



www.uom.gr

UNIVERSITY OF MACEDONIA
ECONOMIC AND SOCIAL SCIENCES



University of Macedonia
Master Information Systems
Networking Technologies
Professors: A.A. Economides & A. Pomportsis

Ad-Hoc and Sensor Networks: Technology and Applications

by
Dimitra Kampitaki

Thessaloniki
February 2007



www.uom.gr

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
ΠΜΣ Πληροφορικά Συστήματα
Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων
Καθηγητές: Α.Α. Οικονομίδης & Α. Πομπόρτσης

**Δίκτυα κατ' απαίτηση και δίκτυα αισθητήρων:
Τεχνολογία και Εφαρμογές**

από
Δήμητρα Καμπιτάκη

Θεσσαλονίκη
Φεβρουάριος 2007

Abstract

The present work presents specific issues on ad-hoc and sensor networks, concerning technologies, network topologies, and communication protocols deployed in order to make the networks to operate properly. The operation concepts, problems that emerge and possible solutions to them are proposed. Finally, application case studies are presented and proposals for future research are suggested.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται τα δίκτυα κατ' απαίτηση (ad-hoc) και τα δίκτυα αισθητήρων όσων αφορά στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση τους, τις τοπολογίες δικτύου και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας καθενός, τα προβλήματα που ενδεχομένως προκύπτουν και προτείνονται πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης. Μελετώνται περιπτώσεις εφαρμογής των παραπάνω δικτύων και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Table of Contents

Abstract..... 3
Abstract in Greek..... 4
Table of Contents..... 5
Table of Contents in Greek..... 6
1. Introduction..... 7
 1.1 Introduction to ad – hoc networks..... 8
 1.2 Introduction to sensor networks..... 9
2. Characteristics..... 11
 2.1 Ad hoc networks 12
 2.2 Sensor networks 13
3. Communication protocols..... 15
4. Issues and solutions..... 19
5. Topologies 21
6. Applications..... 23
7. Conclusions – Further Research..... 25
References..... 26

Περιεχόμενα	
<i>Abstract</i>	<u>3</u>
<i>Περίληψη</i>	<u>4</u>
<i>Table of Contents</i>	<u>5</u>
<i>Περιεχόμενα</i>	<u>6</u>
1. <i>Εισαγωγή</i>	<u>7</u>
1.1 <i>Εισαγωγή στα δίκτυα κατ' απαίτηση (ad-hoc networks)</i>	<u>8</u>
1.2 <i>Εισαγωγή στα δίκτυα αισθητήρων (sensor networks)</i>	<u>9</u>
2. <i>Χαρακτηριστικά</i>	<u>11</u>
2.1 <i>Δίκτυα κατ' απαίτηση</i>	<u>12</u>
2.2 <i>Δίκτυα αισθητήρων</i>	<u>13</u>
3. <i>Πρωτόκολλα επικοινωνίας</i>	<u>15</u>
4. <i>Προβλήματα και λύσεις</i>	<u>19</u>
5. <i>Τοπολογίες</i>	<u>21</u>
6. <i>Εφαρμογές</i>	<u>23</u>
7. <i>Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα</i>	<u>25</u>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<u>26</u>

1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε κατά το δεύτερο εξάμηνο σπουδών στο Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα στα Πληροφοριακά Συστήματα του Πανεπιστημίου Μακεδονίας, στα πλαίσια του μαθήματος «Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων». Είναι μια βιβλιογραφική έρευνα που καλύπτει θέματα που αφορούν τα δίκτυα κατ' απαίτηση και τα δίκτυα αισθητήρων κυρίως όσον αφορά τη δικτυακή πλευρά του θέματος. Τόσο τα δίκτυα κατ' απαίτηση όσο και τα δίκτυα αισθητήρων είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ασύρματα δίκτυα.

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

Όταν ο σκοπός είναι η σύνδεση στο Internet ή γενικότερα σε κάποιο σταθερό σταθμό βάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ήδη υπάρχουσα υποδομή δικτύου για την πραγματοποίηση της σύνδεσης και οι περιπτώσεις αυτές συνήθως έχουν απλή υλοποίηση. Το ίδιο συμβαίνει όταν έχουμε σύνδεση μεταξύ δύο και μόνο συσκευών. Στην περίπτωση όμως που μία ομάδα χρηστών θέλει να επικοινωνήσει με μοναδικό μέσο τις φορητές συσκευές που αυτό διαθέτει χωρίς τη χρήση κάποιας υπάρχουσας υποδομής, απαιτείται ένα νέο σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας ώστε να επιτευχθεί η επικοινωνία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός νέου είδους δικτύου, το λεγόμενο ad-hoc δίκτυο [4,5,6,8,12].

Μια άλλη κατηγορία ασύρματου δικτύου που κερδίζει συνεχώς έδαφος όσον αφορά στις εφαρμογές που χρησιμοποιείται είναι το δίκτυο αισθητήρων [1,2,7,9,10,11]. Και σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται μόνο η ασύρματη υλοποίηση, καθώς ενσύρματα «δίκτυα» αισθητήρων δεν υλοποιούνται, τουλάχιστον όχι με την κλασική έννοια του όρου δίκτυα. Οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις ενσύρματων αισθητήρων χρησιμοποιούν στην πλειονότητα τους ηλεκτρικά μεγέθη για τη μεταφορά των μετρήσεων στο σταθμό βάσης, χωρίς τη χρήση δικτυακού πρωτοκόλλου, αλλά κυρίως με τη χρήση βιομηχανικών προτύπων μεταφοράς δεδομένων. Ευρεία εφαρμογή έχει το πρότυπο 4-20mA, το οποίο εκμεταλλεύεται ηλεκτρικές ιδιότητες για τη μεταφορά των μετρήσεων στο σταθμό βάσης.

Στην περίπτωση όμως όπου πρέπει να ικανοποιηθεί ασύρματη μεταφορά μετρήσεων και επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου αισθητήρων μεταξύ τους και όχι μόνο με το σταθμό βάσης, απαιτείται ειδική αντιμετώπιση. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα σύνολο πρωτοκόλλων και τεχνολογιών ώστε να γίνει εφικτή η παραπάνω επικοινωνία, τα οποία θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια.

1.1 Εισαγωγή στα δίκτυα κατ' απαίτηση (ad-hoc networks)

Στα δίκτυα υπολογιστών ο όρος «ad-hoc» χρησιμοποιείται για να δηλώσει μια μέθοδο διασύνδεσης η οποία συνήθως σχετίζεται με ασύρματα δίκτυα. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη ορολογία στα ελληνικά η οποία να δηλώνει ένα ad-hoc δίκτυο, και ένα τέτοιο δίκτυο ονομάζεται είτε αδόμητο είτε κατ' απαίτηση δίκτυο, με τον δεύτερο όρο να επικρατεί στη βιβλιογραφία. Τα δίκτυα ad-hoc εντάσσονται σε μια ευρύτερη κατηγορία δικτύων (Distributed Transient Network) η οποία ορίζεται σαν τα δίκτυα αυτά τα οποία είναι εν γένει αποκεντρωμένα και αποτελούνται κυρίως από κόμβους τα οποία δεν ανήκουν εξ ορισμού και διαρκώς στο δίκτυο αλλά έχουν την δυνατότητα να εισέρχονται ή να αποχωρούν από το δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και από οποιοδήποτε σημείο του.

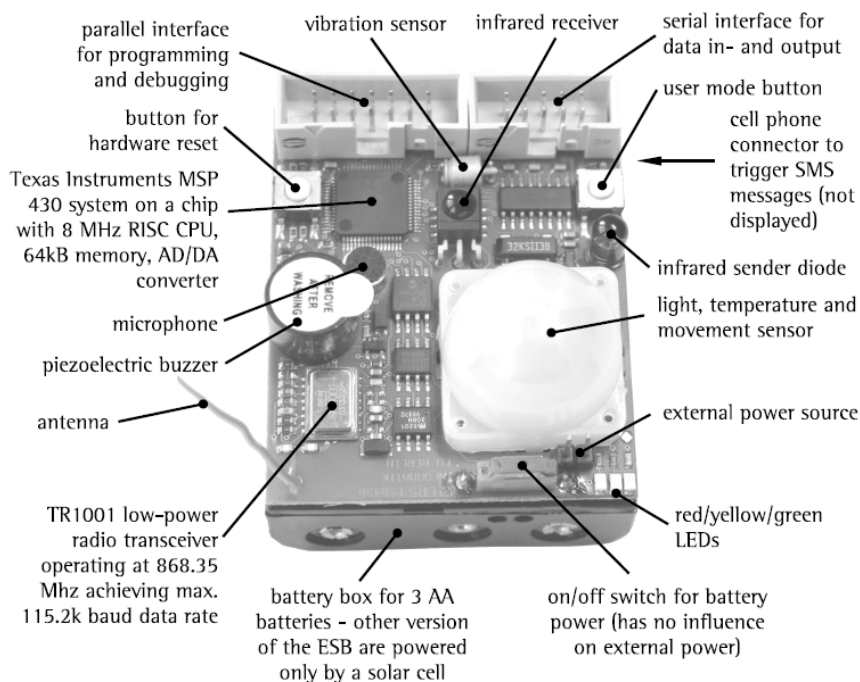
Η σύνδεση που πραγματοποιείται κατά μήκος ενός κατ' απαίτηση δικτύου πραγματοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια μιας σύζευξης και δεν απαιτεί την ύπαρξη σταθμού βάσης. Αντίθετα, οι συσκευές ανακαλύπτουν την ύπαρξη άλλων συσκευών που βρίσκονται γύρω τους για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο που αποτελείται από αυτές τις συσκευές. Οι συνδέσεις πραγματοποιούνται δια μέσου πολλών κόμβων (multihop ad hoc network). Οι κόμβοι του δικτύου παίζουν ενεργό ρόλο κατά την δρομολόγηση των πακέτων, προωθώντας εκτός από τα δικά τους πακέτα και τα πακέτα γειτονικών κόμβων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που ο αποστολέας και ο παραλήπτης ενός πακέτου δεν βρίσκονται εντός της ακτίνας ο ένας του άλλου (ή πιθανόν μόνο ο ένας από τους δύο βρίσκεται εντός της ακτίνας του άλλου). Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να λάβει και να προωθήσει δεδομένα σε άλλους κόμβους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με παλαιότερες δικτυακές τεχνολογίες όπου υπάρχουν κόμβοι με αποκλειστική λειτουργία την προώθηση των δεδομένων σε άλλους κόμβους, όπως για παράδειγμα οι routers.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης στη συνέχεια αναλαμβάνουν την παροχή αξιόπιστων συνδέσεων ακόμα κι αν οι κόμβοι μετακινούνται. Έτσι η τοπολογία του δικτύου μπορεί να μεταβάλλεται ραγδαία και απρόβλεπτα. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή μπορεί να συνδέεται στο Internet, και η ύπαρξη του συνήθως δεν είναι μόνιμη. Εξαιτίας της φορητής και μη δομημένης φύσης των δικτύων ad-hoc εγείρεται ένα σύνολο

από νέες απαιτήσεις κατά το σχεδιασμό τους. Καταρχήν απαιτείται το δίκτυο να είναι αυτορυθμιζόμενο όσον αφορά στις διευθύνσεις και τη δρομολόγηση, ενώ σε επίπεδο εφαρμογής οι χρήστες του δικτύου συνήθως επικοινωνούν και συνεργάζονται ως ομάδες. Αυτό εγείρει ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων και προκλήσεων που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για την αποτελεσματική επικοινωνία.

1.2 Εισαγωγή στα δίκτυα αισθητήρων (sensor networks)

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι ένα δίκτυο υπολογιστών που αποτελείται από αυτόνομες συσκευές καταναμημένες στο χώρο οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες με σκοπό τη συλλογική απεικόνιση φυσικών ή περιβαλλοντολογικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η δόνηση, η πίεση, η κίνηση ή τα σωματίδια μόλυνσης, σε διάφορες τοποθεσίες. Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αρχικά ξεκίνησε για στρατιωτικές εφαρμογές όπως για την παρακολούθηση των πεδίων βολής. Στη συνέχεια εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης των ασύρματων επικοινωνιών και των μικρομηχανικών συστημάτων – micromechanical systems (MEMs), έγινε εφικτή η κατασκευή χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, πολυλειτουργικών και μικροσκοπικών αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν τη δυνατότητα να «αισθάνονται» τα περιβάλλον, να κάνουν επεξεργασία των δεδομένων και να επικοινωνήσουν μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Πλέον χρησιμοποιούνται από το ευρύτερο κοινό σε μία πληθώρα εφαρμογών, που περιλαμβάνει παρακολούθηση περιβάλλοντος και κατοικίας, ιατρικές εφαρμογές, οικιακούς και βιομηχανικούς αυτοματισμούς και έλεγχο κυκλοφορίας.



Εκτός από τους αισθητήρες, κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι εξοπλισμένος με έναν αναμεταδότη, έναν μικροεπεξεργαστή και μία πηγή ενέργειας, συνήθως μπαταρία. Οι αισθητήρες παράγουν ηλεκτρικά σήματα τα οποία είναι ανάλογα των προς μέτρηση φυσικών μεγεθών. Ο μικροεπεξεργαστής αναλαμβάνει να επεξεργαστεί και να αποθηκεύσει τις πληροφορίες που λαμβάνει από τον αισθητήρα. Στην συνέχεια ο αναμεταδότης αναλαμβάνει τη μετάδοση της πληροφορίας προς άλλους κόμβους ή τον κεντρικό σταθμό βάσης, και λαμβάνει επίσης δεδομένα από άλλους κόμβους ή και τον ίδιο το σταθμό βάσης (π.χ. εντολές προς το μικροεπεξεργαστή για συχνότερη συλλογή δεδομένων). Το μέγεθος ενός κόμβου μπορεί να είναι όσο ένα κουτί παπουτσιών ή όσο ένας κόκκος σκόνης.

Ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων αποτελείται πολλές φορές από χιλιάδες τέτοιους κόμβους, κατανεμημένους στο χώρο που θα παρακολουθούν είτε τυχαία είτε σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένη στατιστική κατανομή.

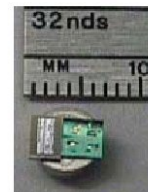
Το κόστος των κόμβων είναι εξίσου κυμαινόμενο, μεταξύ μερικών χιλιάδων δολαρίων έως μερικά cents, ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου και την πολυπλοκότητα των μεμονωμένων κόμβων. Οι περιορισμοί μεγέθους και κόστους έχουν σαν αποτέλεσμα αντίστοιχους περιορισμούς στην ενέργεια, τη μνήμη, την υπολογιστική ισχύ και το εύρος ζώνης.



UC Berkeley: COTS Dust



UC Berkeley: COTS Dust



UC Berkeley: Smart Dust



UCLA: WINS



Rockwell: WINS



JPL: Sensor Webs

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι πολλές και διάφορες. Χρησιμοποιούνται σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές για να συλλέξουν πληροφορίες που θα ήταν είτε πολύ δύσκολο είτε οικονομικά ασύμφορο να συλλεχθούν χρησιμοποιώντας καλωδιωμένους αισθητήρες. Μπορούν να εγκατασταθούν σε απομακρυσμένες περιοχές όπου θα μπορούσε να παραμείνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα καταγράφοντας ένα περιβαλλοντολογικό μέγεθος χωρίς να χρειάζεται να αντικατασταθεί ή να φορτισθεί η πηγή

ενέργειάς τους. Μπορούν να τοποθετηθούν περιμετρικά σε μία ιδιοκτησία και να παρακολουθούν την κίνηση εισβολέων μεταδίδοντας την πληροφορία από κόμβο σε κόμβο.

2. Χαρακτηριστικά

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

Ad hoc Network	Sensor Network
Δεν έχουν συμπεριφορά μετρητικής διάταξης και η επικοινωνία καθορίζεται από τις ανάγκες των εφαρμογών.	Οι κόμβοι κάνουν μετρήσεις στο περιβάλλον, και γεγονότα που συμβαίνουν σ' αυτό μπορούν να ενεργοποιήσουν συγκεκριμένη μεταφορά δεδομένων στο δίκτυο.
Οι κόμβοι είναι πολλών και διαφόρων μεγεθών.	Οι κόμβοι είναι συνήθως μικροί σε μέγεθος και όμοιοι.
Ανανεώσιμες και μεγαλύτερες πηγές ενέργειας.	Πηγές ενέργειας περιορισμένης αντοχής.
Σχετικά ακριβοί κόμβοι	Σχετικά φθηνοί κόμβοι
Δυνατότητα εύρεσης και αποκατάστασης σφαλμάτων και αλλαγής μπαταρίας	Οι κόμβοι μπορεί να τοποθετηθούν και να μείνουν χωρίς επιτήρηση ή συντήρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα
Ο χρόνος ζωής των κόμβων δεν εξαρτάται από τη διάρκεια της μπαταρίας αφού αυτή αντικαθίσταται εύκολα	Ο χρόνος ζωής των κόμβων εξαρτάται από τη χρήση.
Μικρή πυκνότητα κόμβων	Μεγάλη πυκνότητα κόμβων
Περιοχή μετάδοσης που φτάνει τα 500μ.	Περιοχή μετάδοσης που δεν ξεπερνά τα 30μ
Ισχυρή υπολογιστική ισχύς και μεγάλη μνήμη	Μικρή υπολογιστική ισχύς και περιορισμένη μνήμη
Οι κόμβοι επικοινωνούν με το δίκτυο σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης	Οι κόμβοι μπορεί να μην έχουν καμία δραστηριότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα.
Η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων όταν απαιτηθεί από τους χρήστες	Η επικοινωνία βασίζεται στα δεδομένα
Συνεχόμενη ροή πληροφορίας	Μικρή ροή κυκλοφορίας, κυρίως κατά την εμφάνιση συγκεκριμένων γεγονότων
Μεγάλο εύρος ζώνης	Εύρος ζώνης που δεν ξεπερνά τα 100Kbs
Η λειτουργία του δικτύου είναι ίδια για όλες τις εφαρμογές	Η λειτουργία του δικτύου καθορίζεται από την εργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί.

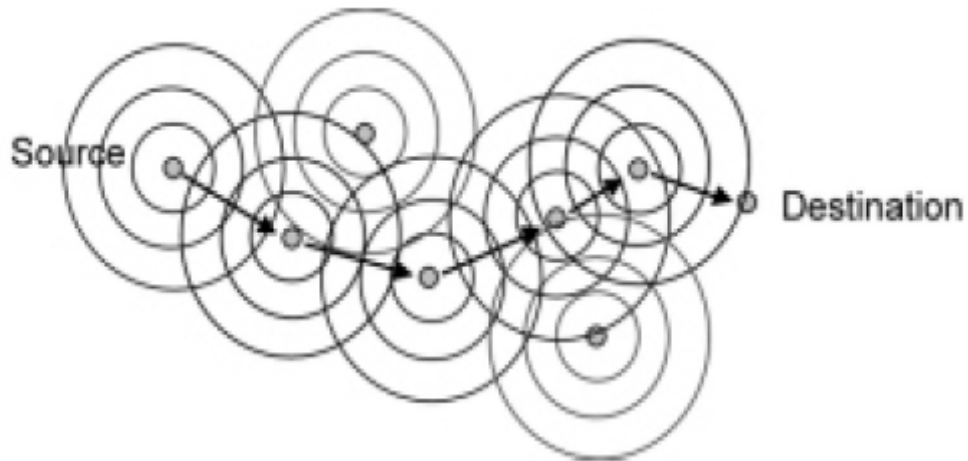
2.1 Δίκτυα κατ' απαίτηση

Το κυριότερο χαρακτηριστικό των κατ' απαίτηση δικτύων είναι η φορητότητα. Οι κόμβοι μπορεί να μετακινούνται συνεχώς και αυτός είναι και ο λόγος ανάπτυξης των συγκεκριμένων δικτύων. Το δίκτυο συνήθως αποτελείται από μικρό αριθμό κόμβων κάθε φορά, γεγονός όχι απόλυτο, οι οποίοι μπορεί να εισέρχονται και να εξέρχονται από το δίκτυο με εντελώς τυχαία συχνότητα. Το δίκτυο είναι ετερογενές, δεν αποτελείται δηλαδή από έναν τύπο συσκευών. Μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο PDA, κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών κτλ. τα οποία πρέπει να έχουν δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους. Η κατανομή των κόμβων αυτών στο χώρο καθορίζει και την τοπολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Αν για παράδειγμα όλες οι συσκευές βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη είναι εφικτή μία σύνδεση απλού hop από κόμβο σε κόμβο. Αντίθετα αν το δίκτυο εκτείνεται σε μεγάλη γεωγραφική έκταση απαιτείται multi-hop διασύνδεση μεταξύ των κόμβων. Η σημασία των ad hoc δικτύων είναι πολύ μεγάλη, κυρίως χάρη στην μεγάλη ευκολία και ταχύτητα με την οποία μπορούν να εγκατασταθούν, αφού δεν απαιτούν την ύπαρξη σταθερής υποδομής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της δυναμικής τους φύσης είναι η εύκολη προσθήκη και απομάκρυνση νέων κόμβων, καθώς και το γεγονός ότι κάθε κόμβος εξαρτάται μόνο από τους γειτονικούς του, με αποτέλεσμα την αυξημένη αξιοπιστία των ad hoc δικτύων.

Τα ad hoc δίκτυα παρουσιάζουν σημαντική ανομοιογένεια, αφού κάθε κόμβος μπορεί να διαφέρει από τους υπόλοιπους σε πολλά χαρακτηριστικά, όπως την υπολογιστική ισχύ, την ακτίνα εκπομπής ή την διάρκεια ζωής των μπαταριών (αν π.χ. είναι ένας φορητός υπολογιστής ή ένας PDA). Επιπλέον, τα διάφορα ad hoc δίκτυα μπορεί να διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους, όπως τους χρησιμοποιούμενους ρυθμούς επικοινωνίας, στο αν παρέχουν δυνατότητες broadcast ή multicast, στο αν συνυπάρχουν ή όχι με άλλα δίκτυα τα οποία έχουν κάποια σταθερή υποδομή ή τέλος, αν υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών και με τι ρυθμούς.

Σημαντικό ρόλο σε κάθε ad hoc δίκτυο παίζει η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων, τόσο μικρότερος θα είναι ο μέσος αριθμός μεταδόσεων που θα απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου από ένα κόμβο σε κάποιον άλλο. Από την άλλη μεριά η μικρή ακτίνα εκπομπής των κόμβων μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων, καθώς και τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα εκπομπής, τόσο περισσότερες μεταδόσεις θα μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπρόσθετα, η ακτίνα μετάδοσης παίζει

καθοριστικό ρόλο και στην κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου, η οποία είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στα περισσότερα ad hoc δίκτυα και συχνά η σημαντικότερη στα MANET. Έτσι, η ακτίνα μετάδοσης θα πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατό μικρότερη, φροντίζοντας όμως ταυτόχρονα να μην είναι τόσο μικρή που το δίκτυο να παύει να είναι συνεκτικό. Μια καλή επιλογή είναι, συνήθως, να επιλέγεται η ακτίνα μετάδοσης, έτσι ώστε κάθε μετάδοση να «ακούγεται» από περίπου 6 κόμβους.



Οι Micah Adler και Christian Scheideler, προτείνουν ένα μοντέλο τριών επιπέδων για την περιγραφή ενός δικτύου ad-hoc [12]. Αρχικά, έχουμε το επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου (Medium Access Control layer), το οποίο είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία από σημείο-σε-σημείο (node-to-node) στο φυσικό μέσο. Ακολούθως έχουμε το επίπεδο επιλογής διαδρομής, (route selection layer), το οποίο είναι υπεύθυνο για την εύρεση κατάλληλων διαδρομών για τα πακέτα. Τέλος, έχουμε το επίπεδο χρονοπρογραμματισμού (scheduling layer), που είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό της σειράς αποστολής των πακέτων.

2.2 Δίκτυα αισθητήρων

Ένα δίκτυο αισθητήρων επιπλέον χαρακτηρίζεται από το χρόνο ζωής του, την κάλυψη που παρέχει, την επεκτασιμότητα του, το κόστος παραγωγής του, την ευκολία ανάπτυξης, την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, τον τρόπο συγχρονισμού, το χρόνο απόκρισης αλλά και την ασφάλεια που μπορεί να παρέχει [9].

Ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του δικτύου είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά, και κυριότερος περιοριστικός παράγοντας στην διάρκεια ζωής του είναι η χωρητικότητα του συσσωρευτή ενέργειας του συστήματος. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές εφαρμογές κρίσιμο χαρακτηριστικό δεν είναι μέσος χρόνος ζωής ενός κόμβου, αλλά ο ελάχιστος εκτιμώμενος χρόνος ζωής.

Αμέσως επόμενοι σημαντικοί παράγοντες μετά τον χρόνο ζωής είναι η κάλυψη και η επεκτασιμότητα. Όπως είναι προφανές είναι σημαντικό για τον τελικό χρήστη να μπορεί να αναπτύξει δίκτυα τα οποία καλύπτουν μια ευρεία περιοχή παρατήρησης. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι η κάλυψη του δικτύου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ακτίνα κάλυψης των επικοινωνιακών συνδέσεων που χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος. Με την χρήση multi-hop τεχνικών είναι εφικτή η επέκταση της κάλυψης αρκετά πιο μακριά από την ακτίνα που επιτρέπει ο χρησιμοποιούμενος πομπός. Θεωρητικά η επέκταση της ακτίνας κάλυψης του δικτύου τείνει στο άπειρο αλλά αποδεικνύεται ότι μετά από ένα αριθμό από hop και μια συγκεκριμένη ακτίνα εκπομπής το συνολικό ισοζύγιο κατανάλωσης ισχύος του δικτύου αυξάνεται ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος αντίδρασής του.

Η επεκτασιμότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν κυμαίνεται από μερικούς αισθητήρες έως μερικές εκατοντάδες, ακόμα θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί που να επιτρέπουν την προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του δικτύου.

Μιας και τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από πολλούς κόμβους, το κόστος ενός εκάστου κόμβου παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του συνολικού κόστους του δικτύου. Έτσι επιδιώκεται το κόστος του κάθε κόμβου να είναι χαμηλό ώστε το συνολικό κόστος του δικτύου να είναι χαμηλότερο από το κόστος ενός αντιστοίχων δυνατοτήτων συμβατικού δικτύου.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι η ευκολία ανάπτυξης. Απαιτείται η ανάπτυξη του δικτύου στο χώρο λειτουργίας του να είναι εφικτή και από μη εξειδικευμένο προσωπικό, μια τέτοια δυνατότητα προϋποθέτει να έχει το δίκτυο την ικανότητα να αυτορυθμίζεται. Στην ιδεατή περίπτωση το σύστημα θα είναι ικανό να ρυθμίζεται αυτόματα ανεξάρτητα την κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται.

Σημαντικός δείκτης απόδοσης για ένα σύστημα αισθητήρων είναι και η αντοχή στα σφάλματα. Κάποιοι κόμβοι μπορεί να πάψουν να λειτουργούν λόγω βλάβης, λόγω αστοχίας κάποιου υποσυστήματος τους ή λόγω παρεμβολών από κάποιο εξωτερικό αίτιο. Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα λειτουργίας ενός κόμβου ή μιας ομάδας κόμβων δεν θα πρέπει να επηρεάζει την συνολική λειτουργία του δικτύου.

Σε ορισμένες κατηγορίες εφαρμογών, όπως στις εφαρμογές επιτήρησης και εντοπισμού, δεδομένα από πολλούς κόμβους πρέπει να συσχετισθούν χρονικά ώστε γίνει εφικτός ο εντοπισμός βασικών παραμέτρων του φαινομένου που παρατηρείται. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός, το δίκτυο πρέπει να είναι ικανό να κατασιευάζει και διατηρεί

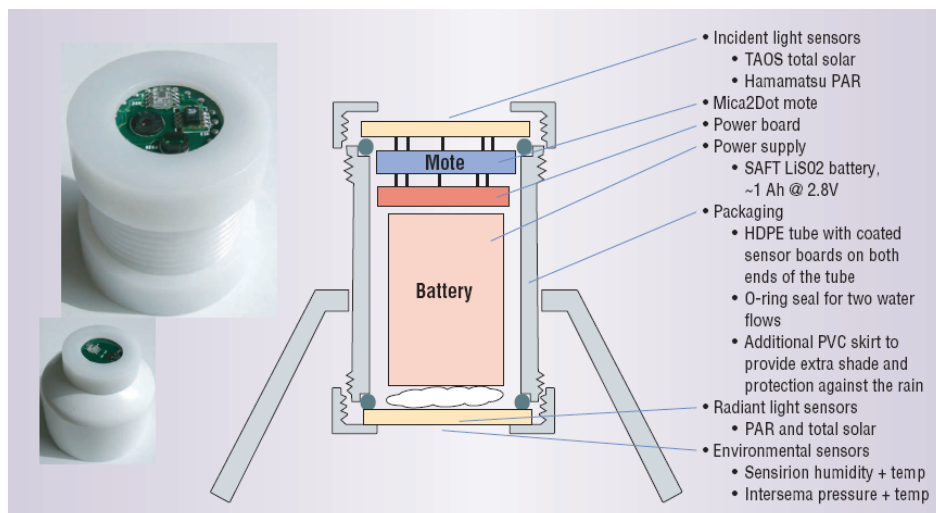
μια καθολική ώρα συστήματος, η οποία θα χρησιμοποιείται για την χρονική ταξινόμηση των δεδομένων που καταγράφονται σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να είναι εφικτή η παραπάνω διαδικασία απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού ο οποίος θα διαχειρίζεται τις διαδικασίες διατήρησης και διασποράς, μεταξύ των κόμβων, των μηνυμάτων με πληροφορίες συγχρονισμού.

Ο χρόνος αντίδρασης είναι για κάποιες εφαρμογές, όπως τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης & συναγερμού, ο σημαντικότερος παράγοντας σχεδίασης και αξιολόγησης ενός δικτύου. Ωστόσο η ικανότητα του δικτύου να έχει μικρό χρόνο απόκρισης έρχεται σε σύγκριση με άλλους δείκτες, π.χ με το χρόνο ζωής του συστήματος. Η αντίφαση αυτή αίρεται με την ενσωμάτωση στο δίκτυο κόμβων που βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας.

Η λύση αυτή εξασφαλίζει τον επιθυμητό χρόνο αντίδρασης αλλά έχει αρνητική επίπτωση στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν την πληροφορία που συλλέγουν κρυφή σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Έτσι για να μπορέσει να διατηρηθεί η μυστικότητα, το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης.

Η χρήση τέτοιων τεχνικών επιδρούν αρνητικά τόσο στην κατανάλωση ισχύος όσο και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου ενώ η ενσωμάτωση στα μεταφερόμενα πακέτα επιπλέον bits, τα οποία περιέχουν τις πληροφορίες αυθεντικοποίησης, μειώνουν τον αριθμό των πραγματικών δειγμάτων που μπορούν να μεταφερθούν από ένα κόμβο.



3. Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Στα ασύρματα δίκτυα ad hoc η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων πραγματοποιείται μέσω καναλιών ραδιοσυχνότητας. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι

οποιαδήποτε από το ευρύ φάσμα τεχνολογιών για ασύρματες επικοινωνίες που υπάρχουν σήμερα. Κάποιες από αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

Ανάλογα με την έκταση της περιοχής που καλείται να καλύψει το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα – Wireless Personal Area Networks (WPAN), στα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα – Wireless Local Area Networks ή στα Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα – Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN). Η ακτίνα κάλυψης ενός WPAN είναι της τάξεως των μερικών μέτρων και μέχρι το πολύ 20 μέτρα. Η ακτίνα κάλυψης ενός WLAN περιορίζεται περίπου στα 100 μέτρα, ενώ η ακτίνα κάλυψης σε ένα WMAN είναι της τάξεως μερικών χιλιομέτρων. Για κάθε έναν από τους παραπάνω τύπους δικτύου έχουν προταθεί και διάφορες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Μερικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω:

WPAN: Bluetooth, UWB

WLAN: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g

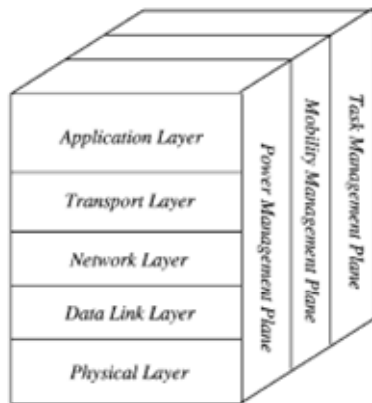
WMAN: IEEE 802.16e

Τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αυτών δίνονται στον πίνακα 2 μαζί με τα συστήματα GPRS και UMTS, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κινητή τηλεφωνία, για ευκολότερη σύγκριση [4]. Η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (bit rate) και οι συχνότητες λειτουργίας είναι βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν το κατά πόσο είναι κατάλληλη κάθε τεχνολογία για τις εφαρμογές που παρέχονται από ένα ad hoc δίκτυο. Σε αντίθεση με τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα WPAN, WLAN και WMAN δεν είναι σχεδιασμένες για φορητή και κινητή επικοινωνία. Παρόλα αυτά τα δίκτυα ad hoc μπορεί να αποτελούνται από συχνά γρήγορα κινούμενους κόμβους. Στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας αυτού του είδους η επικοινωνία είναι εφικτή με τη βοήθεια διαδικασιών handover και περιαγωγής. Το handover εφαρμόζεται όταν ο χρήστης μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη, ενώ η περιαγωγή απαιτεί ειδική δρομολόγηση από τους παρόχους των δικτύων μεταξύ των χωρών.

Τα δίκτυα WLAN, WMAN και WPAN έχουν σχεδιασθεί για φορητά τερματικά, και έχουν προδιαγραφές για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων του μοντέλου OSI. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να χειριστούν κινητούς κόμβους αλλά με σοβαρούς περιορισμούς. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών είναι η χρήση φορητής IP διεύθυνσης για τους κόμβους (mobile IP) καθώς και η χρήση γρήγορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Στα δίκτυα αισθητήρων αντίστοιχα χρησιμοποιείται ένα σύνολο από πρότυπα τα οποία βασίζονται στα WPAN, WLAN και WMAN. Τα πιο γνωστά είναι το ZigBee, το

Wibree και το 6lowpan, με το πρώτο να έχει τη μερίδα του λέοντος στις εμπορικές εφαρμογές. Το ZigBee είναι ένα σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου το οποίο χρησιμοποιεί μικρούς και χαμηλής ισχύος αναμεταδότες βασισμένους στο πρότυπο 802.15.4 της IEEE για WPANs. Λειτουργεί στο βιομηχανικό, επιστημονικό και ιατρικό φάσμα συχνοτήτων (ISM) που για την Ευρώπη είναι τα 868MHz και τα 2.4GHz. Είναι πιο οικονομικό από το Bluetooth, και απαιτεί πολύ λιγότερο λογισμικό από αυτό.



	Maximum data rate (17)	Frequency allocation	Channel bandwidth	Number of RF Channels	Multiple Access technology	Typical range	Mobility support
Bluetooth	1 Mbps	2.4 GHz (ISM)	1 MHz	79	FHSS	10 m	(1)
UWB	110 Mbps (at 10m)	3.1-10.6 GHz	Min. 500 MHz Max. 7.5 GHz	1-15	THSS OFDM (11)	10-15 m	(1)
IEEE 802.11b	11 Mbps	2.4-2.497 GHz (ISM)	25 MHz	3	DSSS	50-80 m (9)	(2)
IEEE 802.11g	54 Mbps	2.4-2.497 GHz (ISM)	(10)	(10)	(10)	50-80 m (9)	(2)
IEEE 802.11a	54 Mbps	various bands in 5 GHz region	20 MHz	US: 12 EU: 8 Japan: 4	OFDM	40-60 m (9)	(2)
IEEE 802.16e	75 Mbps	2-11 GHz 10-66 GHz (3)	1.5 - 20 MHz (3)	(3)	(15)	30 km (4) 4 km (5)	(6)
GPRS	171 kbps (12)	800, 900 and 1800 MHz bands (13)	200 kHz (13)	(13)	TDMA with FDD	1-5 km (14)	Handover possible also at high speeds
UMTS(W-CDMA) (8)	2 Mbps	1920-1980 MHz 2110-2170 MHz	5 MHz	(7)	DSSS	1-3 km (16)	Handover possible also at high speeds

Notes:

- (1) Technology by itself does not support handover.
- (2) Movement within a cell is possible. Technology by itself does not support handover.
- (3) IEEE 802.16 is designed for a wide range of licensed and license-exempt frequencies with flexible bandwidth allocation to accommodate easier cell planning throughout the world.
- (4) With line of sight condition.
- (5) Without line of sight condition.
- (6) Mobility is only supported in the 2-6 GHz band. At walking speeds, handoff between adjacent cells is possible.
- (7) Number of frequency bands depends on the operator's license.
- (8) Of different variants of UMTS, here we only consider the European W-CDMA.
- (9) Lower bound corresponds to 11 Mbps data rate, and upper bound corresponds to 2 Mbps data rate.
- (10) For data rates 1, 2, 5.5 and 11 Mbps the same channel spacing, bandwidth and modulation is used as in IEEE 802.11b (for backwards compatibility). Other supported bit rates use OFDM.
- (11) UWB can be implemented using several spreading technologies. Most implementations use OFDM or THSS.
- (12) This is the maximum data rate using 8 time slots and Coding Scheme 4 (CS-4).
- (13) Same as in GSM.
- (14) With Coding Scheme 1 (CS-1), the coverage radius of GSM voice and GPRS data is the same, with CS-2, CS-3 and CS-4 the coverage radius reduces. Typical range in this table is for urban areas. Theoretically the maximum range could be as much as 30 km.
- (15) IEEE 802.16 physical layer supports three access technologies: 1. Single Carrier Modulation (SC), 2. OFDM in combination with TDMA and 3. OFDMA. OFDM and OFDMA are mainly proposed for no line of sight operation.
- (16) Typical range in this table is for urban areas. Theoretically the maximum range could be as much as 20 km.
- (17) Figures given here are for a single user. In the case of shared use of the radio channel, the capacity is divided amongst all users.

4. Προβλήματα και λύσεις

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα ad hoc δίκτυα είναι η δρομολόγηση. Ο λόγος είναι ότι οι περισσότεροι από τους γνωστούς αλγόριθμους δρομολόγησης έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν κάτω από συνθήκες οι οποίες είναι πολύ πιο ευνοϊκές από αυτές που ισχύουν σε ασύρματα δίκτυα. Μία από τις βασικότερες ιδιαιτερότητες που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων είναι η κινητικότητα των χρηστών, η οποία αλλάζει πολύ συχνά την τοπολογία του δικτύου, με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ συχνά η κατασκευή νέων διαδρομών. Επιπρόσθετα, εξαιτίας του περιορισμένου διαθέσιμου εύρους ζώνης στα ασύρματα δίκτυα, απαιτείται ο αριθμός των σχετικών με την δρομολόγηση μηνυμάτων να είναι περιορισμένος. Επίσης, στα ασύρματα δίκτυα το ποσοστό των πακέτων που χάνονται είναι αρκετά υψηλό, τόσο εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας λαθών μετάδοσης, όσο και εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας καταστροφής συνδέσμων (π.χ. εξαιτίας της μετακίνησης ενός κόμβου).

Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την διαφοροποίηση σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα των ιδιοτήτων που επιθυμούμε να έχουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης στα ad hoc δίκτυα. Έτσι, καταρχήν, τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα θα πρέπει να είναι καταναμημένα, με κάθε κόμβο να είναι αρκετά «έξυπνος» ώστε να μπορεί να παίρνει αποφάσεις δρομολόγησης. Αυτό είναι απαραίτητο, αφού ένα κεντρικοποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν θα ήταν αξιόπιστο σε περίπτωση κίνησης των κόμβων. Επιπρόσθετα, το πρωτόκολλο θα πρέπει να δημιουργεί γρήγορα δρομολογήσεις για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν αλλάξει η τοπολογία του δικτύου, διατηρώντας παράλληλα το επιπλέον φορτίο στο δίκτυο για τους σκοπούς της δρομολόγησης χαμηλό. Εκτός όλων αυτών, το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι επιθυμητό να μπορεί να παίρνει αποφάσεις δρομολόγησης βασιζόμενες και στην ενεργειακή κατάσταση κάθε κόμβου, καθώς και στην πιθανή επίδραση αυτών των αποφάσεων σε αυτήν. Τέλος, κάθε σύνδεσμος μεταξύ κόμβων θα πρέπει να θεωρείται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης ως μία κατεύθυνση, αφού η επικοινωνία προς την μία κατεύθυνση μπορεί να περιορίζεται από φυσικούς παράγοντες ή και την μορφολογία του χώρου, την ακτίνα εκπομπής κάθε κόμβου και άλλα.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να διακριθούν με βάση το εάν η δρομολόγηση γίνεται καταναμημένα σε κάθε κόμβο ή κεντρικοποιημένα από τον κόμβο που στέλνει το πακέτο. Στην πρώτη περίπτωση κάθε κόμβος αποφασίζει για τον επόμενο κόμβο στον οποίο θα προωθήσει το πακέτο, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, που πολλές

φορές ονομάζεται δρομολόγηση πηγής (source routing) η διαδρομή που θα ακολουθήσει κάθε πακέτο καθορίζεται από τον κόμβο αποστολέα του πακέτου. Οι διαδρομές αυτές μπορεί να είναι είτε στατικές, είτε να προσαρμόζονται δυναμικά στην κατάσταση του δικτύου. Ένας άλλος τρόπος διαχωρισμού των πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι σε πρωτόκολλα βασισμένα σε πίνακες (table driven protocols), όπου κάθε κόμβος διατηρεί πληροφορίες για τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου και τα πρωτόκολλα βασισμένα στην κατ' απαίτηση αρχικοποίηση από την πηγή (source initiated on-demand driven protocols), τα οποία δημιουργούν μια διαδρομή όποτε αυτή ζητηθεί από κάποιον κόμβο αφετηρία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας είναι τα Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing Protocol, Wireless Routing Protocol, Global State Routing, Fisheye State Routing, Hierarchical State Routing, Zone-based Hierarchical Link State Routing Protocol και Clusterhead Gateway Switch Routing Protocol. Στα on-demand routing protocols ανήκουν μεταξύ άλλων τα Cluster based Routing Protocol, Ad hoc Ondemand Distance Vector Routing, Dynamic Source Routing Protocol, Temporally Ordered Routing Algorithm, Associativity Based Routing και Signal Stability Routing. Για την προσαρμογή των δρομολογίων στην κατάσταση του δικτύου χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μεγάλες κατηγορίες αλγορίθμων. Η πρώτη κατηγορία είναι οι αλγόριθμοι βασισμένοι σε διανύσματα απόστασης (distance vectors). Σε αυτά τα πρωτόκολλα, κάθε κόμβος στέλνει σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους τις αποστάσεις που γνωρίζει για όλους τους κόμβους του δικτύου. Κάθε κόμβος υπολογίζει με βάση τις πληροφορίες από τους γειτονικούς του κόμβους τα συντομότερα μονοπάτια προς κάθε πιθανό προορισμό (κλασικό παράδειγμα αυτού του είδους των αλγορίθμων είναι ο Distributed Bellman-Ford – DBF). Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας αλγορίθμων είναι η αυξημένη πιθανότητα δημιουργίας «αυλικιών» βρόγχων στην δρομολόγηση ενός πακέτου εξαιτίας της παρουσίας σφαλμάτων σε κάποιον κόμβο. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την πιθανότητα εγκλωβισμού πακέτων σε ένα τέτοιο βρόγχο, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση παράδοσης ή και την απώλεια των πακέτων, η οποία σε περίπτωση σφαλμάτων στο ίδιο το πρωτόκολλο μπορεί να οδηγήσει σε οριστική κατάρρευση του δικτύου. Μια άλλη μεγάλη κατηγορία αλγορίθμων δρομολόγησης είναι οι αλγόριθμοι βασισμένοι στην κατάσταση των συνδέσμων (link state). Στα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους αλγορίθμους, κάθε κόμβος πληροφορεί τους γειτονικούς του για την κατάσταση των γειτονικών του συνδέσμων, με αποτέλεσμα κάθε κόμβος να έχει συνολική εικόνα του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος μπορεί να επιλέξει το συντομότερο μονοπάτι προς οποιονδήποτε κόμβο χρησιμοποιώντας κάποιον

κεντριοποιημένο αλγόριθμο δρομολόγησης (π.χ. Dijkstra). Με την χρήση αυτών των αλγορίθμων η πιθανότητα δημιουργίας κύκλων εξαιτίας λανθασμένων, πιθανόν λόγω καθυστέρησης στην διάδοση, πληροφοριών για την κατάσταση των συνδέσμων, μπορούν να επιλυθούν σύντομα.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η ύπαρξη πληθώρας διαθέσιμων πρωτοκόλλων δρομολόγησης θα πρέπει να είναι αναμενόμενη. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάλληλο για την πλειοψηφία των ad hoc δικτύων, αλλά σε κάθε ad hoc δίκτυο το πρωτόκολλο δρομολόγησης επιλέγεται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

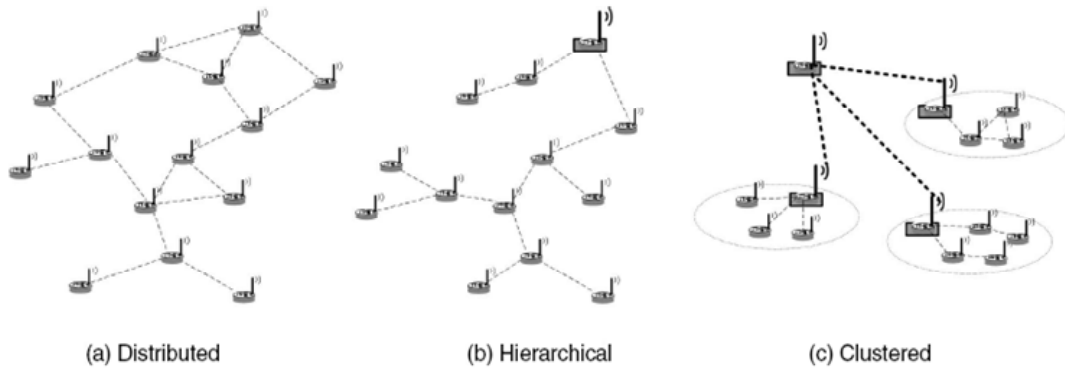
Τα δίκτυα αισθητήρων (sensor networks) έχουν πολλές ομοιότητες με τα δίκτυα ad-hoc, αλλά παράλληλα έχουν και πολλές διαφορές. Όσον αφορά τη δρομολόγηση, ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι η τυπική επικοινωνία αφορά ένα σύνολο κόμβων που μεταδίδουν προς ένα συγκεκριμένο σταθμό, και όχι επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων, όπως συνήθως συμβαίνει. Επίσης, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται από πολλούς αισθητήρες βασίζονται στα ίδια φαινόμενα, υπάρχει πιθανότητα επανάληψης των ίδιων δεδομένων. Ακόμα, σε σύγκριση με τα ad-hoc, οι κόμβοι των δικτύων αισθητήρων δεν κινούνται τόσο συχνά (παρόλο που τα φαινόμενα που παρατηρούν μπορεί να κινούνται). Τέλος, όμοια με τη μελέτη των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης, και στους μηχανισμούς δρομολόγησης σημαντικό κριτήριο ποιότητας είναι η περιορισμένη κατανάλωση ισχύος. Γι' αυτούς, και για αρκετούς ακόμα λιγότερο σημαντικούς λόγους, οι μηχανισμοί δρομολόγησης των δικτύων ad-hoc δε βρίσκουν εφαρμογή στα δίκτυα αισθητήρων και απαιτείται ο σχεδιασμός νέων, με βάση τις ιδιαίτερες απαιτήσεις τους.

5. Τοπολογίες

Στα ad-hoc δίκτυα δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη δομή στο δίκτυο. Κάθε ασύρματος σταθμός έχει την δυνατότητα να επικοινωνήσει απευθείας με οποιονδήποτε άλλο σταθμό χωρίς να χρειάζεται να παρεμβληθεί στην επικοινωνία το access point. Έτσι μεταξύ των συσκευών μπορούν να δημιουργηθούν διάφορα BSS. Σε αυτή την περίπτωση, ένα BSS αποτελείται από συσκευές που λειτουργούν και εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για την διατήρηση τέτοιου είδους δικτύου όπως για παράδειγμα αλγόριθμοι εκλογής προέδρου, όπου ένας κόμβος λειτουργεί σαν σταθμός βάση (base station) ή αφέντης και οι άλλοι σαν «σιλάβου», αλγόριθμοι υπερχείλισης (flooding) και ευρείας μετάδοσης για επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Τα ad-hoc δίκτυα μπορούν να

φαινόουν χρήσιμα, π.χ κατά την διάρκεια μια σύσκεψης οι συμμετέχοντες επικοινωνούν μεταξύ τους και ανταλλάσσουν αρχεία.

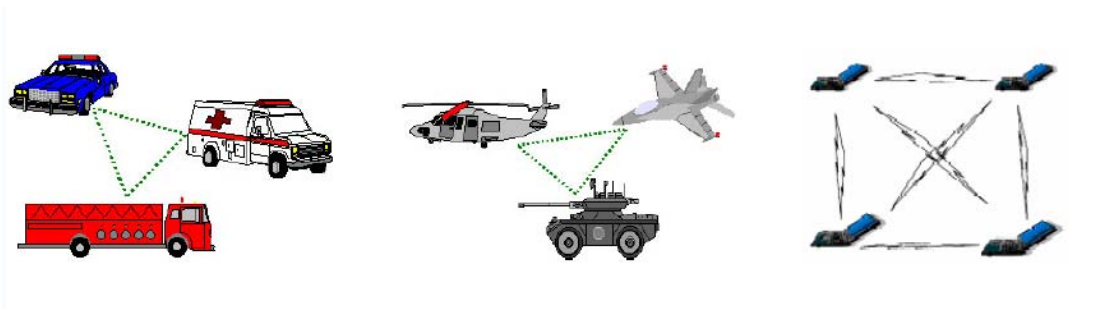
Στα δίκτυα αισθητήρων οι βασικότερες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Η τοπολογία μπορεί να είναι κατανεμημένη (distributed). Στην περίπτωση αυτή όλοι οι κόμβοι είναι ομότιμοι και επικοινωνούν όλοι με όλους. Δεν υπάρχει κάποιος κόμβος ο οποίος να παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης. Στην δεύτερη εικόνα φαίνεται μία ιεραρχική τοπολογία. Στην τοπολογία αυτή όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν και προωθούν την πληροφορία προς ένα κεντρικό κόμβο, ο οποίος παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης. Ενδεχομένως μία από τις λειτουργίες του να είναι και ο καθορισμός της δρομολόγησης της πληροφορίας από τους υπόλοιπους κόμβους, ώστε να γίνεται ισοκατανομή του φόρτου μετάδοσης της πληροφορίας. Τέλος στην τρίτη εικόνα παρουσιάζεται μία τοπολογία συστάδας. Στην τοπολογία αυτή οι αισθητήρες είναι χωρισμένοι σε ομάδες – συστάδες με σκοπό την καλύτερη δρομολόγηση και κατανομή της πληροφορίας. Σε κάθε συστάδα υπάρχει ένας κόμβος που παίζει το ρόλο του κεντρικού κόμβου για τη συστάδα στην οποία ανήκει. Αυτός και μόνο αυτός από κάθε συστάδα συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες από τους υπόλοιπους κόμβους της συστάδας και αναλαμβάνει την επεξεργασία και την αποστολή τους στον κεντρικότερο σταθμό βάσης. Αυτή η τοπολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός κόμβων και ιδιαίτερα στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας. Όλοι οι κόμβοι μίας συστάδας εκτός από τον κεντρικό μπορούν να είναι μικρής ισχύος, τέτοιας ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία μέχρι τον κεντρικό κόμβο. Ο μόνος κόμβος υψηλής ισχύος θα είναι ο κεντρικός, ο οποίος ενδεχομένως να έχει και ισχυρότερη υπολογιστική ισχύ.

6. Εφαρμογές

Τα ad hoc δίκτυα χρησιμοποιούνται συχνά σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης όπου πρέπει να υπάρχει γρήγορη ανάπτυξη επικοινωνιακού δικτύου με περιορισμένες ή μηδενικές υποδομές σε πιθανόν εχθρικό περιβάλλον (π.χ. σε εχθρική χώρα, σε δάση, στην θάλασσα, σε περιοχές που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές κ.α.). Επιπρόσθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις που υπάρχει άμεση ανάγκη για την παροχή δικτυακών υπηρεσιών χωρίς την ύπαρξη των αναγκαίων υποδομών (π.χ. σε ένα συνέδριο, σε μία συνάντηση εργασίας σε ένα ξενοδοχείο κ.α.).



Πολλές από τις εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι ήδη αναγνωρίσιμες στο σύγχρονο περιβάλλον. Σε ιατρικές εφαρμογές τα δίκτυα αισθητήρων αναλαμβάνουν την παρακολούθηση ασθενών, σχηματίζοντας ένα προσωπικό δίκτυο σώματος. Το δίκτυο των αισθητήρων στην περίπτωση αυτή καταγράφει τις λειτουργίες των ζωτικών οργάνων του ασθενή ο οποίος τους έχει πάνω του και τις αναμεταδίδει στο γιατρό ή στο νοσοκομείο σε περίπτωση ανάγκης. Στο πιο μακρινό μέλλον κάποιοι κόμβοι ενδεχομένως να εμφυτευθούν στο σώμα του ασθενή, με σκοπό την ανίχνευση για παράδειγμα του καρκίνου σε πρώιμο στάδιο, οπότε η θεραπεία να είναι αποτελεσματικότερη. Μικροσκοπικές κάμερες με τη μορφή χαπιού, το οποίο μπορεί να καταπιεί ο ασθενής υπάρχουν ήδη στην αγορά. Αυτές οι συσκευές έχουν δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας 24 ωρών και αποστέλλουν εικόνες σε μία άλλη συσκευή την οποία έχει μαζί του ο ασθενής. Μετά την πάροδο των 24 ωρών, εικόνες από όλο το πεπτικό σύστημα έχουν καταγραφεί και μπορούν να αναλυθούν από τον γιατρό. Έτσι αποφεύγονται επίπονες διαδικασίες για τον ασθενή, όπως πχ η γαστροσκόπηση.

Στον τομέα του αυτοματισμού των κατοικιών οι κόμβοι του δικτύου αισθητήρων μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε χώρο του σπιτιού για να μετρούν θερμοκρασία, αντίθετα με την παρούσα κατάσταση όπου υπάρχει ένας ενσύρματος αισθητήρας με θερμοστάτη σε ένα σημείο του σπιτιού.

Οι κόμβοι μπορούν να μετρούν ταυτόχρονα με τη θερμοκρασία και άλλα μεγέθη. Για παράδειγμα μπορούν να ανιχνεύουν κίνηση στο χώρο και να στέλνουν την πληροφορία στο συναγερμό σε περίπτωση που λείπουν οι ιδιοκτήτες. Για να λυθεί το πρόβλημα της ενεργειακής αυτονομίας οι αισθητήρες μπορούν να συνδεθούν με το ηλεκτρικό δίκτυο του σπιτιού.

Σε άλλες περιπτώσεις απαιτείται να ανιχνευθούν αλλαγές στη δομή ενός κτηρίου ή ενός ιστορικού μνημείου που μπορεί να προκύψουν με το χρόνο ή εξαιτίας κάποιου σεισμού. Οι αισθητήρες στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ενσωματωθούν στους τοίχους ή το τσιμέντο, χωρίς να συνδεθούν σε εξωτερική πηγή ενέργειας. Η λειτουργία τους θα περιορίζεται σε μετρήσεις ανά τακτικά μεγάλα σχετικά χρονικά διαστήματα, με σκοπό την μέγιστη διάρκεια ζωής τους. Αυτό μπορεί να κάνει εφικτή τη λειτουργία τους για χρόνια ή ακόμα και για δεκαετίες. Επίσης θα μπορούσαν να καταγράφονται τα δυναμικά μεγέθη που παρουσιάζονται κατά την κατάρρευση ενός κτηρίου και στη συνέχεια να αναλύονται, με σκοπό την κατανόηση των αιτιών και τη βελτίωση στο σχεδιασμό.

Σε μία επιχείρηση, και ειδικότερα στην διατήρηση της αποθήκης η συμβολή των δικτύων αισθητήρων μπορεί να φέρει επανάσταση. Οι συσκευασίες μπορούν να περιέχουν ειδικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους με διάρκεια ζωής όση η διάρκεια αποθήκευσης του αγαθού. Με ένα απλό σήμα broadcast προς όλους τους κόμβους, θα ζητείται από αυτούς να δώσουν το στίγμα τους. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει αυτόματη απογραφή της αποθήκης. Επίσης οι ίδιοι αισθητήρες θα μπορούν να παίρνουν μετρήσεις για την θερμοκρασία και την υγρασία ώστε να διασφαλίζεται η σωστή αποθήκευση των αγαθών. Κατά τη διάρκεια της νύχτας κάθε αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει σαν συναγερμός. Αν κάποιος προσπαθήσει να μετακινήσει κάποια συσκευασία ο αισθητήρας δόνησης θα ανιχνεύσει την κίνηση και μπορεί να στείλει σήμα στο σύστημα συναγερμού.

Η κυριότερη όμως κατηγορία εφαρμογών των δικτύων αισθητήρων αφορά στην περιβαλλοντολογική παρακολούθηση. Με διασπορά ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων σε ένα χώρο μπορεί να μελετηθεί η μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών και να βγουν διάφορα σχετικά συμπεράσματα, ή και να γίνει ανίχνευση διαφόρων σημαντικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα η έναρξη μιας πυρκαγιάς. Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς μπορεί να γίνει χαρτογράφηση των θερμοκρασιών που παρουσιάζονται στο εσωτερικό της πυρκαγιάς με τη βοήθεια ήδη υπαρχόντων αισθητήρων ή αισθητήρων που θα ριφθούν από αεροπλάνο. Στην ταινία tornado ένα σύνολο αισθητήρων εισάχθηκε στο εσωτερικό ενός κυκλώνα με σκοπό την καταγραφή του φαινομένου, σενάριο που στις μέρες μας δεν αποτελεί πλέον επιστημονική φαντασία.

7. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα δίκτυα που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούν τη σημαντικότερη εξέλιξη των τελευταίων ετών στις ασύρματες επικοινωνίες. Σε καμία περίπτωση όμως δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι δεν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των υπαρχόντων τεχνολογιών με σκοπό την αποδοτικότερη και πιο αξιόπιστη επικοινωνία. Για το λόγο αυτό η έρευνα που διεξάγεται τόσο σε βασικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί θα καθορίσει τα μελλοντικά πρότυπα και πρωτόκολλα που θα επιτρέψουν την περαιτέρω εξάπλωση των ασύρματων επικοινωνιών.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με θέματα όπως η βέλτιστη δρομολόγηση των πακέτων, η αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας αλλά και των πόρων του δικτύου [13-18]. Επίσης έρευνα διεξάγεται και στον τρόπο κατανομής των κόμβων στο χώρο, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τοπολογία για κάθε εφαρμογή. Τέλος υπάρχει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της εφαρμοσμένης έρευνας και ειδικότερα στην ενσωμάτωση των νέων αυτών ασύρματων τεχνολογιών σε όλο και περισσότερους τομείς της σύγχρονης ανθρώπινης δραστηριότητας.

Βιβλιογραφία

1. Wireless Sensor Networks A Systems Perspective, Nirupama Bulusu, Sanjay Jha, 2005 Artech House.
2. Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, 2005 CRC Press.
3. Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, Paolo Santi, 2005 Wiley
4. Ad Hoc Networks: Technologies and Protocols, 2005 Springer
5. Ad-Hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies, Ramin Hekmat, Springer 2006
6. The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks, Mahammad Ilyas, 2003 CRC Press
7. Sensornetworks, Thomas Haenselmann, 2006.
8. Υλοποίηση και πειραματική αξιολόγηση αλγορίθμων δρομολόγησης σε Ad-hoc κινητά δίκτυα, Νέαρχος Πασπαλλής, Πάτρα 2001.
9. Δίκτυα αισθητήρων για διάχυτο υπολογισμό, Παναγιώτης Κίικιρας, Αθήνα 2004.
10. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks 38 (2002) 393-422.
11. Römer Kay, Friedemann Mattern, The Design Space of Wireless Sensor Networks, *IEEE Wireless Communications* 11 (6), pp.54-61 (December 2004).
12. M. Adler, C. Scheideler, Efficient Communication Strategies for Ad-Hoc Wireless Networks, In Proc. 10th Annual Symposium on Parallel Algorithms and Architectures – SPAA’98, 1998.
13. W Ye, J Heidemann, D Estrin, An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, Proceedings of the Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2002, vol.3, pp.1567-1576.
14. A. Mainwaring, D Culler, J Polastre, R Szewczyk, J. Anderson, Wireless sensor networks for habitat monitoring, Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, 2002, pp. 88-97.
15. K. Sohrabi, J Gao, V. Ailawadhi, G.J. Pottie, Protocols for self-organization of a wireless sensor network, *IEEE Personal Communications*, 2000
16. S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, M.B. Srivastava, Coverage problems in wireless as-hoc sensor networks Proceedings of the Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2001, vol.3, pp.1380-1387.
17. C. Schurgers, V. Tsitsis, S. Ganeriwal, M. Srivastava, Optimizing sensor networks in the Energy-Latency-Density Design Space, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2002, vol.1 (1), pp. 70-80.
18. D. Braginsky, D. Estrin, Rumor routing algorithm for sensor networks, Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, 2002, pp. 22-31.

Δικτυακοί τόποι

1. <http://whatis.techtarget.com/>

Δικτυακός τόπος όπου μπορούν να βρεθούν σύντομοι ορισμοί για θέματα τεχνολογίας.

2. <http://en.wikipedia.org/wiki/>

Δικτυακός τόπος όπου δίνονται συνοπτικές πληροφορίες σχετικά με οποιοδήποτε θέμα, με αρχειτούς συνδέσμους για περαιτέρω έρευνα.

3. <http://www.tinyos.net/>

Δικτυακός τόπος που αφορά το λειτουργικό σύστημα TinyOS το οποίο χρησιμοποιείται στα δίκτυα αισθητήρων

4. <http://mantis.cs.colorado.edu/tikiwiki/tiki-index.php>

Δικτυακός τόπος που αφορά ένα λειτουργικό σύστημα ανοικτού κώδικα για δίκτυα αισθητήρων