφικές παραστάσεις που αποδεικνύουν την ορθότητα και την αποδοτικότητα του. Πιο ειδικά ο αλγόριθμος που προτάθηκε σε σύγκριση με τον απλό τρόπο μετάδοσης πακέτων απευθείας στη βάση δεδομένων και την συνάθροιση δεδομένων με βάση τη μέση τιμή αποδείχτηκε ότι στέλνει λιγότερα πακέτα στη βάση δεδομένων με αποτέλεσμα να αποφεύγονται φαινόμενα συγκρούσεων και χασίματος πακέτων, όπου τα γεγονότα αυτά έχουν συνέπεια χαμηλότερου q.o.s. αλλά και περισσότερης κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων (αποστολή ξανά χαμένου πακέτου).

Τέλος, αποδείχτηκε, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πρωτοκόλλα ότι η διάρκεια ζωής του δικτύου μεγαλώνει, καθώς τα αποθέματα ενέργειας των αισθητήρων πέφτουν πιο αργά σε σχέση με τα αλλά δύο πρωτόκολλα.

Η όλο και περισσότερο εξάρτηση των ανθρώπων από κάθε μορφής ηλεκτρονικές συσκευές και η συνεχώς επιθυμία τους να παραμείνουν «συνδεδεμένοι» εξασφαλίζει τη συνέχιση της έρευνας και τον προσανατολισμό της από τις στρατιωτικές εφαρμογές σε εφαρμογές που θα επηρεάζουν την καθημερινότητα του κοινού μας

μέλλοντος. Σήμερα αναλογιζόμαστε τη σημασία του ηλεκτρικού ρεύματος και πως θα ήταν οι ζωές μας χωρίς αυτό. Σε λίγα χρόνια θα αναλογιζόμαστε για τη σημασία της τεχνολογίας των ασυρμάτων αισθητήρων και πως θα είναι η ζωή μας χωρίς αυτούς.

## **Βιβλιογραφία**

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci “A Survey on Sensor Networks”, Georgia Institute of Technology, IEEE Communications Magazine August 2002.
- [2] S. Jadhav , T. Brown , S. Doshi, R. Thekkekunnel “Lessons Learned Constructing a Wireless Ad Hoc Network Test Bed”, University of Colorado.
- [3] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson “Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring”.
- [4] N. Xu, “A Survey of Sensor Network Applications”, University of Southern California .
- [5] K. Kalpakis, K. Dasgupta, P. Namjoshi, “Maximum Lifetime Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks”, University of Maryland .
- [6] A. Jain, M. Gruteser, M. Neufeld, D. Grunwald, “Benefits of Packet Aggregation in Ad-Hoc Wireless Network”, University of Colorado, August 2003.
- [7] S. Tilak, N. Abu-Ghazaleh, W. Heinzelman, “A Taxynomy of Wireless Micro-Sensor Network Models”.
- [8] J. Zhu, S. Papavassiliou, S. Kafetzoglou, J. Yang, “On the Modeling of Data Agregation and Report Delivery in Qos- constrained Sensor Networks”, PERCOMW’ 2006 .
- [9] B. Krishnamachari, D. Estrin, S. Wicker, “The impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks”, SensIT Darpa program .
- [10] Y. Yang, X. Wang, S. Zhu, G. Cao, “SDAP: A Secure Hop-by-Hop Data Aggregation Protocol for Sensor Networks”, University of Pennsylvania .
- [11] S. Lindsey, C. Raghavendra, “PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems” .



- [12] I. Solis, K. Obraczka, “In-Network Aggregation Trade offs for Data Collection in Wireless Sensor Networks”, December 2005.
- [13] K. Ferentinos, T. Tsiligiridis, K. Arvanitis, “Energy Optimization of Wireless Sensor Networks for Environmental Measurements”.
- [14] M. Adler, “Collecting Correlated Information form a Sensor Network”, University of Massachusetts, Amherst.
- [15] M. Watfa, W. Daher, H. Azar, “A Sensor Network Data Aggregation Technique”, October 2008.
- [16] A. Boulis, S. Ganeriwal, M. Srivastava, “Agregation in sensor networks: an energy-accuracy trade-off”.
- [17] T. He, L. Gu, L. Luo, T. Yan, J. Stankovic, S. Son, “An Overview of Data Aggregation Architecture for Real-Time Tracking with Sensor Networks” .
- [18] L. Galluccio, S. Palazzo, A. Campbell, “Efficient data aggregation in wireless sensor networks: an entropy-driven analysis”.
- [19] A. Kulakov, d. Darcev, G. Trajkovski, “Application of wavelet neural-networks in wireless sensor networks”, in Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference SNPD/SAWN’05.
- [20] G. Carpenter, S. Grossberg, “Integrating symbolic and neural processing in a self-organizing architecture for pattern recognition and prediction”
- [21] J. Zhu, S. Papavassiliou, J. Yang. “Adaptive localized Qos-constrained data aggregation and processing in distributed sensor networks”, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 17, September 2006.
- [22] T Chen, Y. Chang, H. Tsai, C. Chu, “Data aggregation for range query in wireless sensor networks”, in Proceedings of 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’07).
- [23] K. Fan, S. Liu, P. Sinha, “Structure-free data aggregation in sensor networks”, IEEE Transaction on Mobile Computing, vol 6, no 8, August 2007.

- [24] J. Zheng, A. Jamalipour, “Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective”, John Wiley & Sons publication.
- [25] K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati, “Wireless sensor networks: Technology, Protocols and Applications” , John Wiley & Sons publication.
- [26] N. Misisavjevic, “Sensor and Data Fusion”, In-the publication.
- [27] H. Eren, “Wireless Sensors and Instruments”, Taylor Francis Group publication.
- [28] F. Lewis, “Wireless Sensor Networks”, University of Texas.
- [29] G. Beliakov, A. Pradera, T. Calvo, “Aggregation Functions: A Guide for Practitioners”, Springer publication.
- [30] M. Rosenberg, “Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation” .