

**Τμήμα
Μηχανικών
Πληροφορικής τ.ε.**

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δυτικής Ελλάδας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ MESH
WSN ΔΙΚΤΥΑ**

**ΚΟΤΣΩΝΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ
ΒΕΝΤΟΥΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΑΝΤΙΠΡΙΟ 2018

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αντίρριο, 10-9-2018

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

- 1.
- 2.
- 3.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	1
«Μελέτη κατανάλωσης ενέργειας και ρυθμοαπόδοσης σε mesh wsn δίκτυα».....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	
1.1 Γενικά – Ασύρματες Επικοινωνίες.....	8
1.2 Τι είναι τα ασύρματα δίκτυα	9
1.3 Πλεονεκτήματα ασύρματης δικτύωσης.....	9
1.4 Ασύρματα Δίκτυα – Μειονεκτήματα	10
1.5 Από τον Τηλέγραφο ως τις Σύγχρονες Ασύρματες Επικοινωνίες.....	12
1.6 Κατηγορίες Ασυρμάτων Δικτύων.....	13
1.7 Η ομάδα HEW (High Efficiency WLAN) του IEEE.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας	21
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση των Δικτύων Αισθητήρων.....	23
2.4 Μέσα ασύρματης επικοινωνίας.....	27
2.5 Αισθητήριοι Κόμβοι.....	30
2.5.1 Δομή κόμβου αισθητήρα.....	32
2.6 Τεχνολογίες Ασυρμάτων Δικτύων.....	44
2.6.1 Ασύρματα Δίκτυα Ad-Hoc.....	45
2.6.2 Πρωτόκολλο Ασύρματης Επικοινωνίας IEEE 802.11.....	45
2.6.3 Διαφορές μεταξύ Ασυρμάτων Δικτύων Ad-Hoc και Δικτύων Αισθητήρων.....	51
2.7 Ιδιαιτερότητες στη Σχεδίαση των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων.....	53
2.7.1 Μεγάλη εξάρτηση των κόμβων από την Κατανάλωση Ενέργειας.....	53
2.7.2 Χωρική Πυκνότητα των Αισθητήρων.....	56
2.7.3 Ανοχή σε σφάλματα.....	57
2.7.4 Μη σταθερή τοπολογία.....	57
2.8 Πιθανές αιτίες Δυσλειτουργίας των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων.....	59
2.9 Εφαρμογές των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων.....	59
2.9.1 Ιατρικές Εφαρμογές.....	60
2.9.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές.....	61

2.9.3 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές.....	65
2.9.4 Λοιπές Εφαρμογές.....	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΟΜΒΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΣΗΣ

3.1 Κατανάλωση ενέργειας κόμβου αισθητήρων.....	71
3.1.1 Κατανάλωση ενέργειας μικροελεγκτή.....	73
3.1.2 Κατανάλωση ενέργειας μνήμης.....	74
3.1.3 Κατανάλωση ενέργειας πομποδέκτη.....	74
3.2 Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων	76
3.3 Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας.....	78
3.4 Ασύρματη επαναφόρτιση δικτύων αισθητήρων.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

4.1 Εισαγωγή.....	80
4.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	81
4.3 Επιλογή Πρωτοκόλλου στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	82
4.4 Εξοικονόμηση Ενέργειας με την Επιλογή της Βέλτιστης Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	86
4.5 Ελαχιστοποίηση των Επιβαρύνσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	87
4.6 Παράγοντες που Επηρεάζουν τον Σχεδιασμό Πρωτοκόλλων Εξοικονόμησης Ενέργειας.....	88
4.7 Τεχνικές Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	89
4.7.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Δομή του Δικτύου (Network Structure).....	90
4.7.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στο Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model).....	91
4.7.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based).....	92
4.7.4 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Αξιόπιστη Δρομολόγηση (Reliable Routing).....	92
4.8 Σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών δρομολόγησης.....	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ NS2 - ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΤΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

5.1 Η χρησιμότητα του NS2.....	94
5.2 Μεθοδολογία - Σύστημα Εφαρμογής.....	97
5.3 Τελικό Ενεργειακό Μοντέλο.....	107

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	113
-------------------	-----

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το όραμα των ασύρματων επικοινωνιών να υποστηρίξουν ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ ανθρώπων ή συσκευών είναι στο επίκεντρο των τηλεπικοινωνιών γενικότερα για τις επόμενες δεκαετίες και πολλά βήματα ήδη έχουν γίνει προς αυτήν την κατεύθυνση.

Τα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) έχουν προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα την πραγματοποίηση πολλών σχετικών μελετών που πραγματεύονται ποικίλα θέματα (π.χ. ασφάλεια, αλγόριθμοι δρομολόγησης, τρόπο» εξοικονόμησης ενέργειας των κόμβων, εύρεση κατάλληλων πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων κ.λπ.). Παρόλα αυτά πολλοί τομείς παραμένουν ακόμη ανοιχτοί για έρευνα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ενδογενή αδόμητη αρχιτεκτονική των WSNs που φέρνει στο προσκήνιο πλήθος ιδιαιτεροτήτων σε σύγκριση με άλλες δικτυακές τεχνολογίες.

Η χρήση δικτύων αισθητήρων χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές στρατιωτικές, περιβαλλοντικές, υγείας και άλλες διάφορες εμπορικές εφαρμογές (βιομηχανία, κατασκευές κ.λπ.). Η χρήση των WSNs δεν περιορίζεται φυσικά μόνο στους παραπάνω τομείς αλλά επεκτείνεται σε ένα πολύ ευρύτερο φάσμα δραστηριοτήτων της σύγχρονης ζωής. Σημαντικό ζήτημα σε ένα κόμβο αισθητήρα ασυρμάτου δικτύου είναι η ενέργεια κατανάλωσης η οποία καθορίζει και την διάρκεια της ζωής του κόμβου όταν η αλλαγή μπαταρίας είναι αδύνατη ή ασύμφορη.

ABSTRACT

The vision of the wireless communications to support the enhance of information between people or devices is in the focus of telecommunications generally for the next decades and many steps have been taken in this direction.

The sensor networks have attracted considerable research interest the last years, resulting in many relevant studies. But many areas still remain open for research due to the endogenous unstructured architect of WSNs, which brings to the foreground a number of peculiarities compared to other network technologies. The use of WSNs extends to a wide range of modern life activities.

Hence, an important issue in a wireless sensing knot is the energy consumption which

determines its lifetime, but also the rate of the throughput.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ασύρματη τεχνολογία έχει βοηθήσει στην απλοποίηση του τρόπου της δικτύωσης, επιτρέποντας πολλαπλούς χρήστες είτε βρίσκονται σε ιδιωτικό χώρο είτε σε δημόσιο να μοιράζονται ταυτόχρονα διάφορους πόρους χωρίς πρόσθετες ή ενοχλητικές καλωδιώσεις. Οι πόροι αυτοί θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν μια ευρυζωνική σύνδεση στο Internet, το δίκτυο των εκτυπωτών, τα αρχεία δεδομένων, ακόμα και streaming audio και βίντεο. Αυτό το είδος της κατανομής των πόρων έχει γίνει πιο διαδεδομένο, όπως στους χρήστες των ηλεκτρονικών υπολογιστών με αυτόνομους υπολογιστές να εργάζονται σε δίκτυα με πολλούς υπολογιστές όπου το καθένα με διαφορετικά λειτουργικά συστήματα και διάφορα εργαλεία εξοπλισμού.

Η ασύρματη μετάδοση που γίνεται με τη χρήση κεραιών εκπομπής και λήψης, αντίθετα, έχει χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Χρησιμοποιεί διάφορους τύπους κεραιών και επηρεάζεται άμεσα από το περιβάλλον διάδοσης που ποικίλλει και χαρακτηρίζεται από διάφορα φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης και απορρόφησης.

Τα τελευταία χρόνια μια τεράστια επανάσταση βρίσκεται σε εξέλιξη, η οποία έχει μεταβάλλει τον τρόπο με τον οποίο η άνθρωποι αντιμετωπίζουν την τεχνολογία. Κοιτώντας κανείς γύρω του μπορεί να δει πανίσχυρες ηλεκτρονικές συσκευές, οι οποίες είναι ικανές να εκτελέσουν σύνθετες υπολογιστικές λειτουργίες, αλλάζοντας τον τρόπο που οι άνθρωποι δουλεύουν, σπουδάζουν και ζούν.

Η επανάσταση αυτή στηρίζεται σε τρεις, ανεξάρτητους πυλώνες, τις τηλεπικοινωνίες με την τεράστια πρόοδο που έχουν σημειώσει οι ασύρματες ειδικότερα τα τελευταία χρόνια, τις τεχνικές κατανεμημένου προγραμματισμού, και την ηλεκτρονική με την κατασκευή πανίσχυρων χαμηλού κόστους ηλεκτρονικών υποσυστημάτων για χρήση σε κάθε είδους σύστημα. (Akyildiz, & Melodia 2008) πρώτος ο οποίος μίλησε για την ιδέα του διάχυτου προγραμματισμού ήταν Mark Weiser το 1988 όταν ήταν επικεφαλής στο PARC, ένα ερευνητικό κέντρο της Xerox στο Palo Alto των ΗΠΑ.

Σε ένα άρθρο της εποχής εκείνης ο Weiser διατύπωσε την άποψη ότι σκοπός των μηχανικών, θα πρέπει να είναι όχι η κατασκευή υπολογιστικών συστημάτων τόσο ισχυρών ώστε να μην μπορούμε να απομακρυνθούμε από αυτά, αλλά στην ανάπτυξη αόρατων συστημάτων που να κατακλύζουν τον χώρο που διαβιούμε και εργαζόμαστε, και που ενώ θα μπορούμε να τα χρησιμοποιούμε να μην αντιλαμβανόμαστε ότι πράττουμε κάτι τέτοιο.

Είκοσι χρόνια σχεδόν μετά, και το όραμα του Weiser αρχίζει να υλοποιείται, και η υλοποίηση αυτή δεν συμβαίνει σε ένα από τα πολλά εργαστήρια και ερευνητικά κέντρα που ασχολούνται με αυτή την ιδέα αλλά στην καθημερινή ζωής μας (π.χ δίκτυα αισθητήρων αυτοκινήτων). Σε αυτή την διαδικασία της υλοποίησης του οράματος του Weiser τα δίκτυα αισθητήρων παίζουν κεντρικό ρόλο. Η επανάσταση που συντελείται σε αυτά μπορεί να εξαφανίσει, τα σημερινά υπολογιστικά συστήματα από το προσκήνιο, και να τα αντικαταστήσει με κάθε λογής «έξυπνα» αντικείμενα, τα οποία θα είναι σε θέση να προγραμματίζονται, να σχηματίζουν δίκτυα μεταξύ τους, και να φροντίζουν για την ικανοποίηση των αναγκών των ιδιοκτητών, χωρίς οι ίδιοι να απαιτείται να προβούν σε καμιά ενέργεια. (Akyildiz, & Melodia 2008)

Τα ίδια χαρακτηριστικά των WSNs τα καθιστούν κατάλληλα για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως η ιατρική παρακολούθηση ασθενών, η συλλογή δεδομένων από περιοχές που έχουν υποστεί καταστροφές ή έχουν επικίνδυνη πρόσβαση (π.χ. κρατήρες ηφαιστειών), στρατιωτικές επιχειρήσεις, επιτήρηση περιοχών, δασοπροστασία, εκπαίδευση, παρακολούθηση άγριων ζώων κ.α.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 - Παράδειγμα WBAN.....	14
Εικόνα 2 - Παράδειγμα WPAN.....	15
Εικόνα 3 - Παράδειγμα WLAN.....	16
Εικόνα 4 - Παράδειγμα WMAN.....	17
Εικόνα 5 - Παράδειγμα WWLAN.....	18
Εικόνα 6 - Τοπολογίες ασυρμάτων δικτύων.....	21
Εικόνα 7 - Αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.....	23
Εικόνα 8 - Αρχιτεκτονική κόμβου αισθητήρα.....	31
Εικόνα 9 - Δομή κόμβου αισθητήρων.....	33
Εικόνα 10 - Κόμβος αισθητήρων για εντοπισμό χημικών.....	34
Εικόνα 11 - Ασύρματος κόμβος αισθητήρων	35
Εικόνα 12 - Εύκαμπτος ασύρματος κόμβος αισθητήρων.....	38
Εικόνα 13- Αρχιτεκτονική του RF μπροστινού άκρου	42
Εικόνα 14 - Μετάδοση πακέτων με το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11.....	48
Εικόνα 15 - Διάγραμμα εξοικονόμησης ενέργειας με δύο καταστάσεις λειτουργίας.....	71
Εικόνα 16 - Κατηγοριοποίηση Πρωτοκόλλων στα ΑΔΑ.....	92
Εικόνα 17 - Χρήση διαθέσιμων πρωτοκόλλων στο NS2.....	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

1.1 Γενικά - Ασύρματες Επικοινωνίες

Η ασύρματη μετάδοση που γίνεται με τη χρήση κεραιών εκπομπής και λήψης, έχει χαμηλό κόστος εγκατάστασης. Χρησιμοποιεί διάφορους τύπους κεραιών και επηρεάζεται άμεσα από το περιβάλλον διάδοσης που ποικίλλει και χαρακτηρίζεται από διάφορα φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης και απορρόφησης. Αυτά τα φαινόμενα πηγάζουν από την ανομοιογένεια της επιφάνειας της γης και της ατμόσφαιρας που την περιβάλλει. Η γήινη επιφάνεια είναι μη επίπεδη και εμφανίζει διάφορα επίπεδα αγωγιμότητας ενώ η ατμόσφαιρα έχει σύσταση και διηλεκτρικές ιδιότητες που διαρκώς μεταβάλλονται καθότι επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και την υγρασία.[1]

Το όραμα των ασύρματων επικοινωνιών να υποστηρίξουν ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ ανθρώπων ή συσκευών είναι στο επίκεντρο των τηλεπικοινωνιών γενικότερα για τις επόμενες δεκαετίες και πολλά βήματα ήδη έχουν γίνει προς αυτήν την κατεύθυνση. Με την υλοποίηση αυτού του οράματος στις τηλεπικοινωνίες θα γίνει δυνατή η χρήση και ανταλλαγή πληροφορίας με τη μορφή πολυμέσων με χρήση απλά και μόνο μιας μικρής συσκευής χειρός ή ενός φορητού υπολογιστή. Τα ασύρματα δίκτυα θα διασυνδέουν υπολογιστές χειρός, επιτραπέζιους καθώς και φορητούς οπουδήποτε μέσα σε ένα κτίριο με γραφεία, σε μία πανεπιστημιούπολη ή ακόμα και σε μία καφετέρια. Μέσα στο σπίτι αυτά τα δίκτυα θα κάνουν εφικτή τη χρήση μιας νέας κατηγορίας "έξυπνων" ηλεκτρονικών συσκευών που μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το διαδίκτυο επιπλέον της παροχής συνδεσιμότητας μεταξύ υπολογιστών, τηλεφωνικών συσκευών και συστημάτων ασφαλείας. Τέτοια "έξυπνα" σπίτια μπορούν επίσης να βοηθήσουν τους ανθρώπους τρίτης ηλικίας και τους ανάπηρους να έχουν καλύτερη ποιότητα ζωής.[2]

Οι διαφορετικές εφαρμογές των ασύρματων επικοινωνιών έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις και ως εκ τούτου υπάρχει μία διάσπαση στον τομέα της βιομηχανίας σε αναφορά με τις ασύρματες εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι φωνητικές εφαρμογές έχουν χαμηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς δεδομένων (περί τα 20 Kbps) και είναι ανεκτικές σε αρκετά υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων (BER

της τάξης του 10^{-3}) αλλά η συνολική καθυστέρηση πρέπει να είναι μικρότερη από περίπου 30 msec αλλιώς γίνεται αντιληπτό στο χρήστη. Από την άλλη, τα συστήματα επικοινωνιών δεδομένων τυπικά απαιτούν πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων (1-100 Mbps) και πολύ μικρούς ρυθμούς σφαλμάτων (BER της τάξης του 10^{-8} και όλα τα εσφαλμένα bits πρέπει να αναμεταδοθούν) αλλά δεν έχουν σταθερές απαιτήσεις σε καθυστέρηση. Τα συστήματα με βίντεο πραγματικού χρόνου έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς δεδομένων σε συνδυασμό με τους ίδιους περιορισμούς καθυστέρησης. Αυτές οι διαφορετικές απαιτήσεις για τις διαφορετικές εφαρμογές καθιστούν δύσκολο να αναπτυχθεί ένα ασύρματο δίκτυο που να ικανοποιεί ταυτόχρονα και αποτελεσματικά όλες αυτές τις απαιτήσεις.[3]

1.2 Τι είναι τα ασύρματα δίκτυα

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως, τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και, επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικά δίκτυα υπολογιστών. [2]

Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο «δίκτυο» τηλεπικοινωνιακών κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια. Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και, επομένως, δεν μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών.[3]

1.3 Πλεονεκτήματα ασύρματης δικτύωσης

Τα πλεονεκτήματα ασύρματων δικτύων είναι βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα ακόλουθα :

- Ευκολία χρήσης: Σήμερα, όλοι οι φορητοί υπολογιστές και πολλά κινητά τηλέφωνα είναι εξοπλισμένα με τεχνολογία WiFi που απαιτείται για απευθείας σύνδεση σε ένα ασύρματο δίκτυο LAN. Οι εργαζόμενοι μπορούν να συνδέονται με ασφάλεια στους πόρους του δικτύου σας από οπουδήποτε εντός της εμβέλειας κάλυψης του δικτύου. Η περιοχή κάλυψης είναι κατά κανόνα οι εγκαταστάσεις της επιχείρησής σας, ωστόσο μπορεί να επεκτείνεται και σε περισσότερα κτήρια.
- Φορητότητα: Οι εργαζόμενοι μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο, ακόμα και όταν δεν βρίσκονται στο γραφείο τους. Οι συμμετέχοντες σε συσκέψεις μπορούν να έχουν πρόσβαση σε έγγραφα και εφαρμογές. Οι πωλητές μπορούν να εντοπίζουν στο δίκτυο σημαντικές λεπτομέρειες από οποιαδήποτε τοποθεσία.
- Παραγωγικότητα: Η πρόσβαση στις πληροφορίες και στις βασικές εφαρμογές της εταιρείας σας υποστηρίζει το προσωπικό κατά τη διεκπεραίωση των εργασιών και ενθαρρύνει τη συνεργασία. Οι επισκέπτες (όπως πελάτες, συνεργάτες ή προμηθευτές) μπορούν να έχουν πρόσβαση υψηλής ασφαλείας στο Internet και στα επιχειρηματικά δεδομένα τους. (Θεολόγου 2009)
- Εύκολη ρύθμιση: Εφόσον δεν απαιτείται η τοποθέτηση καλωδίων σε ένα χώρο, η εγκατάσταση μπορεί να ολοκληρωθεί γρήγορα και οικονομικά. Τα ασύρματα δίκτυα LAN διευκολύνουν επίσης τη συνδεσιμότητα δικτύου σε δυσπρόσιτους χώρους, όπως οι αποθήκες ή οι εγκαταστάσεις εργοστασιακής παραγωγής.
- Δυνατότητα κλιμάκωσης: Καθώς οι επιχειρηματικές δραστηριότητές σας αναπτύσσονται, ενδεχομένως να απαιτείται άμεση επέκταση του δικτύου σας. Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν κατά κανόνα να επεκταθούν με τον υπάρχοντα εξοπλισμό, ενώ ένα ενσύρματο δίκτυο ενδέχεται να απαιτεί επιπλέον καλωδίωση.
- Ασφάλεια: Ο έλεγχος και η διαχείριση της πρόσβασης στο ασύρματο δίκτυό σας είναι μέγιστης σημασίας για την επιτυχία του. Οι εξελιγμένες δυνατότητες της τεχνολογίας WiFi προσφέρουν ισχυρή προστασία, ώστε τα δεδομένα σας να είναι εύκολα προσβάσιμα μόνο από τους χρήστες στους οποίους επιτρέπετε την πρόσβαση.
- Κόστος: Μπορεί να αποδειχθεί οικονομικότερη η λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου LAN, το οποίο εξαλείφει ή μειώνει το κόστος καλωδίωσης σε περιπτώσεις μετακόμισης, αναδιάταξης ή επέκτασης γραφείων.[4]

1.4 Ασύρματα Δίκτυα – Μειονεκτήματα

Η χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ραδιοκυμάτων και υπέρυθρης ακτινοβολίας) για

τη μεταφορά πληροφορίας κάνουν τα ασύρματα δίκτυα ευπρόσβλητα σε πολλά φαινόμενα παρεμβολής, τα οποία αλλοιώνουν την επικοινωνία των χρηστών. Τα κυριότερα από αυτά τα προβλήματα αναφέρονται στη συνέχεια.

Παρεμβολή λόγω πολλαπλών διαδρομών: Σήματα που μεταδίδονται είναι δυνατόν να συνδυαστούν με ανακλώμενα σήματα από επιφάνειες ή εμπόδια που βρίσκονται στην ευθεία μετάδοσης του σήματος. Το πρόβλημα αυτό προκαλεί ετεροχρονισμένες λήψεις του ίδιου σήματος λόγω των σημάτων που κάνουν μεγαλύτερη διαδρομή λόγω αντανάκλασεων. Αυτό απαιτεί μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ από τον δέκτη ώστε να μπορεί να ξεχωρίσει τα ανάλογα σήματα και να βάλει στη σωστή σειρά τα δεδομένα που λαμβάνει.

Απώλεια Διαδρομής (Path Loss): Οι απώλειες που μπορεί να έχουμε σε μία ασύρματη επικοινωνία από το “path loss” εξαρτώνται άμεσα από την ύπαρξη ή μη της οπτικής επαφής (LoS: Line of Sight). Κάποια εμπόδια μπορεί να μην αφήνουν καθόλου είτε ένα τμήμα είτε και ολόκληρο το σήμα να περάσει με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη απόδοση με πολύ μεγάλο βαθμό.

Παρεμβολές Ραδιοσημάτων: Οι παρεμβολές από ραδιοσήματα (Radio Signal Interference) διαχωρίζονται σε Εξωγενές (Inward) και Ενδογενές (Outward). Εξωγενές παρεμβολές είναι παρεμβολές που έχουν προκαλέσει άλλες συσκευές (είτε Wi-Fi είτε άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος συχνοτήτων π.χ. Bluetooth ή ακόμα και φούρνοι μικροκυμάτων) με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει στον δέκτη αλλοιωμένο. Ενδογενές παρεμβολές είναι παρεμβολές που έχει προκαλέσει ο ίδιος ο πομπός σε άλλα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Όσο πιο χαμηλή είναι η ένταση ενός σήματος τόσο λιγότερη επίπτωση έχει στα γειτονικά του σήματα. Διαχείριση Ενέργειας: Θα πρέπει να γίνεται σωστή διαχείριση ενέργειας, ώστε να μεγιστοποιείται η αυτονομία των συσκευών που συνδέονται στο ασύρματο δίκτυο.

Ασυμβατότητα Συστημάτων: Για το σωστό στήσιμο ενός WLAN θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και την ασυμβατότητα μεταξύ προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών. Προστασία της Υγείας των Χρηστών: Υπάρχουν περιορισμοί που έχουν υποβληθεί όσο αφορά την ένταση του σήματος κυρίως για την υγεία των χρηστών.

Το Πρόβλημα του Κρυμμένου Κόμβου: Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν υπάρχει ένας σταθμός που δεν μπορεί να ανιχνεύσει την δραστηριότητα ενός άλλου σταθμού ώστε να αναγνωρίσει ότι το μέσο χρησιμοποιείται. Δύο laptop που είναι συνδεδεμένα στο ίδιο access point αλλά είναι σε διαφορετικές άκρες της κάλυψης του δικτύου του access point με αποτέλεσμα να μη «βλέπει» το ένα laptop το άλλο, μπορεί να ξεκινήσουν να στέλνουν πακέτα πληροφοριών

ταυτόχρονα προκαλώντας συγκρούσεις (collisions). Υπάρχουν μέθοδοι, όπως το CSMA/CA, που βοηθάνε στο να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, αλλά δεν είναι πάντα 100% αποτελεσματικά. Ασφάλεια Δικτύου: Η συνολική λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου εμπεριέχεται στα χαμηλότερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου και δεν ενυπάρχει με άλλες λειτουργίες όπως εγκατάσταση σύνδεσης ή άλλες υπηρεσίες (π.χ. login) που προσφέρουν τα ανώτερα στρώματα. Έτσι το μόνο θέμα που σχετίζεται με την ασφάλεια στα ασύρματα δίκτυα είναι τα θέματα ασφαλείας των χαμηλότερων στρωμάτων, π.χ. κρυπτογράφηση (encryption) δεδομένων. Για αυτό το λόγο, έχουν δημιουργηθεί διάφορες τεχνικές κωδικοποίησης οι οποίες καθιστούν δύσκολη την υποκλοπή της πληροφορίας που μεταδίδεται. Ένα ασύρματο δίκτυο είναι προστατευμένο σε δύο επίπεδα. Authentication – χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση ότι η συσκευή που ζητάει προσπέλαση στο δίκτυο έχει εγκριθεί. Encryption – αφού έχει εγκριθεί η συσκευή οι πληροφορίες που μεταδίδονται στο δίκτυο κρυπτογραφούνται για να την αποφυγή υποκλοπή.[5]

1.5 Από τον Τηλέγραφο ως τις Σύγχρονες Ασύρματες Επικοινωνίες

Το 1888 ο Heinrich Rudolf era επιβεβαίωσε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (τα οποία είχαν ήδη αναφερθεί σε εργασίες των Maxwell και Faraday) ισχυριζόμενος ότι δε θα έβρισκαν ποτέ κάποια πρακτική εφαρμογή. Η διάψευση όμως δεν άργησε να έρθει. Μόλις πέντε χρόνια αργότερα, το 1893, ο Nikola Tesla κατασκευάζει το πρώτο ασύρματο σύστημα επικοινωνίας. Ο ίδιος, το 1895, καταφέρνει να μεταδώσει σήματα Μορς σε απόσταση 50 χιλιομέτρων, κάνοντας έτσι μια επίδειξη των δυνατοτήτων του ασύρματου μέσου. Το 1901 μεταδίδεται το πρώτο υπερατλαντικό σήμα από τον Guglielmo Marconi, ο οποίος ίδρυσε και την πρώτη εταιρία υπερατλαντικού ασύρματου τηλεγράφου το 1903.

Από τότε μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί τεράστια άλματα στην ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, με αποτέλεσμα να έχει εξαπλωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό η ασύρματη μεταφορά δεδομένων στην καθημερινή ζωή. Μερικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν το ραδιόφωνο, η τηλεόραση, η κινητή τηλεφωνία, οι δορυφορικές επικοινωνίες, η επικοινωνία μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας (infrared) και η τεχνολογία Bluetooth. Όσον αφορά τη δικτύωση υπολογιστών ή άλλων συσκευών, οι ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα με σημαντικότερο όλων την εξάλειψη της ανάγκης ύπαρξης δομημένης καλωδίωσης, κάτι που καθιστά την επικοινωνία πολύ πιο ευέλικτη και ανταγωνιστική σε κόστος έναντι της ενσύρματης .

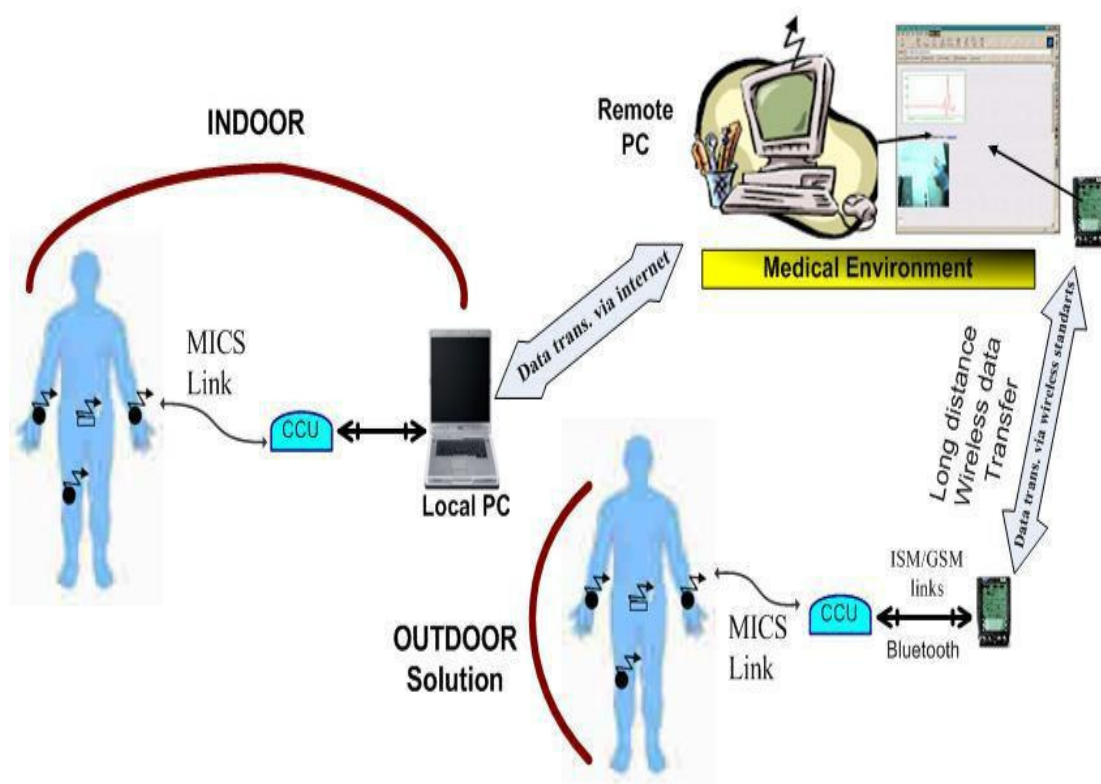
1.6 Κατηγορίες Ασύρματων Δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την περιοχή την οποία καλύπτουν:

- **Ασύρματα σωματικά δίκτυα (Wireless Body Area Networks – WBANs).**

Τα WBAN δίκτυα αποτελούνται από αισθητήρες (sensors) που είναι εμφυτευμένοι ή τοποθετημένοι πάνω στο σώμα ή τα ρούχα ενός ανθρώπου και επιβλέπουν διάφορες ζωτικές λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού ή μετρούν διάφορους δείκτες υγείας. Οι αισθητήρες, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες ασύρματων δικτύων, αποστέλλουν σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα σε ένα κοντινό σημείο (κατοικία) και από εκεί τα δεδομένα αποστέλλονται σε ένα κέντρο βοήθειας ή σε ένα νοσοκομείο. [6]

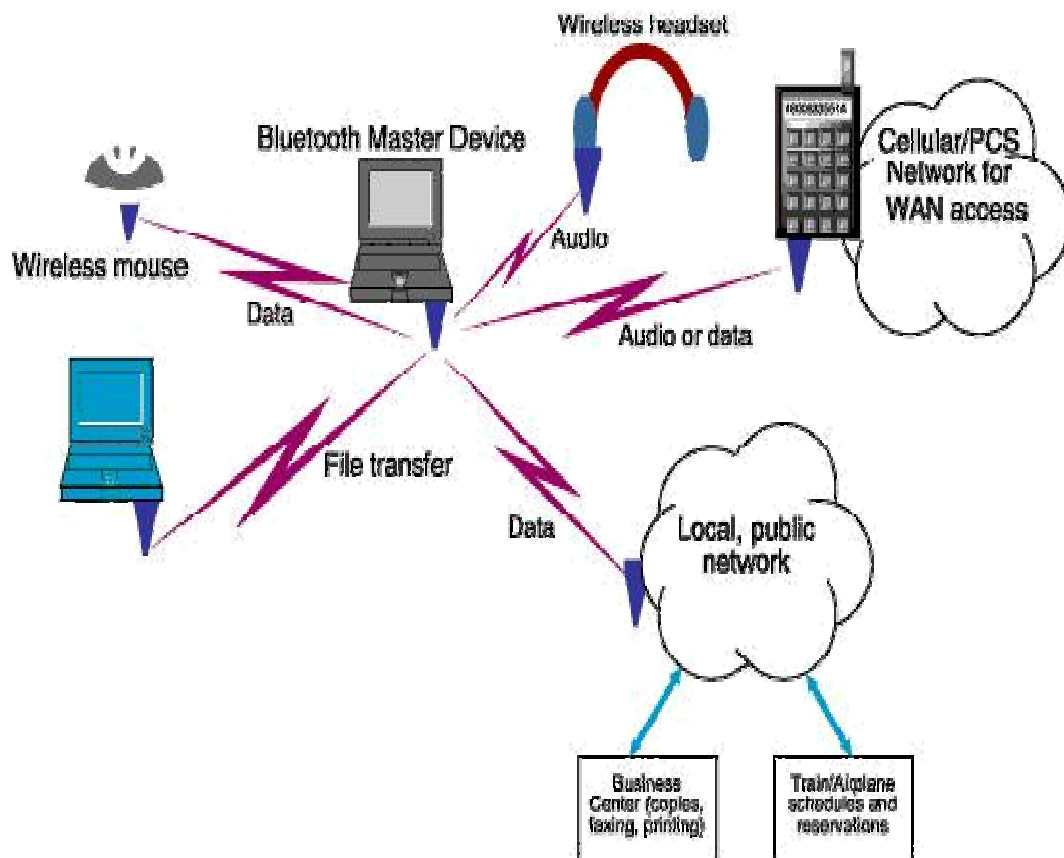
Το πρωτόκολλο IEEE 802.15.6 προορίζεται για τα WBAN δίκτυα (IEEE 802.15 TG6 2007).



Εικόνα 1 - Παράδειγμα WBAN

- **Ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Networks – WPANs).**

Τα WPAN είναι δίκτυα μικρής εμβελείας, εξυπηρετούν έναν χρήστη και καλύπτουν χώρο πχ. ενός γραφείου ή ενός δωματίου και συνολική απόσταση περίπου δέκα μέτρων (Bravo-Escos 2002). Παράδειγμα δικτύου WPAN είναι το Bluetooth το οποίο ορίζεται από το πρωτόκολλο του IEEE 802.15.1 (IEEE 802.15.1 TG1a 2005). Βασικό κριτήριο της απόδοσης των WPAN (όπως και των WBAN) δικτύων είναι η κατανάλωση ενέργειας.[4]



Εικόνα 2 - Παράδειγμα WPAN

- **Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs)**

Τα WLAN δίκτυα έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια από τα WPAN και συνήθως καλύπτουν χώρους πχ. ενός ορόφου, μίας οικίας, κλπ. Τα WLAN είναι ο πλέον δημοφιλής τρόπος ασύρματης επικοινωνίας

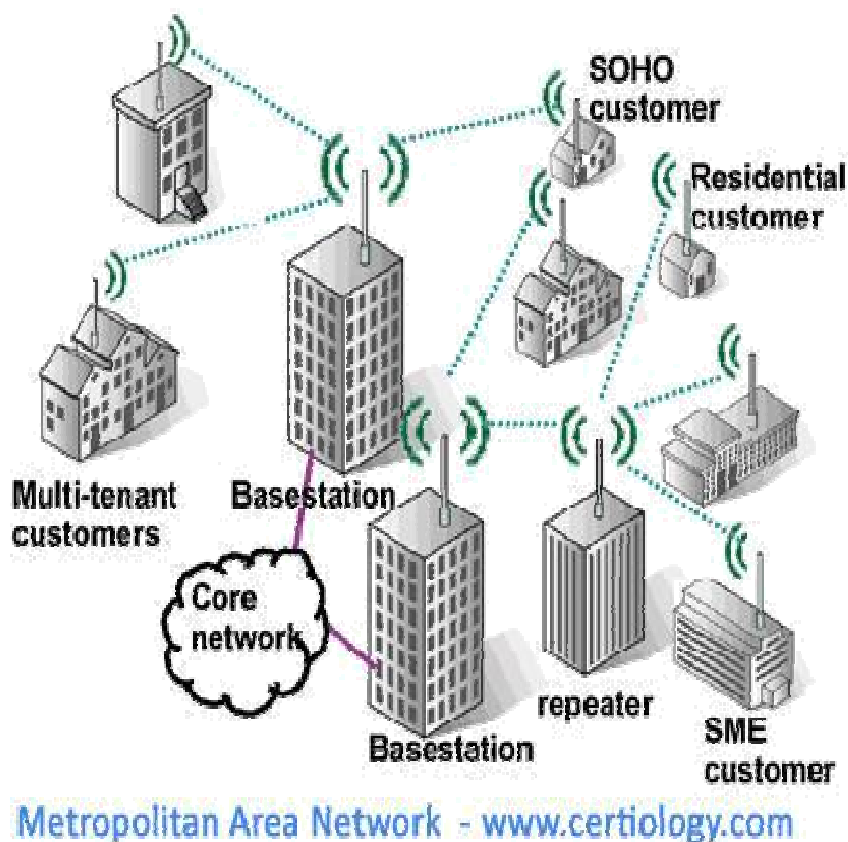
δεδομένων. Το πρωτόκολλο που έχει επικρατήσει στα WLAN είναι το IEEE 802.11 (IEEE 802.11 2001).[4]



Εικόνα 3- Παράδειγμα WLAN

- **Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks - WMANs).**

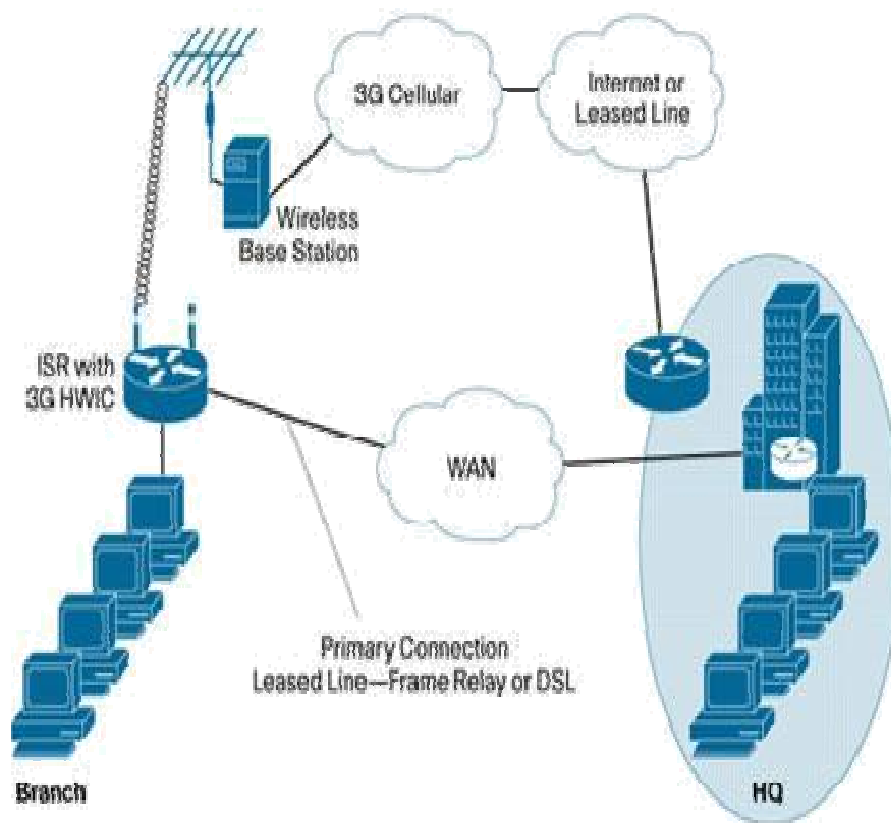
Τα WMAN δίκτυα καλύπτουν γεωγραφικές περιοχές πχ. μικρών πόλεων ή αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων. Τα WMAN στην Βόρειο Αμερική χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IEEE 802.16 (IEEE 802.16 2007) (τεχνολογία WiMAX), στην Νότια Κορέα το Wi-Bro.[4]



Εικόνα 4 - Παράδειγμα WMAN

- **Ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (Wireless Wide Area Networks – WWANs).**

Τα WWAN καλύπτουν περιοχές μιας ή περισσότερων χωρών και είναι ευρέως διαδεδομένα στην κινητή τηλεφωνία και παρέχουν την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων. Τα WWAN διαθέτουν τις 2.5G, 3G τεχνολογίες και την τεχνολογία της επόμενης γενιάς 4G.[4]



Εικόνα 5 - Παράδειγμα WWLAN

1.7 Η ομάδα HEW (High Efficiency WLAN) του IEEE

Η IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) είναι μια παγκόσμια τεχνολογική, επαγγελματική, μη πολιτική οργάνωση με σκοπό την προώθηση της θεωρίας και των εφαρμογών της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών για την εξέλιξη του επαγγέλματος με γνώμονα την κοινωνική προσφορά.

Στην IEEE είναι σήμερα εγγεγραμμένοι περισσότεροι από 425.000 Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί εκ των οποίων περισσότεροι από 90.000 φοιτητές, σε περισσότερες από 160 χώρες, γεγονός που την καθιστά τη μεγαλύτερη τεχνολογική επαγγελματική κοινότητα στον κόσμο.

Οι πλειοψηφία των εργασιών που έχει ανατεθεί στην ομάδα High Efficiency WLAN (HEW) περιλαμβάνει σενάρια υψηλής ρυθμοαπόδοσης τα οποία θα επιτευχθούν στο κοντινό μέλλον. Στα επόμενα χρόνια η ομάδα στοχεύει να αυξήσει σημαντικά την ρυθμοαπόδοση με το πρότυπο που σχεδιάζεται, το IEEE 802.11ax. Επίσης, η ομάδα στοχεύει να βελτιώσει τη απόδοση όσον αφορά την ενέργεια των συσκευών που τροφοδοτούνται από μπαταρίες.

Η ομάδα HEW του IEEE, αποσκοπεί σε βελτιώσεις και τροποποιήσεις τροποποίηση στο Φυσικό επίπεδο (Physical - PHY) καθώς και στην δημιουργία ενός υποεπιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control - MAC) με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του WLAN, εστιάζοντας στην εμπειρία που θα προσφέρεται στον τελικό χρήστη με όρους ρυθμοαπόδοσης και ενεργειακής αποδοτικότητας.

Η ομάδα αυτή αποτελείται πάνω από 300 άτομα που προέρχονται από διάφορους τομείς, όπως silicon vendors, πάροχους υπηρεσιών, σύμβουλους οργανισμών, πανεπιστημιακά ιδρύματα, και σχεδιαστές συστημάτων. Τα άτομα που αποτελούν την ομάδα προέρχονται από 20 διαφορετικές χώρες.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας που ορίζεται από τα πρότυπα IEEE 802 είναι ήδη σε παγκόσμιο επίπεδο διάχυτη, οδηγείται από τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των δικτύων σε όλο τον κόσμο. Νέοι τομείς εφαρμογής θεωρείται ότι θα μπορούσαν να αυξήσουν την οικογένεια των προτύπων IEEE 802 στα δίκτυά τους. Για να διαχειριστούν όλους αυτούς τους τομείς, τα πρότυπα IEEE 802 εξελίσσονται και επεκτείνονται συνεχώς. Η επιτυχία των προτύπων IEEE 802 από το ξεκίνημα τους έως και σήμερα, υπήρξε δίκαιη, ανοικτή και με διαφανείς τρόπους.[4]

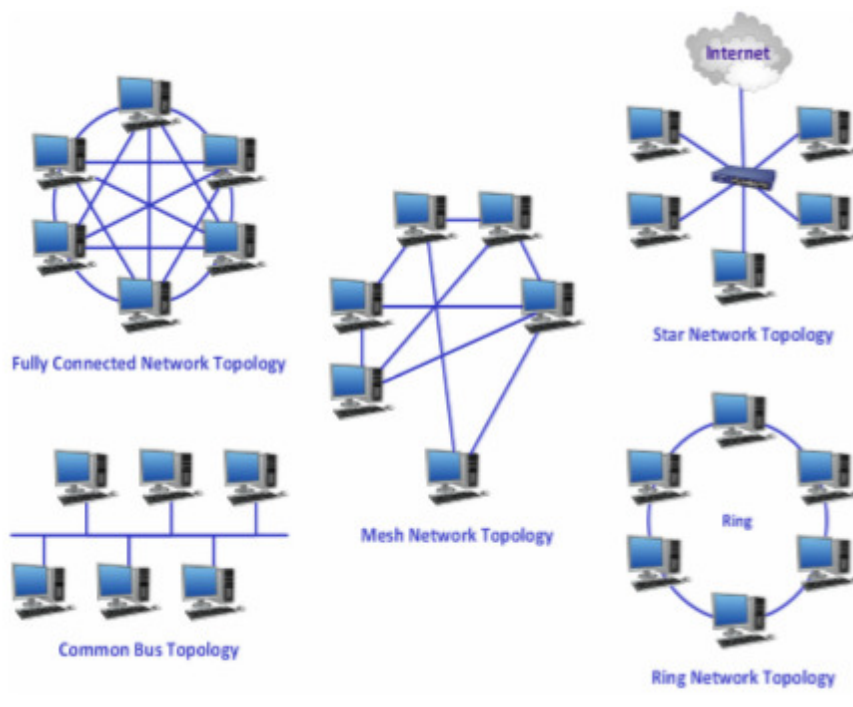
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (ΑΔΑ / Wireless Sensor Network - WSN) αποτελείται από διασκορπισμένους αυτόνομους αισθητήρες για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντολογικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η ατμοσφαιρική πίεση κτλ και μέσω συνεργασίας να μεταφέρει τα δεδομένα μέσω του δικτύου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Τα πιο μοντέρνα δίκτυα είναι ικανά και να δίνουν αλλά και να δέχονται πληροφορίες πράγμα που τους επιτρέπει να ελέγχουν την δραστηριότητα των αισθητήρων. Το κίνητρο για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων με αισθητήρες ήταν οι στρατιωτικές εφαρμογές όπως η παρακολούθηση των πεδίων μάχης. Σήμερα τέτοια δίκτυα χρησιμοποιούνται σε πολλές καταναλωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της βιομηχανικής παραγωγής, την παρακολούθηση των μηχανημάτων υγείας και πολλά άλλα.

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους από μερικές σε αρκετές εκατοντάδες η ακόμα και χιλιάδες, όπου κάθε κόμβος συνδέεται σε έναν (η κάποιες φορές σε αρκετούς) αισθητήρες. Κάθε τέτοιος κόμβος του δικτύου αισθητήρων έχει χαρακτηριστικά μερικά κομμάτια : ένα ραδιοπομποδέκτη με μια εσωτερική κεραία η μια σύνδεση με μια εξωτερική κεραία, έναν μικροελεγκτή, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για την διασύνδεση με τους αισθητήρες και μια πηγή ενέργειας, συνήθως μια μπαταρία η μια ενσωματωμένη μορφή συγκομιδής ενέργειας. Ένας αισθητήριος κόμβος μπορεί να ποικίλει σε μέγεθος από εκείνο ενός κουτιού παπουτσιών μέχρι το μέγεθος ενός κόκκου σκόνης, αν και λειτουργικοί <<κόκκοι>> πραγματικά μικροσκοπικών διαστάσεων δεν έχουν ακόμα δημιουργηθεί. Το κόστος των αισθητήριων κόμβων ποικίλει, ξεκινώντας από μερικά και φτάνοντας σε εκατοντάδες δολάρια, αναλόγως την πολυπλοκότητα των μεμονωμένων αισθητήριων κόμβων. Οι περιορισμοί σε μέγεθος και κόστος έχουν ως αποτέλεσμα αντίστοιχους περιορισμούς σε πόρους όπως ενέργεια, μνήμη, υπολογιστική ταχύτητα και στο εύρος ζώνης των επικοινωνιών. Η τοπολογία των αισθητήρων μπορεί να διαφέρει από ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρος σε ένα αναπτυγμένο ασύρματο δίκτυο πλέγματος multihop. Η

πολλαπλασιαστική τεχνική μεταξύ των λυκίσκων του δικτύου μπορεί να είναι η δρομολόγηση ή ο καταιγισμός διακίνησης.



Εικόνα 6: Τοπολογίες ασυρμάτων δικτύων

Στην επιστήμη των υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένας ενεργός τομέας έρευνας με πολυάριθμα εργαστήρια και συνέδρια που διοργανώνονται κάθε χρόνο. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται συχνά από ένα σύνολο αισθητήρων μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους, οι οποίοι συλλέγουν και μεταδίδουν διάφορα κρίσιμα δεδομένα τα οποία ανιχνεύουν στο φυσικό τους περιβάλλον. μεταδίδουν διάφορα κρίσιμα δεδομένα τα οποία ανιχνεύουν στο φυσικό τους περιβάλλον.

2.2 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται συχνά από ένα σύνολο αισθητήρων μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους, οι οποίοι συλλέγουν και μεταδίδουν διάφορα κρίσιμα δεδομένα τα οποία ανιχνεύουν στο φυσικό τους περιβάλλον.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- i. Διευκολύνουν την παρατήρηση και τον έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος από απόσταση με μεγάλη ακρίβεια, και, ως εκ τούτου, αναπτύσσονται συνήθως σε απομακρυσμένους και

όχι εύκολα προσπελάσιμους χώρους, όπου η αντικατάσταση της μπαταρίας του κάθε αισθητήρα δεν είναι μία απλή υπόθεση. Συνεπώς, η σχεδίαση δικτύων αισθητήρων, που να αντέχουν σε σφάλματα και να έχουν μακρά διάρκεια ζωής, αποτελεί μία πρόκληση.

- ii. Προσδιορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή, και κατά συνέπεια πρέπει να περιλαμβάνουν το κατάλληλο υλικό (hardware) αλλά και λογισμικό (software) μέρος.
- iii. Χρησιμοποιούν πρωτόκολλα τα οποία σχετίζονται άμεσα όχι μόνο με το είδος της εφαρμογής αλλά και με το εκάστοτε ασύρματο δίκτυο.
- iv. Καταναλώνουν ενέργεια υποστηρίζοντας εφαρμογές πολυμέσων, π.χ. PDAs (Personal Digital Assistants), υπολογιστών δικτύων, και κινητών συσκευών επικοινωνίας.
- v. Βελτιώνουν την ακρίβεια του τεράστιου όγκου πληροφοριών (όπως, π.χ., δεδομένα σεισμικής διέγερσης, ηχητικά ή ακουστικά δεδομένα, εικόνες υψηλής ευκρίνειας, κτλ.) που λαμβάνουν από το φυσικό τους περιβάλλον μέσα από την κατανεμημένη επεξεργασία.
- vi. Μπορούν να βελτιώνουν την πρόσβαση σε δεδομένα αισθητήρων που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση, παρέχοντας ενδιάμεσους σταθμούς βάσης (sink nodes) οι οποίοι τους συνδέουν με άλλα δίκτυα, όπως, για παράδειγμα, με το Internet, χρησιμοποιώντας ασύρματες ζεύξεις ευρείας ζώνης. Εάν λοιπόν οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα α) να διαχειρίζονται από κοινού τις όποιες πληροφορίες που λαμβάνουν από το φυσικό τους περιβάλλον τους και β) να τις επεξεργάζονται, ώστε να φθάνουν στους σταθμούς βάσης μόνο όσες από αυτές είναι χρήσιμες, τότε το έργο των χρηστών καθίσταται ευκολότερο διότι μέσα από αυτές μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν το περιβάλλον από μεγάλες αποστάσεις.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

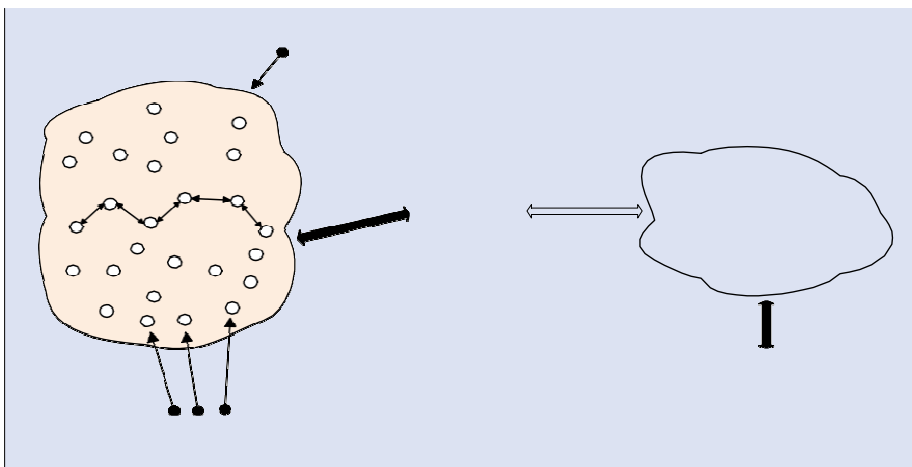
- i. για την παρακολούθηση των διακυμάνσεων του κλίματος από απόσταση και την περισυλλογή μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως είναι π.χ. η θερμοκρασία, η πίεση, και η υγρασία. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη ή την ανίχνευση φυσικών φαινομένων.
- ii. για την επιλεκτική χαρτογράφηση των περιοχών που έχουν πληγεί από φωτιά, ώστε, άμεσα και με μεγάλη ακρίβεια, να κατευθύνουν προς το μέρος της τα πλησίον ευρισκόμενα μέσα πυρόσβεσης.
- iii. σε αποστολές εποπτείας του πεδίου μάχης, προκειμένου να εντοπίσουν π.χ. κινούμενους στόχους ή ακόμη και την παρουσία χημικών αερίων, όσον αφορά το χώρο των

στρατιωτικών εφαρμογών. Τα τελευταία χρόνια, η σχεδίαση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει αποκτήσει τεράστια σημασία λόγω του συνεχώς αυξανόμενου αριθμού των εμπορικών αλλά και των στρατιωτικών εφαρμογών.

Οι αισθητήρες βρίσκονται συνήθως διασκορπισμένοι σε ένα χώρο ο οποίος ονομάζεται *Πεδίο Αισθητήρων* (sensor field).

Καθένας από αυτούς τους αισθητήρες (ή κόμβους) έχει την ικανότητα να συλλέγει δεδομένα και στη συνέχεια να τα δρομολογεί προς το *Σταθμό Βάσης* (sink) μέσω μιας διαδρομής πολλαπλών βημάτων (multi-hop). Ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με τον *Κόμβο Διαχείρισης Εργασιών* (Task manager node) μέσω του Διαδικτύου (Internet) ή μέσω δορυφόρου.

Η σχεδίαση και η αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, όπως είναι αυτό που απεικονίζεται στην Εικόνα 7, εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά στην αμέσως επόμενη ενότητα. [7,8]



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

2.3 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Σχεδίαση των Δικτύων Αισθητήρων

Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς σε πολλές μελέτες που έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές. Πρέπει να σημειώσουμε ότι καμία από αυτές τις μελέτες δεν έχει να παρουσιάσει έναν πλήρη κατάλογο όλων αυτών των παραγόντων. Όμως, αυτοί οι παράγοντες είναι πολύ σημαντικοί

για τη σωστή μελέτη και σχεδίαση ενός πρωτοκόλλου ή ενός αλγόριθμου και θα πρέπει να λαμβάνονται πάντοτε σοβαρά υπόψη]. Στη συνέχεια αναφέρουμε μερικούς από αυτούς.

- **Τοπολογία του Δικτύου Αισθητήρων**

Ένας πολύ μεγάλος αριθμός αισθητήρων, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως και μερικές χιλιάδες, μπορεί να αναπτυχθεί σε μία περιοχή, όπου μας ενδιαφέρει η παρακολούθηση κάποιων φαινομένων, και η οποία ονομάζεται *Πεδίο Αισθητήρων*. Η απόσταση μεταξύ τους συνήθως δεν υπερβαίνει τα λίγα μέτρα [9]. Η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και να προσεγγίζει τους 20 κόμβους/m³ [10]. Η ανάπτυξη ενός τόσο σημαντικού αριθμού αισθητήρων σε τόσο πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, πυκνό δίκτυο, απαιτεί μία πάρα πολύ προσεκτική διαχείριση για τη διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου.

Τα θέματα που σχετίζονται άμεσα με τη διατήρηση αλλά και με την αλλαγή της τοπολογίας του ασύρματου δικτύου αισθητήρων διακρίνονται σε τρεις φάσεις:

- *Φάση Ανάπτυξης των Κόμβων*: Οι κόμβοι (αισθητήρες) μπορούν είτε να τοποθετηθούν τυχαία σε μεγάλες ποσότητες στην υπό έλεγχο περιοχή (π.χ. ρίψη από αεροπλάνο), είτε να τοποθετηθούν ένας-ένας σε προκαθορισμένα σημεία (π.χ. με ανθρώπινη παρέμβαση ή από εξειδικευμένα ρομπότ).

- *Φάση Μετά την Ανάπτυξη των Κόμβων*: Μετά την ανάπτυξη των κόμβων στο πεδίο αισθητήρων, οι οποιεσδήποτε μεταβολές που μπορεί να εμφανιστούν στην τοπολογία του δικτύου πιθανόν να οφείλονται:

- είτε σε αλλαγές της αρχικής θέσης των κόμβων (π.χ. κόμβοι οι οποίοι διαθέτουν σύστημα κίνησης – ρομπότ, ή κόμβοι οι οποίοι παρασύρονται από το φύσημα του αέρα) ,
- είτε στα ποσά ενέργειας που διαθέτουν,
- είτε στη διακοπή λειτουργίας ορισμένων κόμβων,
- είτε στις εργασίες που τους έχουν ανατεθεί.

- *Φάση Ανάπτυξης Νέων Πρόσθετων Κόμβων*: Πρόσθετοι κόμβοι μπορούν να αναπτυχθούν στο δίκτυο οποιαδήποτε χρονική στιγμή, προκειμένου, να αντικαταστήσουν ένα αριθμό κόμβων των οποίων η λειτουργία έχει διακοπεί εξ' αιτίας κάποιας βλάβης, ή διότι άλλαξε η δυναμική του εκτελούμενου έργου.[9]

- **Ανοχή σε Σφάλματα**

Μερικοί κόμβοι είναι πάρα πολύ πιθανό να παύσουν να λειτουργούν για διαφόρους λόγους,

- είτε διότι εξαντλήθηκαν τα υπόλοιπα διαθέσιμα ποσά ενέργειάς τους,
- είτε λόγω φυσικής τους φθοράς ή καταστροφής,
- είτε λόγω παρεμβολών από το γειτονικό τους περιβάλλον.

Σε καμία όμως περίπτωση δεν θα πρέπει να επηρεαστεί η απρόσκοπτη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου εξ' αιτίας της αδυναμίας λειτουργίας ορισμένων κόμβων. Αυτό αποτελεί εξ' άλλου και το βασικό θέμα αξιοπιστίας ή ανοχής σε σφάλματα του δικτύου. Στο σημείο αυτό θα μπορούσε να δοθεί και ο εξής ορισμός: *“Ανοχή σε Σφάλματα είναι η ικανότητα που διαθέτει ένα δίκτυο αισθητήρων να διατηρεί τη λειτουργικότητά του χωρίς διακοπές παρά τις οποιεσδήποτε αδυναμίες λειτουργίας των κόμβων που το συγκροτούν”* [11,12].

- **Επεκτασιμότητα**

Ο αριθμός των κόμβων, που θα αναπτυχθούν σε ένα πεδίο αισθητήρων για τη μελέτη ενός φαινομένου, μπορεί να είναι της τάξης των μερικών δεκάδων ή και μερικών χιλιάδων ακόμη, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Φυσικό είναι, ένας τόσος μεγάλος αριθμός κόμβων να απαιτεί ένα καινούργιο πλαίσιο εργασίας το οποίο θα λαμβάνει πολύ σοβαρά υπόψη αυτόν τον τεράστιο αριθμό των συνεργαζόμενων κόμβων.

Η πυκνότητα μ του δικτύου μπορεί να υπολογιστεί, σύμφωνα με το [13] ως:

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

- **Κόστος Παραγωγής**

Επειδή τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα σημαντικό αριθμό κόμβων, θα πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη το κόστος παραγωγής τους διότι αυτό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το συνολικό κόστος εγκατάστασης ενός δικτύου. Στην περίπτωση όπου το κόστος της εγκατάστασης ενός δικτύου αισθητήρων υπερβεί κατά πολύ το κόστος των ήδη υπάρχουσών συμβατικών τεχνολογιών, τότε είναι εύλογο να μην προτιμηθεί. Γι' αυτό λοιπόν το λόγο θα πρέπει το κόστος του κάθε κόμβου χωριστά να διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα προκειμένου να είναι συμφέρουσα η επιλογή του.

- **Περιβάλλον Λειτουργίας**

Οι αισθητήρες αναπτύσσονται συνήθως σε πυκνή μορφή, είτε πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο, είτε απευθείας μέσα στο ίδιο το υπό παρακολούθηση φαινόμενο. Τα δίκτυα, τα οποία αυτοί συγκροτούν, λειτουργούν συνήθως σε απομακρυσμένες και δύσκολα προσβάσιμες γεωγραφικές περιοχές χωρίς την υποστήριξη του ανθρώπινου παράγοντα. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αναπτυχθούν και να λειτουργούν ενδεικτικά:

- είτε σε μία χημικά ή βιολογικά μολυσμένη περιοχή,
- είτε στα βάθη των ωκεανών,
- είτε στο πεδίο της μάχης πίσω από τις εχθρικές γραμμές,
- είτε στο εσωτερικό μιας μεγάλης μηχανής,
- είτε σε μία κατοικία ,
- είτε τέλος σε ένα μεγάλο κτήριο.

- **Κατανάλωση Ισχύος**

Ο κάθε αισθητήριος κόμβος, επειδή είναι ουσιαστικά μία μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να τροφοδοτείται μόνο από μία πηγή περιορισμένης ισχύος (συνήθως, <0.5 Ah, 1.2 V). Σε κάποιες μάλιστα εφαρμογές είναι δύσκολη η αντικατάσταση της μπαταρίας που διαθέτει. Ως εκ τούτου, ο χρόνος ζωής του κόμβου είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με το χρόνο ζωής της μπαταρίας του.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, κάθε κόμβος παίζει το διπλό ρόλο του γεννήτορα (originator) και του δρομολογητή (router) δεδομένων. Η οποιαδήποτε βλάβη ή καταστροφή, ακόμη και ελάχιστων κόμβων, είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου και είναι πάρα πολύ πιθανό να απαιτηθεί επαναδρομολόγηση (re-routing) των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Συνεπώς, οι διάφοροι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων, θα πρέπει να λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα της μπαταρίας του κάθε κόμβου και να φροντίζουν πάντοτε για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίησή τους.

Για όλους αυτούς τους λόγους, σήμερα οι ερευνητές εστιάζουν την προσοχή τους στη μελέτη και σχεδίαση των πλέον κατάλληλων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το κύριο έργο ενός κόμβου σε πεδίο αισθητήρων είναι η ανίχνευση γεγονότων που λαμβάνουν χώρα στο φυσικό τους περιβάλλον, η ταχεία επεξεργασία των

δεδομένων που προέκυψαν από αυτήν τη μέτρηση, εφόσον είναι απαραίτητο, και τέλος η αποστολή τους. Ως εκ τούτου, η ενέργεια που θα καταναλώνεται στο δίκτυο θα οφείλεται κυρίως στην ανίχνευση γεγονότων ή λήψη δεδομένων από γειτονικούς κόμβους, στην επεξεργασία τους και στην αποστολή τους.

Η κατανάλωση ενέργειας, η οποία αποτελεί έναν από τους σπουδαιότερους παράγοντες και που θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη κατά τη μελέτη και τη σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, είναι το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

2.4 Μέσα Ασύρματης Επικοινωνίας

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, η ζεύξη επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι ασύρματη και μπορεί να γίνει με κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

- Με ραδιοσυχνότητες,
- Με υπέρυθρες,
- Με Bluetooth και
- Με οπτικές ακτίνες Laser

Αυτά τα δίκτυα για να μπορούν να λειτουργούν οπουδήποτε, θα πρέπει το μέσο μετάδοσης να είναι διαθέσιμο παντού σε όλο τον κόσμο.

• Επικοινωνία με Ραδιοσυχνότητες

Τα περισσότερα από τα δίκτυα αισθητήρων που αναπτύσσονται τον τελευταίο καιρό έχουν επιλέξει τις ραδιοσυχνότητες (Radio Frequencies – RF) ως μέσο μετάδοσης των πληροφοριών. Ο ασύρματος αισθητήριος κόμβος με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, και ο οποίος περιγράφεται στο, χρησιμοποιεί ένα πομποδέκτη RF απλού καναλιού ο οποίος λειτουργεί στα 916 MHz. Η αρχιτεκτονική WINS (Wireless Integrated Network Sensors – ασύρματοι ολοκληρωμένοι αισθητήρες δικτύου) χρησιμοποιεί επίσης τις ραδιοσυχνότητες ως μέσο επικοινωνίας [14].

Οι ραδιοσυχνότητες παρουσιάζουν τα εξής βασικά πλεονεκτήματα:

1. Δεν απαιτούν οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη, ενώ η ζεύξη μπορεί να υλοποιηθεί με σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας και χρήση μικρών σε μέγεθος κεραιών (λίγα εκατοστά, όσον αφορά τη ζώνη συχνοτήτων κάτω από αυτήν των GHz).

2. Εκπέμπονται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, χωρίς να εμποδίζονται από φυσικά εμπόδια, καθιστώντας έτσι εύκολη την εγκατάσταση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.
3. Παρέχουν εύκολη και ταχεία επέκταση του δικτύου, χωρίς να επηρεάζονται από τις όποιες μεταβολές της τοπολογίας του.
4. Ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της ίδιας συχνότητας είναι πολύ σημαντικός εξ' αιτίας του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης των πακέτων και των μικρών αποστάσεων επικοινωνίας.[15]

Οι ραδιοσυχνότητες παρουσιάζουν τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

1. Είναι κατασκευαστικά ακριβότερες από τις υπέρυθρες και τις οπτικές ακτίνες Laser διότι απαιτούν κυκλώματα διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης (MODEM), φιλτραρίσματος και πολυπλεξίας προκειμένου να λειτουργήσουν.
2. Απαιτούν τη χρήση κεραιών.
3. Υπάρχουν μεγάλες απώλειες του μεταδιδόμενου σήματος για το λόγο ότι οι κόμβοι, μαζί φυσικά με τις κεραιές τους, βρίσκονται στο έδαφος .
4. Καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την εκπομπή αλλά και τη λήψη. Συνεπώς, είναι επιβεβλημένη η χρήση των κατάλληλων τεχνικών και πρωτοκόλλων που θα συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.
5. Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι το πλεονέκτημα της εύκολης και τυχαίας ανάπτυξης των δικτύων αισθητήρων δίνει το προβάδισμα στη χρήση ραδιοσυχνοτήτων έναντι των υπολοίπων μέσων ασύρματης επικοινωνίας.

• **Επικοινωνία με Υπέρυθρες**

Ένας άλλος δυνατός τρόπος ενδοκομβικής ασύρματης επικοινωνίας στα δίκτυα αισθητήρων είναι με τη χρήση υπέρυθρων (IrDA).

Οι υπέρυθρες παρουσιάζουν τα εξής βασικά πλεονεκτήματα:

1. Δεν απαιτείται ειδική άδεια για να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα αισθητήρων.
2. Είναι ιδιαίτερα εύρωστες σε παρεμβολές από ηλεκτρικές οικιακές συσκευές.
3. Οι πομποδέκτες που χρησιμοποιούν υπέρυθρες έχουν αρκετά χαμηλό κόστος και είναι πολύ πιο εύκολοι στην κατασκευή.

4. Δεν απαιτείται η χρήση κεραιών.
5. Η ενέργεια που καταναλώνουν είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτήν που καταναλώνουν οι ραδιοσυχνότητες.

Οι υπέρυθρες παρουσιάζουν το εξής βασικό μειονέκτημα :

Η επικοινωνία τους είναι συνήθως κατευθυντική οπότε απαιτείται οπτική επαφή (LOS – Line Of Sight). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μη παροχή δυνατότητας τυχαίας ανάπτυξης των αισθητήρων στην υπό παρακολούθηση περιοχή. Μία καλή λύση που προτείνεται, για να ξεπεραστούν τα όποια εμπόδια στην ομαλή μετάδοση των δεδομένων, είναι αυτή που περιγράφεται στη μελέτη του PushPin. Σε αυτή τη μελέτη προτείνεται η χρήση ενός κώνου διάχυσης, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από πολυκαρβονικό σωλήνα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί μία πολυκατευθυντική (omni-directional) ακτίνα στην επιφάνεια ενός επιπέδου. Παρά τις όποιες έρευνες θα απαιτηθεί μία νέα προσπάθεια ευθυγράμμισης των κόμβων. Η μελέτη του PushPin χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη υπέρυθρων τύπου 83F8851. Το βασικό του όμως μειονέκτημα είναι η πολύ μικρή του εμβέλεια η οποία περιορίζεται στο ένα μόλις μέτρο.[16]

- **Επικοινωνία με Bluetooth**

Το Bluetooth είναι ένας επιπλέον τρόπος ενδοκομβικής ασύρματης επικοινωνίας ο οποίος χρησιμοποιείται στα δίκτυα αισθητήρων. Αποτελεί ένα πρότυπο το οποίο προσφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εφόσον βέβαια πρόκειται για ασύρματες επικοινωνίες μικρής εμβέλειας. Όμως, οι επιδόσεις του Bluetooth κρίνονται υπερβολικές όταν χρησιμοποιείται από έναν απλό αισθητήριο κόμβο, διότι αυξάνει την πολυπλοκότητά του, προκειμένου να είναι σε θέση να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα με υψηλές ταχύτητες. Συνεπώς, δεν πρέπει να προτείνεται για χρήση στους αισθητήριους κόμβους. Μπορεί, όμως, να αποτελέσει καλή λύση για πύλες και σταθμούς βάσης που μεταδίδουν δεδομένα σε άλλα δίκτυα, αλλά και για αισθητήριους κόμβους οι οποίοι μεταδίδουν εικόνα .

Ο ασύρματος αισθητήριος κόμβος μAMPS χρησιμοποιεί έναν πομποδέκτη 2.4 GHz ο οποίος είναι συμβατός με Bluetooth και περιλαμβάνει ένα συνθέτη συχνοτήτων (frequency synthesizer) ο οποίος είναι τοποθετημένος σε chip [17].

- **Οπτική Επικοινωνία με Ακτίνες Laser**

Η οπτική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων με τη χρήση Laser είναι ένας ακόμη τρόπος μετάδοσης

δεδομένων στα δίκτυα αισθητήρων. Για παράδειγμα αναφέρουμε ενδεικτικά το Smart Dust Mote [9], το οποίο είναι ένα αυτόνομο σύστημα συλλογής, επεξεργασίας και επικοινωνίας δεδομένων, χρησιμοποιεί την οπτική επικοινωνία ως μέσο μετάδοσης.

Η οπτική επικοινωνία με Laser παρουσιάζει τα εξής βασικά πλεονεκτήματα :

- a) Η επικοινωνία με οπτικά κύματα μπορεί να διεξάγεται με μικρότερους σε μέγεθος και περισσότερο ενεργειακά αποδοτικούς πομποδέκτες από ότι αυτοί οι οποίοι χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητες.
- b) Δεν απαιτείται η χρήση κεραιών.
- c) Προσφέρει υψηλό επίπεδο ασφαλείας αφενός, διότι η εκπομπή των δεδομένων δεν γίνεται πολυκατευθυντικά, και αφετέρου, διότι και αν ακόμη υπάρξει η οποιαδήποτε ανεπιθύμητη παρεμβολή σε κανάλι επικοινωνίας τότε διακόπτεται η μετάδοση.

Η οπτική επικοινωνία με Laser παρουσιάζει τα εξής βασικά μειονεκτήματα :

- a) Απαιτείται οπωσδήποτε οπτική γραμμή επαφής μεταξύ του πομπού και του δέκτη.
- b) Είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Μπορεί πολύ εύκολα να παρεμβληθεί το φως της ημέρας, ή ακόμη και το περιβάλλον φως, με αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία ή και τη διακοπή της επικοινωνίας.
- c) Η εγκατάσταση των αισθητήριων κόμβων πρέπει να γίνεται ύστερα από πολύ καλή μελέτη και σχεδίαση διότι η επικοινωνία είναι κατευθυντική. Το γεγονός, ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα τυχαίας εγκατάστασης των κόμβων, καθιστά αυτή τη λύση λιγότερο ελκυστική.

Είναι προφανές ότι ο τρόπος μετάδοσης που επιλέγεται για την αποστολή και λήψη δεδομένων επηρεάζει άμεσα τη σχεδίαση πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, αλλά και άλλες επιπλέον ιδιότητες που σχετίζονται με την εφαρμογή.[16]

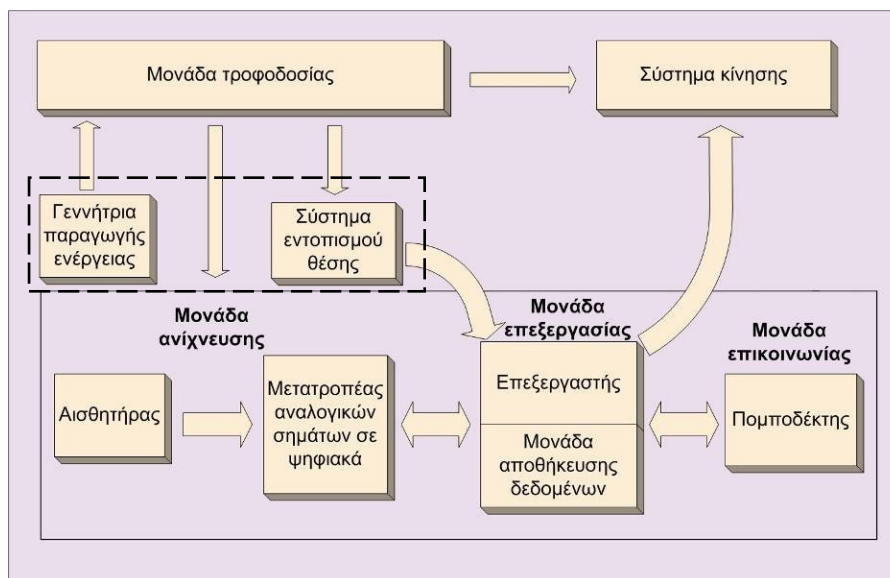
2.5 Αισθητήριοι Κόμβοι

Οι αισθητήριοι κόμβοι αποτελούν τον πυρήνα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Έχουν βασικά την ευθύνη της συλλογής, της επεξεργασίας και της μετάδοσης δεδομένων. Δεν έχουν τη δυνατότητα της άμεσης μετάδοσης των δεδομένων σε κάποιο άλλο μεγάλο δίκτυο, (όπως είναι λόγου χάρη το Διαδίκτυο ή κάποιο δίκτυο υπολογιστών), ή σε κάποιο κεντρικό υπολογιστή. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει μία άλλη συσκευή η οποία ονομάζεται πύλη (Gateway) και έχει ως βασικό της σκοπό τη μετάδοση των δεδομένων από το τοπικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων προς κάποιο

άλλο μεγαλύτερο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα: Οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Μπορούν να περισυλλέγουν πληροφορίες τέτοιες ώστε να παρέχουν μία πλούσια, πολυδιάστατη εικόνα του περιβάλλοντος, εφόσον αποτελούν μέρος του δικτύου. Μπορούν να εστιάζουν την προσοχή τους σε κρίσιμα συμβάντα που υποδεικνύονται από άλλους αισθητήρες του δικτύου (όπως, π.χ. την είσοδο εισβολέα σε κτήριο).
- Έχουν τη δυνατότητα να συνεχίζουν να λειτουργούν με ακρίβεια ακόμη και σε περίπτωση απώλειας κάποιων μεμονωμένων αισθητήρων του δικτύου. Για παράδειγμα, εάν κάποιος από τους αισθητήρες του δικτύου απωλέσουν μία σημαντική πληροφορία, τότε, άλλοι αισθητήρες μπορούν να έλθουν σε βοήθεια προκειμένου να παραδώσουν τα δεδομένα που έχουν ήδη χαθεί.
- Έχουν πολύ περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα και η αντικατάσταση της μπαταρίας τους είναι τουλάχιστον αδύνατη, εφόσον βρίσκονται σε μη προσπελάσιμους ή επικίνδυνους περιβαλλοντικά χώρους. Ως εκ τούτου, η καλή σχεδίαση αλγορίθμων, που θα λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τους το θέμα των περιορισμένων ενεργειακών δυνατοτήτων των αισθητήρων, καθίσταται ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη διατήρηση αλλά και την παράταση της διάρκειας ζωής των αισθητήρων.



Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική κόμβου αισθητήρα

- Είναι γενικά εφοδιασμένοι με μικροκυκλώματα επεξεργασίας και επικοινωνίας των πληροφοριών που λαμβάνουν από το φυσικό τους περιβάλλον. Η μονάδα ανίχνευσης μετρά τις διάφορες παραμέτρους από το περιβάλλον του αισθητήρα και τις μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα. Η επεξεργασία αυτών των σημάτων αποκαλύπτει κάποιες ιδιότητες, είτε των εκεί ευρισκόμενων αντικειμένων, είτε των διαφόρων συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή εμβέλειας του αισθητήρα. Ο αισθητήρας αποστέλλει τις πληροφορίες που έχει ανιχνεύσει, συνήθως με τη βοήθεια ενός πομποδέκτη (αναμεταδότη), προς ένα κέντρο ελέγχου, είτε απευθείας, είτε μέσω ενός ενδιάμεσου κέντρου περισυλλογής δεδομένων (σταθμό βάσης ή πύλη). Ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να συγχωνεύει τα δεδομένα που έχουν ανιχνευθεί προκειμένου να φιλτράρει τα λανθασμένα δεδομένα και άλλες ανωμαλίες και να εξάγει συμπεράσματα από τα δεδομένα που έχουν αναφερθεί για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο είναι προσανατολισμένο στην κατόπτευση, τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από ένα αισθητήρα υποδεικνύουν την ανίχνευση κάποιου στόχου, ενώ η συγχώνευση όλων των αναφορών που προέρχονται από πολλούς άλλους αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ακριβή εντοπισμό και προσδιορισμό του στόχου που έχει ανιχνευθεί.

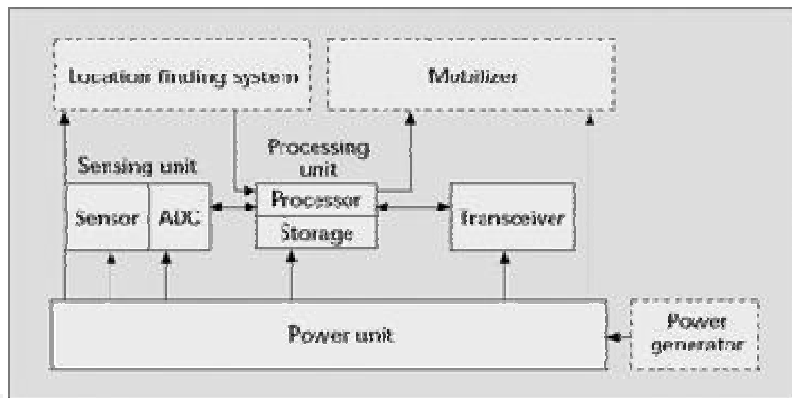
Οι εργασίες, που αφορούν την επεξεργασία των διαφόρων σημάτων καθώς και την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων, αποτελούν τους μεγαλύτερους καταναλωτές της ενέργειας των αισθητήρων.

2.5.1 Δομή κόμβου αισθητήρα

Όταν επιλέγονται τα εξαρτήματα ενός κόμβου αισθητήρων, αναπόφευκτα οι απαιτήσεις της προς υλοποίηση εφαρμογής παίζουν σημαντικό ρόλο σε ό,τι αφορά το μέγεθος, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας του κόμβου. Σημαντική είναι η επεξεργαστική ικανότητα και η ικανότητα επικοινωνίας του κόμβου, αλλά θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ των χαρακτηριστικών αυτών και του κόστους τους. Ένας τυπικός κόμβος αισθητήρων αποτελείται από τέσσερα κυρίως εξαρτήματα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 9:

- Μονάδα ανίχνευσης (Sensing unit)
- Μονάδα επεξεργασίας (Processing unit)

- Μονάδα επικοινωνίας (Transceiver unit)
- Μονάδα παροχής ενέργειας (Power unit)



Εικόνα 9 : Δομή κόμβου αισθητήρων

Η μονάδα ανίχνευσης αποτελείται από ένα ή περισσότερους αισθητήρες και/ή ενεργοποιητές και έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC), ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα εξόδου του αισθητήρα σε ψηφιακό, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του από την μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα ανίχνευσης αποτελεί δηλαδή τη φυσική διεπαφή του κόμβου με το περιβάλλον. Η μονάδα επεξεργασίας, η οποία αποτελείται από έναν ελεγκτή και μια μικρής χωρητικότητας μνήμη, λαμβάνει το ψηφιακό σήμα από τον ADC και εκτελεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες ώστε ο κόμβος αισθητήρων σε συνεργασία με άλλους κόμβους αισθητήρων να υλοποιήσει την επιθυμητή εργασία. Η μονάδα επικοινωνίας είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων μέσω της ανταλλαγής δεδομένων. Η μονάδα παροχής ενέργειας είναι πολύ σημαντική, καθώς τροφοδοτεί με ρεύμα όλα τα εξαρτήματα του κόμβου αισθητήρων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις παραπάνω τέσσερις βασικές μονάδες, ένας κόμβος

αισθητήρων μπορεί να έχει επιπλέον εξαρτήματα ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, μπορεί να περιέχει κάποιο σύστημα εντοπισμού θέσης (location finding system) αν απαιτείται η γνώση της ακριβούς θέσης του ή κινητοποιητή (mobilizer) σε περίπτωση που χρειάζεται να κινείται.

Όλα τα εξαρτήματα πρέπει να λειτουργούν με γνώμονα την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την εκπλήρωση των απαιτήσεων της εφαρμογής. Για παράδειγμα, οι μονάδες επικοινωνίας και επεξεργασίας πρέπει να είναι απενεργοποιημένες όταν δεν χρησιμοποιούνται. Προκειμένου να ενεργοποιηθούν, μπορεί να υπάρχει ένας μετρητής που ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα τις ενεργοποιεί ή μπορούν να ενεργοποιούνται όταν ανιχνευτεί κάποιο συγκεκριμένο γεγονός, όπως η λήψη ενός πακέτου.



Εικόνα 10 : Κόμβος αισθητήρων για εντοπισμό χημικών

- **Μονάδα επεξεργασίας (Processing unit)**

Η μονάδα επεξεργασίας αποτελεί τον πυρήνα του κόμβου αισθητήρων. Συλλέγει τα δεδομένα από τους αισθητήρες του κόμβου, τα επεξεργάζεται, αποφασίζει πότε και πού να τα στείλει, λαμβάνει δεδομένα από άλλους κόμβους και αποφασίζει σχετικά με την συμπεριφορά του ενεργοποιητή. Όπως είναι εμφανές, αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του κόμβου.

Ελεγκτής

Όλες αυτές οι εργασίες μπορούν να εκτελεστούν από διάφορες αρχιτεκτονικές ελεγκτών με διαφορετικούς συμβιβασμούς (trade-offs) ανάμεσα σε ευελιξία, λειτουργία, ενεργειακή απόδοση και κόστος.

Μια λύση είναι η χρήση επεξεργαστών γενικού σκοπού, όπως αυτοί που υπάρχουν στους προσωπικούς υπολογιστές. Οι επεξεργαστές αυτοί είναι πολύ ισχυροί και έχουν υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Υπάρχουν όμως και πιο απλοί επεξεργαστές ειδικά εξοπλισμένοι για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα, γνωστοί ως μικροελεγκτές. Τα χαρακτηριστικά που κάνουν τους μικροελεγκτές κατάλληλους για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα είναι η εύκολη δικτύωσή τους με άλλες συσκευές, το σύνολο εντολών τους που ανταποκρίνεται σε χρονοευαίσθητη επεξεργασία σήματος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η ικανότητα προγραμματισμού τους που τους καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτους και η ενσωματωμένη μνήμη που συνήθως διαθέτουν. Συγκεκριμένα για τα WSNs, ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας με το να εισέρχονται σε κατάσταση ύπνου, κατά την οποία μόνο ορισμένα τμήματα του μικροελεγκτή είναι ενεργά.



Εικόνα 11: Ασύρματος κόμβος αισθητήρων

Μια ειδική περίπτωση προγραμματιζόμενου επεξεργαστή είναι ο Επεξεργαστής Ψηφιακού Σήματος (Digital Signal Processor, DSP), ο οποίος είναι ειδικά εξοπλισμένος από άποψη αρχιτεκτονικής και συνόλου εντολών, για την επεξεργασία μεγάλου όγκου διανυσματικών δεδομένων. Σε ένα κόμβο αισθητήρων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας DSP για την επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από μια αναλογική, ασύρματη συσκευή με στόχο την δημιουργία μιας ψηφιακής ροής δεδομένων. Παρόλα αυτά, στα WSNs οι απαιτήσεις της ασύρματης επικοινωνίας και οι εργασίες επεξεργασίας σήματος των δεδομένων που συλλέγουν οι αισθητήρες είναι πολύ απλές. Γι' αυτό συνήθως δεν χρησιμοποιούνται οι DSP στους κόμβους αισθητήρων.

Μια ακόμη επιλογή είναι η χρήση Field-Programmable Gate Arrays (FPGA) ή Application-

Specific Integrated Circuits (ASIC). Ένα FPGA μπορεί να επαναπρογραμματιστεί στον τόπο λειτουργίας για να προσαρμοστεί σε ένα μεταβλητό σύνολο απαιτήσεων. Αυτό φυσικά θέλει χρόνο και ενέργεια, οπότε ο επαναπρογραμματισμός δεν είναι δυνατό να πραγματοποιείται τόσο συχνά όσο μπορούμε να αλλάξουμε το πρόγραμμα εκτέλεσης ενός μικροελεγκτή. Ο ASIC είναι ένας εξειδικευμένος επεξεργαστής, που σχεδιάζεται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως για δρομολογητές υψηλής ταχύτητας. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε απώλεια ευελιξίας με αντάλλαγμα μια αρκετά αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας και λειτουργία. Επίσης, οι ASIC απαιτούν ανάπτυξη υλικού, γεγονός που τους κάνει ακριβούς σε σχέση με τους μικροελεγκτές, οι οποίοι απαιτούν ανάπτυξη λογισμικού.

Για ένα WSN που η λειτουργία του δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ζωής του και που ο αριθμός των κόμβων είναι αρκετά μεγάλος για να δικαιολογεί την επένδυση, η χρήση ενός ASIC είναι η ενδεδειγμένη λύση. Στην παρούσα φάση ανάπτυξης των WSNs, η μεγαλύτερη ευελιξία και η απλότητα στην χρήση των μικροελεγκτών, τους καθιστά την προτιμώμενη λύση.

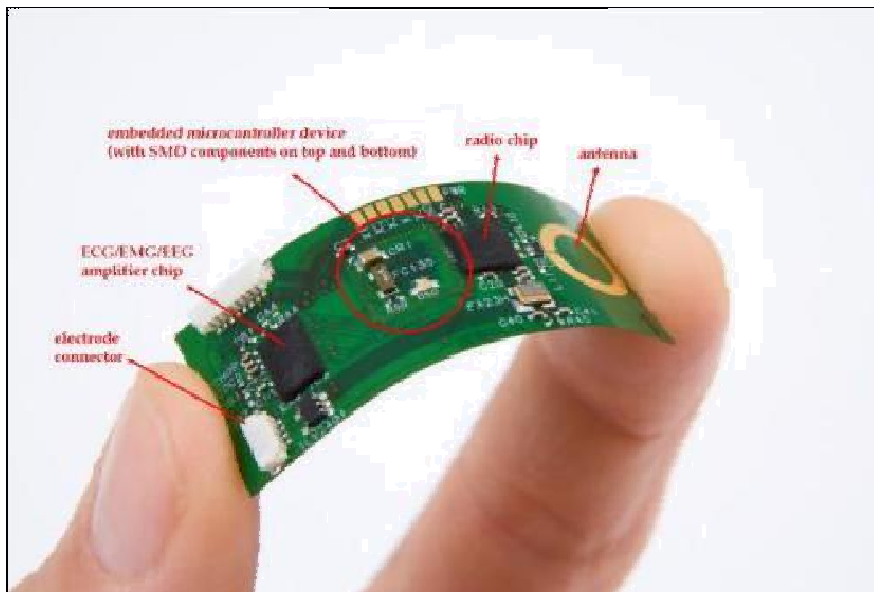
Μνήμη

Προφανώς υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης RAM (Random Access Memory) για την αποθήκευση των ενδιάμεσων ενδείξεων των αισθητήρων και των πακέτων από άλλους κόμβους. Παρότι η RAM είναι γρήγορη, χάνει το περιεχόμενό της σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας. Τα προγράμματα μπορούν να είναι αποθηκευμένα σε ROM (Read-Only Memory) ή EEPROM (Electrically Erasable Programmable ReadOnly Memory) ή flash memory, η οποία διαφέρει από την EEPROM στο ότι επιτρέπει την εγγραφή/διαγραφή των δεδομένων σε ομάδες αντί για ένα byte τη φορά. Η flash memory μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενδιάμεσων δεδομένων σε περίπτωση που η RAM είναι ανεπαρκής ή όταν πρέπει να διακοπεί η τροφοδοσία της για κάποιο χρονικό διάστημα. Σε αντάλλαγμα, η flash memory έχει μεγάλες καθυστερήσεις στην εγγραφή/διαγραφή και υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Σημαντικό ρόλο στο κόστος και την κατανάλωση ενέργειας της μνήμης παίζει η σωστή επιλογή του μεγέθους, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή.

- **Μονάδα επικοινωνίας (Transceiver unit)**

Η μονάδα επικοινωνίας χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ μεμονωμένων κόμβων. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατή η ενσύρματη επικοινωνία, όπου οι συσκευές επικοινωνίας

είναι τυποποιημένα εμπορικά προϊόντα. Σε περίπτωση ασύρματης επικοινωνίας, η πρώτη επιλογή που πρέπει να γίνει είναι αυτή του μέσου επικοινωνίας. Τα πιο συνηθισμένα μέσα είναι οι ραδιοσυχνότητες (RF), η οπτική επικοινωνία και οι υπέρηχοι. Από αυτές τις επιλογές, οι επικοινωνίες που βασίζονται στις RF είναι αυτές που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των WSNs· προσφέρουν σχετικά μεγάλη κάλυψη και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αποδεκτό ρυθμό σφαλμάτων με λογική κατανάλωση ενέργειας και δεν απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της συχνότητας φέροντος όταν πρόκειται για RF επικοινωνίες. Συνήθως, τα WSNs χρησιμοποιούν συχνότητες από 433 MHz έως 2,4 GHz.



Εικόνα 12 : Εύκαμπτος ασύρματος κόμβος αισθητήρων

Χαρακτηριστικά πομποδέκτη

Για την περάτωση της επικοινωνίας, κάθε κόμβος διαθέτει πομπό και δέκτη. Η βασική λειτουργία τους είναι η μετατροπή μιας ροής bit από τον μικροελεγκτή σε ραδιοκύμα και το αντίστροφο. Για πρακτικούς λόγους, υπάρχει μια συσκευή που πραγματοποιεί και τις δύο λειτουργίες, η οποία λέγεται πομποδέκτης. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία χαμηλού κόστους πομποδεκτών στο εμπόριο που διαθέτουν όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για εκπομπή και λήψη (διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση, ενίσχυση, φιλτράρισμα, μίξη και άλλα). Για την επιλογή του κατάλληλου πομποδέκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορα χαρακτηριστικά. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

- i. Κατανάλωση ενέργειας και αποδοτικότητα: Η πιο απλή ερμηνεία της ενεργειακής απόδοσης του πομποδέκτη είναι η ενέργεια που χρειάζεται για την εκπομπή ενός bit. Επίσης, για να

είναι ένας πομποδέκτης κατάλληλος για χρήση σε κόμβο αισθητήρων θα πρέπει να διαθέτει διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, όπως κατάσταση ύπνου, κατάσταση λειτουργίας, κατάσταση αδράνειας και άλλα. Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διάρκεια μετάβασης από μια κατάσταση σε άλλη ή όταν ο πομποδέκτης δεν εκτελεί κάποια λειτουργία είναι πολύ σημαντικό στοιχείο.

- ii.** Συχνότητα φέροντος και πολλαπλά κανάλια: Οι πομποδέκτες είναι διαθέσιμοι σε πολλές διαφορετικές συχνότητες φέροντος. Επιπλέον, είναι χρήσιμο πολλές φορές ο ίδιος πομποδέκτης να προσφέρει αρκετές συχνότητες φέροντος (κανάλια) για επιλογή, βοηθώντας έτσι να καταπολεμηθούν προβλήματα συμφόρησης σε δίκτυα. Τέτοια κανάλια αξιοποιούνται με συγκεκριμένα πρωτόκολλα MAC (Medium Access Control), όπως FDMA ή πολυκαναλικό CSMA/ALOHA και άλλα.
- iii.** Αλλαγή καταστάσεων λειτουργίας και ενέργεια: Ένας πομποδέκτης μπορεί να εκπέμπει ή να λαμβάνει δεδομένα, να χρησιμοποιεί διαφορετικά κανάλια ή να βρίσκεται σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, ο χρόνος και η ενέργεια που χρειάζεται για μεταβούμε από την μια λειτουργία στην άλλη είναι σημαντικά ζητήματα. Ο χρόνος μετάβασης από την εκπομπή στην λήψη για παράδειγμα είναι σημαντικός για πολλά πρωτόκολλα MAC.
- iv.** Ρυθμός δεδομένων: Η συχνότητα φέροντος, καθώς και το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συνδυασμένα με την διαμόρφωση και την κωδικοποίηση καθορίζουν το συνολικό ρυθμό δεδομένων. Συνηθισμένες τιμές είναι μερικές δεκάδες kilobits το δευτερόλεπτο, που είναι αρκετά για τα WSNs. Μπορούμε να επιτύχουμε διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων αλλάζοντας την χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση ή αλλάζοντας την διάρκεια συμβόλου.
- v.** Διαμόρφωση και κωδικοποίηση: Οι πομποδέκτες υποστηρίζουν διάφορα είδη διαμόρφωσης, όπως ASK (Amplitude Shift Keying) και FSK (Frequency Shift Keying) και διαφορετικές κωδικοποιήσεις.
- vi.** Έλεγχος ισχύος εκπομπής: Πολλοί πομποδέκτες προσφέρουν την δυνατότητα ελέγχου της ισχύος εκπομπής που θα χρησιμοποιηθεί. Συνήθως υπάρχουν ορισμένες διακριτές τιμές ισχύος από τις οποίες μπορεί να γίνει η επιλογή.
- vii.** Συντελεστής θορύβου: Ο συντελεστής θορύβου (Noise Figure, NF) ενός στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος του σηματοθορυβικού λόγου στην είσοδο SNR_i προς αυτόν στην έξοδο SNR_o . Ο συντελεστής θορύβου περιγράφει την χειροτέρευση του SNR λόγω της λειτουργίας του στοιχείου και συνήθως υπολογίζεται σε dB από τον τύπο: $NF (dB) = SNR_i (dB) - SNR_o (dB)$

- viii.** Κέρδος: Το κέρδος του πομποδέκτη ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος εξόδου προς την ισχύ του σήματος εισόδου και συνήθως υπολογίζεται σε dB. Επιθυμητή είναι η χρήση ενισχυτών μεγάλου κέρδους για να επιτύχουμε καλή ενεργειακή απόδοση.
- ix.** Ευαισθησία δέκτη: Η ευαισθησία του δέκτη εκφράζεται σε dBm και αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ισχύ σήματος που χρειάζεται ο δέκτης για να επιτύχει τον απαιτούμενο λόγο / ή τον απαιτούμενο ρυθμό σφαλμάτων σε bit/πακέτο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του δέκτη, τόσο επεκτείνεται η περιοχή κάλυψης του κόμβου.
- x.** Ακτίνα κάλυψης: Η ακτίνα κάλυψης του πομπού θεωρείται χωρίς την ύπαρξη παρεμβολών και εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ εκπομπής, τα χαρακτηριστικά της κεραίας, την εξασθένιση λόγω του περιβάλλοντος, η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την συχνότητα φέροντος, το σχήμα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται και το ανεκτό BER (Bit Error Rate) στο δέκτη. Επίσης, η ακτίνα κάλυψης εξαρτάται και από την ποιότητα του δέκτη, κυρίως από την ευαισθησία του. Παρότι δεν είναι εύκολο να προσδιορίσουμε τυπικές τιμές για την ακτίνα κάλυψης, γνωρίζουμε ότι κυκλοφορούν προϊόντα με ακτίνα κάλυψης από μερικά μέτρα μέχρι αρκετές εκατοντάδες μέτρα.
- xi.** Ικανότητα φραγής παρεμβολέα: Η ικανότητα φραγής του δέκτη αναφέρεται στο BER που επιτυγχάνεται παρουσία παρεμβολέων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται σε ποια επίπεδα ισχύος θα πρέπει ένας παρεμβολέας (σε σταθερή γνωστή θέση) να εκπέμπει, σε γνωστή απόσταση από την συχνότητα φέροντος, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό BER στο δέκτη. Μια ξεχωριστή περίπτωση παρεμβολής είναι η παρεμβολή γειτονικού διαύλου. Πρέπει ο πομποδέκτης να μπορεί να φιλτράρει τα σήματα των γειτονικών διαύλων και να λαμβάνει μόνο αυτά που προορίζονται γι' αυτόν.
- xii.** Έλεγχος φέροντος και RSSI: Σε πολλά πρωτόκολλα MAC είναι βασικό να γνωρίζουμε αν ο δίαυλος είναι κατειλημμένος, δηλαδή αν κάποιος άλλος κόμβος αποστέλλει δεδομένα, οπότε θα πρέπει ο δέκτης να μπορεί να παρέχει αυτές τις πληροφορίες. Επίσης, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ενός εισερχόμενου πακέτου μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το δίκτυο, όπως για παράδειγμα την απόσταση του πομπού από τον δέκτη δεδομένης ισχύος εκπομπής. Γι' αυτό ο δέκτης πρέπει να ενημερώνει το RSSI (Received Signal Strength Indicator).

Δομή πομποδέκτη

Συνήθως ένας πομποδέκτης αποτελείται από:

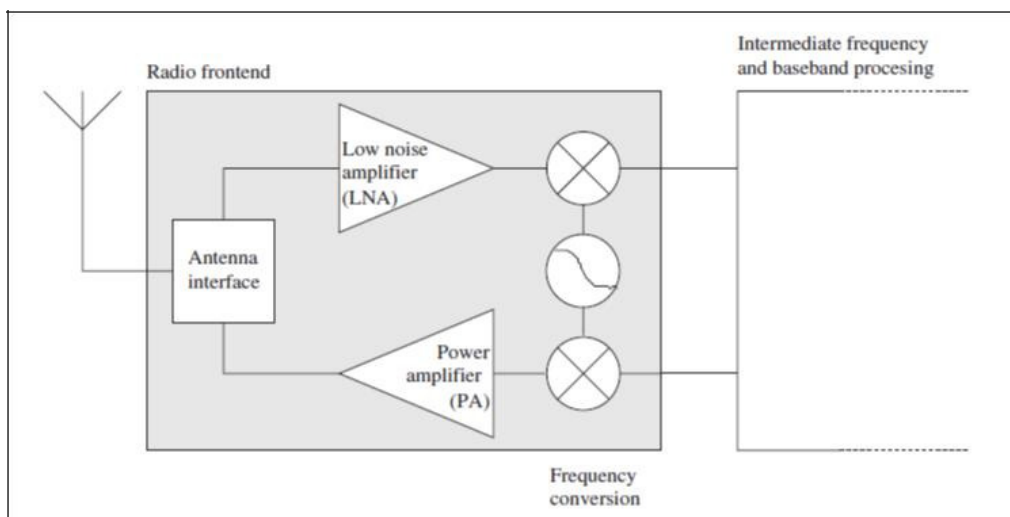
- 1) RF μπροστινό άκρο (RF front end): εκτελεί την αναλογική επεξεργασία σήματος στο εύρος ζώνης των RF.
- 2) Επεξεργαστής βασικής ζώνης (Baseband processor): εκτελεί όλη την ψηφιακή επεξεργασία σήματος και επικοινωνεί με τον επεξεργαστή του κόμβου.

Μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων γίνεται μετατροπή συχνότητας, είτε απευθείας, είτε μέσω κάποιας ενδιάμεσης βαθμίδας (IFs). Η αρχιτεκτονική του RF μπροστινού άκρου παρουσιάζεται στην εικόνα 13 και περιλαμβάνει:

1. Ενισχυτή ισχύος (Power Amplifier, PA), ο οποίος δέχεται σήματα που έχουν υποστεί άνω μετατροπή συχνότητας από τις ενδιάμεσες συχνότητες (IFs) και το τμήμα βασικής ζώνης και τα ενισχύει για την εκπομπή από την κεραία.

2. Ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier, LNA), ο οποίος ενισχύει τα εισερχόμενα σήματα σε επίπεδο κατάλληλο για την περαιτέρω επεξεργασία τους χωρίς να μειώνει σημαντικά το SNR [25]. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος κυμαίνεται από πολύ ασθενές σήμα που προέρχεται από κόμβο στα όρια της περιοχής κάλυψης μέχρι ισχυρό σήμα από γειτονικό κόμβο. Αν δεν ληφθούν μέτρα, ο LNA είναι συνεχώς ενεργοποιημένος και καταναλώνει μεγάλο τμήμα της ενέργειας του πομποδέκτη.

3. Στοιχεία όπως τοπικούς ταλαντωτές, μίκτες και άλλα που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή συχνότητας από τα RF σε ενδιάμεσες συχνότητες ή την βασική ζώνη.



Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική του RF μπροστινού άκρου

Καταστάσεις λειτουργίας πομποδέκτη

Σε πολλούς πομποδέκτες μπορούμε να διαχωρίσουμε 4 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας [27]:

- i.** Κατάσταση εκπομπής: Σε αυτή την κατάσταση είναι ενεργός ο πομπός και η κεραία ακτινοβολεί ενέργεια.
- ii.** Κατάσταση λήψης: Αντιστοίχως, σε αυτή την κατάσταση είναι ενεργός ο δέκτης.
- iii.** Κατάσταση αδράνειας: Ο πομποδέκτης είναι έτοιμος να λάβει δεδομένα, αλλά δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η λήψη. Σε αυτή την φάση, πολλά τμήματα του δέκτη είναι ενεργά, ενώ άλλα είναι απενεργοποιημένα. Για παράδειγμα, στο κύκλωμα συγχρονισμού τα στοιχεία που ασχολούνται με την απόκτηση των δεδομένων είναι ενεργά, ενώ τα στοιχεία που ασχολούνται με παρακολούθηση τροχιάς είναι απενεργοποιημένα μέχρι να χρειαστούν.
- iv.** Κατάσταση ύπνου: Τα περισσότερα από τα στοιχεία του πομποδέκτη είναι απενεργοποιημένα. Υπάρχουν αρκετές διαβαθμίσεις για αυτή την κατάσταση που εξαρτώνται από τον αριθμό των κυκλωμάτων που είναι απενεργοποιημένα, τον απαιτούμενο χρόνο επαναφοράς και την ενέργεια επανεκκίνησής τους.

- **Μονάδα αντίληψης (Sensing unit)**

Αισθητήρες

Οι αισθητήρες μπορούν χοντρικά να κατηγοριοποιηθούν σε 3 κατηγορίες [27]:

1) Παθητικοί, ομοιοκατευθυντικοί αισθητήρες: Αυτοί οι αισθητήρες μετράνε ένα φυσικό μέγεθος χωρίς να αλληλεπιδρούν περαιτέρω με το περιβάλλον και υπό αυτή την έννοια είναι παθητικοί. Επιπλέον, κάποιοι από αυτούς τους αισθητήρες συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον για να εκτελέσουν την ενίσχυση του αναλογικού σήματος που παράγουν. Τέλος, οι μετρήσεις των αισθητήρων αυτών δεν έχουν καμία αναφορά σε κατεύθυνση. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων μετρήσεων είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η μηχανική αντοχή και άλλα.

2) Παθητικοί, κατευθυντικοί αισθητήρες: Επίσης παθητικοί, αυτοί οι αισθητήρες έχουν μια καλά ορισμένη αντίληψη της κατεύθυνσης στις μετρήσεις τους. Κλασικό παράδειγμα είναι οι κάμερες, οι οποίες λαμβάνουν μετρήσεις σε κάποια δοσμένη κατεύθυνση.

3) Ενεργητικοί αισθητήρες: Η τελευταία αυτή κατηγορία αλληλεπιδρά ενεργά με το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα οι σόναρ ή ραντάρ αισθητήρες ή ορισμένοι σεισμικοί αισθητήρες, οι οποίοι παράγουν κύματα κρούσης μέσω μικρών εκρήξεων.

Αισθητήρες όλων των παραπάνω τύπων είναι διαθέσιμοι σε πολλές διαφορετικές μορφές. Μερικά προφανή trade-offs είναι η ακρίβεια, η κατανάλωση ενέργειας, η αξιοπιστία, το κόστος, το μέγεθος και άλλα. Μια υπόθεση που γίνεται συχνά στην βιβλιογραφία σχετικά με τους κόμβους αισθητήρες είναι ότι διαθέτουν μια οριοθετημένη περιοχή κάλυψης, εντός της οποίας μπορούν αξιόπιστα και με ακρίβεια να μετρήσουν το παρατηρούμενο μέγεθος ([10], [11]).

Ενεργοποιητές

Οι ενεργοποιητές έχουν τόση ποικιλία, όση και οι αισθητήρες, αλλά για τις ανάγκες των WSNs οι λειτουργίες που επιτελούν είναι πιο απλές. Πρακτικά, ένας κόμβος μπορεί να ανοιγοκλείσει ένα διακόπτη ή έναν αναμεταδότη ή να ορίσει κάποιο κατώφλι. Ανεξάρτητα με το αν ελέγχεται μια λάμπα, μια μηχανή ή κάποιο άλλο φυσικό αντικείμενο, ο σχεδιασμός του πρωτοκόλλου επικοινωνίας δεν επηρεάζεται.

- **Μονάδα παροχής ενέργειας (Power unit)**

Σε ό,τι αφορά αυτή την μονάδα, δύο είναι τα βασικά ζητήματα: πρώτον η αποθήκευση της ενέργειας και η παροχή ισχύος στην κατάλληλη μορφή και δεύτερον η προσπάθεια αναπλήρωσης της καταναλωμένης ενέργειας με τεχνικές συλλογής από άλλες πηγές ενέργειας έξω από τον κόμβο.

Τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας

Ο συμβατικός τρόπος αποθήκευση της ενέργειας είναι με χρήση μπαταριών. Ο σχεδιασμός των μπαταριών αποτελεί ένα κλάδο από μόνος του και οι τεχνικές συλλογής ενέργειας για την επαναφόρτισή τους έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης. Υπάρχουν βέβαια και μη συμβατικά μέσα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία θα παρουσιαστούν περιληπτικά στην συνέχεια.

Μπαταρία

Η πηγή ισχύος του κόμβου μπορεί να είναι είτε μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία, είτε επαναφορτιζόμενη μπαταρία, αν υπάρχει δυνατότητα συλλογής ενέργειας. Και στις δύο περιπτώσεις, οι μπαταρίες είναι ηλεκτροχημικές αποθήκες ενέργειας, όπου η επιλογή του χημικού αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα της τεχνολογίας της μπαταρίας. Για τις μπαταρίες αυτές ισχύουν πολύ αυστηρές προϋποθέσεις. Τέτοιες είναι:

- a) Χωρητικότητα: Πρέπει να διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα, αλλά μικρό βάρος, όγκο και χαμηλή τιμή. Η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται ως ενέργεια ανά όγκο και μετριέται συνήθως σε J/ . Γίνονται έρευνες για κατασκευή μπαταριών μικρής κλίμακας, οι οποίες θα τοποθετούνται κατευθείαν πάνω σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- b) Χωρητικότητα υπό φορτίο: Οι μπαταρίες θα πρέπει να αντέχουν διάφορα είδη χρήσης, αφού ένας κόμβος καταναλώνει διαφορετικά επίπεδα ενέργειας κατά την διάρκεια λειτουργίας του και επιπλέον μπορεί να τραβήξει υψηλά ρεύματα σε συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας. Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, τόσο περισσότερη ισχύς μπορεί να αποδοθεί στιγμιαία.
- c) Αποφόρτιση μπαταρίας: Πρέπει η μπαταρία να έχει αργό ρυθμό αποφόρτισης, αφού συνήθως απαιτείται μεγάλος χρόνος ζωής. Με την χρήση κατάλληλων τεχνικών, οι μπαταρίες έχουν διάρκεια ζωής μόνο μερικούς μήνες, ανεξάρτητα από το αν αντλείται από αυτές ενέργεια ή όχι.
- d) Αποδοτική επαναφόρτιση: Η επαναφόρτιση της μπαταρίας πρέπει να είναι αποδοτική ακόμα και με χαμηλή και διακοπτόμενη ισχύ επαναφόρτισης. Συνεπώς, η μπαταρία δεν θα πρέπει να παρουσιάζει κάποιο φαινόμενο μνήμης.

Φαινόμενο χαλάρωσης: Το φαινόμενο χαλάρωσης είναι η φαινομενική αποφόρτιση μιας άδειας ή σχεδόν άδειας μπαταρίας όταν δεν τραβάμε ρεύμα από αυτήν και οφείλεται σε μηχανισμούς χημικής διάχυσης. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η αξιοποιήσιμη χωρητικότητά της αυξάνονται αν περιοριστεί αυτό το φαινόμενο.

Μη συμβατικές μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας

Εκτός από τις παραδοσιακές μπαταρίες, υπάρχουν και άλλες μορφές πηγών ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμων πληρούν τις προϋποθέσεις για ηλεκτροχημικές αποθήκες ενέργειας, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια από την οξείδωση υδρογόνου ή από καύσιμα υδρογονανθράκων. Οι κυψέλες καυσίμων έχουν εξαιρετική πυκνότητα ενέργειας, αλλά τα διαθέσιμα συστήματα ακόμα απαιτούν ένα μη αμελητέο ελάχιστο μέγεθος για τις αντλίες, τις βαλβίδες και τα λοιπά. Μια πιο παραδοσιακή προσέγγιση για την αξιοποίηση της ενέργειας που βρίσκεται στους υδρογονάνθρακες, είναι η χρήση μικροσκοπικών θερμικών μηχανών, όπως η τουρμπίνα. Βέβαια, η σμίκρυνση τέτοιων θερμικών μηχανών στα επιθυμητά μεγέθη προϋποθέτει έρευνα από την μεριά των MEMSs (Micro-Electro-Mechanical Systems).

Δυστυχώς, οι μπαταρίες ή οι άλλες μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας μόνες τους δεν επαρκούν ως πηγή ενέργειας για τον κόμβο. Ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα είναι η μείωση της τάσης της μπαταρίας όταν πέφτει η χωρητικότητά της. Κατ' επέκταση, λιγότερη ισχύς μεταφέρεται στα κυκλώματα του κόμβου, με άμεσο αντίκτυπο στις συχνότητες των ταλαντωτών και την ισχύ εκπομπής. Επομένως, ένας κόμβος με αδύναμη μπαταρία θα έχει μικρότερη ακτίνα κάλυψης συγκριτικά με έναν με γεμάτη μπαταρία. Έτσι, πιθανώς θα αχρηστευτούν όλες οι ρυθμίσεις που έχουν γίνει σχετικά με τις ακτίνες κάλυψης των κόμβων του δικτύου κατά τον σχεδιασμό του.

Αυτό το πρόβλημα λύνεται με την χρήση ενός DC σε DC μετατροπέα, ο οποίος θα ελέγχει την τάση που λαμβάνουν τα κυκλώματα του κόμβου. Για να μπορέσει ο μετατροπέας να εξασφαλίσει την απαιτούμενη τάση ακόμα και όταν η μπαταρία δεν μπορεί, πρέπει να τραβάει μεγάλα ρεύματα από μια ήδη αδύναμη μπαταρία, επιταχύνοντας έτσι την αχρήστευσή της. Επιπλέον, ο μετατροπέας καταναλώνει και αυτός ενέργεια για την λειτουργία του, γεγονός που μειώνει την συνολική αποδοτικότητα. Όμως, αυτό αντισταθμίζεται από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η προβλέψιμη λειτουργία καθ' όλη την διάρκεια ζωής του κόμβου.

2.6 Τεχνολογίες Ασύρματων Δικτύων

Σήμερα, οι επικρατέστερες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων είναι οι εξής τρεις:

- Ad hoc,
- Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και

- IEEE 802.11.

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μία εκτεταμένη αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επειδή τα εν λόγω δίκτυα παρουσιάζουν πολλά κοινά σημεία με τα ad hoc δίκτυα, θα ήταν αρκετά χρήσιμο να γίνει μία αναφορά στις ουσιαστικές διαφορές τους, αλλά και να διαπιστωθεί κατά πόσον αυτοί οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα δίκτυα αισθητήρων.

Η αναφορά θα επικεντρωθεί κατά κύριο λόγο στους μηχανισμούς ελέγχου ισχύος.

2.6.1 Ασύρματα Δίκτυα Ad Hoc

Στα προσχεδιασμένα δίκτυα, η τοπολογία του δικτύου είναι γνωστή εκ των προτέρων. Αντίθετα, στα δίκτυα ad hoc η τοπολογία του δικτύου θα πρέπει να δομηθεί σε πραγματικό χρόνο και επιπλέον να αναβαθμίζεται περιοδικά σε περίπτωση που κάποιος από τους κόμβους παρουσιάσει κάποια βλάβη ή καταστραφεί, ή όταν ένας καινούργιος έλθει να προστεθεί στο δίκτυο. Επιπλέον, σε αυτά τα δίκτυα δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη σταθμού βάσης. Το βασικότερο όλων είναι ότι τα δίκτυα ad hoc δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των περιορισμένων αποθεματικών ενέργειας, για τον απλούστατο λόγο ότι αυτά έχουν αδιάλειπτη τροφοδοσία [37].

Κάθε κόμβος οφείλει να γνωρίζει την ταυτότητα καθώς και τη θέση των γειτονικών του κόμβων για να φέρει εις πέρας επιτυχώς το έργο της επεξεργασίας των δεδομένων αλλά και της μεταξύ τους επικοινωνίας.

2.6.2 Πρωτόκολλο Ασύρματης Επικοινωνίας IEEE 802.11

Το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11 αποτελεί μία ξεχωριστή οικογένεια πρωτοκόλλων την οποία χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας WLAN (Wireless Local Area Networks) με σκοπό τη μεταξύ τους επικοινωνία [37,38]. Το πρόβλημα της χρησιμοποίησης αυτών των πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εστιάζεται κυρίως στο γεγονός ότι τα WLAN έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ανάγκες δικτύων τα οποία δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των περιορισμένων αποθεματικών ενέργειας, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα υπολογιστών όπου η τροφοδοσία τους με ισχύ είναι συνεχής, και δεν έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ανάγκες αυτόνομων συσκευών όπως είναι οι αισθητήριοι κόμβοι, των οποίων η διάρκεια ζωής εξαρτάται άρρηκτα από τα περιορισμένα τους αποθέματα ενέργειας.

Το IEEE 802.11 ορίζει δύο πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης:

- Το PCF (Point Coordination Function) το οποίο είναι *Κεντριοποιημένο* και
- Το DCF (Distributed Coordination Function) το οποίο είναι *Κατανεμημένο*. Εδώ χρησιμο- ποιείται το DCF.

Το DCF στο IEEE 802.11 βασίζεται στο CSMA/CA. Η ανίχνευση φέροντος μπορεί να είναι πραγματική ή εικονική (virtual).

Η εικονική ανίχνευση φέροντος γίνεται με βάση το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του κάθε πλαισίου, και αναγράφεται κάθε φορά στην επικεφαλίδα των RTS (Request-To-Send), CTS (Clear-To-Send) και DATA πλαισίων.

Ο χρόνος μετάδοσης στην επικεφαλίδα είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο ο κόμβος πηγή (ή πηγαίος κόμβος – source node) θα πρέπει να λάβει επιβεβαίωση (Acknowledgement – ACK) για τη λήψη των DATA από τον κόμβο προορισμού. Για παράδειγμα, το πεδίο που αναγράφει το χρόνο μετάδοσης στο πλαίσιο RTS, περιλαμβάνει το συνολικό χρόνο που θα απαιτηθεί για τη μετάδοση των CTS, DATA και ACK πλαισίων. Με παρόμοιο τρόπο, ο χρόνος μετάδοσης που αναγράφεται στην επικεφαλίδα του πλαισίου CTS, περιλαμβάνει το συνολικό χρόνο που θα απαιτηθεί για τη μετάδοση των πλαισίων DATA και ACK, ενώ στην επικεφαλίδα του πλαισίου DATA αναγράφεται ο χρόνος που θα απαιτηθεί για τη μετάδοση του πλαισίου ACK.

Στο IEEE 802.11, κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα ο οποίος ονομάζεται NAV (Network Allocation Vector – Άνυσμα Κατανομής Δικτύου) και στον οποίο αναγράφονται οι χρόνοι που απόμένουν για την ολοκλήρωση των τρεχουσών μεταδόσεων. Ο πίνακας NAV κάθε κόμβου ενημερώνεται συνεχώς με βάση τις επικεφαλίδες των RTS, CTS και DATA πακέτων που λαμβάνουν οι κόμβοι. Το κανάλι μετάδοσης είναι απασχολημένο όταν η πραγματική ή εικονική ανίχνευση φέροντος δείχνει ότι είναι πράγματι απασχολημένο. Οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσης και εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος άλλων κόμβων ενημερώνουν διαρκώς το δικό τους πίνακα NAV κάθε φορά που λαμβάνουν πλαίσια RTS-CTS-DATA-ACK. Έτσι λοιπόν, κάθε φορά που οι κόμβοι κοιτάζουν τον πίνακα NAV γνωρίζουν το χρόνο έναρξης και λήξης μιας μετάδοσης.

Το IFS (Interval Frame Space) είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των μεταδιδόμενων πλαισίων. Από τη στιγμή που θα αποσταλεί ένα πλαίσιο πρέπει να παρέρθει ένα συγκεκριμένο διάστημα νεκρού χρόνου πριν να δοθεί η άδεια σε οποιονδήποτε σταθμό να στείλει ένα άλλο καινούργιο πλαίσιο.

Το IEEE 802.11 ορίζει τα εξής τέσσερα διαστήματα μεταξύ πλαισίων (IFSs):

- SIFS (Short Interframe Space),

- PIFS (PCF Interframe Space),
- DIFS (DCF Interframe Space) και
- EIFS (Extended Interframe Space).

Το IFS καθορίζει επίπεδα προτεραιότητας για την πρόσβαση στο κανάλι μετάδοσης.

Το SIFS είναι το μικρότερο από τα IFSs και χρησιμοποιείται μετά τα πλαίσια RTS, CTS και DATA παρέχοντας σε αυτά μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Στο DCF, όταν το κανάλι είναι αδρανές, τότε ο κόμβος αναμένει για DIFS χρόνο πριν μεταδώσει οποιοδήποτε πακέτο. Όταν κάποιοι κόμβοι μεταδίδουν πλαίσια RTS ή CTS, τότε, όσοι κόμβοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων που τα μεταδίδουν θα ενημερώνουν συνεχώς το δικό τους πίνακα NAV σύμφωνα με τις τιμές που αναγράφονται σε αυτά. Όμως, οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν με ακρίβεια τα πλαίσια που λαμβάνουν με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να γνωρίζουν τι είδους πλαίσια μεταδίδονται (RTS, CTS, DATA ή ACK) και συνεπώς να μη γνωρίζουν για πόσο ακριβώς χρονικό διάστημα θα πρέπει να αναβάλλουν τις μεταδόσεις τους. Άρα, όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύει μία μετάδοση, αλλά δεν είναι ταυτόχρονα σε θέση να την αποκωδικοποιήσει, τότε, προκειμένου να μην παρεμβάλλει τον κόμβο πηγή, αποφασίζει να μη μεταδώσει για χρόνο ίσο με τη διάρκεια ενός EIFS πλαισίου. Ο κύριος σκοπός του πλαισίου EIFS είναι να παρέχει αρκετό χρόνο στον κόμβο πηγή για να μπορεί να λάβει το πλαίσιο ACK, πριν οποιοσδήποτε άλλος κόμβος επιχειρήσει να μεταδώσει, και κατά συνέπεια να καταστρέψει το πλαίσιο ACK. Το EIFS υπολογίζεται με βάση τα DIFS και το συνολικό χρόνο που απαιτείται μέχρι τη μετάδοση και του πλαισίου ACK, έχοντας πάντοτε ως βάση το ρυθμό μετάδοσης των πλαισίων στο δίκτυο.

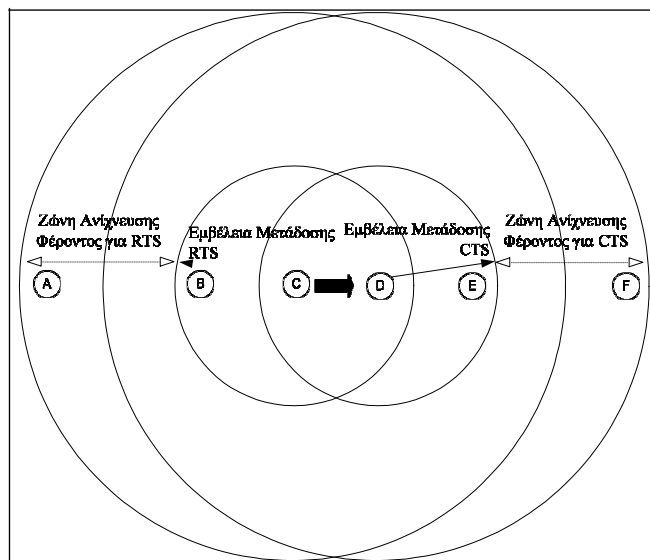
Στο IEEE 802.11, το EIFS χρησιμοποιείται όταν υπάρχει κάποια ένδειξη από το φυσικό επίπεδο ότι ξεκίνησε μία μετάδοση πλαισίου αλλά δεν ολοκληρώθηκε σωστά η λήψη του.

Έτσι λοιπόν, οποτεδήποτε ένας κόμβος ανιχνεύει μία μετάδοση, αλλά δεν την αποκωδικοποιεί σωστά, αναβάλλει οποιαδήποτε μετάδοσή του για χρόνο ο οποίος είναι ίσος με τη διάρκεια ενός πλαισίου EIFS.

Πρέπει να τονιστεί, ότι το IEEE 802.11 δεν είναι σε θέση να αποτρέψει πλήρως τις συγκρούσεις εξαιτίας των κρυμμένων τερματικών. Κόμβοι που βρίσκονται εντός της ζώνης ανίχνευσης φέρο- ντος, αλλά όμως όχι και του πομπού, μπορούν να προκαλέσουν συγκρούσεις κατά τη λήψη ενός πακέτου DATA από το δέκτη.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος C (Σχήμα 2.3) μεταδίδει ένα πακέτο στον κόμβο D. Όταν οι κόμβοι C και D μεταδίδουν ένα RTS και CTS πακέτο, αντίστοιχα, τότε οι κόμβοι

A και F θα αναβάλλουν οποιαδήποτε μετάδοση για χρόνο ίσο με ένα EIFS πλαίσιο. Κατά τη διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου DATA από τον κόμβο C, ο κόμβος A αναβάλλει οποιαδήποτε μετάδοση, διότι ανιχνεύει τη μετάδοση του πλαισίου DATA από τον κόμβο C. Παρόλα αυτά, ο κόμβος F δεν λαμβάνει κανένα σήμα κατά τη διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου DATA από τον κόμβο C, και έτσι θεωρεί ότι το κανάλι είναι αδρανές. Έτσι, εάν ο κόμβος F ξεκινήσει μία καινούργια μετάδοση τη στιγμή της μετάδοσης του πλαισίου DATA, τότε θα το καταστρέψει και ο κόμβος D δεν θα το λάβει ποτέ (καθώς ο κόμβος F βρίσκεται έξω από την εμβέλεια μετάδοσης του D, λόγω συμμετρίας, και ο D βρίσκεται έξω από την εμβέλεια μετάδοσης του F). Παρόλα αυτά, επειδή ο F βρίσκεται εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος του D, λόγω συμμετρίας, ο F θα παρεμβάλλει τον κόμβο D, όταν αυτός λαμβάνει το πλαίσιο DATA.



Εικόνα 14: Μετάδοση πακέτων με το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11

- **Τύποι Πρωτοκόλλων Ασύρματης Επικοινωνίας της Οικογένειας IEEE 802.11**

Η οικογένεια IEEE 802.11 [37,38] συμπεριλαμβάνει διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης οι οποίες χρησιμοποιούν το ίδιο βασικό πρωτόκολλο. Οι πλέον δημοφιλείς από αυτές είναι εκείνες που προσδιορίζονται από τα πρωτόκολλα IEEE 802.11a [39], IEEE 802.11b [40] και IEEE 802.11g [41], και αποτελούν βελτιωμένες τροποποιήσεις του αρχικού πρότυπου (original standard). Το IEEE

802.11a [39] ήταν το αρχικό πρότυπο της ασύρματης δικτύωσης (wireless networking standard), αλλά το *IEEE 802.11b* [40] ήταν το πρώτο που έγινε ευρέως αποδεκτό, ακολουθούμενο από τα *IEEE 802.11g* [41] και *IEEE 802.11n* [42]. Η ασφάλεια ήταν αρχικά επίτηδες αναποτελεσματική και οφειλόταν σε λόγους εξωτερικής πολιτικής μερικών κυβερνήσεων, αλλά αργότερα εμπλουτίστηκε με την προσθήκη του *IEEE 802.11i* [43] ύστερα από κυβερνητικές και νομοθετικές αλλαγές. Το *IEEE 802.11n* [42] αποτελεί μία καινούργια τεχνική πολυρευματικής διαμόρφωσης (multi-streaming modulation technique) η οποία βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξής της, όμως, παρόλα αυτά, τα προϊόντα που βασίζονται σε αυτές τις πρόχειρες ιδιοκτησιακές εκδόσεις (pre-draft proprietary versions) πωλούνται στην αγορά.

Άλλα πρότυπα (standards), που ανήκουν στην ίδια οικογένεια, όπως είναι τα *IEEE 802.11h* [44], *IEEE 802.11j* [45], αποτελούν βελτιωμένες επεκτάσεις, ή διορθώσεις των προηγούμενων προδιαγραφών [38].

Το πρότυπο *IEEE 802.11a* [39] αποτελεί επέκταση του *IEEE 802.11* [38], και εφαρμόζεται στα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας (wireless LANs) μεταδίδοντας 54 Mbps στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz. Το *IEEE 802.11a* [39] προτιμά να χρησιμοποιεί ένα σχήμα κωδικοποίησης OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) παρά τα FHSS or DSSS.

Το πρότυπο *IEEE 802.11b* [40] (το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως *IEEE 802.11 High Rate* ή Wi-Fi) αποτελεί και αυτό επέκταση του *IEEE 802.11* [38], και εφαρμόζεται στα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας μεταδίδοντας 11 Mbps στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz. Το *IEEE 802.11b* χρησιμοποιεί μόνο DSSS. Το *IEEE 802.11b* [40] ήλθε το 1999 να επικυρώσει το πρότυπο *IEEE 802.11*, επιτρέποντας ασύρματη λειτουργικότητα συγκρινόμενο με το Ethernet.

Το πρότυπο *IEEE 802.11g* [41] εφαρμόζεται επίσης στα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας μεταδίδοντας 20+ Mbps στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz.

Τα πρότυπα *IEEE 802.11b* [40] και *IEEE 802.11g* [41] χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων ISM στα 2.4 GHz, και λειτουργούν στις ΗΠΑ σύμφωνα με το άρθρο 15 του νόμου που αναφέρεται στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (US FCC - Federal Communications Commission - Rules and Regulations). Λόγω αυτής της επιλογής ζώνης συχνοτήτων, ο εξοπλισμός των προτύπων *IEEE 802.11b* [40] και *IEEE 802.11g* [41] μπορεί να υποφέρει περιπτώσιακά από παρεμβολές (interference) από φούρνους μικροκυμάτων (microwave ovens) και ασύρματα τηλέφωνα (cordless telephones). Οι συσκευές Bluetooth, παρόλο που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, θεωρητικά τουλάχιστον, δεν παρεμβάλλονται στη λειτουργία του *IEEE 802.11b/g* [40] διότι χρησιμοποιούν τη μέθοδο σηματοδότησης (signaling method) FHSS (frequency hopping spread spectrum) ενώ το *IEEE 802.11b/g* [40] χρησιμοποιεί τη μέθοδο σηματοδότησης DSSS (direct

sequence spread spectrum). Το *IEEE 802.11a* [39] χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων U- NII στα 5 GHz, η οποία προσφέρει 8 μη επικαλυπτόμενα κανάλια (non-overlapping channels) και όχι 3 που προσφέρει η ζώνη συχνοτήτων ISM στα 2.4GHz.

Το τμήμα του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιείται διαφέρει από χώρα σε χώρα. Στις ΗΠΑ, οι συσκευές που χρησιμοποιούν τις τεχνικές διαμόρφωσης *IEEE 802.11a* [39] και *IEEE 802.11g* [41] μπορούν να λειτουργούν χωρίς ειδική άδεια, όπως αυτό ερμηνεύεται στο άρθρο 15 του νόμου που αναφέρεται στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα κανάλια από το 1 μέχρι και το 6 (*IEEE 802.11b*) εμπίπτουν στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz των ραδιοερασιτεχνών (amateur radio band). Οι εξουσιοδοτημένοι ραδιοερασιτέχνες χειριστές (amateur radio operators) μπορούν να λειτουργούν τις συσκευές που χρησιμοποιούν το *IEEE 802.11b/g* [40] σύμφωνα με το άρθρο 97 του νόμου που αναφέρεται στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών, επιτρέποντας αυξημένη ισχύ στην έξοδο αλλά όχι εμπορικό περιεχόμενο ή κρυπτογράφηση.

Το πρότυπο *IEEE 802.11n* [42] είναι επίσης μία προταθείσα προσθήκη στο πρότυπο *IEEE 802.11*[38] για τη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος. Το πρότυπο *IEEE 802.11n* αναμένεται να είναι πολύ πιο γρήγορο από τα άλλα πρότυπα, όπως π.χ. τα *IEEE 802.11b* και *IEEE 802.11g* [41], και υπάρχουν πολλοί ειδικοί οι οποίοι διακηρύσσουν ότι αυτή η ασύρματη τεχνολογία θα δώσει τελικά τη δυνατότητα στους καταναλωτές να κινηθούν πέρα από το παραδοσιακό ενσύρματο 10/ 100 LAN.

Το πρότυπο *IEEE 802.11i* [43] αποτελεί προσθήκη του προτύπου *IEEE 802.11* [38], έκδοση 1999 (Reaff 2003). Αφορά στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων – ειδικές απαιτήσεις – τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα (Local and metropolistan area networks). Ειδικές απαιτήσεις - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) και προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (PHY) - Προσθήκη 6: Επεκτάσεις ασφαλείας (Security Enhancements) σε επίπεδο MAC.

Το πρότυπο *IEEE 802.11h* [44] αφορά στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων – ειδικές απαιτήσεις LAN/MAN – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) και προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (PHY): Φάσμα και προσθήκες διαχείρισης εκπεμπόμενης ισχύος (Spectrum and Transmit Power Management Extensions) στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz στην Ευρώπη.

Το πρότυπο *IEEE 802.11j* [45] αποτελεί προσθήκη του προτύπου *IEEE 802.11*, έκδοση 2004. Αφορά την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων – ειδικές απαιτήσεις – τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα (Local and metropolitan area networks) –

Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) και προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (PHY)
– Προσθήκη 7: Λειτουργία στην Ιαπωνία στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 4.9 GHz – 5 GHz.

Το πρότυπο *IEEE 802.11d* [46] αποτελεί μία προσθήκη στις προδιαγραφές του προτύπου *IEEE 802.11* υποστηρίζοντας "πρόσθετα ρυθμιστικά πεδία ορισμού" (additional regulatory domains). Αυτή η υποστήριξη συμπεριλαμβάνει την προσθήκη ενός στοιχείου για πληροφορίες χωρών στα beacons, αιτήσεις διερεύνησης (probe requests), και αποκρίσεις διερευνήσεων (probe responses). Το στοιχείο για πληροφορίες χωρών απλοποιεί τη δημιουργία του *IEEE 802.11* [σημεία ασύρματης πρόσβασης - Wireless access points] και των συσκευών πελατών (client devices) που συναντώνται σε κανονισμούς που επιβάλλονται σε διάφορα μέρη του κόσμου. Η προσθήκη έχει ενσωματωθεί στο δημοσιευμένο πρότυπο *IEEE 802.11-2007#802.11-2007 IEEE 802.11-2007*].

Το πρότυπο *IEEE 802.11e* [47] αποτελεί και αυτό βελτιωμένη έκδοση του προτύπου *IEEE 802.11* προσδιορίζοντας μία σειρά από βελτιώσεις στην ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service) των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων τοπικής εμβέλειας, μέσα από τροποποιήσεις του επιπέδου MAC. Αυτό το πρότυπο θεωρείται ότι είναι εξέχουσας σπουδαιότητας σε εφαρμογές οι οποίες είναι ευαίσθητες στη χρονική καθυστέρηση, όπως είναι, π.χ. το Voice over Wireless IP και το Streaming Multimedia. Η τροποποίηση αυτού του προτύπου ενσωματώθηκε στο δημοσιευμένο πρότυπο *IEEE 802.11* [38] το 2007.

2.6.3 Διαφορές Μεταξύ Ασύρματων Δικτύων Ad Hoc και Δικτύων Αισθητήρων

Οι βασικές διαφορές μεταξύ ασύρματων δικτύων ad hoc και δικτύων αισθητήρων είναι οι εξής:

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ότι σε ένα δίκτυο ad hoc.
- Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολύ πιο πυκνά τοποθετημένοι από ότι σε ένα δίκτυο ad hoc.
- Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολύ πιο επιρρεπείς σε βλάβες και πολύ πιο εύκολο να καταστραφούν εξ' αιτίας του γεγονότος ότι λειτουργούν εκτεθειμένοι σε αντίξοες συνθήκες και η αντικατάστασή τους είναι πολύ δύσκολη, αν όχι ανέφικτη.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά.
- Στα περισσότερα δίκτυα ad hoc, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι από *Σημείο σε Σημείο (point-to-point)*, ενώ αντίθετα, στα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιείται κυρίως η *Εκπομπή (broadcast)*.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν περιορισμένη αποθηκευτική ικανότητα (μνήμη),

επεξεργαστική ισχύ και διαθέσιμα ποσά ενέργειας.

- Ο κάθε αισθητήριος κόμβος δε διαθέτει τη δική του διεύθυνση (ID) ώστε να είναι αναγνω- ρίσιμος από το παγκόσμιο δίκτυο, και τούτο εξαιτίας της πολυπλοκότητας που εισάγει αυτό (π.χ. μεγάλο μέγεθος επικεφαλίδας), αλλά και λόγω του εξαιρετικά μεγάλου αριθμού αισθητήριων κόμβων στο δίκτυο.

2.7 Ιδιαιτερότητες στη Σχεδίαση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, η δομή και η λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων διαφέρει ουσιαστικά από αυτήν των παραδοσιακών δικτύων. Στη συνέχεια αυτής της ενότητας παρουσιάζονται, όσο γίνεται αναλυτικότερα, οι ιδιαιτερότητες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, όχι μόνο κατά τη σχεδίαση των αισθητήριων κόμβων, αλλά και κατά τον προγραμματισμό των πλέον κατάλληλων πρωτοκόλλων.

2.7.1 Μεγάλη Εξάρτηση των Κόμβων από την Κατανάλωση Ενέργειας

Η απαίτηση για πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί το σημαντικότερο περιορισμό. Προκειμένου όμως να είναι εφικτή αυτή η απαίτηση, είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη συνύπαρξη δύο εξίσου σημαντικών παραγόντων.

- Πρώτον, η χρήση υλικών με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, και
- Δεύτερον, η χρήση τεχνικών και πρωτοκόλλων που θα εξασφαλίζουν την αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας.

Ενέργεια καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των *τριών Βασικών Λειτουργιών του κάθε Αισθητήριου Κόμβου*, δηλαδή,

- κατά την ανίχνευση και μέτρηση πληροφοριών από το περιβάλλον,
- κατά την επεξεργασία των πληροφοριών που έχουν ληφθεί, και
- κατά την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και του σταθμού βάσης.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε επίπεδο υλικού (Hardware) επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καταναλώνουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια ανά κύκλο του ρολογιού, ενώ βρίσκειται παράλληλα σε εξέλιξη μεγάλη έρευνα η οποία σχετίζεται με τη χρήση των πλέον κατάλληλων τύπων μπαταριών που θα τροφοδοτούν τους αισθητήριους κόμβους. Επιπλέον, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για την εξεύρεση των καταλληλότερων μεθόδων που θα έχουν ως στόχο την παράταση ζωής των αισθητήριων κόμβων. Αυτές οι μέθοδοι εστιάζονται στην άντληση ενέργειας από το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα από τον ήλιο με χρήση ηλιακών συλλεκτών φωτός, ή ακόμη και από τις δονήσεις του εδάφους [15], [48].

- Κατανάλωση Ενέργειας κατά τη Διάρκεια της Επεξεργασίας Δεδομένων

Πρόσφατες έρευνες [8] έχουν δείξει ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στη φάση της επεξεργασίας δεδομένων είναι κατά πολύ μικρότερη από εκείνη που καταναλώνεται στη φάση της επικοινωνίας (εκπομπή/λήψη δεδομένων).

Οι προσπάθειες των ερευνητών εστιάζονται στην όσο το δυνατόν καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνουν από τη μονάδα ανίχνευσης ώστε να στέλνονται λιγότερα και μικρότερα πακέτα κατά τη διάρκεια της εκπομπής/λήψης. Για αυτόν ακριβώς το σκοπό είναι απαραίτητη η σχεδίαση των πλέον κατάλληλων, ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης που θα διασφαλίζουν την παραπάνω απαίτηση.

Η ενέργεια, την οποία καταναλώνει ένας επεξεργαστής, εξαρτάται από δύο πολύ σημαντικούς παράγοντες:

- την τάση και
- τη συχνότητα λειτουργίας του. Σε αυτήν εδώ την περίπτωση, το περίγραμμα μέσα στο οποίο κινούμαστε για την εξοικονόμηση ενέργειας, ονομάζεται *Δυναμικός Χρονοπρογραμματισμός Τάσης (Dynamic Voltage Scheduling – DVS)*. Αυτό το σχήμα εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ο μικροεπεξεργαστής του κόμβου εργάζεται όσο το δυνατόν λιγότερες φορές με το μέγιστο της απόδοσής του (αναλυτική περιγραφή αυτού του σχήματος αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4).

- Μεγάλη Κατανάλωση Ενέργειας κατά τη Διάρκεια της Επικοινωνίας

Μεγάλη έρευνα, όσον αφορά τις τεχνικές και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των διαθέσιμων ποσών ενέργειας, διεξάγεται κυρίως προς την κατεύθυνση περιορισμού της διάρκειας επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήριων κόμβων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα, με ακτίνες laser (οπτικά), με υπέρυθρες και με ραδιοσυχνότητες (RF). Παρά το γεγονός ότι οι δύο πρώτοι τρόποι ασύρματης επικοινωνίας απαιτούν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, προτιμάται τελικά η ιδιαίτερα δημοφιλής επικοινωνία με χρήση ραδιοσυχνοτήτων, ενώ, βεβαίως, δημιουργείται ταυτόχρονα η ανάγκη κατασκευής περισσότερο ενεργειακά αποδοτικών ράδιο-πομποδεκτών. Το πλαίσιο μέσα στο οποίο κινούμαστε, προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, ονομάζεται *Δυναμική Διαχείριση της Ισχύος (Dynamic Power Management – DPM)* (αναλυτική περιγραφή αυτού του σχήματος αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4).

Άλλοι σημαντικοί παράγοντες ελαχιστοποίησης της καταναλισκόμενης ενέργειας από τους αισθητήριους κόμβους, είναι η επιλογή:

- της κατάλληλης *Τεχνικής Διαμόρφωσης*,
- της κατάλληλης *Τεχνικής Αποδιαμόρφωσης*,
- της κατάλληλης *Τεχνικής Φιλτραρίσματος*, καθώς και
- της κατάλληλης *Ζώνης Συχνοτήτων*.

Τα είδη διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα είναι συνήθως η OOK (On-Off Keying), η ASK (Amplitude Shift Keying), και η FSK (Frequency Shift Keying).

- Η OOK αποτελεί μία παραλλαγή της ASK όπου δεν υπάρχει φέρον κατά τη διάρκεια μετάδοσης του λογικού μηδέν (0). Είναι μία αρκετά δημοφιλής μέθοδος διαμόρφωσης λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής, αφενός, και λόγω του πλεονεκτήματος που διαθέτει ώστε να επιτρέπει στον πομπό να παραμένει αδρανής (idle) κατά τη διάρκεια μετάδοσης του λογικού μηδέν, αφετέρου. Ως εκ τούτου, εξοικονομείται αρκετή ενέργεια. Όμως, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και ένα σημαντικό μειονέκτημα. Είναι πολύ ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου και αρκετά ευάλωτη σε σφάλματα συγχρονισμού κατά τη μετάδοση μεγάλου μήκους στοιχειοσειρών από μηδενικά, αφού ο δέκτης παραμένει αδρανής κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.
- Η FSK παρουσιάζει πολύ καλύτερη συμπεριφορά στην παρουσία ανεπιθύμητων σημάτων, αλλά είναι πολύ δυσκολότερη η κατασκευή της.
- Η ASK επηρεάζεται λιγότερο από το θόρυβο, σε σύγκριση με την OOK, ενώ η κατασκευή της είναι ευκολότερη και συνεπώς κοστίζει λιγότερο από την FSK.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, ότι οι τεχνικές OOK και ASK απαιτούν την παρουσία μιας διάταξης *Αυτομάτου Ελέγχου Κέρδους (AGC – Automatic Gain Control)* για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, η οποία, όμως, δεν είναι απαραίτητη στην FSK. Η επιλογή της κατάλληλης ζώνης συχνοτήτων για τις ασύρματες ζεύξεις είναι πολύ σημαντική διότι αφορά το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης κεραίας, αφενός, και την εξοικονόμηση της ενέργειας, αφετέρου. Για βέλτιστη εκπομπή και λήψη σήματος συνιστάται η χρήση κεραίας $\lambda/4$, όπου λ το μήκος κύματος του φέροντος. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί, ότι η χρησιμοποίηση υψηλότερων συχνοτήτων συνεπάγεται την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας. Έχοντας λοιπόν κανείς κατά νου όσα ήδη έχουν αναφερθεί, καταλήγει εύκολα στο συμπέρασμα ότι μία πολύ καλή επιλογή είναι η χρησιμοποίηση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής ζώνης συχνοτήτων (ISM band – Industrial, Scientific and Medicine band), και μάλιστα, πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση της συχνότητας των 433 MHz για την Ευρώπη και των 916 MHz για τη Βόρεια Αμερική. Το μεγάλο πλεονέκτημα της ζώνης συχνοτήτων ISM είναι η δωρεάν χρήση της, το τεράστιο φάσμα και η

παγκόσμια διαθεσιμότητα.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η χρήση μιας εξαιρετικά ευρείας ζώνης συχνοτήτων (Ultra Wide Band 3.1 GHz -10.6 GHz), η οποία προτείνεται ως μία πολύ καλή επιλογή επειδή βοηθά στην αντιμετώπιση των απωλειών και στην εξοικονόμηση ενέργειας.

- Τεχνική Multihop

Η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήριων κόμβων, ή μεταξύ ενός αισθητήριου κόμβου και του σταθμού βάσης, πραγματοποιείται μέσω διαδρομών πολλαπλών βημάτων (multihop communication) λόγω της μεγάλης χωρικής πυκνότητας με την οποία εμφανίζονται αυτοί οι κόμβοι στο ασύρματο δίκτυο [15], [49]. Επειδή η ισχύς του σήματος RF είναι ανάλογη του r^{-4} , όπου r η απόσταση επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, είναι πάρα πολύ πιθανό να συμφέρει περισσότερο, από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, η μετάδοση πολλών μηνυμάτων σε μικρές αποστάσεις, παρά η μετάδοση ενός μηνύματος σε μεγάλη απόσταση.

Άρα, η μέθοδος multihop, εκτός των άλλων, έχει το πλεονέκτημα να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας.

2.7.2 Χωρική Πυκνότητα των Αισθητήριων

Ο αριθμός των κόμβων, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήριων, μπορεί να είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων ή και χιλιάδων ακόμη, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αριθμός των κόμβων είναι πιθανόν να προσεγγίσει την οριακή τιμή των εκατομμυρίων.

Επίσης, είναι εξίσου πιθανόν, αυτός ο τεράστιος αριθμός των αισθητήριων κόμβων να αναπτύσσεται σε περιοχές περιορισμένης έκτασης. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη χωρική πυκνότητα των αισθητήριων κόμβων. Η χωρική πυκνότητα εξαρτάται άμεσα από το είδος της εκάστοτε εφαρμογής. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές επιτήρησης οικιών, ο αριθμός των κόμβων κυμαίνεται μεταξύ 25 και 100 ανά περιοχή [50], ενώ σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως είναι π.χ. η παρακολούθηση της λειτουργίας μηχανημάτων, ο αριθμός των κόμβων μπορεί να είναι, ενδεικτικά, περίπου 500 ανά 5 m² [7].

Από όλα αυτά συμπεραίνεται ότι τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν αυτού του είδους τις απαιτήσεις, θα πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζονται τη μεγάλη πυκνότητα και τον πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων.

2.7.3 Ανοχή σε Σφάλματα

Η μη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών (DoS – Denial of Service) από κάποιους κόμβους του δικτύου είναι ένα πάρα πολύ συχνό φαινόμενο, ανάλογα βέβαια και με το είδος της εφαρμογής. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές που έχουν ως φυσικό τους χώρο την ύπαιθρο, ή σε στρατιωτικές εφαρμογές που σχετίζονται με την επιτήρηση του πεδίου μάχης, είναι πολύ πιθανόν εξωτερικοί παράγοντες να θέσουν εκτός λειτουργίας έναν ή περισσότερους κόμβους. Αντίθετα, κόμβοι οι οποίοι ανιχνεύουν τα επίπεδα υγρασίας ή θερμοκρασίας σε ένα σπίτι δεν είναι ευάλωτοι σε εξωγενείς παράγοντες.

Όπως έχει ήδη πολλές φορές αναφερθεί, η διάρκεια ζωής ενός αισθητήρα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διάρκεια ζωής της πηγής που τον τροφοδοτεί με ενέργεια, επειδή οι αισθητήρες έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν αυτόνομα, χωρίς καμία επίβλεψη, και μάλιστα σε χώρους όπου δεν υπάρχει πρόβλεψη για αντικατάσταση της μπαταρίας τους. Συνεπώς, το ζητούμενο είναι να μην επηρεάζεται η λειτουργία του ασύρματου δικτύου αισθητήρων από την αδυναμία ανταπόκρισης κάποιων κόμβων, είτε εξαιτίας φυσικής τους καταστροφής, είτε εξαιτίας εξάντλησης των διαθέσιμων ενεργειακών τους αποθεμάτων. Αυτό το θέμα αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως αξιοπιστία ή ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance) [11].

Συνοψίζοντας, ο ορισμός που προκύπτει από τα όσα ήδη έχουν αναφερθεί, είναι ο εξής: *“Ανοχή σε σφάλματα είναι η ικανότητα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων να διατηρεί αδιάλειπτα τη λειτουργικότητά του άσχετα με τις όποιες αποτυχίες των κόμβων του”*. Ως εκ τούτου, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, είναι τελείως απαραίτητη η σχεδίαση πρωτοκόλλων τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη την ανοχή σε σφάλματα.

2.7.4 Μη Σταθερή Τοπολογία

Η φύση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθιστά τη διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου μία πραγματική πρόκληση. Η ανάπτυξη αυτού του είδους δικτύων σε μη προσβάσιμες περιοχές, και για ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών, γίνεται με έναν εντελώς τυχαίο τρόπο, όπως για παράδειγμα με τη ρίψη αισθητήριων κόμβων,

- Σε απροσπέλαστο δάσος από αεροπλάνο, ή καταπέλτη, ή
- Στο βυθό της θάλασσας από το κατάστρωμα κάποιου πλοίου.

Όμως, η τοπολογία του δικτύου ενδέχεται να αλλάξει από τη μη ανταπόκριση κάποιων κόμβων, τόσο από έλλειψη ενέργειας, όσο και από φυσική τους καταστροφή. Επιπλέον, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάξει δυναμικά, επειδή κάποιοι από τους κόμβους είναι εφοδιασμένοι με ένα

σύστημα κίνησης για την παρακολούθηση κάποιου συνεχώς μεταβαλλόμενου φαινόμενου.

Τέλος, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης επιπλέον κόμβων στο δίκτυο, με σκοπό, είτε την περαιτέρω επέκταση του δικτύου, είτε την αντικατάσταση ορισμένων κόμβων οι οποίοι έχουν παρουσιάσει κάποια δυσλειτουργία ή έχουν καταστραφεί. Φυσικά, η προσθήκη των νέων κόμβων θα γίνεται με τυχαίο τρόπο, οπότε η τοπολογία του δικτύου να μπορεί να αλλάξει και πάλι.

Από όσα μέχρι στιγμής έχουν αναφερθεί καθίσταται πλέον σαφές ότι κατά την εγκατάσταση και λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα και τεχνικές που να διασφαλίζουν τα εξής:

- Αυτονομία και λειτουργία του δικτύου χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.
- Μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Μη απαίτηση ανάγκης για προκαταρκτική σχεδίαση ή οργάνωση.
- Αύξηση της ευελιξίας για την τοποθέτηση των αισθητήριων κόμβων.
- Δυνατότητα για περαιτέρω επέκταση του δικτύου.
- Βελτιστοποίηση της αυτό-οργάνωσης και της ανοχής σε σφάλματα.

2.8 Πιθανές Αιτίες Δυσλειτουργίας ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύσσονται και βελτιώνονται σήμερα με πολύ γοργούς ρυθμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αισθητήριοι κόμβοι εξαναγκάζονται να δρουν σε ένα φοβερά ανταγωνιστικό περιβάλλον χωρίς να τους επιτρέπεται η έστω και μικρή πιθανότητα αποτυχίας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όπου οι αισθητήριοι κόμβοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν σωστά και τούτο οφείλεται σε πολλούς και ποικίλους λόγους, όπως:

- Οι αισθητήριοι κόμβοι λειτουργούν με μπαταρίες ή ακόμη και με ενέργεια την οποία λαμβάνουν από το περιβάλλον, όπως είναι π.χ. η ηλιακή. Τα αποθέματα ενέργειας που διαθέτουν είναι πιθανόν, είτε να μειωθούν, είτε να εξαντληθούν, είτε να μην είναι προσωρινά διαθέσιμα.
- Η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήριων κόμβων πραγματοποιείται με τη βοήθεια των μονάδων επικοινωνίας που διαθέτουν, και η οποία εξαρτάται άμεσα από τις κάθε είδους διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα, ο θόρυβος, η παραμόρφωση και οι παρεμβολές από άλλες συσκευές.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι, λόγω του μικρού τους μεγέθους και βάρους, είναι πολύ πιθανόν να μετακινηθούν από τις αρχικές τους θέσεις και να τεθούν εκτός της εμβέλειας επικοινωνίας. Ένας πιθανός λόγος μετακίνησής τους είναι, για παράδειγμα, ένας δυνατός άνεμος.

2.9 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι πρώτες έρευνες σε θέματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων πραγματοποιήθηκαν από επιστήμονες του στρατού. Από αυτές τις έρευνες προέκυψε ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών ευρείας γκάμας οι οποίες ξεκινούν από μεγάλης κλίμακας δίκτυα, π.χ. ακουστικής επιτήρησης των ωκεανών, μέχρι μικρής κλίμακας δίκτυα, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα τα οποία αποτελούνται από μη επιτηρούμενους αισθητήριους κόμβους εδάφους για την ανίχνευση διαφόρων φαινομένων. Η ραγδαία μείωση του κόστους αλλά και του μεγέθους των αισθητήριων κόμβων συνέβαλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη πολλών ακόμη δυναμικών εφαρμογών που έχουν σχέση, για παράδειγμα, με την ιατρική, τη βιομηχανία, την ασφάλεια των κτηρίων, κτλ.

Ένας αισθητήριοις κόμβος, όπως είναι για παράδειγμα ο MICA2, μπορεί να περιλαμβάνει μία σχετικά μεγάλη γκάμα αισθητήρων, όπως: αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης και φωτός, αισθητήρες επιταχυνσιομετρικούς, βαρομετρικούς, μικρόφωνα, μαγνητόμετρα, και πολλά άλλα ακόμη είδη αισθητήρων με κατάλληλες αναλογικές εισόδους.

Στο εμπόριο κυκλοφορούν ακόμη και μερικοί εξειδικευμένοι κόμβοι οι οποίοι περιλαμβάνουν τα εξής είδη αισθητήρων: σεισμικοί, οπτικοί, με ραντάρ, με υπέρηχους και με υπέρυθρες [51].

Όλοι οι αισθητήρες που έχουν ήδη αναφερθεί είναι σε θέση να παρακολουθούν τις εκάστοτε σημειούμενες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών παρέχοντας στον ενδιαφερόμενο χρήστη πληροφορίες σχετικά με τις διακυμάνσεις, π.χ. της πίεσης, της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του φωτός, του θορύβου, της διάρθρωσης του εδάφους, της παρουσίας ή μη συγκεκριμένων τύπων αντικειμένων μέσα στο πεδίο επιτήρησής τους, των επιπέδων μηχανικής πίεσης που ασκείται σε ενσωματωθέντα αντικείμενα, της κίνησης οχημάτων, αλλά και της ταχύτητας, κατεύθυνσης και μεγέθους κάποιου συγκεκριμένου αντικειμένου.

Με βάση την προσφερόμενη ποικιλία των πληροφοριών, η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθίσταται εξαιρετικά σημαντική, αλλά και πολλές φορές αναγκαία σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Πολλοί είναι οι τομείς της επιστήμης, και όχι μόνο, που έχουν επιδείξει μεγάλο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και να τις εκμεταλλευτούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες τους. Αναφέρονται ενδεικτικά οι σπουδαιότεροι από αυτούς [4,5], [52]: Ιατρική, περιβάλλον, περιβαλλοντικοί οργανισμοί, παρακολούθηση οδικής και εναέριας κυκλοφορίας, στρατός, βιομηχανικές και κατασκευαστικές εταιρείες, οικιακές εφαρμογές, κτλ.

Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Κάποιες από αυτές βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, κάποιες άλλες αποτελούν ήδη εμπορικά προϊόντα, ενώ κάποιες ακόμη έχουν ενταχθεί σε ερευνητικά προγράμματα, τα οποία χρησιμοποιούν τα δίκτυα αισθητήρων ως εργαλείο.

2.9.1 Ιατρικές Εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν τεράστιες εφαρμογές στον τομέα της υγείας. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμεύσουν ως μέσον παροχής βοήθειας σε άτομα με ειδικές ανάγκες, στην παρακολούθηση των φυσιολογικών δεδομένων ενός ασθενούς από απόσταση, στην παρακολούθηση και διάγνωση ασθενειών (τηλεϊατρική), στον εντοπισμό και την παρακολούθηση ιατρών και ασθενών σε νοσοκομειακή μονάδα και επίσης στη διαχείριση φαρμάκων [4,5].

- Παρακολούθηση των Φυσιολογικών Δεδομένων Ασθενούς από Απόσταση

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συγκεντρώνει τα φυσιολογικά δεδομένα από έναν επιλεγμένο

ασθενή και στη συνέχεια τα αποθηκεύει για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου να τα χρησιμοποιήσει όποτε προκύψει ανάγκη. Οι μικροί σε μέγεθος κόμβοι παρέχουν τη δυνατότητα στους γιατρούς να αναγνωρίσουν έγκαιρα προκαθορισμένα συμπτώματα. Ταυτόχρονα επιτρέπουν μεγαλύτερη ευχέρεια κινήσεων στον ασθενή, παρέχοντας του έτσι μία καλύτερη ποιότητα ζωής, σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς τρόπους θεραπείας [4,5], [49].

- Παρακολούθηση Ιατρών και Ασθενών σε Νοσοκομείο

Μία άλλη εξίσου σπουδαία εφαρμογή είναι ο εντοπισμός και η παρακολούθηση των ιατρών, αλλά και των ασθενών, σε νοσοκομειακή μονάδα [4,5]. Κάθε ασθενής φέρει επάνω του μικρούς σε μέγεθος αισθητήριους κόμβους, καθένας εκ των οποίων εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό. Για παράδειγμα, ένας αισθητήριος κόμβος μπορεί να ανιχνεύει τους χτύπους της καρδιάς, ενώ κάποιος άλλος μπορεί να ανιχνεύει ταυτόχρονα την πίεση του αίματος. Επίσης οι γιατροί μπορούν να φέρουν επάνω τους έναν ειδικό αισθητήρα ο οποίος θα βοηθούσε στον άμεσο εντοπισμό τους μέσα στο χώρο του νοσοκομείου.

- Διαχείριση Φαρμάκων σε Νοσοκομείο

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομείο [4,5]. Με την εγκατάσταση αισθητήριων κόμβων σε φάρμακα, ελαχιστοποιείται η πιθανότητα λήψης λανθασμένης φαρμακευτικής αγωγής από ασθενή.

2.9.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Μερικά από τα πολύ βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι: η ταχύτητα, η μεγάλη ποικιλία τρόπων εγκατάστασης, η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης, η λειτουργία χωρίς επίβλεψη, καθώς και η ανοχή τους σε λάθη. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν ιδανικά προκειμένου να ενσωματωθούν σε στρατιωτικά συστήματα, όπως: συστήματα εντολών, ελέγχου, επικοινωνίας, ευφυΐας, άμυνας, παρακολούθησης (κατασκοπίας), αναγνώρισης και στόχευσης. Επειδή τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται, κατά κύριο λόγο, στην πυκνή τους χωρική εγκατάσταση, η καταστροφή μερικών κόμβων, από τις εχθρικές δυνάμεις, δεν μπορεί να επηρεάσει μία στρατιωτική επιχείρηση στο βαθμό που θα την επηρέαζε η καταστροφή των παραδοσιακών τύπων αισθητήρων [4,5], [52]. Στη συνέχεια αναφέρονται μερικές από τις πλέον συνήθεις εφαρμογές.

- Παρακολούθηση του Πεδίου της Μάχης

Η παρακολούθηση του πεδίου της μάχης είναι μία από τις πολλές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για στρατιωτικούς σκοπούς. Εδάφη ζωτικής σημασίας, δρομολόγια πρόσβασης και μονοπάτια μπορούν να καλυφθούν γρήγορα με ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και να παρακολουθούνται διαρκώς παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες που σχετίζονται με τις κινήσεις των εχθρικών δυνάμεων. Εξίσου σημαντική είναι επίσης και η παρακολούθηση της πορείας κινούμενων στόχων. Παρά το γεγονός ότι η παρακολούθηση κινούμενων στόχων έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς μελέτης στα παραδοσιακού τύπου δίκτυα αισθητήρων, όμως, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε ειδική μέριμνα, ώστε αυτά να εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα της συγχώνευσης των δεδομένων χωρίς να υπερφορτώνουν στο ελάχιστο το συνεργαζόμενο δίκτυο. Με την εξέλιξη των στρατιωτικών επιχειρήσεων θα είναι πολύ εύκολη η προσαρμογή και η ταχύτατη αντικατάσταση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων από άλλα καινούργια τα οποία θα είναι σε θέση να καλύπτουν πλήρως τις νέες ανάγκες [53].

- Παρακολούθηση Εξοπλισμού και Πυρομαχικών των Φίλιων Δυνάμεων

Η παρακολούθηση του εξοπλισμού και των πυρομαχικών των φίλιων δυνάμεων αποτελεί μία εξίσου σημαντική εφαρμογή. Οι διοικητές, με τη χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν την κατάσταση των μονάδων τους καθώς επίσης και του εξοπλισμού αλλά και των πυρομαχικών τους. Κάθε στρατιώτης, όχημα και εξοπλισμός μπορούν να εφοδιαστούν με αισθητήρες οι οποίοι θα αναφέρουν την εκάστοτε κατάσταση. Αυτές οι αναφορές θα συγκεντρώνονται σε κεντρικούς κόμβους (σταθμούς βάσης) και στη συνέχεια θα προωθούνται στα κατάλληλα στρατιωτικά κλιμάκια. Επίσης είναι δυνατόν, τα δεδομένα που λαμβάνονται να αθροίζονται με τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από άλλες μονάδες του ίδιου επιπέδου έτσι ώστε να παρέχεται μία συνολικότερη εικόνα των φίλιων δυνάμεων [4,5], [52].

- Παρακολούθηση Ναρκοπεδίου

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και στην παρακολούθηση ναρκοπεδίων προκειμένου να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία τους. Σε κάθε νάρκη έχει τοποθετηθεί και από ένας αισθητήρας, και όλες μαζί σχηματίζουν ένα δίκτυο ad hoc πολλαπλών βημάτων. Οι ζεύξεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι κάτω από συνεχή στενή παρακολούθηση. Στην

περίπτωση που διαπιστωθεί ότι κάποιος από τους κόμβους δεν επικοινωνεί με τους υπόλοιπους, (δηλαδή ότι έχει εξουδετερωθεί η νάρκη), τότε αντικαθίσταται άμεσα [4,5].

- Ανίχνευση και Αναγνώριση Ραδιοβιολογικής, χημικής και Πυρηνικής Απειλής

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση και αναγνώριση ραδιοβιολογικής, χημικής και πυρηνικής απειλής [4,5], [52]. Σε περίπτωση ραδιοβιολογικού, χημικού και πυρηνικού πολέμου, είναι ζωτικής σημασίας η παροχή ακριβούς και έγκαιρης πληροφόρησης σχετικά με την ύπαρξη μόλυνσης και μάλιστα όταν υπάρχουν άνθρωποι κοντά στο σημείο όπου έχει σημειωθεί η έκρηξη του ανάλογου όπλου. Τα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία έχουν εγκατασταθεί μέσα σε περιοχές των φίλιων δυνάμεων, χρησιμοποιούνται κατά βάση ως συστήματα αναγνώρισης και προειδοποίησης για ύπαρξη τέτοιου είδους ουσιών. Μπορούν να παρέχουν στις φίλιες δυνάμεις, έγκαιρα και ανελλιπώς, χρήσιμες πληροφορίες ώστε να αντιδρούν γρηγορότερα και να μειώνουν έτσι δραστικά τις απώλειες. Εκτός από τα παραπάνω, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αναγνώριση μιας περιοχής η οποία έχει προσβληθεί από ραδιοβιολογική ή χημική ή πυρηνική επίθεση, δίχως να είναι απαραίτητο να εκτεθεί σε άμεσο κίνδυνο η ομάδα ανίχνευσης.

- Ανίχνευση και Κατασκοπία των Εχθρικών Δυνάμεων και του Εδάφους

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου αποδοτικά στην ανίχνευση του εδάφους ή την κατασκοπία των εχθρικών δυνάμεων λόγω της ταχύτητας εγκατάστασης και της συλλογής δεδομένων που τα διακρίνει [4,5], [52]. Πιο συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν σε εχθρικά εδάφη και να συγκεντρώνουν έγκαιρα, μέσα σε ελάχιστα λεπτά, πολύτιμες και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικές με τις εχθρικές δυνάμεις και το έδαφος πριν ακόμη προλάβει ο εχθρός να τα καταστρέψει.

- Ανίχνευση Στρατιωτικών Οχημάτων

Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την ανίχνευση στρατιωτικών οχημάτων. Το δίκτυο αυτό θα πρέπει να είναι εύρωστο και πολύ δύσκολα ανιχνεύσιμο. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους κόμβους θα πρέπει να αποστέλλονται στο σταθμό βάσης με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια. Οι αισθητήριοι κόμβοι ρίπτονται ελεύθερα στην υπό παρακολούθηση περιοχή από ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Αμέσως μετά την προσεδάφισή τους αρχί-

ζουν να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους και να εκτελούν υπολογιστικές πράξεις σχετικές με την ταχύτητα και την πορεία των οχημάτων που πρέπει να παρακολουθούν. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την επεξεργασία αποστέλλονται κατευθείαν στο σταθμό βάσης ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος που πετάει διαρκώς πάνω από την υπό παρακολούθηση περιοχή.

- Ανίχνευση Στόχων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εμφυτευτούν στα συστήματα πλοήγησης των «έξυπνων πυρομαχικών», ελαχιστοποιώντας έτσι τις περιπτώσεις όπου τα βλήματα πλήττουν εσφαλμένους στόχους [24].

- Εντοπισμός Ελεύθερων Σκοπευτών

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον εντοπισμό της θέσης των ελεύθερων σκοπευτών. Το δίκτυο αποτελείται από κόμβους οι οποίοι είναι σε θέση να ανιχνεύουν και να επεξεργάζονται κρουστικά κύματα κάνοντας χρήση ειδικού τύπου αισθητήρων. Όλοι οι αισθητήριοι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε μία περιοχή όπου σχηματίζουν ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών βημάτων. Κάθε κόμβος επεξεργάζεται τα κρουστικά κύματα που λαμβάνει, ενώ ταυτόχρονα ένας άλλος κύριος κόμβος συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους υπόλοιπους κόμβους στο δίκτυο και εντοπίζει τη θέση του ελεύθερου σκοπευτή με ακρίβεια μέχρι και ενός περίπου μέτρου και με χρονική καθυστέρηση μικρότερη των δύο δευτερολέπτων. Όλες οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί εκτελούνται με τη βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή ο οποίος είναι σε θέση να εκτελεί πολύπλοκες λειτουργίες.

2.9.3 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

Το περιβάλλον αποτελεί έναν από τους ιδανικότερους χώρους για την εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, για τον απλούστατο λόγο ότι μπορεί να μετρηθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος φυσικών μεγεθών, όπως είναι π.χ. η θερμοκρασία, η οποία αποτελεί μία από τις πλέον σημαντικές μεταβλητές και αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, η πίεση αλλά και η υγρασία [53]. Οι αισθητήρες που παρακολουθούν το περιβάλλον χρησιμοποιούνται για να εξετάζουν προσεκτικά τον τρόπο απόκρισης της βλάστησης στις εκάστοτε παρουσιαζόμενες μεταβολές του κλίματος αλλά και στις διάφορες ασθένειες. Οι ακουστικοί αισθητήρες αλλά και οι αισθητήρες εικόνας (οι οποίοι διεγείρονται με την εμφάνιση κάποιας εικόνας) είναι σε θέση να αναγνωρίζουν αποτυπώματα και να μετρούν τον πληθυσμό των άγριων πτηνών καθώς και των άλλων ειδών της πανίδας στην υπό παρακολούθηση περιοχή. Μπορούν επίσης να παρακολουθούν τις κινήσεις των πτηνών και των αγρίων ζώων όταν αυτά αποδημούν ή μεταναστεύουν σε άλλες περιοχές.

- Ανίχνευση Δασικών Πυρκαγιών

Μία άλλη πολύ σημαντική εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, είναι η ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών. Οι αισθητήριοι κόμβοι τοποθετούνται σε κάποιο δάσος, είτε τυχαία, είτε στη βάση κάποιου στρατηγικού σχεδιασμού και ανιχνεύουν, όχι μόνο την ύπαρξη φωτιάς, αλλά και την ακριβή της προέλευση και στη συνέχεια να μεταβιβάζουν τις πληροφορίες που έλαβαν στους άμεσα ενδιαφερόμενους [4,5]. Μπορούν επίσης να συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε να πραγματοποιούν κατανεμημένη ανίχνευση του χώρου και να παρακάμπτουν δέντρα ή βράχους που μπορεί να τους είναι εμπόδιο στην εργασία ανίχνευσης [52].

- Ανίχνευση Πλημμυρών

Μία άλλη σπουδαία περιβαλλοντική εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, είναι η ανίχνευση πλημμυρών [52]. Το ALERT [54] είναι ένα σύστημα ανίχνευσης πλημμυρών, το οποίο αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ αλλά χρησιμοποιείται και σήμερα από άλλες χώρες, όπως είναι για παράδειγμα, η Κίνα, η Ινδία, η Αυστραλία, η Αργεντινή, κ.ά.

Τα συστήματα ανίχνευσης ALERT περιλαμβάνουν αισθητήρες βροχόπτωσης, αισθητήρες μέτρησης της στάθμης του νερού και μετεωρολογικούς αισθητήρες. Αυτοί οι αισθητήρες συλλέγουν τα κατάλληλα δεδομένα από το περιβάλλον τους και στη συνέχεια διοχετεύουν αυτό το πλήθος των πληροφοριών προς μία κεντρική βάση δεδομένων όπου πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία

και αξιολόγησή τους.

- Παρακολούθηση της Συμπεριφοράς των Ζώων

Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των ζώων αποτελεί αντικείμενο πρωταρχικής σημασίας για τους ζωολόγους διότι τους βοηθά να αποκτήσουν πληρέστερη γνώση σε θέματα που σχετίζονται με τις κινήσεις των ζώων και με τους διαφόρους ήχους που αυτά παράγουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε μία κατασκήνωση από το τμήμα τεχνολογίας και επιστήμης του Πανεπιστημίου του Χονγκ-Κονγκ [55]. Ο σκοπός αυτού του πειράματος ήταν η ανίχνευση της συμπεριφοράς των βατράχων στην κατασκήνωση όπου κατά τη διάρκεια της άνοιξης, όπως είναι γνωστό, οι βάτραχοι συνηθίζουν να κοάζουν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε δώδεκα πλατφόρμες MICA2 οι μισές από τις οποίες έφεραν τις πλακέτες αισθητήρων MTS310CA, ενώ οι υπόλοιπες έφεραν τις πλακέτες MTS420CA. Παρά τη μεγάλη δυνατότητα που διέθεταν οι πλακέτες για τη μέτρηση πολλών διαφορετικών μεγεθών, κατάφεραν να μετρήσουν μόνο τρία μεγέθη: υγρασία, θερμοκρασία και ήχο.

- Παρατήρηση Άγριων Πτηνών

Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται σήμερα για την παρατήρηση της αναπαραγωγικής συμπεριφοράς ενός μικρού πτηνού στην πολιτεία Maine των ΗΠΑ. Είναι πράγματι πολύ δύσκολο να παρατηρήσει κανείς από κοντά αυτά τα πτηνά διότι ενοχλούνται, όπως άλλωστε είναι φυσικό, από την ανθρώπινη παρουσία. Σε αυτήν εδώ την περίπτωση, η χρήση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων φαντάζει ως ο καλύτερος τρόπος για την παρατήρηση και την κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Η περίοδος αναπαραγωγής διαρκεί επτά μήνες και οι βιολόγοι ενδιαφέρονται για τις ίδιες τους τις φωλιές, για τις περιβαλλοντικές συνθήκες (όπως, π.χ. θερμοκρασία, υγρασία κτλ.) μέσα και έξω από τις φωλιές τους κατά τη διάρκεια αναπαραγωγής, για τα σημεία αναπαραγωγής τους καθώς και για τις παραμέτρους επιλεγμένων σημείων αναπαραγωγής.

Οι κόμβοι, που τοποθετούνται μέσα στις φωλιές των πτηνών, διαθέτουν αισθητήρες ανίχνευσης υγρασίας, θερμοκρασίας, πίεσης, φωτεινότητας κτλ. αλλά και υπέρυθρες ακτίνες προκειμένου να ανιχνεύουν την παρουσία των πτηνών. Οι φωλιές είναι συνήθως πολύ κοντά η μία με την άλλη ώστε να σχηματίζουν συστοιχίες (clusters), και έτσι οι κόμβοι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα ασύρματο δίκτυο πολλών βημάτων. Κάθε συστοιχία

περιλαμβάνει έναν κόμβο ο οποίος φέρει μία κατευθυντική κεραία μεγάλης εμβέλειας και η οποία συνδέει τη συστοιχία με τον κύριο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης συνδέεται με μία βάση δεδομένων μέσω δορυφορικής ζεύξης. Οι αισθητήρες λαμβάνουν δείγματα μία φορά το λεπτό και στέλνουν τις μετρήσεις στη βάση δεδομένων μέσω του υπολογιστή του σταθμού βάσης.

- Ανίχνευση των Σύνθετων Βιολογικών Οργανισμών του Περιβάλλοντος

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση των σύνθετων βιολογικών οργανισμών του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες οι οποίοι έχουν ενσωματωθεί στην εξωτερική επιφάνεια δορυφόρων αλλά και αεροσκαφών είναι χρήσιμοι για την παρακολούθηση μεγάλης κλίμακας βιοδιαφορών, όπως είναι για παράδειγμα η χωρική πολυπλοκότητα των επικρατέστερων ειδών φυτών.

- Ανίχνευση και Μελέτη των Ωκεανών

Ο ωκεανός είναι ένας μαγνητικός τόπος και παραμένει σχετικά ανεξερεύνητος, σε σύγκριση με την ξηρά. Τα υποθαλάσσια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν ακόμη και στον πυθμένα των ωκεανών ανιχνεύοντας και μετρώντας διάφορα χρήσιμα για τους ωκεανολόγους μεγέθη.

2.9.4 Λοιπές Εφαρμογές

Ο αριθμός των εφαρμογών όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παραμένει ανεξάντλητος. Αυτό το γεγονός καθιστά πολύ δύσκολο το έργο της ταξινόμησής τους. Στη συνέχεια παρατίθεται μία σειρά από εφαρμογές η οποία δεν μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις προηγούμενες κατηγορίες.

- Οικιακές Εφαρμογές

Ο οικιακός αυτοματισμός είναι ίσως το πλέον δημοφιλές πεδίο εφαρμογής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία, έξυπνοι αισθητήρες και μηχανισμοί κίνησης μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορες οικιακές συσκευές, όπως: ψυγεία, καταψύκτες, ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων, βίντεο, κτλ. Αυτοί οι ειδικοί αισθητήρες μπορούν να αλληλεπιδρούν όχι μόνο μεταξύ τους, αλλά και με ένα εξωτερικό δίκτυο, όπως είναι για παράδειγμα το Διαδίκτυο ή κάποιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το γεγονός παρέχει τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να διαχειρίζονται τις οικιακές συσκευές από οπουδήποτε και

εάν ευρίσκονται.

Ο σχεδιασμός ενός έξυπνου περιβάλλοντος βασίζεται σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: στην ανθρωποκεντρική και στην τεχνοκεντρική.

- Στην *Ανθρωποκεντρική Προσέγγιση*, ένα έξυπνο περιβάλλον θα πρέπει να προσαρμόζεται προς τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών, σε ότι αφορά τις δυνατότητες εισόδου/εξόδου.

- Στην *Τεχνοκεντρική Προσέγγιση*, πρέπει να αναπτυχθούν καινοτόμες τεχνολογίες υλικών, δικτυακές λύσεις καθώς και ενδιάμεσες συσκευές.

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να προσαρμοσθούν σε έπιπλα αλλά και σε οικιακές συσκευές και να επικοινωνούν, όχι μόνο μεταξύ τους, αλλά και με τον εξυπηρετητή (server) του χώρου μέσα στον οποίο ευρίσκονται. Ο εξυπηρετητής του δωματίου είναι επίσης δυνατόν να επικοινωνεί και με τους εξυπηρετητές των υπόλοιπων δωματίων έχοντας έτσι μία άμεση πληροφόρηση για τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν, όπως για παράδειγμα, εκτύπωση, σάρωση, αποστολή και λήψη φαξ, κ.ο.κ. Οι υπολογισμοί των μετρούμενων μεγεθών σε αυτό το περιβάλλον εργασίας θα πρέπει να είναι αξιόπιστοι, ανελλιπείς και διαφανείς.

- Εφαρμογές στην Ασφάλεια Κτηρίων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ασφάλεια κτηρίων από αντιτρομοκρατικές ενέργειες [53]. Κτήρια και εγκαταστάσεις ζωτικής σημασίας, όπως: εγκαταστάσεις παραγωγής ρεύματος, τηλεπικοινωνιακά κέντρα, κτλ. πρέπει να προστατεύονται από ενδεχόμενες τρομοκρατικές επιθέσεις. Δίκτυα με οπτικούς, ακουστικούς και άλλου είδους αισθητήρες μπορούν να αναπτυχθούν μέσα ή γύρω από τέτοιου είδους κτήρια για την προστασία τους. Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν εγκαίρως τις οποιεσδήποτε πιθανές απειλές. Τα βελτιωμένα συστήματα αλληλοεπικάλυψης και ανίχνευσης των αισθητήρων μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα ψευδοσυναγερμών η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη συγχώνευση των πληροφοριών που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες.

- Εφαρμογές στον Περιβαλλοντικό Έλεγχο σε Συγκρότημα Γραφείων

Σήμερα τα περισσότερα συγκροτήματα γραφείων διαθέτουν κεντρικά ελεγχόμενη θέρμανση και κλιματισμό. Επειδή η ροή του αέρα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χώρο, π.χ. γραφείο, τότε η κάθε μία πλευρά αυτού του χώρου θα έχει και διαφορετική θερμοκρασία, έστω και ακόμη λίγων βαθμών. Ένα κατανεμημένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που εγκαθίσταται στο συ-

γκεκριμένο χώρο μπορεί να ελέγχει όχι μόνο τη ροή του αέρα αλλά και τη θερμοκρασία σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Έχει υπολογισθεί ότι η εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου είναι πιθανόν να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας ακόμη και κατά δύο μονάδες BTU (British Thermal Units) η οποία αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, π.χ. για τις Η.Π.Α., αξίας 55 δις δολαρίων το χρόνο, και μείωση στην εκπομπή υδρογονανθράκων κατά 35 εκατ. Τόνους .

- Εφαρμογές σε Αλληλεπιδραστικά Μουσεία

Σήμερα, σε αρκετά μουσεία του κόσμου μπορεί κανείς να αλληλεπιδρά με τα εκθέματα, τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν όχι μόνο στο άγγιγμα αλλά και στην ομιλία. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούν, ιδίως τα παιδιά, να διδάσκονται από αυτά ενώ ταυτόχρονα θα μπορούν να συμμετέχουν σε ένα διαρκές πείραμα δράσης/αντίδρασης που θα τους διδάξει για το περιβάλλον και τις επιπτώσεις. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, ο ρόλος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε έναν τέτοιο χώρο είναι σημαντικός. Ένα παράδειγμα μουσείου αυτού του είδους είναι και το Deutsches Museum στο Μόναχο της Γερμανίας.

- Εφαρμογές στη Ρύθμιση της Οδικής Κυκλοφορίας των Οχημάτων

Μία ακόμη πολύ χρήσιμη εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η ρύθμιση της οδικής κυκλοφορίας των οχημάτων. Σήμερα, πολλοί οδικοί κόμβοι φέρουν υπέργειους, επίγειους ή και υπόγειους αισθητήρες οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους ενσύρματα για την ανίχνευση των οχημάτων και το χειρισμό των φωτεινών σηματοδοτών. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ειδικές κάμερες σε δρόμους με μεγάλη κυκλοφορία οχημάτων οι οποίες καταγράφουν την κίνηση και στέλνουν πολύτιμες πληροφορίες σε κεντρικούς σταθμούς βάσης από όπου γίνεται και η κατάλληλη ρύθμιση, εφόσον χρειαστεί. Όμως, οι αισθητήρες, καθώς και τα ενσύρματα δίκτυα στα οποία ανήκουν, κοστίζουν ακριβά, οπότε η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε ένα πολύ μικρό αριθμό οδικών κόμβων. Αυτό το γεγονός είναι πλέον αρκετό ώστε να δοθεί η σκυτάλη σε φθηνά και ευέλικτα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αλλάζοντας έτσι εκ βάθρων το τοπίο του ελέγχου και της παρακολούθησης του οδικού δικτύου. Αισθητήρες εξαιρετικά χαμηλού κόστους εγκαθίστανται σε κάθε διασταύρωση για την ανίχνευση οχημάτων και την καταγραφή της ταχύτητάς τους. Οι αισθητήριοι κόμβοι θα επικοινωνούν με άλλους γειτονικούς τους με τελικό αποτέλεσμα την ενιαία χαρτογράφηση της οδικής κυκλοφορίας.

- Εφαρμογές στην Ανίχνευση και Παρακολούθηση Κλοπής Οχημάτων

Αισθητήριοι κόμβοι είναι δυνατόν να εγκατασταθούν σε μία γεωγραφική περιοχή με στόχο την ανίχνευση και αναγνώριση κλοπών οχημάτων μέσα σε αυτή και στη συνέχεια αναφέρουν τις κλοπές που εντόπισαν σε απομακρυσμένους χρήστες.

- Εφαρμογές στη Γεωργία

Η εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στη γεωργία εξελίσσεται πλέον σε σημαντικό παράγοντα εκμετάλλευσής τους. Με τη χρήση αυτών των δικτύων είναι δυνατόν να παρακολουθούνται, σε πραγματικό χρόνο, τα ακριβή επίπεδα πόσιμου νερού, διάβρωσης και μόλυνσης του εδάφους. Οι διάφορες πληροφορίες που συλλέγονται, αποστέλλονται σε κάποιο σταθμό βάσης (κεντρικό υπολογιστή) προκειμένου να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης από τους άμεσα ενδιαφερομένους.

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης διαφόρων παραγόντων, όπως είναι για παράδειγμα, το χρώμα των φύλλων, η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, κτλ., οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την ανάπτυξη των φυτών και ανάλογα με τα αποτελέσματα να ενεργοποιείται ο μηχανισμός της αυτόματης άρδευσης. Η πλατφόρμα MICA2, η οποία είναι εφοδιασμένη με την κάρτα αισθητήρων MDA300 αποτελεί μία πολύ καλή λύση για εφαρμογές ακριβείας στη γεωργία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΑ WSN

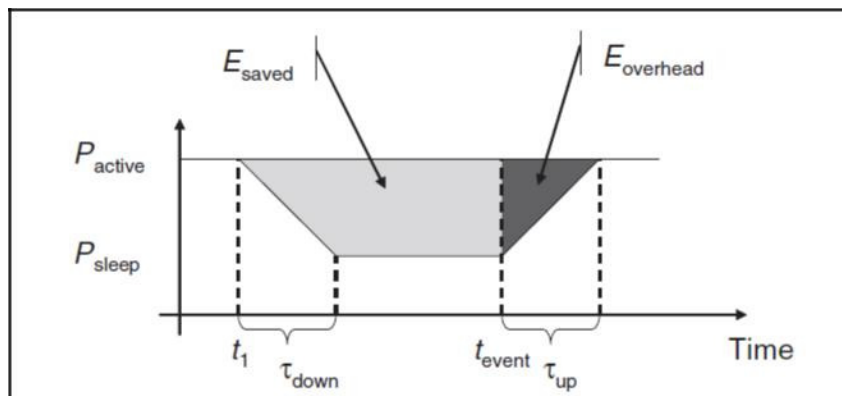
3.1 Εισαγωγή

Όπως προκύπτει από το προηγούμενο κεφάλαιο, τα ενεργειακά αποθέματα ενός κόμβου αισθητήρα είναι πολύτιμα οι μπαταρίες έχουν μικρή χωρητικότητα και η επαναφόρτισή τους μέσω τεχνικών συλλογής ενέργειας είναι δύσκολη. Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας του κόμβου πρέπει να ελέγχεται στενά. Τα εξαρτήματα που καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια είναι ο μικροελεγκτής, το μπροστινό RF άκρο του πομποδέκτη και σε μικρότερο βαθμό η μνήμη και ορισμένοι τύποι αισθητήρων.

Μια σημαντική συνεισφορά στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας προέρχεται από τις χαμηλότερου επιπέδου τεχνολογίες, όπως είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χαμηλής κατανάλωσης. Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός του υλικού δεν μπορεί να αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα αν δε συνδυαστεί με την αποδοτική λειτουργία των εξαρτημάτων του κόμβου. Για την αποδοτική λειτουργία ενός κόμβου εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι δεν έχει να εκτελέσει κάποια εργασία την περισσότερη ώρα, οπότε συμφέρει να είναι απενεργοποιημένος. Επειδή όμως πρέπει να ενεργοποιείται ξανά είτε λαμβάνοντας κάποιο εξωτερικό ερέθισμα, είτε ανά τακτά χρονικά διαστήματα, δεν είναι δυνατό να απενεργοποιείται εντελώς, αλλά υιοθετεί διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας ανάλογα με τις εργασίες που έχει να εκτελέσει. Η ύπαρξη και χρήση διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με αντάλλαγμα την μειωμένη λειτουργικότητα του κόμβου είναι η λύση για ενεργειακά αποδοτικούς ασύρματους κόμβους αισθητήρων.

Άλλωστε, αυτή η τεχνική είναι ήδη γνωστή από τους προσωπικούς υπολογιστές, όπου έχουμε καταστάσεις αναμονής και ύπνου. Παρότι ένα μοντέλο με καταστάσεις λειτουργίας διαβαθμισμένες ως προς την βαθύτητα του ύπνου είναι αρκετά ξεκάθαρο και απλό, η μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη απαιτεί ενέργεια και χρόνο, γεγονός που περιπλέκει το μοντέλο. Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι όσο πιο βαθύς είναι ο ύπνος, τόσο περισσότερη ενέργεια και χρόνο χρειάζεται ο κόμβος για να επανέλθει σε πλήρη λειτουργία (active mode) ή να μεταβεί σε κάποια κατάσταση ελαφρύτερου ύπνου. Γι' αυτό πολλές φορές ίσως είναι προτιμότερο από άποψη αποδοτικότητας να παραμένει ο κόμβος σε κατάσταση ελαφρύ ύπνου (idle mode) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, παρά να μεταβαίνει σε βαθύτερο ύπνο (sleep mode).

Η διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας λόγω των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας φαίνεται από το διάγραμμα στο εικόνα-14 ([13], [23]). Ας υποθέσουμε ότι ένα εξάρτημα καταναλώνει ισχύ P_{active} όταν βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας και P_{sleep} όταν βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου. Έστω επίσης ότι την χρονική στιγμή λαμβάνεται η απόφαση να μεταβεί το εξάρτημα σε κατάσταση ύπνου για να μειώσει την κατανάλωσή του και τελικά μετά από χρόνο εισέρχεται σε κατάσταση ύπνου. Αντιστοίχως, την χρονική στιγμή t_1 συμβαίνει κάποιο γεγονός που απαιτεί την επαναφορά του εξαρτήματος σε κατάσταση λειτουργίας, η οποία επιτυγχάνεται μετά από χρονικό διάστημα τ_{up} . Αν το εξάρτημα ήταν μονίμως ενεργοποιημένο, μέχρι να συμβεί το γεγονός θα κατανάλωνε ισχύ P_{active} από την χρονική στιγμή t_1 μέχρι την t_{event} , δηλαδή $E_{\text{active}} = P_{\text{active}} (t_{\text{event}} - t_1)$. Αν θεωρήσουμε ότι κατά την χρονική διάρκεια της μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη έχουμε μέση κατανάλωση ισχύος $(P_{\text{active}} + P_{\text{sleep}})/2$, τότε η ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά είναι $E_{\text{states}} = P_{\text{sleep}}(t_{\text{event}} - t_1 - \tau_{\text{down}})$. Τελικά, η ενέργεια που εξοικονομείται είναι $E_{\text{saved}} = E_{\text{active}} - E_{\text{states}}$. Βέβαια, καταναλώνεται και μία επιπλέον ποσότητα ενέργειας για την επαναφορά του εξαρτήματος σε κατάσταση λειτουργίας, η οποία ισούται με $E_{\text{overhead}} = \tau_{\text{up}} (P_{\text{active}} + P_{\text{sleep}})/2$. Προφανώς, για να είναι συμφέρουσα η χρήση διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας θα πρέπει να ισχύει $E_{\text{saved}} > E_{\text{overhead}}$.



Εικόνα 15: Διάγραμμα εξοικονόμησης ενέργειας με δύο καταστάσεις λειτουργίας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταναλώσεις των ενεργειακά απαιτητικότερων εξαρτημάτων ενός κόμβου αισθητήρα.

3.1.1 Κατανάλωση ενέργειας μικροελεγκτή

Οι ενσωματωμένοι ελεγκτές συνήθως εφαρμόζουν την λογική των πολλαπλών καταστάσεων λειτουργίας όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Για παράδειγμα, ο μικροεπεξεργαστής Intel StrongARM διαθέτει τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας (normal mode) όλα τα εξαρτήματά του τροφοδοτούνται πλήρως και η κατανάλωση ισχύος φτάνει μέχρι τα 400 mW. Στην αδρανή κατάσταση λειτουργίας (idle mode) σταματάει τα ρολόι της CPU και διατηρούνται ενεργά μόνο τα ρολόγια που συνδέονται με περιφερειακές συσκευές. Η κατανάλωση ισχύος σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας φτάνει μέχρι τα 100 mW και με οποιοδήποτε ερέθισμα ο μικροεπεξεργαστής επανέρχεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Τέλος, ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει την κατάσταση ύπνου (sleep mode), όπου μόνο το ρολόι πραγματικού χρόνου παραμένει ενεργό. Για να επανέλθει στην κανονική κατάσταση λειτουργίας χρησιμοποιείται χρονόμετρο και η μετάβαση μπορεί να διαρκέσει έως και 160 ms, ενώ η κατανάλωση ισχύος μέχρι τα 50 μ W.

Μια πιο εξεζητημένη υλοποίηση σε σύγκριση με τις διακριτές καταστάσεις λειτουργίας είναι η συνεχής προσαρμογή της ισχύος που καταναλώνεται, μέσω της προσαρμογής της ταχύτητας λειτουργίας του μικροελεγκτή. Η κεντρική ιδέα βασίζεται στην επιλογή της βέλτιστης ταχύτητας λειτουργίας του μικροελεγκτή με την οποία πρέπει να υλοποιήσει μια εργασία μέσα σε δοσμένο χρονικό πλαίσιο. Μια προφανής λύση είναι να λειτουργήσει με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα για να ολοκληρώσει το συντομότερο δυνατό την εργασία και μετά να εισέλθει σε κατάσταση ύπνου. Μια εναλλακτική λύση είναι να εκτελέσει την εργασία με τέτοια ταχύτητα ώστε να την ολοκληρώσει ακριβώς πριν λήξει το χρονικό της περιθώριο. Η λογική πίσω από αυτή την τεχνική είναι ότι ένας ελεγκτής που λειτουργεί με χαμηλότερη ταχύτητα καταναλώνει μικρότερα ποσά ενέργειας από έναν που λειτουργεί με την μέγιστη, με δεδομένο πάντα την ορθή του λειτουργία. Αυτή η τεχνική ονομάζεται δυναμική ρύθμιση τάσης (Dynamic Voltage Scaling, DVS) [4].

Όταν εφαρμόζεται η τεχνική DVS πρέπει να δίνεται προσοχή στην εντός προδιαγραφών λειτουργία του ελεγκτή, αφού υπάρχουν άνω και κάτω όρια που πρέπει να τηρούνται σε ό,τι αφορά τον χρονισμό του. Τέλος, όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς επεξεργασία, η μόνη λύση είναι η μετάβαση σε κατάσταση ύπνου.

3.1.2 Κατανάλωση ενέργειας μνήμης

Όταν αναφερόμαστε στην κατανάλωση ενέργειας της μνήμης, δύο είναι οι βασικοί τύποι μνήμης που εννοούμε: την ενσωματωμένη μνήμη του μικροελεγκτή και την flash μνήμη. Η απαιτούμενη ισχύς για την οδήγηση της ενσωματωμένης μνήμης συμπεριλαμβάνεται συνήθως στα αντίστοιχα στοιχεία του μικροελεγκτή, οπότε θα επικεντρωθούμε στην flash μνήμη. Ο τρόπος κατασκευής και χρήσης της flash μνήμης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του κόμβου αισθητήρα. Οι σχετικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι ο χρόνος ανάγνωσης και εγγραφής, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας αυτών των διαδικασιών. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι διαθέσιμα από τον κατασκευαστή της μνήμης και ποικίλλουν, καθώς εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες. Οι χρόνοι ανάγνωσης, αλλά και η ενέργεια που απαιτείται για την ανάγνωση, κινούνται στα ίδια επίπεδα στους διάφορους τύπους flash μνήμης. Αντιθέτως, η διαδικασία εγγραφής στη μνήμη είναι πιο περίπλοκη, αφού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα των δεδομένων που προσπελαύνουμε κάθε φορά.

Όπως είναι εμφανές, η εγγραφή στη flash μνήμη είναι μια χρονοβόρα και ενεργειακά απαιτητική διαδικασία, η οποία πρέπει να περιορίζεται όσο το δυνατό περισσότερο.

3.1.3 Κατανάλωση ενέργειας πομποδέκτη

Ο πομποδέκτης ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρα έχει δύο λειτουργίες: την αποστολή και λήψη δεδομένων μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων. Όπως ο μικροελεγκτής, έτσι και ο πομποδέκτης μπορεί να διαθέτει διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, οι πιο απλές από τις οποίες είναι να είναι ενεργοποιημένος ή απενεργοποιημένος. Προκειμένου ο πομποδέκτης να είναι αποδοτικός πρέπει να είναι απενεργοποιημένος την περισσότερη ώρα και να ενεργοποιείται μόνο όταν χρειάζεται να εκτελέσει κάποια εργασία. Αυτό εισάγει μια επιπλέον πολυπλοκότητα λόγω του χρόνου και της ενέργειας που χρειάζεται ο πομποδέκτης για να μεταβεί από τη μια κατάσταση στην άλλη.

Για να κατανοήσουμε την κατανάλωση ενέργειας του πομποδέκτη και την επίδρασή της στον σχεδιασμό των πρωτοκόλλων, κρίνεται απαραίτητη η μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας τόσο για την εκπομπή, όσο και για τη λήψη. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά τέτοια μοντέλα με διάφορα επίπεδα ακρίβειας και λεπτομέρειας ([1],[20],[24])

- **Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας κατά την εκπομπή**

Θεωρητικά η ενέργεια που καταναλώνεται από ένα πομπό οφείλεται σε δύο αίτια : πρώτον στη δημιουργία του RF σήματος και δεύτερον στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που είναι υπεύθυνα για σύνθεση και μετατροπή συχνότητας (frequency synthesis and conversion), φίλτρα και άλλα. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία του RF σήματος σχετίζεται άμεσα με τη χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση και την απόσταση πομπού – δέκτη, άρα και με την ισχύ εκπομπής P_{tx} .

Μια από τις πιο κρίσιμες επιλογές είναι αυτή της ισχύος εκπομπής P_{tx} . Η ισχύς εκπομπής παράγεται από τον ενισχυτή του πομπού, του οποίου η κατανάλωση ισχύος εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του και την ισχύ P_{tx} που παράγει. Στα πιο απλά μοντέλα αυτές οι δύο τιμές είναι ανάλογες μεταξύ τους, ενώ ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο θεωρεί ένα επιπλέον σταθερό ποσό ισχύος ανεξάρτητα από την ακτινοβολούμενη ισχύ. Δηλαδή ισχύει η σχέση: $P_{amp} = a_{amp} + \beta_{amp} P_{tx}$

όπου τα a_{amp} και β_{amp} είναι σταθερές εξαρτώμενες από την τεχνολογία επεξεργασίας και την αρχιτεκτονική του ενισχυτή. Η αποδοτικότητα του ενισχυτή ισχύος ορίζεται ως $\eta_{amp} = P_{tx}/P_{amp}$, οπότε η μέγιστη αποδοτικότητα προκύπτει για μέγιστη ισχύ εξόδου. Παρόλα αυτά, η μέγιστη ισχύς δεν χρησιμοποιείται πάντα, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στα κυψελωτά συστήματα, και γι' αυτό το παραπάνω σχήμα μπορεί να μην είναι το πιο αποδοτικό. Επιπρόσθετα του ενισχυτή, θα πρέπει να τροφοδοτηθούν και άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα κατά τη διάρκεια της εκπομπής, όπως για παράδειγμα ο επεξεργαστής βασικής ζώνης. Η συνολική ισχύς που καταναλώνεται σε αυτά τα κυκλώματα αναφέρεται ως P_{txElec} . Η ενέργεια που απαιτείται για την εκπομπή ενός πακέτου μήκους n bits έχει εξάρτηση από τον χρόνο που κάνει το πακέτο για να σταλεί, ο οποίος καθορίζεται από τον ονομαστικό ρυθμό bit R και τον ρυθμό κωδικοποίησης R_{code} , και από την συνολική ισχύ που καταναλώνεται στην εκπομπή. Επιπλέον, αν ο πομπός πρέπει να ενεργοποιηθεί πριν την εκπομπή, προκύπτουν κόστη εκκίνησης. Όλα τα παραπάνω αντικατοπτρίζονται στην εξίσωση :

$$E_{tx}(n, R_{code}, P_{amp}) = t_{start} P_{start} + \frac{n}{R_{code} R} (P_{txElec} + P_{amp})$$

Πρέπει να τονιστεί ότι στην παραπάνω εξίσωση δεν λαμβάνεται υπόψη η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση. Παρότι οι μετρήσεις έχουν αποδείξει ότι υπάρχει εξάρτηση από τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται, η διαφορά είναι τόσο μικρή ώστε η παράβλεψή της να αποτελεί μια αποδεκτή απλοποίηση. Επίσης, έχει γίνει η υπόθεση ότι το κόστος κωδικοποίησης εξαρτάται μόνο από το ρυθμό κωδικοποίησης. Τέλος, παρατηρούμε ότι δε συμμετέχει η απόδοση της κεραίας, αφού

θεωρούμε ότι δεν έχει απώλειες. Σε διαφορετική περίπτωση θα υπήρχαν επιπλέον απώλειες ισχύος μεταξύ της εξόδου του ενισχυτή και της ακτινοβολούμενης ισχύος.

- **Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λήψη**

Όπως συμβαίνει και με τον πομπό, ο δέκτης μπορεί να είναι είτε ενεργοποιημένος, είτε απενεργοποιημένος. Όσο είναι ενεργοποιημένος, ο δέκτης μπορεί είτε να λαμβάνει κάποιο πακέτο, είτε να είναι σε κατάσταση αναμονής, δηλαδή να παρατηρεί το κανάλι και να είναι έτοιμος να λάβει πακέτο. Προφανώς, η κατανάλωση ενέργειας του δέκτη όσο είναι απενεργοποιημένος είναι αμελητέα. Επίσης, η διαφορά στην κατανάλωση ανάμεσα στην λήψη και την κατάσταση αναμονής είναι τόσο μικρή που μπορεί να θεωρηθεί μηδενική.

Συνολικά, η ενέργεια E_{rx} που καταναλώνει ο δέκτης για τη λήψη ενός πακέτου n bits περιλαμβάνει την ενέργεια εκκίνησης (αν ο δέκτης ήταν απενεργοποιημένος) και μια ποσότητα ανάλογη του χρόνου του πακέτου. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της λήψης είναι αναγκαία η τροφοδότηση των κυκλωμάτων του δέκτη με μια σχετικά σταθερή ισχύ P_{rxElec} . Ο τελευταίος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος αποκωδικοποίησης E_{dec} , το οποίο επιβαρύνει κάθε bit του πακέτου. Επομένως, η εξίσωση που συνοψίζει τα παραπάνω είναι:

$$E_{rx} = t_{start} P_{start} + \frac{n}{R_{code}R} P_{rxElec} + n E_{dec}$$

Η ενέργεια που δαπανάται για την αποκωδικοποίηση είναι σχετικά περίπλοκη στην μοντελοποίηση, καθώς σχετίζεται με αρκετούς παράγοντες υλικού και συστήματος. Για παράδειγμα έχει διαφορά αν η αποκωδικοποίηση πραγματοποιείται σε επιφορτισμένο με αυτή την εργασία υλικό ή με χρήση λογισμικού στον μικροελεγκτή. Επιπρόσθετα, εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας, τον χρόνο αποκωδικοποίησης ανά bit (ο οποίος επηρεάζεται με τη σειρά του από την ταχύτητα επεξεργασίας και κατ' επέκταση τη χρήση τεχνικών όπως DVS), το μήκος K του χρησιμοποιούμενου κώδικα και άλλες παραμέτρους

3.2 Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων

Κατά το σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, υπάρχουν πολλοί σημαντικοί παράγοντες, οι οποίοι θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Μερικοί από αυτούς, είναι το περιβάλλον

στο οποίο θα τοποθετηθεί το δίκτυο, οι περιορισμοί στο υλικό, η ανοχή σε σφάλματα και το κόστος παραγωγής. Ένας όμως από τους σημαντικότερους παράγοντες, αποτελεί η διαχείριση των ενεργειακών πόρων των κόμβων των αισθητήρων, οι οποίοι απαρτίζουν αυτά τα δίκτυα.

Κάθε κόμβος σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, είναι εξοπλισμένος με μία πηγή ενέργειας, η οποία συνήθως είναι μία μικρής χωρητικότητας μπαταρία. Κάθε αισθητήρας, καταναλώνει αρκετή ενέργεια προκειμένου να πραγματοποιήσει τις λειτουργίες του. Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν την παρακολούθηση του περιβάλλοντός τους, την παραγωγή δεδομένων, κ.α.. Ένα μεγάλο βέβαια ποσοστό ενέργειας, καταναλώνεται κατά την αποστολή και λήψη δεδομένων από έναν άλλο κόμβο.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, εάν ένας κόμβος δεν έχει πλέον ενέργεια για να λειτουργήσει, τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει στη δυσλειτουργία ή ακόμα και στην κατάρρευση ολόκληρου του δικτύου. Συνεπώς, η σωστή διαχείριση της ενέργειας είναι υψίστης σημασίας και αποτελεί κρίσιμο κομμάτι στο σχεδιασμό και στη λειτουργία του δικτύου .

Οι ερευνητές στον τομέα αυτό, κατευθύνονται κυρίως προς 3 κατευθύνσεις. Η μία κατεύθυνση είναι το πως μπορεί ένας αισθητήρας να καταναλώνει όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια. Ο τομέας αυτός, ασχολείται κυρίως με την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης με κύριο σκοπό τους τη διατήρηση της ενέργειας. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό δε λύνεται οριστικά το πρόβλημα, καθώς οι αλγόριθμοι αυτοί, απλά μπορούν να καθυστερήσουν την κατάρρευση του δικτύου.[56]

Η δεύτερη κατεύθυνση, αφορά το πως μπορεί η μπαταρία κάθε αισθητήρα να επαναφορτίζεται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια ή η αιολική ενέργεια. Βέβαια, εδώ τίθενται αρκετοί περιορισμοί ως προς το περιβάλλον λειτουργίας του δικτύου αλλά και ως προς τη διαθεσιμότητα αυτών των πηγών ενέργειας, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του. Για παράδειγμα, αν έχει δημιουργηθεί ένα δίκτυο αισθητήρων, το οποίο βασίζεται στην επαναφόρτιση με ηλιακή ενέργεια, και το δίκτυο αυτό έχει αναπτυχθεί σε περιοχή, στην οποία υπάρχει ηλιοφάνεια 8 μήνες το χρόνο, τότε θα υπάρχει πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου τους υπόλοιπους 4 μήνες.

Τέλος, τρίτη πολύ σημαντική κατεύθυνση, είναι η δημιουργία ασύρματων επαναφορτιζόμενων δικτύων, στα οποία η μεταφορά ενέργειας στους κόμβους γίνεται με ασύρματο

τρόπο.

3.3 Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας

Η φράση «ασύρματη μεταφορά ενέργειας», αναφέρεται στη διαδικασία εκείνη, κατά την οποία μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια από μία πηγή σε μία συσκευή χωρίς τη χρήση καλωδίων ή αγωγών. Είναι ένας γενικός όρος, ο οποίος αναφέρεται σε έναν αριθμό διαφορετικών τεχνολογιών μετάδοσης ισχύος, που χρησιμοποιούν χρονικώς μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Το 1826, ο André-Marie Ampère ανέπτυξε το νόμο του Αμπέρ, όπου δείχνει ότι το ηλεκτρικό ρεύμα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο. Μετά από 5 χρόνια, το 1831, ο Michael Faraday, ανέπτυξε το νόμο επαγωγής Faraday, ο οποίος περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική δύναμη που προκαλείται σε έναν αγωγό, από μία χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή. Το 1862, ο James Clerk Maxwell, χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες, καθώς και άλλες παρατηρήσεις, αποτελέσματα πειραμάτων και εξισώσεων πάνω στον ηλεκτρισμό, το μαγνητισμό και την οπτική, συνέθεσε μία θεωρία από την οποία απορρέουν οι εξισώσεις του Maxwell. Αυτό το σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων, αποτελεί τη βάση για το σύγχρονο ηλεκτρομαγνητισμό, συμπεριλαμβανομένης και της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1890, ο Νικόλαος Τέσλα, ήταν εκείνος ο οποίος πραγματοποίησε τα πρώτα πειράματα για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Έχοντας στο μυαλό του το όνειρο του για έναν κόσμο με Ελεύθερη Ενέργεια για όλους, πήγε στο Κολοράντο Σπρινγκς, όπου αναζήτησε μία τοποθεσία απομονωμένη για να διεξάγει τα πειράματά του. Στις αρχές του 1899, εξασφάλισε νέες επενδύσεις από έναν αριθμό πλούσιων προσωπικοτήτων, μεταξύ των οποίων και ο John Jacob Astor, και τελικά κατόρθωσε να δημιουργήσει τεχνητές αστραπές μήκους 40 μέτρων αλλά και να ανάψει λαμπτήρες και να θέσει σε λειτουργία συσκευές σε απόσταση δεκάδων χιλιομέτρων. Φεύγοντας από το Κολοράντο Σπρινγκς, γεμάτος αισιοδοξία κι ελπίδες, ο Τέσλα έγραφε στο ημερολόγιό του: «Η δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας διαμέσου του φυσικού περιβάλλοντος και σε μεγάλες αποστάσεις, θα δημιουργήσει ανεξάντλητες πηγές πλούτου και δύναμης, θέτοντας ακόμη και την ίδια την ηλιακή ενέργεια στην υπηρεσία του ανθρώπου».

Το 2007, επιστήμονες του MIT ανακοίνωσαν πως κατάφεραν να ανάψουν μια λάμπα των 60 watt, τροφοδοτώντας την με ενέργεια από μια ηλεκτρική πηγή, η οποία βρισκόταν σε απόσταση

μεγαλύτερη των 2 μέτρων από αυτήν και χωρίς φυσικά να υπάρξει οποιαδήποτε φυσική σύνδεση. Οι ερευνητές ονόμασαν το εγχείρημά τους «WiTricity» (από τις λέξεις Wireless και Electricity). Το πείραμα έγινε με δύο χάλκινα καλώδια, διαμέτρου 60 εκατοστών, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιήθηκε ως πομπός και είχε συνδεθεί στην παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ το άλλο ως δέκτης και τοποθετήθηκε 2 μέτρα μακριά, αφού πρώτα συνδέθηκε με τη λάμπα. Το πείραμα ήταν επιτυχές, αν και μόνο το 40% της εκπεμπόμενης ενέργειας κατάφερε να μεταφερθεί στη λάμπα. Σημειώνεται δε, ότι η λάμπα παρέμεινε αναμμένη ακόμη και όταν ανάμεσα σε αυτήν και τον πομπό τοποθετήθηκαν διάφορα φυσικά εμπόδια, όπως ξύλο, μέταλλο ή ακόμη και ηλεκτρονικές συσκευές. Σήμερα, οι προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση όλο και πληθαίνουν και έχουν επιτύχει την ασύρματη μεταφορά ενέργειας, έστω και για πολύ κοντινές αποστάσεις .[57]

3.4 Ασύρματη επαναφόρτιση δικτύων αισθητήρων

Η τεχνολογία ασύρματης φόρτισης, είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Οι σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα αυτό, καθώς και οι εξελίξεις σχετικά με τα υλικά των μπαταριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανοίγουν το δρόμο για νέες ευκαιρίες, οι οποίες αφορούν τον τρόπο διαχείρισης της ενέργειας στα δίκτυα αισθητήρων. Όσον αφορά το πρώτο κομμάτι, έρευνες έχουν δείξει ότι μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότητα μέχρι και 40% κατά τη μεταφορά 60 Watts ενέργειας σε απόσταση έως και 2 μέτρων. Όσον αφορά το δεύτερο κομμάτι, έχει βρεθεί ένα νέο υλικό για κατασκευή μπαταριών το οποίο επιτρέπει εξαιρετικά γρήγορη φόρτιση.

Αυτή η εξαιρετικά γρήγορη φόρτιση, παρατηρήθηκε σε σχετικά πειράματα που έγιναν με το LiFePO₄. Αποδείχθηκε λοιπόν ότι υιοθετεί και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των συμβατικών μπαταριών Li-ion και των υπερ-πυκνωτών, με αποτέλεσμα υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και να μπορεί να φορτιστεί μέχρι και 400C. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρόνος για μία πλήρης φόρτιση της μπαταρίας, συρρικνώνεται σε μόλις λίγα δευτερόλεπτα.[58]

Αυτές οι εξελίξεις, όπως είναι φυσικό, ανοίγουν το δρόμο για τα Ασύρματα Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων. Αυτά αποτελούνται από αισθητήρες κόμβους, οι οποίοι μπορούν να είναι είτε σταθεροί είτε κινητοί, καθώς επίσης και από κινητούς κόμβους οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την παροχή ενέργειας στους κόμβους αισθητήρες.

Στη συνέχεια, δίνονται ορισμένα πλεονεκτήματα χρήσης των Επαναφορτιζόμενων Δικτύων Αισθητήρων:

- Το θέμα της ενέργειας σε τέτοια δίκτυα θα μπορεί να διευθετηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και πιο αποδοτικά.
- Το θέμα της διαχείρισης της ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί παθητικά από την πλευρά των κόμβων, χωρίς το υπολογιστικό και επικοινωνιακό βάρος που προστίθεται από πολύπλοκους αλγορίθμους διαχείρισης της ενέργειας.
- Το κομμάτι της διαχείρισης της ενέργειας μπορεί να μελετηθεί και να σχεδιαστεί ανεξάρτητα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων.
- Δεν εξαρτάται η επαναφόρτιση του δικτύου από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως γίνεται στην περίπτωση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Σε αντίθεση με τις περιπτώσεις όπου έχει προταθεί η αντικατάσταση των μπαταριών σε κόμβους που έχουν ξεμείνει από ενέργεια, εδώ δεν απαιτείται κάτι σχετικό. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα που αφορά την αντικατάσταση των μπαταριών έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι κόμβοι δεν είναι πάντα προσβάσιμοι από τους ανθρώπους ή από robots σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ένα παράδειγμα είναι όταν το δίκτυο είναι τοποθετημένο στο βυθό της θάλασσας.
- Η τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας είναι φιλική προς το περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια ενδελεχής έρευνα για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που επιτυγχάνουν εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθώς και η

κατάταξή τους σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: Δομή του Δικτύου (Network Structure), Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model), βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based) και βασισμένα στην Αξιόπιστη Δρομολόγηση (Reliable Routing). Επικεντρωνόμαστε στις τεχνικές που χρησιμοποιούν αυτά τα πρωτόκολλα προκειμένου να δρομολογήσουν τα πακέτα, λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που καταναλώνουν και πώς επιτυγχάνουν την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

4.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υφιστάμενων εργασιών, καθώς και προσπάθειες που βρίσκονται σε εξέλιξη, για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτά τα πρωτόκολλα έχουν αναπτυχθεί με βάση τις ανάγκες κάθε εφαρμογής και την αρχιτεκτονική του κάθε δικτύου. Ωστόσο, υπάρχουν παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι η ενεργειακή απόδοση των πρωτοκόλλων που επηρεάζει άμεσα την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Υπάρχουν αρκετές έρευνες στη βιβλιογραφία σχετικά με πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός ερευνών για δίκτυα αισθητήρων, ή για αλγόριθμους δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια αναλυτική έρευνα με έμφαση στα πρωτόκολλα δρομολόγησης υψηλής ενεργειακής απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η έρευνά μας επικεντρώνεται σε ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και μπορεί να δώσει οδηγίες στους αναγνώστες για το πώς να επιλέξουν το καταλληλότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης για ενεργειακή απόδοση του δικτύου τους. Επιπλέον, η επισκόπηση αυτή αντανακλά την τρέχουσα κατάσταση για δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνοντας μια ολοκληρωμένη λίστα με πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν προταθεί πρόσφατα. Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ τους, με βάση τις κυριότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (επεκτασιμότητα, πολλαπλή διαδρομή, κινητικότητα, κατανάλωση ενέργειας, δρομολόγηση, είδος περιοδικού μηνύματος, αντοχή και ποιότητα).[59]

4.3 Επιλογή Πρωτοκόλλου στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι όχι μόνο να μεταδίδουν τα δεδομένα από μια πηγή σε έναν προορισμό, αλλά επίσης και να αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Ανάλογα με τις εφαρμογές, έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές και σχέδια στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η απόδοση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης εξαρτάται από την αρχιτεκτονική και το σχεδιασμό του δικτύου, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο, η λειτουργία του πρωτοκόλλου μπορεί να επηρεάσει την ενέργεια που δαπανάται για τη μετάδοση των δεδομένων.

Οι αρχικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών κόμβων προέρχονται κυρίως από ακαδημαϊκά ιδρύματα. Ωστόσο, την τελευταία δεκαετία, έχει εμφανιστεί μια σειρά από εμπορικές προσπάθειες (πολλές από τις οποίες βασίζονται σε κάποιες από τις παραπάνω ακαδημαϊκές), συμπεριλαμβανομένων των εταιρειών Crossbow, Sensoria, Worldsens, Dust Networks και Ember Corporation. Οι εταιρείες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα σε κάποιον να αγοράσει συσκευές έτοιμες για χρήση σε μια ποικιλία σεναρίων εφαρμογής, μαζί με διάφορα εργαλεία διαχείρισης για τον προγραμματισμό, τη συντήρηση, και την απεικόνιση των δεδομένων.

Παράλληλα με την ανάπτυξη του υλικού των κόμβων και προκειμένου να αναπτυχθούν ενεργειακά αποδοτικές λύσεις, έχει γίνει έρευνα στην ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης που απαιτούν λιγότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Η πιο απλή ιδέα είναι η μετάβαση του κόμβου σε χαμηλότερη λειτουργία όποτε είναι δυνατόν. Το πρόβλημα είναι ότι ο χρόνος και η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την μετάβαση σε υψηλότερη λειτουργία δεν είναι αμελητέα. Έτσι, απαιτούνται τεχνικές και πρωτόκολλα που θα εξετάσουν την ενεργειακή απόδοση και την μετάδοση πακέτων μέσω ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης και επομένως την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δαπανάται σε τρεις βασικές δραστηριότητες: τη σάρωση, την επεξεργασία δεδομένων και την επικοινωνία. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικοί και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη πρωτοκόλλων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επειδή η επικοινωνία των κόμβων είναι το κύριο στοιχείο της κατανάλωσης ενέργειας, η εν εξελίξει έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν τη λιγότερη δυνατή ενέργεια κατά τη

διάρκεια της επικοινωνίας των κόμβων.

Η πιθανή αποστολή των πρωτοκόλλων δεν είναι μόνο να βρουν τη χαμηλότερη ενεργειακή διαδρομή από μια πηγή σε έναν προορισμό, αλλά και τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Η συνεχής χρήση της χαμηλής ενεργειακά διαδρομής οδηγεί συχνά σε εξάντληση της ενέργειας των κόμβων κατά μήκος αυτής και μπορεί να οδηγήσει σε διχοτόμηση του δικτύου.

Υπάρχουν κάποιοι όροι που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και εδώ είναι οι πιο σημαντικές [60]:

- Ενέργεια ανά πακέτο. Ο όρος αυτός αναφέρεται στην ποσότητα της ενέργειας που δαπανάται κατά την αποστολή ενός πακέτου από μια πηγή σε έναν προορισμό.
- Ενέργεια και αξιοπιστία. Ο όρος αυτός αναφέρεται στον τρόπο που επιτυγχάνεται μια ανταλλαγή μεταξύ διαφορετικών απαιτήσεων μιας εφαρμογής. Σε ορισμένες εφαρμογές, τα γεγονότα έκτακτης ανάγκης μπορεί να δικαιολογήσουν μια αύξηση του κόστους της ενέργειας για την επιτάχυνση υποβολής τέτοιων γεγονότων ή για να αυξήσουν την επιτυχία μετάδοσης χρησιμοποιώντας πολλαπλά μονοπάτια.
- Διάρκεια ζωής του δικτύου. Δεν υπάρχει κανένας καθολικά αποδεκτός ορισμός για τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε πολλές περιπτώσεις, η διάρκεια ζωής του δικτύου αντιστοιχεί στο χρόνο, κατά τον οποίο ο πρώτος κόμβος εξαντλεί την ενέργειά του ή ένα ορισμένο ποσοστό των κόμβων του δικτύου μείνουν από ενέργεια, ή ακόμα όλοι οι κόμβοι μείνουν από ενέργεια. Σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι λογικό να μετρηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου από παραμέτρους για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως ο χρόνος, όταν το δίκτυο δεν μπορεί πλέον να αναμεταδώσει το βίντεο. *στόσο, η σημασία ενός WSN είναι να μπορεί να είναι σε λειτουργία και να είναι σε θέση να εκτελεί τα καθήκοντά του κατά τη διάρκεια χρήσης του. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι σημαντικό να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, που σημαίνει να αυξηθεί η βιωσιμότητα του δικτύου ή να παραταθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κόμβων. Η κοινή πρακτική σε δίκτυα είναι να χρησιμοποιούν τις συντομότερες διαδρομές για τη μεταφορά των πακέτων. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει τους κόμβους κατά μήκος της συντομότερης

διαδρομής σε γρήγορη κατανάλωση της ενέργειας που έχουν διαθέσιμη. Δεδομένου ότι σε ένα WSN κάθε κόμβος πρέπει να λειτουργεί ως συνδεδεμένος κρίκος για να προωθήσει κάποιο μήνυμα, αν κάποιοι κόμβοι μείνουν χωρίς ενέργεια πολύ νωρίτερα είναι πιθανό ότι οι άλλοι κόμβοι δεν θα είναι σε θέση να επικοινωνούν πια. Ως εκ τούτου, το δίκτυο θα αποσυνδεθεί, η κατανάλωση ενέργειας δεν θα είναι ισορροπημένη και η διάρκεια ζωής του δικτύου θα επηρεάζεται σοβαρά. Ένας συνδυασμός μεταξύ της επιλογής της συντομότερης διαδρομής και της επέκτασης της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι καταλληλότερη δρομολόγηση για να χρησιμοποιηθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου προσδιορίζεται με βάση τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του. Η κύρια κατανάλωση της ενέργειας οφείλεται στην μετάδοση και λήψη δεδομένων μεταξύ των κόμβων και των στοιχείων επεξεργασίας.

- Μέση κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η μετρική δείχνει τη μέση κατανάλωση της ενέργειας ανά κόμβο με την πάροδο του χρόνου στο δίκτυο, καθώς εκτελεί διάφορες λειτουργίες, όπως τη μετάδοση, λήψη, ανίχνευση και ομαδοποίηση των δεδομένων.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ένα ενεργειακό πρωτόκολλο πρέπει να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από ότι τα παραδοσιακά πρωτόκολλα. Αυτό σημαίνει ότι ένα πρωτόκολλο που θα λαμβάνει υπόψη το επίπεδο ενέργειας των κόμβων και επιλέγει διαδρομές που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου θεωρείται ως ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο.
- Συνολικός αριθμός κόμβων σε λειτουργία. Αυτή η μετρική δίνει μια ιδέα για την περιοχή κάλυψης του δικτύου.
- Συνολικός αριθμός των σημάτων δεδομένων που φτάνουν στο σταθμό βάσης. Αυτή είναι ισοδύναμη με την ενέργεια που εξοικονομείται από το πρωτόκολλο, αφού δε μεταδίδονται συνεχώς πακέτα δεδομένων τα οποία δεν απαιτούνται.
- Μέση καθυστέρηση πακέτου. Αυτή η μετρική υπολογίζεται ως ο μέσος όρος καθυστέρησης μια μονόδρομης μετάδοσης και της λήψης ενός πακέτου δεδομένων στην βάση. Αυτή μετρά τη χρονική ακρίβεια ενός πακέτου.
- Λόγος Παράδοσης Πακέτων. Υπολογίζεται ως ο λόγος του αριθμού των διακριτών πακέτων

που φτάνουν στην βάση προς τον αριθμό των πακέτων που αποστέλλονται από τον κόμβο. Αυτή υποδηλώνει την αξιοπιστία της παράδοσης των δεδομένων.

- Χρόνος μέχρι ο πρώτος κόμβος να σβήσει από ενέργεια. Ο χρόνος αυτός δείχνει τη διάρκεια που όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο είναι ενεργοί. Υπάρχουν πρωτόκολλα στα οποία ο πρώτος κόμβος του δικτύου μένει από ενέργεια νωρίτερα από ότι σε άλλα πρωτόκολλα, αλλά καταφέρνει να κρατήσει το δίκτυο λειτουργικό για περισσότερο χρονικό διάστημα.
- Ενέργεια που καταναλώνεται ανά γύρο. Αυτή η μετρική σχετίζεται με το συνολικό ποσό ενέργειας που δαπανάται στη δρομολόγηση μηνυμάτων σε ένα γύρο. Πρόκειται για ένα βραχυπρόθεσμο μέτρο σχεδιασμένο για να παρέχει ενεργειακή απόδοση του κάθε πρωτοκόλλου σε ένα γύρο.
- Αδράνεια Ακρόασης. Ένας κόμβος που είναι σε κατάσταση αδράνειας ακρόασης, που δεν στέλνει ή δεν λαμβάνει δεδομένα, μπορεί να εξακολουθεί να καταναλώνει σημαντική ποσότητα ενέργειας. Ως εκ τούτου, αυτός ο κόμβος δεν πρέπει να μείνει σε κατάσταση αναμονής ακρόασης, αλλά θα πρέπει να απενεργοποιηθεί.
- Μέγεθος πακέτου. Το μέγεθος πακέτου καθορίζει το χρόνο που διαρκεί η μετάδοση. Ως εκ τούτου, είναι αποτελεσματικό στην κατανάλωση ενέργειας. Το μέγεθος του πακέτου θα πρέπει να μειωθεί με το συνδυασμό διάφορων πακέτων σε ένα μεγάλο πακέτο ή με συμπίεση.
- Απόσταση. Η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη μπορεί να επηρεάσει τη ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή και λήψη πακέτων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να επιλέξουν τα συντομότερα μονοπάτια μεταξύ των κόμβων και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Η επιλογή των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένα πραγματικά κρίσιμο ζήτημα. Υπάρχουν διάφορες πολιτικές για την επιλογή της διαδρομής με υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η πιο γνωστή πολιτική ονομάζεται “συγκέντρωση κλήσεων”. Αυτή η πολιτική δρομολογεί τα νέα πακέτα σε φορτωμένες συνδέσεις. Το πλεονέκτημα αυτής είναι ότι ευνοεί τα πακέτα υψηλού εύρους ζώνης, αλλά το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι

δεν χρησιμοποιεί κάποιες ζεύξεις, μειώνοντας έτσι τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Η πολιτική εξισορρόπησης φορτίου, σε αντίθεση με αυτή, προσπαθεί να διαδώσει το φορτίο ομοιόμορφα μεταξύ των συνδέσμων. Αυτή η πολιτική αποφασίζει να δρομολογεί πακέτα σε μη φορτωμένες διαδρομές.

Μια τρίτη πολιτική, με τίτλο “πολιτική ελάχιστων βημάτων”, δρομολογεί ένα πακέτο στο μονοπάτι ελάχιστων-βημάτων που πληροί τις απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Αυτό το είδος της πολιτικής είναι χρήσιμο σε ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Η πολιτική εξισορρόπησης φορτίου είναι μια καλή πολιτική επίδοσης σε όλες τις τοπολογίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαφορά μεταξύ της εξισορρόπησης φορτίου και των πολιτικών δρομολόγησης με ελάχιστα βήματα είναι πολύ μικρή.

Επιπλέον, υπάρχουν μοντέλα για δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων. Δύο από αυτά συγκρίνονται στο [40]. Το πρώτο μεγιστοποιεί την ελάχιστη διάρκεια ζωής των κόμβων, ενώ το δεύτερο ελαχιστοποιεί τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [40] εξετάζουν την ενέργεια μετάδοσης και την ενέργεια του κυκλώματος που δαπανάται στη μετάδοση, καθώς και την ενέργεια του δέκτη. Η σύγκριση αποκαλύπτει ότι στο πρώτο μοντέλο προτιμάται η δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων, όταν ο λόγος της ενέργειας μετάδοσης προς την ενέργεια του κυκλώματος είναι χαμηλή και στο δεύτερο όταν αυτή η αναλογία είναι υψηλή. Για την εξισορρόπηση του φορτίου, το πρώτο σύστημα περιορίζει το εύρος της δρομολόγησης πολλαπλών βημάτων.

4.4 Εξοικονόμηση Ενέργειας με την Επιλογή της Βέλτιστης Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που συνδέονται στενά με το δυναμικό προγραμματισμό μπορεί να βασίζονται σε διαφορετική ανάλυση του δικτύου και αρχές θεωρίας στα συστήματα επικοινωνίας δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων της μέγιστης ροής, της συντομότερης διαδρομής και του ελάχιστου διαστήματος. Τα συστήματα βασισμένα στην συντομότερη διαδρομή δρομολόγησης υπολογίζουν τη συντομότερη διαδρομή από οποιοδήποτε κόμβο προς τον κόμβο προορισμό. Εάν το κόστος, αντί του μήκους, συνδέεται με κάθε σύνδεσμο, αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν επίσης να υπολογίζουν τις διαδρομές ελάχιστου κόστους. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορεί να

είναι κεντρικοποιημένοι ή κατανεμημένοι.

Ο συνήθης τρόπος δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η δρομολόγηση πακέτων στο μονοπάτι ελάχιστου κόστους από την πηγή μέχρι τον προορισμό. Σε περίπτωση που οι κόμβοι παράγουν δεδομένα συνεχώς και το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, τότε η δρομολόγηση των δεδομένων στις διαδρομές ελάχιστου κόστους μπορεί να υπερφορτώσει τις ασύρματες συνδέσεις προς τον σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό του εύρους ζώνης στο ασύρματο κανάλι, διαφορετικά, θα δρομολογούσε τα πακέτων πάνω από συνδέσεις με μεγάλη συμφόρηση. Αυτό θα οδηγούσε σε αύξηση της συμφόρησης, σε αυξημένη καθυστέρηση και σε απώλειες πακέτων, το οποίο με τη σειρά του θα προκαλούσε την αναμετάδοση των πακέτων, και θα αύξανε έτσι την κατανάλωση ενέργειας.

Ο αλγόριθμος Dijkstra, ο οποίος έχει πολυωνυμική πολυπλοκότητα, και ο αλγόριθμος Bellman-Ford, ο οποίος βρίσκει τη διαδρομή με το λιγότερο αριθμό βημάτων είναι οι δύο πολύ γνωστοί και καλά καθορισμένοι αλγόριθμοι δρομολόγησης για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής.

4.5 Ελαχιστοποίηση των Επιβαρύνσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η επιβάρυνση είναι μια σημαντική συνιστώσα της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων σε ένα WSN. Η αμέλεια της επιβάρυνσης σε αποφάσεις ενεργειακής δρομολόγησης μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη χρήση της ενέργειας. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης για την εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται, σε κάθε βήμα μετάδοσης δεδομένων μέσω του ασύρματου δικτύου. Η χρήση μικρότερων διαδρομών πολλαπλών βημάτων εμφανίζεται ως μια πιο συμφέρουσα λύση, αν υπολογίζεται η ενέργεια μετάδοσης μόνο ως το κόστος επικοινωνίας.

Ωστόσο, λόγω άλλων δραστηριοτήτων κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων, όπως, η λήψη έμμεσων μηνυμάτων και η σάρωση καταναλώνεται σημαντική ενέργεια, σε ορισμένα μοντέλα διάχυσης που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία . Ως εκ τούτου, τα πολλαπλά βήματα μετάδοσης δεν είναι μερικές φορές επιθυμητά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Πρόσφατη έρευνα επικεντρώθηκε στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης στα ασύρματα δίκτυα

αισθητήρων λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως, την ενέργεια που καταναλώνεται στην σάρωση, υπολογίζοντας τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται, την αποστολή μηνυμάτων καθώς και τη μετάδοση δεδομένων σε κάθε βήμα στο δίκτυο.

4.6 Παράγοντες που Επηρεάζουν τον Σχεδιασμό Πρωτοκόλλων Εξοικονόμησης Ενέργειας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παρά τις αναρίθμητες εφαρμογές τους, έχουν διάφορους περιορισμούς που αφορούν, κυρίως, τα περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, την περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ και το περιορισμένο εύρος ζώνης των ασύρματων συνδέσεων μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Ένας από τους πιο σημαντικούς τους στόχους είναι η επικοινωνία δεδομένων ενώ παράλληλα προσπαθούν να συμβάλουν στη μακροβιότητα του δικτύου και να αποκλείσουν την διακοπή σύνδεση με τη χρήση τεχνικών διαχείρισης της ενέργειας. Ο σχεδιασμός των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να υπολογιστούν για να μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματική επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι οι παρακάτω[59]:

- (a) Τοποθέτηση Κόμβων: Πρόκειται για μια λειτουργία που επηρεάζει την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και μπορεί να είναι είτε ντετερμινιστική ή τυχαία.
- (b) Ετερογένεια Κόμβων: Η ύπαρξη ενός ετερογενούς συνόλου αισθητήρων δημιουργεί πολλά τεχνικά προβλήματα που σχετίζονται με την δρομολόγηση των δεδομένων τα οποία και πρέπει να ξεπεραστούν.
- (c) Μοντέλο Αναφοράς Δεδομένων: Η ανίχνευση των δεδομένων, η μέτρηση και η αναφορά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εξαρτάται από την εφαρμογή και την κρισιμότητα των δεδομένων. Η αναφορά των στοιχείων μπορεί να είναι με βάση το χρόνο (συνεχής), το γεγονός (event-driven), το ερώτημα ή υβριδική.
- (d) Κατανάλωση Ενέργειας χωρίς Απώλεια Ακρίβειας: Σε αυτή την περίπτωση, οι μηχανισμοί ενεργειακής απόδοσης επικοινωνίας και επεξεργασίας δεδομένων είναι περισσότερο από

αναγκαία.

- (e) **Επεκτασιμότητα:** Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να είναι επεκτάσιμα ώστε να ανταποκρίνονται σε διάφορα γεγονότα, π.χ. σε μια τεράστια αύξηση των κόμβων αισθητήρων στο δίκτυο.
- (f) **Δυναμική Δικτύου:** Είναι απαραίτητο σε πολλές εφαρμογές να ληφθεί υπόψη η κινητικότητα των κόμβων αισθητήρων, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες από τις αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί υποθέτουν ότι οι κόμβοι αισθητήρων είναι στατικοί.
- (g) **Ανοχή Σφαλμάτων:** Το συνολικό έργο του δικτύου αισθητήρων δεν πρέπει να επηρεάζεται από την αστοχία κάποιων κόμβων αισθητήρων.
- (h) **Συνδεσιμότητα:** Η συνδεσιμότητα των κόμβων αισθητήρων εξαρτάται από την κατανομή των κόμβων στο χώρο.
- (i) **Μέσο Μετάδοσης:** Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με μετάδοση πληροφορίας με πολλαπλά βήματα, οι κόμβοι συνδέονται μέσω του ασύρματου μέσου. Μια προσέγγιση σχεδιασμού MAC για δίκτυα αισθητήρων είναι η χρήση πρωτοκόλλων TDMA που εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα CSMA (π.χ. IEEE 802.11).
- (j) **Κάλυψη:** Η περιοχή κάλυψης για κάθε αισθητήρα είναι περιορισμένη σε εύρος και σε ακρίβεια, το δίκτυο δηλαδή μπορεί να καλύψει μόνο ένα περιορισμένο φυσικό χώρο.
- (k) **Ποιότητα Υπηρεσίας:** Τα δεδομένα πρέπει να παραδοθούν μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, σε έναν αριθμό εφαρμογών, η διατήρηση της ενέργειας, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διάρκεια ζωής του δικτύου, θεωρείται σχετικά πιο σημαντική από την ποιότητα των δεδομένων που αποστέλλονται. Ως εκ τούτου, τα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να τηρούν αυτή την απαίτηση.
- (l) **Συνάθροιση Δεδομένων:** Η συνάθροιση δεδομένων είναι ο συνδυασμός δεδομένων από διαφορετικές πηγές, σύμφωνα με μια συγκεκριμένη συνάρτηση συνάθροισης.

4.7 Τεχνικές Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να είναι πιο απαιτητική από ότι σε άλλα ασύρματα δίκτυα, όπως τα δίκτυα κατά περίπτωση ή τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για τους ακόλουθους λόγους:

- (a) Οι κόμβοι αισθητήρων απαιτούν προσεκτική διαχείριση των πόρων τους λόγω των

περιορισμών σε διαθέσιμη ενέργεια, επεξεργασία και αποθήκευση. • Σχεδόν όλες οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων απαιτούν τη ροή των δεδομένων από πολλαπλές πηγές σε ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης.

- (b) Οι απαιτήσεις σχεδιασμού ενός WSN εξαρτώνται από την εφαρμογή, επειδή τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσαρμόζονται στη συγκεκριμένη εφαρμογή.
- (c) Οι κόμβοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ως επί το πλείστον σταθεροί στην θέση τους μετά την εγκατάστασή τους, το οποίο οδηγεί σε προβλέψιμες και μη-συχνές τοπολογικές αλλαγές.
- (d) Η συλλογή δεδομένων είναι, υπό κανονικές συνθήκες, με βάση τη θέση, ως εκ τούτου, η γνώση της θέσης των κόμβων αισθητήρων είναι σημαντική. Η θέση των κόμβων αισθητήρων προσδιορίζεται με χρήση μεθόδων όπως ισχύ συχνότητας από μερικά γνωστά σημεία. Προς το παρόν, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) για το σκοπό αυτό. Συνιστάται να χρησιμοποιούνται λύσεις διαφορετικές από το GPS για τον εντοπισμό θέσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [45].
- (e) Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τα δεδομένα που συλλέγονται να είναι τα ίδια οπότε είναι απαραίτητο να αξιοποιηθούν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τη βελτίωση της ενέργειας και της αξιοποίησης του εύρους ζώνης.

4.7.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Δομή του Δικτύου (Network Structure)

Η δομή του δικτύου συχνά καθορίζεται από την ομοιομορφία των κόμβων. Οι κόμβοι σε ορισμένα δίκτυα τοποθετούνται ομοιόμορφα, είναι ο ένας ίσος με τον άλλο, ενώ σε άλλα δίκτυα υπάρχει διάκριση μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι ο τρόπος που οι κόμβοι συνδέονται και δρομολογούν τις πληροφορίες βασιζόμενοι στην υποκείμενη αρχιτεκτονική. Αυτό δημιουργεί δύο τύπους τοποθέτησης κόμβων, στο ίδιο επίπεδο σύνδεσης και σε ιεραρχίες. Ως εκ τούτου, τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως εξής:

- a) Επίπεδα Πρωτόκολλα: Όλοι οι κόμβοι του δικτύου παίζουν τον ίδιο ρόλο. Η επίπεδη αρχιτεκτονική του δικτύου παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της ελάχιστης επιβάρυνσης για τη διατήρηση της διαδρομής μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων.

b) **Ιεραρχικά Πρωτόκολλα:** Τα πρωτόκολλα αυτά ακολουθούν μια δομή του δικτύου για την επίτευξη της ενεργειακής απόδοσης, τη σταθερότητα και την επεκτασιμότητα. Σε αυτή την κατηγορία πρωτοκόλλων, οι κόμβοι του δικτύου οργανώνονται σε συμπλέγματα όπου ο κόμβος με την υψηλότερη στάθμη ενέργειας, για παράδειγμα, αναλαμβάνει το ρόλο του επικεφαλής του συμπλέγματος. Ο επικεφαλής του συμπλέγματος είναι υπεύθυνος για το συντονισμό των δραστηριοτήτων στο πλαίσιο του συμπλέγματος και τη διαβίβαση των πληροφοριών μεταξύ των συμπλεγμάτων. Η ομαδοποίηση των κόμβων έχει τη δυνατότητα να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Έχει υψηλή αναλογία παράδοσης δεδομένων και επεκτασιμότητας και μπορεί να ισορροπήσει την κατανάλωση ενέργειας. Οι κόμβοι γύρω από το σταθμό βάσης ή τον επικεφαλής καταναλώνουν πιο γρήγορα την διαθέσιμη ενέργεια τους από τους άλλους κόμβους. Η αποσύνδεση του δικτύου είναι ένα πρόβλημα, όπου ορισμένα τμήματα του δικτύου μπορεί να γίνουν απρόσιτα. Εάν υπάρχει μόνο ένας κόμβος που συνδέει ένα τμήμα του δικτύου με το υπόλοιπο και αποτυγχάνει, τότε αυτό το τμήμα θα αποκοπεί από το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου.

4.7.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στο Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model)

Το μοντέλο επικοινωνίας σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σχετίζεται με τον τρόπο που ακολουθείται η κύρια λειτουργία του πρωτοκόλλου για τη δρομολόγηση πακέτων στο δίκτυο. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορεί να παραδώσουν περισσότερα δεδομένα για μία δεδομένη ποσότητα ενέργειας. Επίσης, όσον αφορά το ποσοστό διάδοσης και χρήσης της ενέργειας τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να εκτελέσουν πολύ κοντά στο θεωρητικό βέλτιστο από σημείο-σε-σημείο και σε δίκτυα ανοικτής εκπομπής. Το πρόβλημα με αυτά τα πρωτόκολλα είναι ότι δεν έχουν υψηλή αναλογία παράδοσης για τα δεδομένα που αποστέλλονται σε έναν προορισμό. Έτσι, δεν εγγυώνται την παράδοση των δεδομένων. Τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- **Πρωτόκολλα βασισμένα στο Ερώτημα (Query-Based):** Οι κόμβοι προορισμού διαδίδουν ένα ερώτημα για δεδομένα από έναν κόμβο μέσω του δικτύου και ο κόμβος που έχει τα δεδομένα στέλνει, αυτά που ταιριάζουν με το ερώτημα, πίσω στον κόμβο.
- **Συνεκτικά και μη-Συνεκτικά Πρωτόκολλα (Coherent and Non-CoherentBased):** Στη συνεκτική δρομολόγηση, τα δεδομένα προωθούνται σε συναθροιστές μετά από μια

ελάχιστη επεξεργασία. Στη μη-συνεκτική διαδικασία, οι κόμβοι επεξεργάζονται τοπικά τα ανεπεξεργαστα δεδομένα πριν αποσταλούν σε άλλους κόμβους για περαιτέρω επεξεργασία.

- Πρωτόκολλα βασισμένα στην διαπραγμάτευση (Negotiation-Based): Χρησιμοποιούν τις διαπραγματεύσεις μετά-δεδομένων για να μειωθούν οι περιττές μεταδόσεις στο δίκτυο.

4.7.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based)

Τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν την αρχή ότι κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο διατηρεί πληροφορίες τοπολογίας και ότι η κύρια διαδικασία της λειτουργίας του πρωτοκόλλου βασίζεται στην τοπολογία του δικτύου. Τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως εξής:

- Πρωτόκολλα βασισμένα στην θέση (Location-based): Τα πρωτόκολλα αυτά μπορεί να επωφεληθούν από τις πληροφορίες θέσης, προκειμένου να αναμεταδώσουν τα δεδομένα που έλαβαν μόνο σε ορισμένες περιοχές και όχι σε ολόκληρο το WSN. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να βρουν μια διαδρομή από μια πηγή σε έναν προορισμό με ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων αισθητήρων. Έχουν περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης σε περίπτωση που οι κόμβοι είναι κινητοί. Επίσης, ένας κόμβος πρέπει να γνωρίζει ή να μάθει για τις θέσεις των άλλων κόμβων.
- Πρωτόκολλα βασισμένα σε κινητούς πράκτορες (Mobile Agent-based): Τα συστήματα κινητών πρακτόρων έχουν ως κύριο συστατικό ένα κινητό μέσο, το οποίο μετακινείται μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου για να εκτελέσει μια εργασία αυτόνομα και έξυπνα, με βάση τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα πρωτόκολλα αυτά μπορεί να παρέχουν στο δίκτυο επιπλέον ευελιξία, καθώς και νέες δυνατότητες σε αντίθεση με τις συμβατικές λειτουργίες του WSN που βασίζονται στο μοντέλο πελάτη-εξυπηρετητή.

4.7.4 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Αξιόπιστη Δρομολόγηση (Reliable Routing)

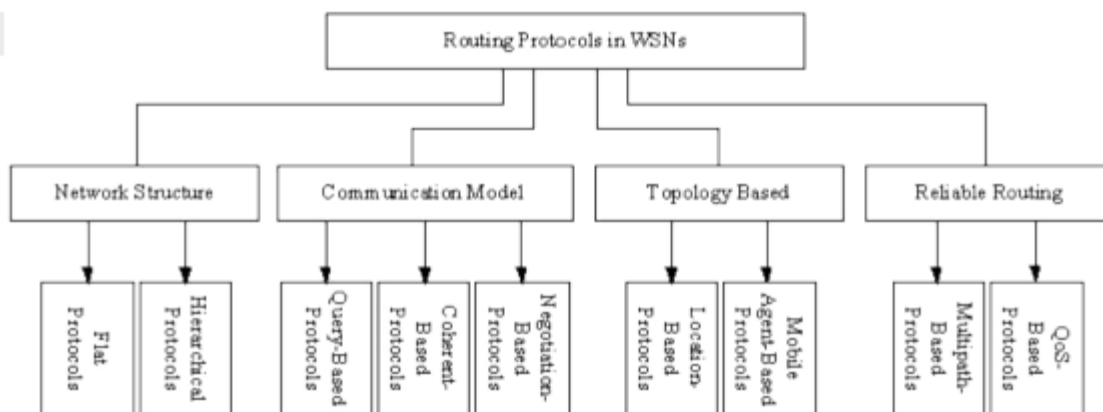
Τα πρωτόκολλα αυτά είναι πιο ανθεκτικά σε προβληματικές διαδρομές είτε με την εύρεση

εναλλακτικών διαδρομών ή πληρόντας ορισμένες παραμέτρους QoS, όπως η καθυστέρηση, η ενέργεια, και το εύρος ζώνης. Οι κόμβοι του δικτύου μπορεί να υποφέρουν το φόρτο της διατήρησης με χρήση πινάκων δρομολόγησης και μετρήσεων QoS σε κάθε κόμβο αισθητήρα. Τα πρωτόκολλα αυτά ταξινομούνται ως εξής:

- Πρωτόκολλα βασισμένα σε πολλαπλές διαδρομές (Multipath-Based): Επιτυγχάνουν την εξισορρόπηση του φορτίου και είναι πιο ανθεκτικά σε προβληματικές διαδρομές.
- Πρωτόκολλα βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας (QoS-based): Το δίκτυο θα πρέπει να ισορροπήσει μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ποιότητας της υπηρεσίας. Κάθε φορά που ο σταθμός βάσης θέλει δεδομένα από τους κόμβους στο δίκτυο, η μετάδοση θα πρέπει να καλύψει συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας.

4.8 Σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών δρομολόγησης

Το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που βασίζονται στην δομή του δικτύου είναι ο τρόπος που οι κόμβοι συνδέονται και ασκούν επιρροή για την δρομολόγηση των πληροφοριών. Για παράδειγμα, σε μια ιεραρχική δομή οι κόμβοι του χαμηλότερου επιπέδου μεταφέρουν την πληροφορία στο ανώτερο επίπεδο, με αποτέλεσμα την ισορροπημένη ενεργειακή δομή του δικτύου. Ωστόσο, στο μοντέλο επικοινωνίας, το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων είναι ο τρόπος που εκτελείται μια απόφαση δρομολόγησης, χωρίς να βασίζεται κυρίως στη δομή του δικτύου. Έτσι, για παράδειγμα μια καλά καθορισμένη τεχνική θεωρείται η διαπραγμάτευση μεταξύ των κόμβων πριν από τη μεταφορά των δεδομένων, για τη δρομολόγηση της πληροφορίας από την πηγή προς τον προορισμό.



Εικόνα 16: Κατηγοριοποίηση Πρωτοκόλλων στα ΑΔΑ.

Επιπλέον, υπάρχουν κάποια πρωτόκολλα που εκτός από το μοντέλο επικοινωνίας που χρησιμοποιούν για τη μετάδοση δεδομένων, λαμβάνουν υπόψη και την τοπολογία του δικτύου. Λειτουργούν χωρίς πίνακες δρομολόγησης, κατά τακτά χρονικά διαστήματα μεταδίδουν μηνύματα HELLO για να μπορούν οι γείτονες να γνωρίζουν τις θέσεις τους. Κάποια από τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν πράκτορες για να μεταφέρουν τα δεδομένα και να μειώσουν τις ενεργειακές δαπάνες των κόμβων. Τέλος, υπάρχει μια κατηγορία πρωτοκόλλων που εκτός της ενεργειακής απόδοσης τείνουν να παρέχουν αξιόπιστη δρομολόγηση δεδομένων. Αυτό το επιτυγχάνουν, είτε με την παροχή πολλαπλών διαδρομών από την πηγή στον προορισμό ή από την εφαρμογή QoS για την κύρια δραστηριότητα δρομολόγησης τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ NS2 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

5.1. Η χρησιμότητα του NS2

Ο NS2 Simulator (Έκδοση 2), είναι ένα ιδιαίτερα δημοφιλές εργαλείο προσομοίωσης καθοδηγούμενο από γεγονότα και είναι πολύ χρήσιμο στη μελέτη της δυναμικής φύσης των δικτύων επικοινωνίας.

Το πρόγραμμα NS2 προσφέρει την δυνατότητα προσομοίωσης ενσύρματων αλλά και ασύρματων λειτουργιών δικτύου και πρωτοκόλλων (όπως για παράδειγμα αλγορίθμους δρομολόγησης, πρωτόκολλο TCP,UDP). Σε γενικές γραμμές το εργαλείο NS2 προσφέρει στους χρήστες διάφορους τρόπους να καθορίσουν τέτοια δίκτυα και να τα προσομοιώσουν τις διάφορες συμπεριφορές τους

και λειτουργίες.

Το NS2 αποκτά όλο και περισσότερη δημοτικότητα στην έρευνα των δικτύων από το ξεκίνημα του το 1989. Προσφέρει στους χρήστες την δυνατότητα να δώσουν εκτελέσιμες εντολές τις οποίες το NS2 τις λαμβάνει ως είσοδο. Τέτοια αρχεία έχουν την κατάληξη .TCL και αποτελούν αρχεία script. Αφού, δημιουργηθεί ένα τέτοιο αρχείο στη συνέχεια ο χρήστης το εισάγει στο πρόγραμμα ώστε να σχεδιαστεί ο κατάλληλος γράφος και να δημιουργηθεί το γραφικό περιβάλλον του δικτύου.

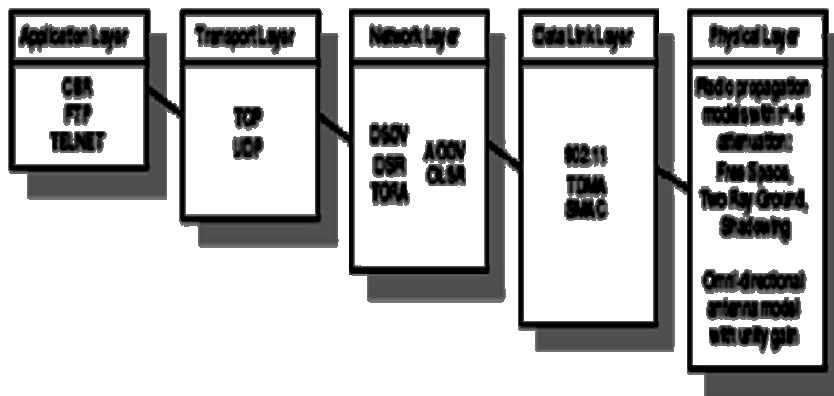
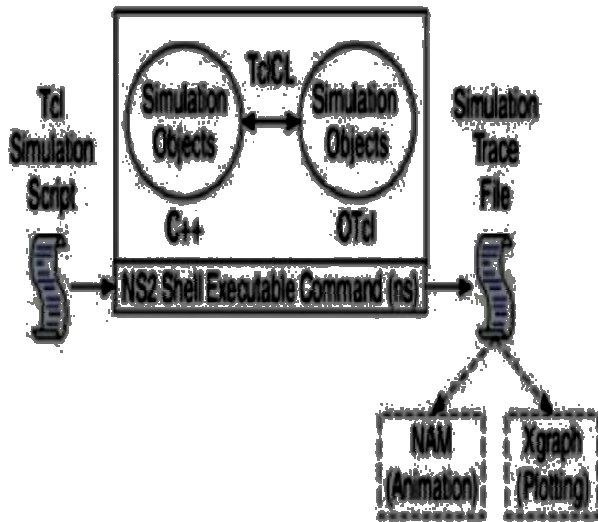
Το NS2 δέχεται δύο γλώσσες προγραμματισμού

A) την C++

B) την OTcl

Η γλώσσα προγραμματισμού C++ ορίζει τον εσωτερικό μηχανισμό (backend) των αντικειμένων της προσομοίωσης . Η γλώσσα OTcl εγκαθιστά και δημιουργεί την προσομοίωση, συναρμολογώντας και ρυθμίζοντας τα αντικείμενα καθώς και τα ξεχωριστά γεγονότα (frontend). Οι δύο γλώσσες προγραμματισμού C++ και OTcl ενώνονται μαζί και χρησιμοποιούν την TclCL. Ο σχεδιαστής δικτύου NAM είναι ένα εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για προβολή δικτύων και χρησιμοποιεί πραγματικά πακέτα.

Μετά την δημιουργία ενός αρχείου trace, scripting γλώσσες όπως η AWK και η PERL μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να υπολογιστούν οι διάφορες μετρικές της απόδοσης των δικτύων. Σε αυτή την περίπτωση η Pearl χρησιμοποιείται με σκοπό να υπολογίζει τον μέσο όρο της καθυστέρησης των πακέτων από άκρη σε άκρη, δηλαδή από τον κόμβο της πηγής μέχρι τον τελικό κόμβο. Η Pearl είναι μία γλώσσα προγραμματισμού γενικού σκοπού και αρχικά δημιουργήθηκε για τον χειρισμό του κειμένου και σήμερα χρησιμοποιείται παγκοσμίως σε μια σειρά από λειτουργίες που συμπεριλαμβάνουν συστήματα διαχείρισης, κατασκευή ιστοσελίδων, προγραμματισμό δικτύων.



Εικόνα 17 - Χρήση διαθέσιμων πρωτοκόλλων στο NS2

5.2 - Μεθοδολογία - Σύστημα Εφαρμογής

Στην εργασία μας χρησιμοποιήσαμε το λειτουργικό σύστημα το λειτουργικό **LINUX – Ubuntu** και για την δημιουργία της προσομοίωσης χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό NS2.

Δημιουργήσαμε 3 τύπους δικτύων.

Το πρώτο ήταν ένα δίκτυο δακτυλίου με 6 κόμβους και το δεύτερο ένα δίκτυο αστέρα με 10 κόμβους που συνδέονται σε ένα Sink.

Στην συνέχεια ένα δίκτυο WSN 5 κόμβων

Και στα 3 δίκτυα δημιουργήσαμε τα ανάλογα TCL scripts που περιγράφονται παρακάτω.

Και στα 3 δίκτυα βάλαμε του κόμβους να στέλνουν μηνύματα TCP και UDP μεταξύ τους.

Στο πρώτο δίκτυο ορίσαμε δύο κόμβους να στέλνουν μηνύματα ο ένας στον άλλο, πιο συγκεκριμένο n0 και n6. Για να μελετήσουμε και την συμπεριφορά του δικτύου σταματάμε τους κόμβους n1 και n2 ώστε να σπάσουμε ουσιαστικά τον δακτύλιο και να αναγκάσουμε το δίκτυο να στέλνει μηνύματα σε μεγαλύτερη διαδρομή.

Στο δεύτερο δίκτυο ορίσαμε όλοι οι κόμβοι να επικοινωνούν με το Sink.

Στο τρίτο έχουμε ένα WSN 5 κόμβων όπου μελετούμε τελικά και την ενέργεια που καταναλώνει.

Τα μηνύματα που μεταφέρουμε είναι μεγάλου όγκου και πολλαπλών εφαρμογών που εφαρμόζουν πολιτικές ασφαλείας όπως FTP αλλά και άλλες με μειωμένη ασφάλεια όπως CBR/UDP π.χ. βίντεο και εικόνα.

Κώδικες TCL

Για το πρώτο δίκτυο – Δίκτυο δακτυλίου έχουμε:

```
#Create a simulator object
set ns [new Simulator]

#Open the nam trace file
set nf [open out.nam w]
$ns namtrace-all $nf
set tf [open out.tr w]
$ns trace-all $tf
```

```

#Define a 'finish' procedure
proc finish {} {
global ns nf tf
$ns flush-trace
#Close the trace file
close $nf
close $tf
exit 0
}

#Create nodes
set n0 [$ns node]
set n1 [$ns node]
set n2 [$ns node]
set n3 [$ns node]
set n4 [$ns node]
set n5 [$ns node]
set n6 [$ns node]

#Create links between the nodes
$ns duplex-link $n0 $n1 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n1 $n2 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n2 $n3 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n3 $n4 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n4 $n5 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n5 $n6 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n6 $n0 1.5Mb 10ms DropTail

#Create a UDP agent and attach it to node n0
set udp0 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $n0 $udp0

# Create a CBR traffic source and attach it to udp0
set cbr0 [new Application/Traffic/CBR]

```

```

$cbr0 set packetSize_ 500
$cbr0 set interval_ 0.005
$cbr0 attach-agent $udp0

set null0 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $n3 $null0

$ns connect $udp0 $null0

#Schedule events for the CBR agents
$ns at 0 "$cbr0 start"
$ns at 4.5 "$cbr0 stop"

$ns rtmodel-at 1.0 down $n1 $n2
$ns rtmodel-at 2.0 up $n1 $n2

#we setup to dynamic or static
$ns rproto Static

$ns at 5.0 "finish"
#Run the simulation
$ns run

```

Στην περίπτωση μηνυμάτων με FTP και UDP και δημιουργήσαμε τον παρακάτω κώδικα

Για το δεύτερο δίκτυο - Δίκτυο αστέρα έχουμε:

```

#Create a simulator object
set ns [new Simulator]

#Open the nam trace file

```

```

set nf [open out.nam w]
$ns namtrace-all $nf
set tf [open out.tr w]
$ns trace-all $tf

#Define a 'finish' procedure
proc finish {} {
    global ns nf tf
    $ns flush-trace
    #Close the trace file
    close $nf
    close $tf
    #Execute nam on the trace file
    exec nam out.nam &
    exit 0
}

#Create nodes
set n20 [$ns node]
for {set i 0} {$i < 10} {incr i} {
    set n($i) [$ns node]
}

#Create links between the nodes
for {set i 0} {$i < 10} {incr i} {
    $ns duplex-link $n($i) $n20 1Mb 10ms DropTail
}

#Create a UDP agents and attach
for {set i 0} {$i < 10} {incr i} {
set udp($i) [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $n($i) $udp($i)

```

```

}

# Create a CBR traffic source and attach it to udp0
for {set i 0} {$i < 10} {incr i} {
set cbr($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr($i) set packetSize_ 500
$cbr($i) set interval_ 0.005
$cbr($i) attach-agent $udp($i)
}

set null0 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $n20 $null0

for {set i 0} {$i < 10} {incr i} {
$ns connect $udp($i) $null0
}

#Schedule events for the CBR agents
for {set i 0} {$i < 10} {incr i} {
$ns at 0 "$cbr($i) start"
$ns at 4.5 "$cbr($i) stop"
}

#we setup to dynamic
$ns rtproto DV

#Call the finish procedure after 5 seconds simulation time
$ns at 5.0 "finish"

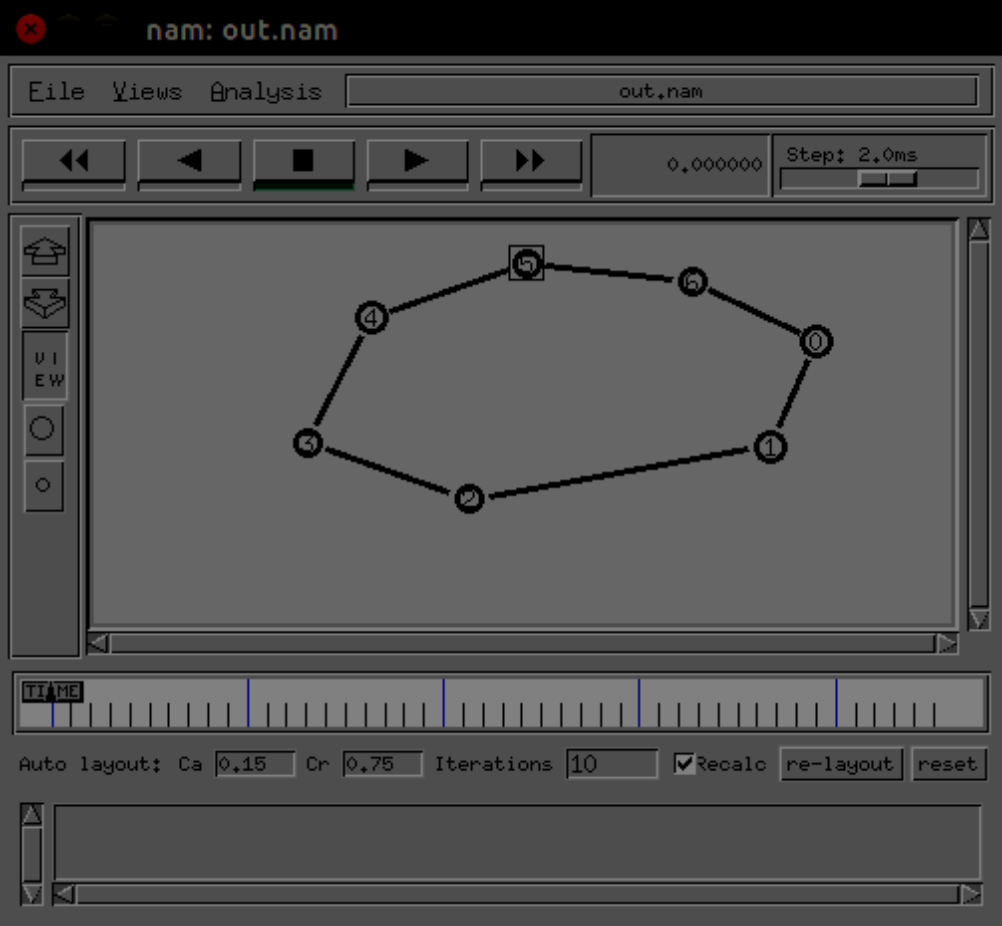
#Run the simulation
$ns run

```

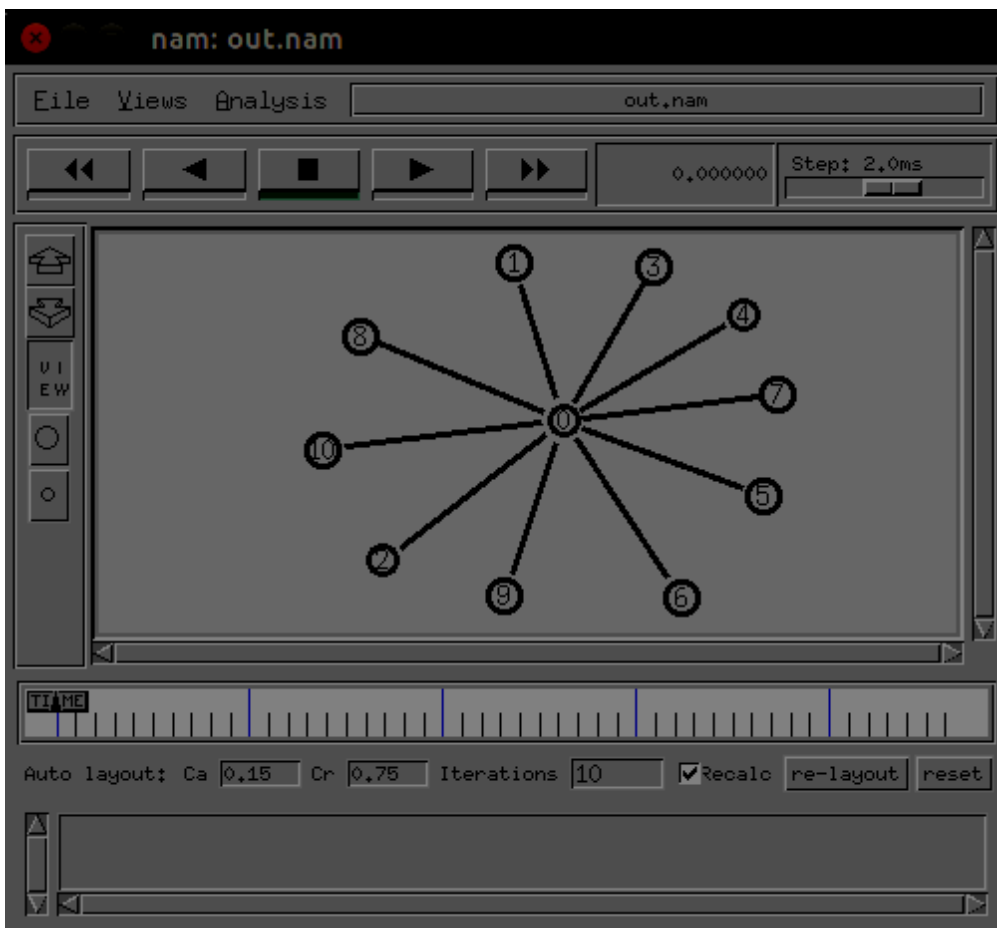


Με χρήση του nam που μας δείχνει την δομή του δικτύου αλλά και την κίνησή του πήραμε τα παρακάτω δίκτυα:

Το δίκτυο του δακτυλίου



Το δίκτυο του αστέρα



Τα παρακάτω αρχεία μας τα τρέξαμε και τελικά πήραμε σειρά αποτελεσμάτων που φαίνονται παρακάτω.

Δίκτυο WSN

Ο κώδικας για το δίκτυο που αναφέρουμε είναι ο παρακάτω:

```
set ns [new Simulator]

set nf [open out.nam w]
$ns namtrace-all $nf
set tf [open out.tr w]
```

```

$ns trace-all $tf

set n0 [$ns node]
set n1 [$ns node]
set n2 [$ns node]
set n3 [$ns node]
set n4 [$ns node]
set n5 [$ns node]
set n6 [$ns node]

$ns duplex-link $n0 $n1 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n1 $n2 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n2 $n3 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n3 $n4 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n4 $n5 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n5 $n6 1.5Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link $n6 $n0 1.5Mb 10ms DropTail

set udp0 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $n0 $udp0

set cbr0 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr0 set packetSize_ 500
$cbr0 set interval_ 0.005
$cbr0 attach-agent $udp0

set null0 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $n3 $null0

$ns connect $udp0 $null0

proc finish {} {
global ns nf tf
$ns flush-trace

```



```
close $nf
close $tf
exit 0
}
```

```
$ns at 0 "$cbr0 start"
```

```
$ns at 4.5 "$cbr0 stop"
```

```
$ns rtmodel-at 1.0 down $n1 $n2
```

```
$ns rtmodel-at 2.0 up $n1 $n2
```

```
$ns rtproto DV
```

```
$ns at 5.0 "finish"
```

```
$ns run
```

Το δίκτυο αυτό μας δίνει τα παρακάτω:

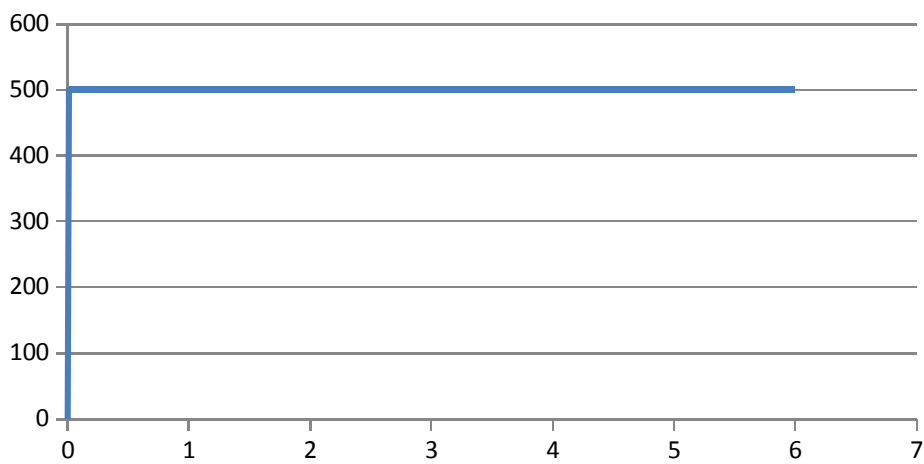


Αποτελέσματα

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα που δείχνει τι λαμβάνει ο κόμβος n3 στο πρώτο δίκτυο καθώς και ο κόμβος ο κόμβος n2 για να δούμε την στιγμή που χάνεται.

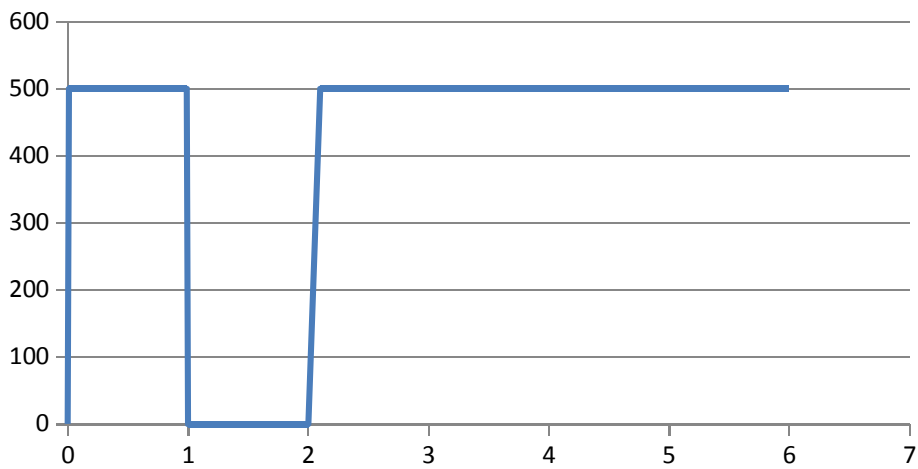
Για τον κόμβο n3 φαίνεται πως λαμβάνει bytes σε σχέση με τον χρόνο :

n3



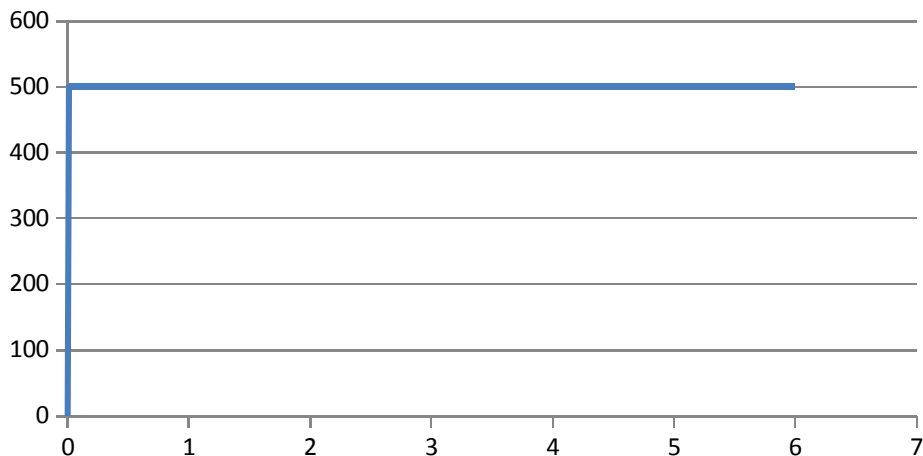
Για τον κόμβο n1 έχουμε

n1



Στο δεύτερο δίκτυο έχουμε τον κόμβο n20 τι λαμβάνει σε σχέση με τον χρόνο

n20



Παρακάτω παραθέτουμε τα αρχεία των reports μέσω των οποίων μπορούμε να τρέξουμε τα δίκτυα μας.

Τα αρχεία μας είναι:

Αρχείο	Περιγραφή
test1.tcl	Δίκτυο Δακτυλίου
test2.tcl	Δίκτυο Αστέρα
test3.tcl	Αρχείο WSN

5.3 Τελικό Ενεργειακό Μοντέλο

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάστηκε τελικό ενεργειακό μοντέλο με 10 κόμβους ασύρματους σε τυχαίες θέσεις που κάνουν αλλαγές σε τυχαίους χρόνους και μετρούμε την ενεργειακή απόδοση.

Το μοντέλο έχει τον παρακάτω κώδικα:

```
# Define options
set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# channel type
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
set val(netif) Phy/WirelessPhy ;# network interface type
set val(mac) Mac/802_11 ;# MAC type
set val(ifq) Queue/DropTail ;# interface queue type
set val(ll) LL ;# link layer type
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ;# antenna model
```

```

set val(ifqlen)    50           ;# max packet in ifq
set val(nn)        10           ;# number of mobilenodes
set val(rp)        DSDV         ;# routing protocol
set val(x)         500          ;# X dimension of topography
set val(y)         400          ;# Y dimension of topography
set val(stop)      150         ;# time of simulation end

set ns      [new Simulator]
set tracefd [open simple-dsdv.tr w]
set windowVsTime2 [open win.tr w]
set namtrace [open simwrls.nam w]

$ns trace-all $tracefd

$ns namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

# set up topography object
set topo [new Topography]

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

create-god $val(nn)

#
# Create nn mobilenodes [$val(nn)] and attach them to the channel.
#

# configure the nodes
$ns node-config -adhocRouting $val(rp) \
  -llType $val(ll) \
  -macType $val(mac) \
  -ifqType $val(ifq) \
  -ifqLen $val(ifqlen) \
  -antType $val(ant) \
  -propType $val(prop) \

```

```

-phyType $val(netif) \
-channelType $val(chan) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace OFF \
-movementTrace ON \
-energyModel "EnergyModel" \
-rxPower 1.0 \
-txPower 1.0 \
-initialEnergy 1000 \
-sleepPower .5 \
-transitionPower .2 \
-transitionTime .001 \
-idlePower .1

$ns set WirelessNewTrace_ ON
for {set i 0} {$i < $val(nn) } { incr i } {
  set node_($i) [$ns node]
}

# Provide initial location of mobilenodes
$node_(0) set X_ 5.0
$node_(0) set Y_ 5.0
$node_(0) set Z_ 0.0

$node_(1) set X_ 490.0
$node_(1) set Y_ 285.0
$node_(1) set Z_ 0.0

$node_(2) set X_ 150.0
$node_(2) set Y_ 240.0
$node_(2) set Z_ 0.0

$node_(2) set X_ 150.0
$node_(2) set Y_ 240.0

```

\$node_(2) set Z_ 0.0

\$node_(3) set X_ 150.0

\$node_(3) set Y_ 240.0

\$node_(3) set Z_ 0.0

\$node_(4) set X_ 150.0

\$node_(4) set Y_ 340.0

\$node_(4) set Z_ 0.0

\$node_(5) set X_ 50.0

\$node_(5) set Y_ 240.0

\$node_(5) set Z_ 0.0

\$node_(6) set X_ 50.0

\$node_(6) set Y_ 40.0

\$node_(6) set Z_ 0.0

\$node_(7) set X_ 180.0

\$node_(7) set Y_ 140.0

\$node_(7) set Z_ 0.0

\$node_(8) set X_ 100.0

\$node_(8) set Y_ 100.0

\$node_(8) set Z_ 0.0

\$node_(9) set X_ 100.0

\$node_(9) set Y_ 20.0

\$node_(9) set Z_ 0.0

Generation of movements

\$ns at 10.0 "\$node_(0) setdest 250.0 250.0 3.0"

\$ns at 15.0 "\$node_(1) setdest 45.0 285.0 5.0"

\$ns at 110.0 "\$node_(2) setdest 480.0 300.0 5.0"

```

$ns at 115.0 "$node_(3) setdest 120.0 120.0 3.0"
$ns at 125.0 "$node_(4) setdest 140.0 122.0 5.0"
$ns at 140.0 "$node_(5) setdest 310.0 340.0 5.0"
$ns at 154.0 "$node_(0) setdest 120.0 420.0 3.0"
$ns at 158.0 "$node_(1) setdest 42.0 205.0 5.0"
$ns at 119.0 "$node_(0) setdest 100.0 170.0 5.0"

# Set a TCP connection between node_(0) and node_(1)
set tcp [new Agent/TCP/Newreno]
$tcp set class_ 2
set sink [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $node_(0) $tcp
$ns attach-agent $node_(1) $sink
$ns connect $tcp $sink
set ftp [new Application/FTP]
$ftp attach-agent $tcp
$ns at 10.0 "$ftp start"

# Define node initial position in nam
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
# 30 defines the node size for nam
$ns initial_node_pos $node_($i) 30
}

# Telling nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
$ns at $val(stop) "$node_($i) reset";
}

# ending nam and the simulation
$ns at $val(stop) "$ns nam-end-wireless $val(stop)"
$ns at $val(stop) "stop"
$ns at 150.01 "puts \"end simulation\" ; $ns halt"

```

```

proc stop {} {
    global ns tracefd namtrace
    $ns flush-trace
    close $tracefd
    close $namtrace
    exec nam simwrls.nam &
}

$ns run

```

Με την εκτέλεση του μοντέλου πήραμε διάφορα αποτελέσματα

Πιο συγκεκριμένα είχαμε σε μία από τις εκτελέσεις το παρακάτω αποτέλεσμα:

```

s 0.032821055 _1_ RTR --- 0 message 32 [0 0 0 0] [energy 1000.000000 ei 0.000 es 0.000 et 0.000 er 0.000] ----- [1:255
-1:255 32 0]
N -t 0.033057 -n 2 -e 999.995974
s 0.178591360 _2_ RTR --- 1 message 32 [0 0 0 0] [energy 999.995974 ei 0.003 es 0.000 et 0.000 er 0.001] ----- [2:255
-1:255 32 0]
N -t 0.178927 -n 0 -e 999.981387
N -t 0.178928 -n 1 -e 999.980739
s 1.113402886 _0_ RTR --- 2 message 32 [0 0 0 0] [energy 999.981387 ei 0.018 es 0.000 et 0.000 er 0.001] ----- [0:255
-1:255 32 0]
N -t 1.113639 -n 2 -e 999.886620
M 10.00000 0 (5.00, 5.00, 0.00), (250.00, 250.00), 3.00
s 10.000000000 _0_ AGT --- 3 tcp 40 [0 0 0 0] [energy 999.887268 ei 0.111 es 0.000 et 0.001 er 0.001] ----- [0:0 1:0 32 0]
[0 0] 0 0
r 10.000000000 _0_ RTR --- 3 tcp 40 [0 0 0 0] [energy 999.887268 ei 0.111 es 0.000 et 0.001 er 0.001] ----- [0:0 1:0 32 0]
[0 0] 0 0

```

Όπως βλέπουμε παίρνουν το συνολικό ποσό ενέργεια που χρειάζεται για τις μεταφορές των πακέτων στις αποστάσεις που πραγματοποιούνται.

Μπορούν να γίνουν διάφορες δοκιμές τόσο σε grid μοντέλα , σε ασύρματα κ.α. και με παρόμοιο τρόπο να λάβουμε αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1].Θεολόγου Μ. Ε., Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών Αθήνα, Μάρτιος 2009, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [2].Κωττής, Χ. Καυάλης, «Κεραίες και Ασύρματες Ζεύξεις», Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2003.
- [3].Andrea Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University, 2005.
- [4].Omeni , O.C, Eljamaly (2007) , Energy Efficient Medium Access Protocol for Wirelsss Medical Body Area Sensor Networks
- [5].Dargie, W. and Poellabauer, C. (2010) Fundamentals of Wireless Sensor Networks:Theory and Practice John Wiley & Sons
- [6].Conti, Marco (2003) Body, Personal, and Local Ad Hoc Wireless Netwotks, CRC Press< ISBN
- [4] I.F. Akyildiz et al., "Wireless sensor networks: A survey,"Computer Networks, vol. 38, Issue 4, pp. 393-422,2002.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks,"IEEE Communications Magazine,vol. 40, Issue. 8, pp. 102-114,2002.
- [6] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks,"Proceedings of the ACM MobiCom'00,pp. 56-57, Boston, MA,2000.
- [7] E. Shih et al., "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks,"Proceedings of the ACM MobiCom'01,pp. 272-286, Rome, Italy,2001.
- [8] G. J. Pottie, and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors,"Communications of theACM,vol. 43, Issue. 5,pp. 551-558,2000.
- [9] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust,"Proceedings of the ACM, MobiCom'99, pp. 271-278, Washington DC,1999.

[10] C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "Sensor Information Networking Architecture and Applications," Proceedings of the IEEE Pers. Commun., pp. 52-59, 2001.

[11] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouche, "Optimal Design of Fault Tolerant Sensor Networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications '00, pp. 467-472, Anchorage, AK, 2000.

[59]. Νικολιδάκης Στέφανος,, Διδακτορική διατριβή μες τίτλο "Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Ενεργειακά Αποδοτική Δρομολόγηση"