



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ, ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

**Μελέτη και Υλοποίηση Ρομποτικής Πλατφόρμας
Διαφορικής Κίνησης με MD25 H-Bridge και EMG-30
Κινητήρες για Ασύρματους Αισθητήρες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Σ. ΠΑΠΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

Επιβλέπων : **Γ. Σταμούλης**
Αναπ. Καθηγητής
2^{ος} Βαθμολογητής: **Δρ. Π. Κίικρας**

Βόλος 2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7779/1
Ημερ. Εισ.: 15-12-2009
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΗΥΤΔ
2009
ΠΑΠ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ,
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

**Μελέτη και Υλοποίηση Ρομποτικής Πλατφόρμας
Διαφορικής Κίνησης με MD25 H-Bridge και EMG-30
Κινητήρες για Ασύρματους Αισθητήρες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Σ. ΠΑΠΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

Επιβλέπων : **Γ. Σταμούλης**
Αναπ. Καθηγητής
2^{ος} Βαθμολογητής: **Δρ. Π. Κίκιρας**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Σεπτεμβρίου 2009

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Φ.
Καθηγητής

.....

Μ.
Καθηγητής

.....

Α.
Λέκτορας

Βόλος 2009

(Υπογραφή)

.....
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Σ. ΠΑΠΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

© 2009 – All rights reserved

Copyright ©Αλέξανδρος Σ. Παπαποστόλου, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης. Η αναφορά του ονόματος του συγγραφέα θα αποτελούσε για αυτόν μια χαρά. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη αυτοκινούμενων οχημάτων διαφορετικής κίνησης και των ασύρματων αισθητήρων για την υλοποίηση ενός ενιαίου ενσωματωμένου συστήματος που λειτουργεί ως κινητός ασύρματος αισθητήρας. Η ρομποτική πλατφόρμα που υλοποιείται έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη κατανεμημένων αλγορίθμων σε κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, να τηλεκατευθύνεται ή να αυτοκατευθύνεται μέσω του αισθητήρα.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στη θεωρία ελέγχου και σχεδιασμού ρομποτικής κίνησης και εκτενέστερα στη διαφορεική κίνηση 2 τροχών που είναι πολύ διαδεδομένη στα ρομποτικά οχήματα με τροχούς. Παρουσιάζεται η κινηματική της διαφορεικής κίνησης και η οδομετρία. Επίσης επισημαίνονται τα χαρακτηριστικά των ασύρματων αισθητήρων και των πολλαπλών εφαρμογών τους και κυρίως τα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και οι εφαρμογές τους.

Έπειτα, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο υλικό που χρησιμοποιείται σήμερα για τη σχεδίαση ενός δικτύου αισθητήρων και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλατφόρμων και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Εκτενέστερα παρουσιάστηκε η πλατφόρμα Tmote Sky της Moteiv, την οποία και χρησιμοποιήσαμε, αναλυτικότερα οι τρόποι σύνδεσης I2C και serial (UART), όπως επίσης και η γέφυρα MD25 που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των κινητήρων EMG30.

Αντίστοιχα παρουσιάζεται το λογισμικό στο οποίο στηρίζεται η πλατφόρμα αυτή, το οποίο περιλαμβάνει το λειτουργικό σύστημα TinyOS και τη γλώσσα προγραμματισμού NesC. Ύστερα, αναφέρεται και η βιβλιοθήκη Swing της Java για το γραφικό περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε.

Στη συνέχεια, περιγράφεται το γραφικό περιβάλλον και οι χρήσεις του.

Λέξεις – Κλειδιά : κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, Tmote Sky, TinyOS, NesC, TOSSIM, Oscilloscope, UART, I2C, MD25, διαφορεική κίνηση 2 τροχών, robot, CC2420.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study mobile differential drive vehicle and wireless sensors to achieve a single integrated system that works as a mobile wireless sensor. The robotic platform implemented is designed to be used for the study of distributed algorithms in mobile wireless sensor networks, to be remote controlled or self-driven through the sensor.

For start an introduction is made to control theory and the design of robotic motion and more details are provided concerning the differential movement of wheels, used in mobile robotic vehicles. Kinematics of motion and the differential odometry are presented. Also highlighted are the characteristics of wireless sensors and their multiple applications and particularly mobile wireless sensor networks and their applications.

Then a brief reference is made to the material currently used to design a network of sensors and to the technical platforms and communication protocols. Extensively presented is the platform of Tmote Sky Moteiv, which we used and, in more detail the ways to connect I2C and serial (UART), as well as the bridge MD25 used to control motor EMG30.

Respectively, the software behind the platform is analyzed, and this includes the TinyOS operating system and programming language NesC. Then the library of Java Swing for the GUI figure is mentioned.

Then the graphic interface and its uses are described.

Keywords: mobile wireless sensor networks, Tmote Sky, TinyOS, NesC, TOSSIM, Oscilloscope, UART, I2C, MD25, differential movement 2 wheels, robot, CC2420.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Αντικείμενο της πτυχιακής-Σκοπός (σελ.10)
- 1.2 Οργάνωση του τόμου (σελ. 11)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΚΙΝΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

- 2.1 Περιγραφή ασύρματου δικτύου αισθητήρων (σελ.12)
- 2.2 Εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (σελ.13)
- 2.3 Εφαρμογές στα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (σελ.14)
- 2.4 Αισθητήρες (σελ.15)
 - 2.4.1 Πλατφόρμες στις οποίες βασίζονται τα δίκτυα αισθητήρων (σελ. 16)
 - 2.4.1.1 Η μονάδα Spec (σελ. 18)
 - 2.4.1.2 Τα MicaZ, Mica2 (σελ.19)
 - 2.4.1.3 Το Tmote Sky (σελ.20)
 - 2.4.1.4 Το imote (σελ. 20)
 - 2.4.1.5 Η πλατφόρμα Stargate (σελ. 21)
 - 2.4.1.6 Το BTnode (σελ. 22)
 - 2.4.1.7 Αρχιτεκτονικές διαφορές (σελ. 23)
 - 2.4.1.8 Η εξέλιξη στο υλικό και το λογισμικό των πλατφορμών (σελ. 25)
 - 2.4.1.9 Σημερινές πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων οργανωμένες κατά τάξη συσκευής (σελ. 25)
- 2.5 Πρότυπα λογισμικού και διεπαφών (σελ. 27)
 - 2.5.1 Αξιοπιστία δεδομένων (σελ. 29)
 - 2.5.2 Διάρκεια πηγής τάσης τροφοδοσίας (σελ. 31)
 - 2.5.3 Κόστος (σελ. 33)
 - 2.5.4 Εύρος Μετάδοσης (σελ. 33)
 - 2.5.5 Ρυθμός Μετάδοσης δεδομένων (σελ. 33)
 - 2.5.6 Λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων (σελ. 34)
 - 2.5.7 Ασφάλεια δεδομένων (σελ. 34)
 - 2.5.8 Το Zigbee συγκριτικά με εναλλακτικές τεχνολογίες (σελ. 35)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΔΥΟ ΤΡΟΧΩΝ

- 3.1 Εισαγωγή στη θεωρία σχεδιασμού και ελέγχου ρομποτικής κίνησης (σελ. 37)
- 3.2 Διαφορική οδήγηση δύο τροχών (σελ. 38)
 - 3.2.1 Περιγραφή (σελ. 38)
 - 3.2.2 Κινηματική (σελ. 38)
 - 3.2.3 Οδομετρία (σελ. 41)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΥΛΙΚΟ HARDWARE

- 4.1 Tmote Sky (Moteiv) (σελ. 43)
 - 4.1.1 Βασικά γνωρίσματα (σελ. 44)
 - 4.1.2 Κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά (σελ. 44)
 - 4.1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας Tmote Sky (σελ. 45)
 - 4.1.4 Τεχνολογικές τάσεις (σελ. 45)
 - 4.1.5 Ασύρματος πομποδέκτης (σελ. 47)
 - 4.1.6 Ολοκληρωμένη σχεδίαση (σελ. 50)
 - 4.1.7 Συνδετήρας επέκτασης (σελ. 52)
 - 4.1.8 Κατανάλωση ενέργειας (σελ. 53)
 - 4.1.9 Αισθητήρες υγρασίας/ θερμοκρασίας και φωτός (σελ. 55)
 - 4.1.10 USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receive/ Transmit) (σελ. 57)
 - 4.1.10.1.1 USART: UART mode: εισαγωγή (σελ. 57)
 - 4.1.10.1.2 USART: UART mode: εφαρμογή (σελ. 58)
 - 4.1.10.1.2.1 USART αρχικοποίηση και επαναφορά αρχικών συνθηκών (σελ. 58)
 - 4.1.10.1.2.2 Τυποποίηση χαρακτήρων (σελ. 59)
 - 4.1.10.1.2.3 USART Receive Enable and Transmit Enable (σελ. 59)
 - 4.1.10.1.2.4 UART Παραγωγή ρυθμού μετάδοσης (σελ. 60)
 - 4.1.10.1.3 USART καταχωρητές: UART mode (σελ. 61)
 - 4.1.10.2 USART: I2Cmode (σελ. 62)
 - 4.1.10.2.1 USART: I2Cmode: Εισαγωγή (σελ. 62)
 - 4.1.10.2.2 USART: I2Cmode: Εφαρμογή (σελ. 63)
- 4.2 RD02 Σύστημα Ρομποτικής Οδήγησης (σελ. 64)
 - 4.2.1 MD25 (σελ. 64)
 - 4.2.1.1 MD25: I2Cmode και προβλήματα (σελ. 66)
 - 4.2.1.2 MD25: Serial mode στα 38400bps (σελ. 66)
 - 4.2.2 EMG30 (σελ. 70)
- 4.3 USBee AX Test Pod (σελ. 71)
 - 4.3.1 Περιγραφή (σελ. 71)
 - 4.3.2 USBee Logic Analyzer (σελ. 72)
 - 4.3.2.1 USBee Logic Analyzer-Αποκωδικοποίηση (σελ. 72)
- 4.4 I2C-TRN Dual Bidirectional I2C Voltage Level Translate (σελ. 73)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

- 5.1 Λογισμικό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (σελ. 75)
 - 5.1.1 Εισαγωγή (σελ. 75)
 - 5.1.2 Λειτουργικό σύστημα TinyOS (σελ. 75)

- 5.1.3 NesC και βασικά της χαρακτηριστικά (σελ. 76)
- 5.2 Λογισμικό στο Tmote Sky (σελ. 77)
 - 5.2.1 Το λειτουργικό σύστημα του Tmote Sky (Boomerang) (σελ. 77)
 - 5.2.2 Εγκατάσταση και προγράμματα του Tmote Sky (σελ. 78)
 - 5.2.3 HPLSUARTOC.nc και ασφαλής UART επικοινωνία (σελ. 79)
 - 5.2.4 MSP430 I2CM.nc (σελ. 81)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ROBOMOT

- 6.1 Εισαγωγή (σελ. 82)
- 6.2 TOSBase.nc (σελ. 82)
- 6.3 MD25Msg.h (σελ. 83)
- 6.4 TmoteMD25.nc (σελ. 84)
- 6.5 Java Εφαρμογή MD25Sky.java (σελ. 86)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

- 7.1 Μελλοντικές Δυνατότητες Επέκτασης (σελ. 88)

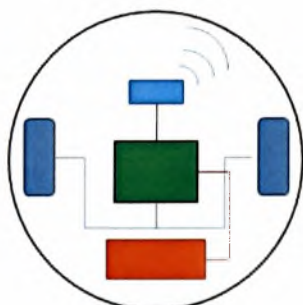
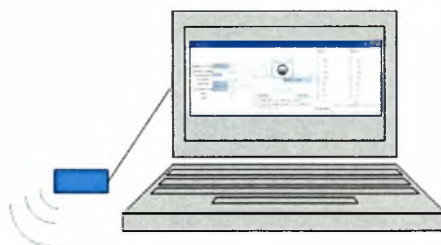
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (σελ. 89)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της Πτυχιακής - Σκοπός

Αντικείμενο της πτυχιακής είναι η μελέτη της τεχνολογίας ασύρματων δικτύων αισθητήρων και της τεχνολογίας ρομποτικών συστημάτων, με σκοπό την υλοποίηση ενός ενιαίου συστήματος με την ικανότητα να «αισθάνεται» περιβαλλοντικές αλλαγές και να κινείται χειροκίνητα από έναν απομακρυσμένο υπολογιστή. Ο αισθητήρας αναλαμβάνει να προωθεί ασύρματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα τις μετρήσεις σε έναν σταθερό υπολογιστή και να δέχεται από αυτόν ανά πάσα στιγμή οδηγίες κίνησης, τις οποίες τις προωθεί στο ρομποτικό σύστημα οδήγησης. Ο χειρισμός της πλοήγησης και η εμφάνιση των μετρήσεων γίνονται στο γραφικό περιβάλλον του υπολογιστή.



Εικόνα 1.1- σχέση ρομποτικού συστήματος και υπολογιστή

1.2 Οργάνωση του τόμου

Αρχικά έγινε μια εισαγωγή στη θεωρία ελέγχου και σχεδιασμού ρομποτικής κίνησης και στη συνέχεια εκτενέστερη αναφορά στη διαφορική κίνηση 2 τροχών. Η τελευταία είναι πολύ διαδεδομένη στα ρομποτικά οχήματα με τροχούς. Παρουσιάζεται η κινηματική της διαφορικής κίνησης και η οδομετρία. Επίσης, επισημαίνονται τα χαρακτηριστικά των ασύρματων αισθητήρων και των πολλαπλών εφαρμογών τους και κυρίως των κινητών ασύρματων δικτύων αισθητήρων με τις εφαρμογές τους.

Έπειτα γίνεται μια σύντομη αναφορά στο υλικό που χρησιμοποιείται σήμερα για τη σχεδίαση ενός δικτύου αισθητήρων και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλατφόρμων και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Αναλυτικότερα παρουσιάστηκε η πλατφόρμα Tmote Sky της Moteiv, η οποία και χρησιμοποιήθηκε, πιο συγκεκριμένα οι τρόποι σύνδεσης I2C και serial (UART), όπως επίσης και η γέφυρα MD25 που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των κινητήρων EMG30.

Αντίστοιχα, παρουσιάζεται το λογισμικό στο οποίο στηρίζεται η πλατφόρμα αυτή, το οποίο περιλαμβάνει το λειτουργικό σύστημα TinyOS και τη γλώσσα προγραμματισμού NesC. Στη συνέχεια αναφέρεται και η βιβλιοθήκη Swing της Java για το γραφικό περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος, περιγράφεται το γραφικό περιβάλλον και οι χρήσεις του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΙΝΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Περιγραφή ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (Wireless Sensor Network) είναι ένα ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από χωρικά κατανεμημένες αυτόνομες συσκευές που χρησιμοποιούν αισθητήρες για να ελέγξουν τις φυσικές ή περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η δόνηση, η πίεση, η κίνηση ή οι ρύποι στις διαφορετικές τοποθεσίες. Κάθε αισθητήρας έχει ικανότητα ασύρματης επικοινωνίας, δυνατότητες επεξεργασίας σήματος και δικτύωσης των στοιχείων. Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων παρακινήθηκε αρχικά από τις στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η επιτήρηση πεδίων μαχών. Εντούτοις, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται τώρα σε πολλούς βιομηχανικούς και πολιτικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένου του περιβάλλοντος και της παρακολούθησης βιότοπων, των εφαρμογών υγειονομικής περίθαλψης, της οικιακής αυτοματοποίησης και του ελέγχου της κυκλοφορίας.

Η αρχή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στηρίζεται στην απλή εξίσωση:

Αίσθηση + Επεξεργασία + Ραδιοεπικοινωνία = Χιλιάδες εφαρμογές

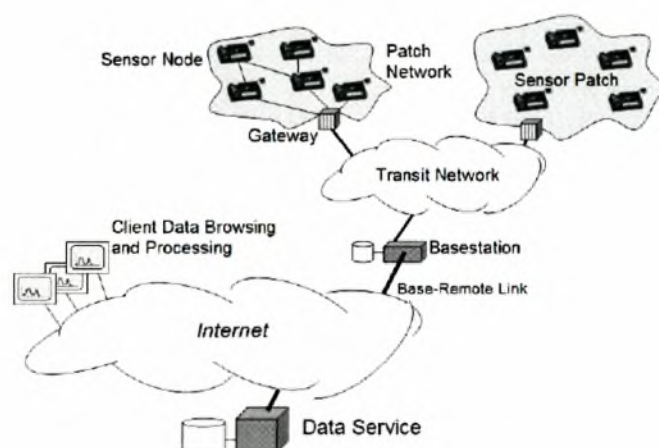


Figure 1: System architecture for habitat monitoring

Εικόνα 2.1 - αρχιτεκτονική συστήματος

2.2 Εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Οι εφαρμογές στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι πολλές και ποικίλες. Χρησιμοποιούνται εκεί όπου θα ήταν δύσκολο ή ακόμα και ακριβό να ελεγχθούν από αισθητήρες συνδεδεμένους με καλώδιο. Το πλεονέκτημα τους στηρίζεται στην ικανότητα να παρατάσσονται σε μεγάλους αριθμούς μικροσκοπικών κόμβων, καθώς η σύγχρονη τεχνολογία έκανε τους αισθητήρες φθηνούς και μικρούς, να συναντιούνται και να σχηματίζονται μεταξύ τους. Τα σενάρια χρήσης γι' αυτές τις συσκευές περιλαμβάνουν από ανίχνευση δεδομένων πραγματικού χρόνου, σε παρατήρηση περιβαλλοντικών συνθηκών, σε παρακολούθηση κτιριακών δομών και εξοπλισμών από τη φυσική τους θέση. Επίσης, ενώ αποκαλούνται ως ασύρματα δίκτυα **αισθητήρων**, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενεργοποιούν όπως στη περίπτωση του Robomote που ελέγχουν ενεργοποιητές κίνησης. Μερικά από τα πιο άμεσα παραδείγματα εφαρμογών των Α.Δ.Α. είναι:

- Στρατιωτικά δίκτυα αισθητήρων για την ανίχνευση και την λήψη όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών για τις εχθρικές κινήσεις, τις εκρήξεις, και άλλα φαινόμενα ενδιαφέροντος.
- Δίκτυα αισθητήρων για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των χημικών, βιολογικών, ραδιολογικών, πυρηνικών, και εκρηκτικών επιθέσεων καθώς και υλικών. Για παράδειγμα, σε μια εγκατάσταση χημικού εργοστασίου μπορούν πολύ εύκολα να ανιχνευθούν διαρροές από εκατοντάδες αισθητήρες που αυτόματα σχηματίζουν ένα ασύρματο αλληλοσυνδεδεμένο δίκτυο το οποίο αναφέρει αμέσως τον εντοπισμό της χημικής διαρροής. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ενσύρματα συστήματα τα κόστη εγκατάστασης είναι ελάχιστα αντί της ανάπτυξης χιλιάδων μέτρων καλωδίων ειδικά προστατευμένων καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος έκρηξης από χαλασμένα καλώδια. Το δίκτυο λόγω της ασύρματης φύσης του μπορεί πολύ εύκολα και χωρίς κόστος να επεκταθεί. Εκτός από τα χαμηλά κόστη έχουν επίσης το πλεονέκτημα να προσαρμόζονται δραστικά ανάλογα με τις ανάγκες που επιτάσσονται. Για παράδειγμα, το ίδιο ενσωματωμένο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός από την ανίχνευση των διαρροών στον εντοπισμό της πηγής της επικίνδυνης από δηλητηριώδη αέρια διαρροής και έπειτα στον υπολογισμό της ασφαλούς διαδρομής για εκκένωση έκτακτης ανάγκης.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ρύθμισης κυκλοφορίας για τον έλεγχο της κυκλοφορίας οχημάτων στις εθνικές οδούς ή στα κορεσμένα μέρη μιας πόλης.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων επιτήρησης για παροχή ασφάλειας σε εμπορικά πολυκαταστήματα, χώρους στάθμευσης, και άλλων εγκαταστάσεων.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χώρων στάθμευσης για καθορισμό των σημείων που είναι κατειλημμένα και αυτών που είναι ελεύθερα.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης κτιριακών εγκαταστάσεων π.χ. γέφυρες (BriMon)
- Δίκτυα αισθητήρων για την ανίχνευση και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών αλλαγών στις πεδιάδες, τα δάση, τους ωκεανούς, κλπ. Για παράδειγμα "Redwood Tries": παρακολούθηση μικροκλίματος:
 - Ρυθμό φωτοσύνθεσης

- Μεταφορά νερού και ιχθυοστοιχείων
- Τρόπο ανάπτυξης-ωρίμανσης

2.3 Εφαρμογές στα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που αποτελούνται από ασύρματους αισθητήρες πάνω σε κινητή πλατφόρμα είτε επίγειο όχημα με τροχούς ή ερπύστριες είτε θαλάσσιο ή εναέριο. Οι αισθητήρες αλληλεπιδρούν με το όχημα και το όχημα είτε είναι αυτόνομο και καθοδηγείται από τον αισθητήρα, είτε είναι καθοδηγούμενο μέσω του ασύρματου αισθητήρα από το σταθμό βάσης που επικοινωνούν άμεσα ή έμμεσα όλοι οι αισθητήρες, ή συνδυασμός και των δυο. Το πλεονέκτημα που έχουν σε σχέση με τα δίκτυα σταθερής θέσης είναι ότι λόγω της δυνατότητας της μεταφοράς έχουμε τη δυνατότητα της δυναμικής παρατήρησης των δεδομένων ανάλογα με αυτό που μας ενδιαφέρει. Επικεντρώνουμε αυτόματα αισθητήρες εκεί που μας ενδιαφέρει περισσότερο ανά πάσα στιγμή. Τα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένα λόγω του κόστους της πλατφόρμας και της αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης κατά τη μεταφορά, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα βασικό πλεονέκτημα των ασύρματων αισθητήρων που είναι η πολύ χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και η αυξημένη επιχειρησιακή ζωή. Οπότε τα περισσότερα κινητά ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται και αναπτύσσονται από την επιστημονική κοινότητα για ερευνητικούς λόγους, όπως για την έρευνα κατανεμημένων αλγορίθμων, συνεργασίας και κατανεμημένης αίσθησης για μεγάλα (>50) ρομποτικά δίκτυα. Κάθε ρομπότ, δηλαδή ρομποτική πλατφόρμα με αισθητήρα, είναι μικρό και όσο το δυνατόν πιο φθινό κατασκευαστικά. Ένα από τα πιο διαδεδομένα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η περίπτωση των Cobots που αναπτύχθηκε λόγω της έλλειψης ύπαρξης ικανοποιητικής πλατφόρμας, όσον αφορά το μικρό μέγεθος και το χαμηλό κόστος για τη δημιουργία δικτύων άνω των 50 κόμβων. Τα Khepera robots κοστίζουν γύρω στα 3000\$ και είναι μεγάλα σε μέγεθος. Άλλες προσπάθειες όπως το Robomote, MICAbot και Millibots παρέχουν μικρές και οικονομικές πλατφόρμες για την ανάπτυξη μεγάλου βαθμού κινητού δικτύου.

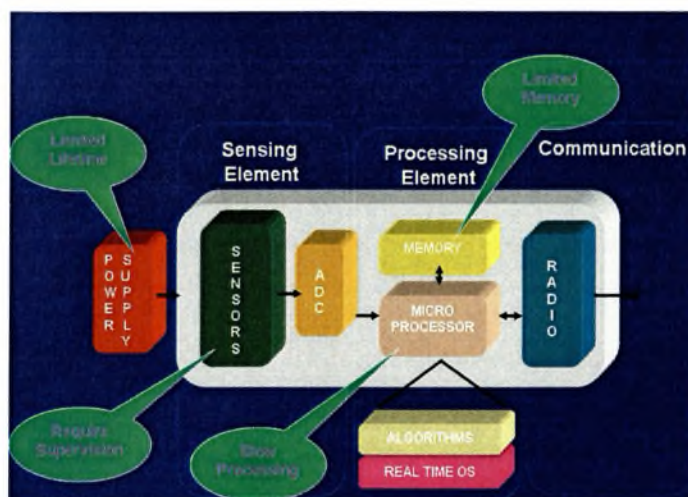
Η έρευνα στα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η αλληλεπίδραση και ο συνδυασμός της έρευνας της τεχνολογίας για αυτόνομα ή μη ρομποτικά οχήματα και της τεχνολογίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

- Οι ασύρματοι αισθητήρες βοηθάνε την ρομποτική τεχνολογία για την ανάπτυξή τους όσον αφορά την αυτονομία τους και την εντόπιση
- Η ρομποτική τεχνολογία βοηθάει την τεχνολογία των ασύρματων δικτύων για ανάπτυξη κατανεμημένων αλγορίθμων συνεργασίας κινητών πάντα κόμβων.

Εκτός από την εφαρμογή της στο ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιούνται κινητά ασύρματα δίκτυα στον αγροτικό τομέα, αλλά και σε άλλους τομείς για την δυναμική ανίχνευση και τον δυναμικό έλεγχο των περιβαλλοντικών αλλαγών στις πεδιάδες, τα δάση, τους ωκεανούς κλπ.

2.4 Αισθητήρες

Οι αισθητήρες είναι μικροσκοπικά ενσωματωμένες συσκευές που συνδυάζουν δυνατότητες επεξεργασίας, αίσθησης (sensing) και επικοινωνίας. Στη συνέχεια τα πρωτόκολλα επικοινωνίας συνδυάζουν κατάλληλα τις ανεξάρτητες συσκευές, για τη δημιουργία ενός διασυνδεδεμένου βροχωτού δικτύου (mesh network), όπου τα δεδομένα δρομολογούνται ανάμεσα σε όλους τους κόμβους και σχηματίζεται έτσι το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Είναι εξοπλισμένοι, συνήθως από μια μονάδα επεξεργασίας κατανάλωσης 1mW με περιορισμένη υπολογιστική ικανότητα 10MHz συχνότητα ρολογιού κύκλου μηχανής, περιορισμένη μνήμη περίπου 10KB RAM, 100KB ROM, με ένα πομποδέκτη ή άλλη συσκευή ασύρματης επικοινωνίας κατανάλωσης 10-20mW, εμβέλειας περίπου 10m και που υποστηρίζει διασυνδεδεμένο βροχωτό δίκτυο, συσκευές αίσθησης κατανάλωσης μερικών mW και μια πηγή ενέργειας, συνήθως μια μπαταρία. Οι συσκευές έχουν διαστάσεις από μερικά χιλιοστά μέχρι το μέγεθος ενός υπολογιστή παλάμης αν και σύμφωνα με τις τάσεις της τεχνολογίας, το νόμο του Moore, όλο και περισσότερο πυρίτιο ανά μονάδα περιοχής, όλο και περισσότερο επεξεργαστική ισχύ ανά μονάδα περιοχής τείνουν προς τη «μινιατουροποίηση». Οι αισθητήρες έχουν φθάσει το μέγεθος κόκκου σκόνης και ο χαρακτηρισμός του δικτύου αισθητήρων ως «έξυπνη σκόνη» έχει γίνει πραγματικότητα. Το κόστος των κόμβων αισθητήρων είναι ομοίως μεταβλητό, κυμαινόμενο από εκατοντάδες δολάρια ως μερικά σεντς, ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου αισθητήρων και της πολυπλοκότητας που απαιτείται από τους μεμονωμένους κόμβους αισθητήρων. Περιορισμοί μεγέθους και κόστους στους κόμβους αισθητήρων οδηγούν σε αντίστοιχους περιορισμούς σε πόρους όπως η ενέργεια, η μνήμη, η υπολογιστική ταχύτητα και το εύρος ζώνης. Οι αισθητήρες που απαρτίζουν τα δίκτυα αυτά μπορούν να μετρήσουν: απόσταση, κατεύθυνση, ταχύτητα, υγρασία, σύσταση εδάφους, θερμοκρασία, χημικά, ηλιακή ακτινοβολία, κίνηση, δονήσεις, σεισμικά και ακουστικά δεδομένα.

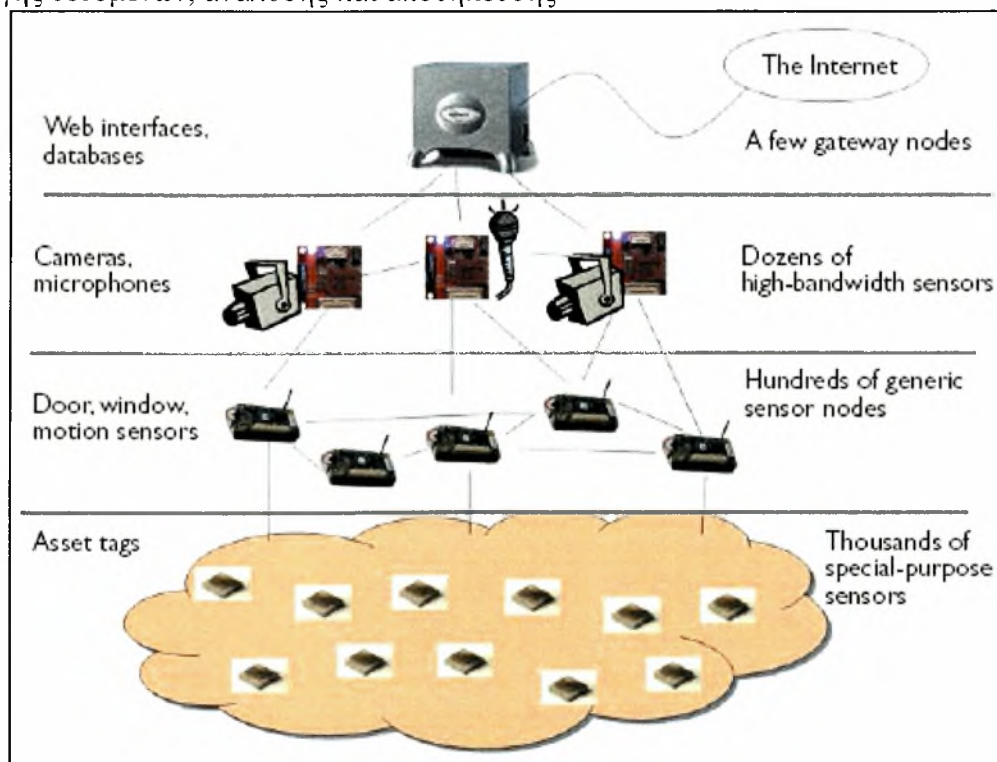


Εικόνα 2.2- Δομή ασύρματων αισθητήρων (εικόνα από http://www.ee.unimelb.edu.au/sen_net/multimedia/research_prog/intsens.gif)

Αντίθετα με τα κινητά τηλέφωνα και τους ασύρματους φορητούς υπολογιστές, η περιοδική τροφοδοσία δεν είναι δυνατή για τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στον τομέα των δικτύων αισθητήρων, μονάδες αισθητήρων (sensor nodes) ειδικού σκοπού, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να θυσιάζουν την ευελιξία προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, σχετικά φτηνές και μακράς επιχειρησιακής ζωής. Γενικευμένες μονάδες αισθητήρων παρέχουν διεπαφές (interfaces) με μεγάλες δυνατότητες επέκτασης, ώστε να δημιουργούν ευέλικτες συνδέσεις με μια σειρά από απλούς αισθητήρες. Μονάδες αισθητήρων μεγάλου εύρους ζώνης έχουν ενσωματωμένες τις δυνατότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας, που είναι απαραίτητες ώστε να ανταποκρίνονται σε πολύπλοκες ακολουθίες δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας κινούμενης εικόνας (video) και ήχου. Μονάδες που λειτουργούν ως πύλες (Gateway nodes) παρέχουν μια σημαντική σύνδεση μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και των παραδοσιακών υποδομών διαδικτύωσης, συμπεριλαμβανομένων του Ethernet, του 802.11 προτύπου επικοινωνίας και των διευρυμένων δικτύων.

2.4.1 Πλατφόρμες στις οποίες βασίζονται τα δίκτυα αισθητήρων

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



Εικόνα 2.3 - ιεραρχική ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Αυτή η βαθμωτή αρχιτεκτονική είναι κοινή σε όλα σχεδόν τα δίκτυα αισθητήρων και γίνεται εύκολα κατανοητή με ένα παράδειγμα. Ας θεωρήσουμε ένα

δίκτυο αισθητήρων ενός προηγμένου συστήματος ασφαλείας, στο οποίο η πλειονότητα των αισθητήρων καλύπτει σπάσιμο τζαμιών, κλείσιμο επαφών και ανίχνευση κίνησης. Το πλήθος των αισθητήρων και των κατάλληλων θέσεων τους απαιτούν να τροφοδοτούνται από μπαταρία. Συμπληρώνονται από μερικούς περισσότερο εξελιγμένους αισθητήρες, όπως είναι οι κάμερες, οι ανιχνευτές ήχων και χημικών, τοποθετημένοι σε καίρια σημεία. Τα απλά και τα σύνθετα δεδομένα των αισθητήρων δρομολογούνται μαζί, μέσω ενός δικτύου, σε μια μονάδα παρακολούθησης και ελέγχου του κτιρίου, που παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης. Οι αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε παράθυρα και πόρτες για ανίχνευση εισβολής είναι παραδείγματα γενικευμένων μονάδων αισθητήρων (generic sensing devices). Η λειτουργία τους είναι απλή και συγκεκριμένη και απαιτεί την τροφοδοσία από μπαταρία μεγάλης διάρκειας. Επιπλέον, οι ρυθμοί επεξεργασίας και επικοινωνίας που διαθέτουν, είναι οι ελάχιστοι. Αντίθετα, οι αισθητήρες ήχου, εικόνας και χημικών είναι παραδείγματα μονάδων μεγάλου εύρους ζώνης, που απαιτούν επικοινωνία και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να απαιτούν τροφοδότηση από μπαταρία αλλά συχνά χρειάζεται να συνδεθούν με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής τάσης, για να λειτουργήσουν σε μακρά διάρκεια.

Επιπλέον των παραδοσιακών εφαρμογών ασφαλείας, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι σχεδιασμένα να παρακολουθούν κινητά αντικείμενα αξίας (mobile assets), μέσω μικροσκοπικών, χαμηλού κόστους συσκευών ασφαλείας (security tagsmini motes). Αυτοί οι κόμβοι αισθητήρων ειδικού σκοπού είναι συνώνυμοι μικροσκοπικών διατάξεων με απαίτηση ελάχιστης τροφοδοσίας. Θα μπορούσαν να ενεργοποιήσουν τον συναγερμό όταν ένα αντικείμενο απομακρυνθεί χωρίς εξουσιοδότηση. Επίσης πρέπει να είναι πλήρως ολοκληρωμένοι και σχετικά φτηνοί.

Στα συστήματα ασφαλείας, το δίκτυο αισθητήρων είναι πιθανό να έχει ένα ή περισσότερα τελικά σημεία, που περιλαμβάνουν μια βάση δεδομένων ή άλλο λογισμικό συλλογής δεδομένων, σχεδιασμένο να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει ενδείξεις ανεξάρτητων αισθητήρων. Αυτές οι μονάδες πύλης (gateway nodes) παρέχουν μια διεπαφή (interface) σε πολλά υπάρχοντα είδη δικτύων.

Στον Πίνακα I παρατίθενται τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεσσάρων κατηγοριών των μονάδων-κόμβων: πλατφόρμα-αισθητήρας ειδικού σκοπού (specialized sensing platform), πλατφόρμα-αισθητήρας γενικού σκοπού (generic sensing platform), πλατφόρμα-αισθητήρας μεγάλου εύρους ζώνης (high bandwidth sensing) και πύλη (gateway) - όλες κατασκευασμένες με τεχνολογία αιχμής.

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

Πίνακας 1 - τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των 4 κατηγοριών ασύρματου δικτύου.

2.4.1.1 Η μονάδα Spec

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

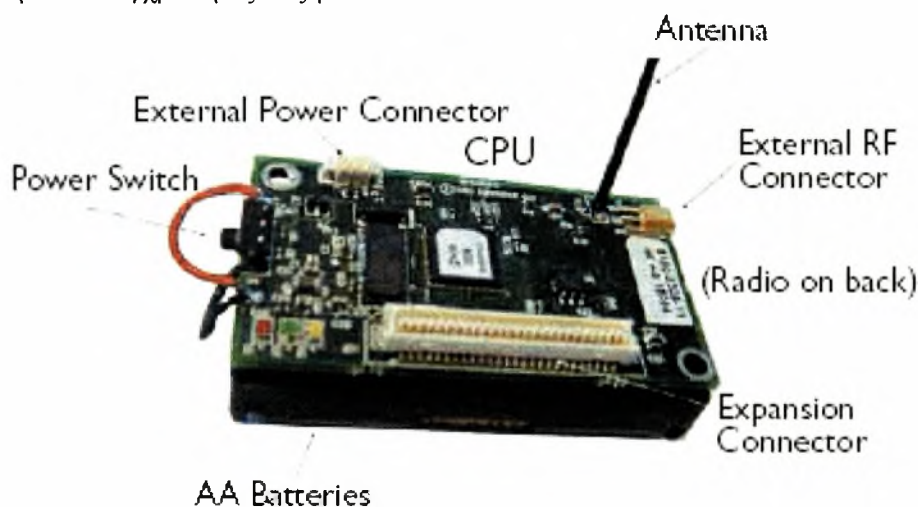


Εικόνα 2.4 - η μονάδα Spec

Τα motes του Πανεπιστημίου Berkeley, California αποτελούν παράδειγμα συσκευών γενικευμένης τάξης (generic sensor devices), που χρησιμοποιούνται σήμερα από περισσότερους από εκατό ερευνητικούς οργανισμούς. Κάποια από αυτά είναι το Mica2 και το Tmote Sky.

2.4.1.2 Τα MicaZ, Mica2

Το Mica2 είναι ένα από τα πιο πρόσφατα ανεπτυγμένα εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα, που ενσωματώνει εξαρτήματα για μέγιστη ευελιξία, με το MicaZ να αποτελεί την πιο σύγχρονη εξέλιξη του.



Εικόνα 1.5 - το Mica2

Περιλαμβάνει ένα μεγάλο σύνδεσμο διεπαφής παρέχοντας τη δυνατότητα προσάρτησης μιας σειράς από αισθητήρες. Διαθέτοντας μεγάλο πλήθος από I/O pins και δυνατότητες επέκτασης, το Mica2 είναι μια από τις καλύτερες επιλογές κόμβων-αισθητήρων σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος και το κόστος δεν είναι σημαντικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, συνδέεται εύκολα σε ανιχνευτές κίνησης και σε επαφές παραθύρων και θυρών, που είναι απαραίτητα για το σύστημα ασφάλειας σε κτίρια. Επιπλέον, το Mica2 είναι ικανό να δέχεται μηνύματα από μονάδες-κόμβους Spec, που είναι τοποθετημένοι σε αντικείμενα αξίας, όπως οι προσωπικοί και φορητοί υπολογιστές, για περιπτώσεις κλοπής. Η μνήμη και η επεξεργαστική ισχύς που είναι διαθέσιμη στο Mica2, είναι ικανές για τη διαχείριση πολλών δεδομένων που στέλνονται από τις μονάδες Spec. Παρόλο που το Mica2 μπορεί να συνδεθεί με ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων, δεν μπορεί να ανταποκριθεί στο μεγάλο εύρος δεδομένων που προέρχονται από σύνθετους αισθητήρες. Αποτυγχάνει στην επεξεργασία κινούμενης εικόνας και ήχου μεγάλου εύρους ζώνης.

2.4.1.3 Το Tmote sky

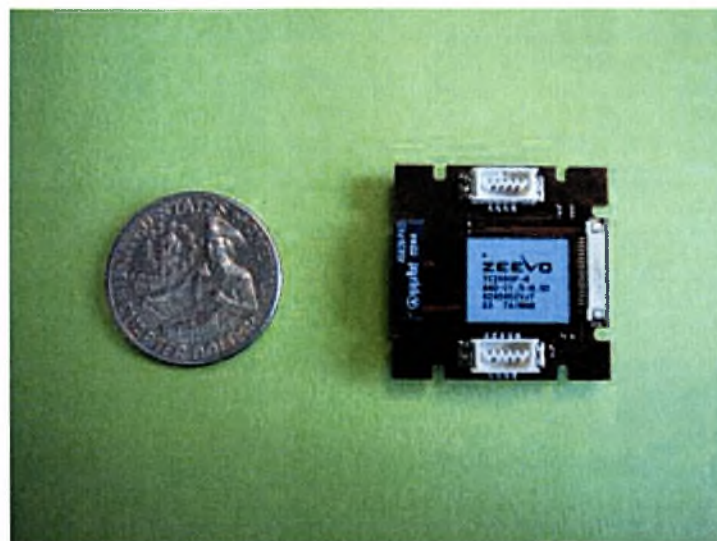
Το tmote-sky (το προηγούμενο μοντέλο ονομαζόταν Telosb) αποτελεί επίσης μια μονάδα που συνδυάζει ενσωματωμένους αισθητήρες, δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και προγραμματιστικές δυνατότητες. Τα χαρακτηριστικά του θα περιγράψουν αναλυτικά στη συνέχεια.



Εικόνα 2.6 - Tmote sky

2.4.1.4 Το imote

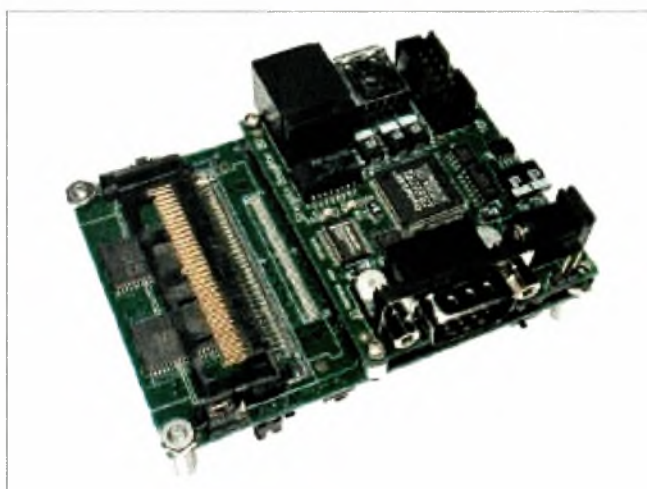
Το iMote, που δημιούργησε η Intel Research τον Μάιο του 2003, έχει σχεδιαστεί ως πλατφόρμα αισθητήρων μεγάλου εύρους ζώνης και περιλαμβάνει πολύ μεγαλύτερη μνήμη RAM και ισχύ επεξεργασίας, όπως επίσης πομποδέκτη βασισμένο σε τεχνολογία Bluetooth, ικανό να επικοινωνεί σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 500Kbps.



Εικόνα 2.7 - η πλατφόρμα της Intel iMote

2.4.1.5 Η πλατφόρμα Stargate

Η πλατφόρμα Stargate, που ανέπτυξε η Intel και πούλησε η Crossbow Technology, είναι αντιπροσωπευτική των συσκευών κατηγορίας πύλης (gatewayclass devices) και περιλαμβάνει επεξεργαστή Intel 400 MHz, μνήμη RAM μερικών megabytes και δυνατότητα αποθήκευσης μέχρι την τάξη των gigabytes. Είναι ικανή να συνδέεται ευθέως με συσκευές βασισμένες στο Mica2 και το iMote και να διαβιβάζει δεδομένα από χαμηλής ισχύος δίκτυα σε παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα όπως είναι το 802.11 και το Ethernet. Επιπλέον, οι διατάξεις μνήμης και επεξεργασίας του, του επιτρέπουν να λειτουργεί ως Web front-end σε δίκτυα αισθητήρων, όπου οι χρήστες έχουν πρόσβαση στα δεδομένα του μέσω Web browser.



Εικόνα 2.8 - η πλατφόρμα stargate της CrossBow

Το λειτουργικό σύστημα που τρέχει σε συγκεκριμένη πλατφόρμα πρέπει να είναι συμβατό με τις δυνατότητες του υλικού (hardware) της πλατφόρμας. Για συσκευές ειδικού και γενικού σκοπού, ένα ειδικό λειτουργικό σύστημα καλούμενο TinyOS, το οποίο θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο, έχει σχεδιαστεί ώστε να τρέχει σε πλατφόρμες με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Αντίθετα με πολλά ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα, αυτό παρέχει ισχυρή ενοποίηση ανάμεσα σε ασύρματη σύνδεση και λειτουργίες δικτύου. Παρόλα αυτά, καθώς αυξάνουν οι δυνατότητες των πλατφορμών, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην πλατφόρμα Stargate, απαιτείται όλο και περισσότερη συμμετοχή από το λειτουργικό σύστημα ώστε να υποστηριχτούν πιο σύνθετες εφαρμογές. Πολυεπεξεργασία (multiprocessing), μεταγωγή εκτέλεσης διεργασιών με βάση την προτεραιότητα (preemptive task switching) ή ακόμα υποστήριξη εικονικής μνήμης, είναι επιθυμητά στη διεκπεραίωση πολλαπλών λειτουργιών του συστήματος. Η μονάδα Stargate τρέχει μια ενσωματωμένη έκδοχή του λειτουργικού συστήματος Linux. Όχι μόνο προσφέρει ένα πλήθος δυνατοτήτων του συστήματος αλλά, επιπλέον, το Linux παρέχει μια πληθώρα οδηγών συσκευής (device drivers) για κάρτες Ethernet και κάρτες ασύρματης δικτύωσης 802.11 που είναι απαραίτητες για να επιτρέψουν στους κόμβους-πύλες να συνδεθούν σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων δικτύωσης.

2.4.1.6 Το BTnode

Το BTnode είναι μια αυτόνομη ασύρματη πλατφόρμα επικοινωνίας και υπολογισμών βασισμένη σε ένα ραδιοπομπό Bluetooth και έναν μικροελεγκτή. Χρησιμεύει ως μια πλατφόρμα επίδειξης για την έρευνα σε κινητά και ειδικά συνδεδεμένα δίκτυα (MANETs) και διανεμημένα δίκτυα αισθητήρων. Το BTnode έχει αναπτυχθεί από κοινού στο ΕΘ Ζυρίχης από την εφαρμοσμένη μηχανική υπολογιστών και το εργαστήριο δικτύων (TIK) και την ερευνητική ομάδα για τα διανεμημένα συστήματα. Το χαμηλής ισχύος ασύρματο σύστημα εκπομπής είναι το ίδιο όπως χρησιμοποιείται και στα Berkley motes Mica2. Και τα δύο συστήματα εκπομπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα ή να κλείνουν ανεξάρτητα όταν δεν βρίσκονται σε χρήση, μειώνοντας αρκετά τη κατανάλωση ισχύος της συσκευής.

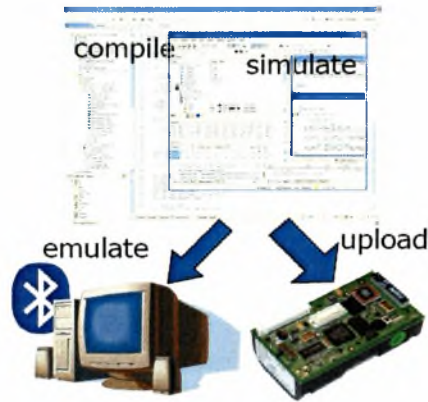


Εικόνα 2.9 - BT Node

Τα χαρακτηριστικά του BT node:

- Microcontroller: Atmel ATmega 128L (8 MHz @ 8 MIPS)
- Memories: 64+180 Kbyte RAM, 128 Kbyte FLASH ROM, 4 Kbyte EEPROM
- Bluetooth subsystem: Zeevo ZV4002, supporting AFH/SFH
- Scatternets with max. 4 Piconets/7 Slaves, BT v1.2 compatible
- Low-power radio: Chipcon CC1000 operating in ISM band 433-915 MHz
- External Interfaces: ISP, UART, SPI, I2C, GPIO, ADC, Timer, 4 LEDs
- Standard C Programming, TinyOS compatible

Η πλατφόρμα ξεφεύγει από τη βασικότερη φιλοσοφία των WSN που αφορά την χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας από του κόμβους και στοχεύει στην προσαρμοστικότητα, την εύκαμπτη και γρήγορη εφαρμογή. Για τον λόγο αυτό εκτός από την συμβατότητα της με το TinyOS χρησιμοποιεί και το BTnut το οποίο είναι ένα πολύ ελαφρύ λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιεί την απλή γλώσσα C. Έχει γραφικό περιβάλλον και βιβλιοθήκες όπως και απλές εφαρμογές.



2.4.1.7 Αρχιτεκτονικές διαφορές

Η συνολική αρχιτεκτονική δομή και στις 4 κατηγορίες πλατφορμών δικτύων αισθητήρων είναι αξιοσημείωτα όμοια, παρά τις σημαντικές διαφορές στις δυνατότητες των συσκευών. Η αρχιτεκτονική ομοιότητα προκύπτει από την απαίτηση να υποστηρίζουν την ασύρματη δικτύωση. Αντίθετα, οι βασικές τους διαφορές προκύπτουν από την επιθυμία των σχεδιαστών τους να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας καθενιάς πλατφόρμας για συγκεκριμένη κατηγορία εφαρμογής. Κάποιες από τις θεμελιώδεις αποφάσεις που πρέπει να λάβουν οι μηχανικοί εφαρμογών περιλαμβάνουν το μέγεθος της on-board μνήμης, εάν θα συμπεριλάβουν μνήμη αναλαμπής (flash memory), το μέγεθος της ισχύος της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) καθώς, επίσης, τον τύπο και το εύρος ζώνης της ασύρματης ζεύξης. Αφού οι περισσότερες υλοποιήσεις μεταχειρίζονται εξεζητημένα συστατικά στοιχεία, κάποιες από αυτές τις αποφάσεις υπαγορεύονται από τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων μερών. Στο τέλος, το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον τελικό σχεδιασμό της κάθε μονάδας- αισθητήρα. Μια κύρια διαφορά ανάμεσα σε μονάδες δικτύου αισθητήρων και πιο παραδοσιακών υπολογιστικών πλατφορμών, περιλαμβανομένων των προσωπικών υπολογιστών, των υπολογιστών παλάμης (PDAs), ακόμα και των ενσωματωμένων συσκευών είναι η ακραία έμφαση που δίνουν τα δίκτυα αισθητήρων στη διαχείριση της ενέργειας. Μια πληθώρα εφαρμογών απαιτούν τροφοδότηση με μπαταρία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Προκειμένου να διαχειρίζεται αποτελεσματικά η ισχύς, κάθε υποσύστημα της πλατφόρμας τροφοδοτείται ανεξάρτητα. Για παράδειγμα, ο πομποδέκτης πρέπει να λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια της ενεργής επικοινωνίας και, αν είναι δυνατόν, να κλείνει την κεντρική μονάδα επεξεργασίας στις περιόδους μη επεξεργασίας. Όμοια, πρέπει να είναι σε θέση να κόβει την τροφοδοσία στα υποσυστήματα αισθητήρων και μονάδων εισόδου-εξόδου, ξεχωριστά, όταν είναι ανενεργά.

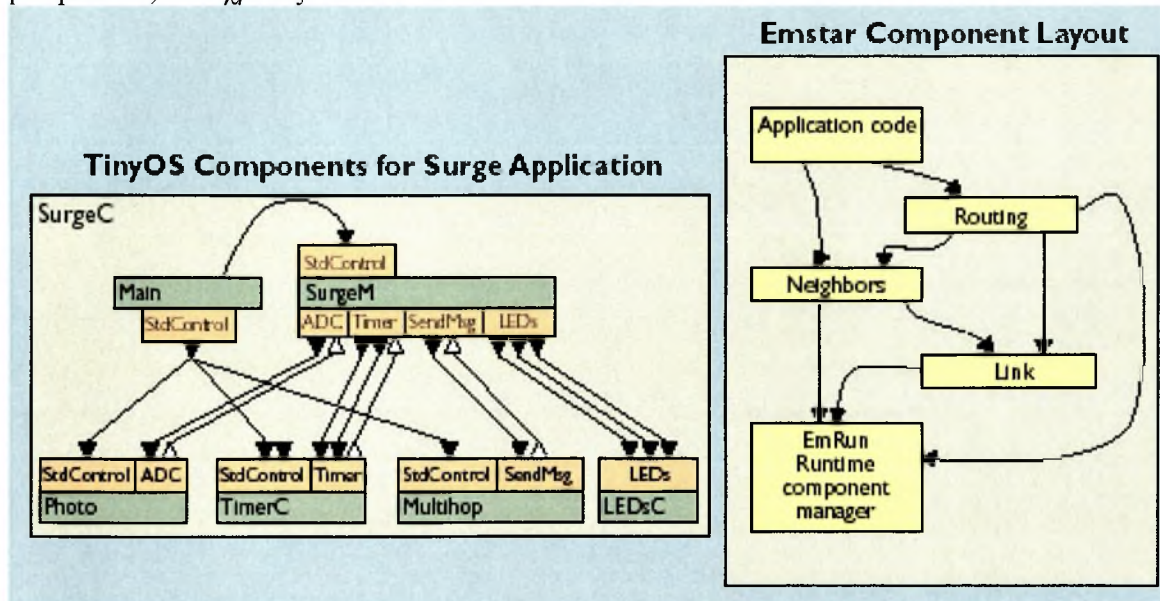
Το λειτουργικό σύστημα TinyOS, σε πολλές περιπτώσεις, ελέγχει την δραστηριότητα και την ισχύ των διαφόρων υποσυστημάτων. Ο χρονισμός των περιόδων που σταματάει η τροφοδοσία (power-down cycles) καθορίζεται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως είναι οι απαιτήσεις της εφαρμογής και το συγκεκριμένο υλικό που χρησιμοποιείται. Στο TinyOS, η διαχείριση ισχύος αφορά κάθε τομέα του συστήματος και όλα τα επιμέρους στοιχεία είναι σχεδιασμένα ώστε να μην καταναλώνουν ισχύ όταν είναι ανενεργά. Για να διευκολυνθεί η σωστή

διαχείριση ισχύος, οι πλατφόρμες των δικτύων αισθητήρων δίνουν απευθείας στις εφαρμογές, λεπτομερή έλεγχο του υποκείμενου υλικού. Παραδοσιακές αντιλήψεις διαστρωμάτωσης για τις στοίβες τόσο του δικτύου όσο και των αισθητήρων οδηγούν σε αναποτελεσματική χρήση της ισχύος. Πρόσφατη έρευνα προτείνει μια κοινή προσέγγιση αυτής της πρόκλησης στο πεδίο των πλατφορμών, με τη χρήση 3 πρόσθετων αρχιτεκτονικών στοιχείων:

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

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

Όταν το Linux χρησιμοποιείται σε μονάδες κατηγορίας πύλης (gateway-class nodes), όπως είναι το Stargate, χρειάζεται επιπρόσθετη υποστήριξη για ακριβή έλεγχο του υλικού, για την οποία έχουν μεριμνήσει οι σχεδιαστές. Στο Stargate, οι καταχωρητές (processor registers) και οι γραμμές εισόδου-εξόδου γενικού σκοπού, γίνονται διαθέσιμες στις εφαρμογές μέσω οδηγών (drivers) ειδικού σκοπού. Στη συνέχεια, τα περιβάλλοντα ανάπτυξης των δικτύων αισθητήρων (όπως είναι το Emstar), χρησιμοποιούν αυτούς τους οδηγούς για να παρέχουν στις εφαρμογές, τον έλεγχο πάνω στον χρονισμό και στην κατάσταση των περιφερειακών (hardware peripherals) που χρειάζονται .



Εικόνα 2.10 - μοντέλο της εφαρμογής Emstar

Οι προσπάθειες ανάπτυξης του TinyOS και του ενσωματωμένου Linux, υιοθέτησαν το virtualization (εικονοποίηση) της επεξεργασίας και των πόρων επικοινωνίας, για να απλοποιήσουν τη διαδικασία εξέλιξης των δικτύων αισθητήρων. Ένα τμήμα για την παροχή ακριβούς ελέγχου υλικού σε λογισμικό επίπεδο

εφαρμογών είναι ότι κάποιες φορές, συγκεκριμένα δομικά στοιχεία του υλικού καθιστούν το λογισμικό του δικτύου αισθητήρων, μη συμβατό. Τόσο το TinyOS όσο και το Emstar παρουσιάζουν κάποιες αφηρημένες έννοιες για το υλικό που προσπαθούν να διατηρήσουν τη συμβατότητα, χωρίς να θυσιάζουν τον ακριβή έλεγχο. Το καθένα παρέχει την επιλογή της χρήσης υψηλού επιπέδου μεταφραστών για τη διευκόλυνση ανάπτυξης της εφαρμογής.

2.4.1.8 Η εξέλιξη στο υλικό και το λογισμικό των πλατφορμών

Η πρόσφατη έρευνα και ανάπτυξη των πλατφορμών 1ης γενιάς ασύρματων δικτύων αισθητήρων επαναπροσδιορίζεται για να βοηθήσει τους μηχανικούς συστημάτων να ορίσουν μια νέα γενιά υλικού που θα εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες των δικτύων.

Αναλύοντας την εξέλιξη στο υλικό των δικτύων αισθητήρων πρέπει να τονίσουμε την επίδραση του νόμου του Moore, στο σχεδιασμό και την εξέλιξη των δικτύων. Για όλες τις κατηγορίες πλατφορμών, εκτός από τις μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού, ο νόμος του Moore εγγυάται αύξηση της απόδοσης για δεδομένη ισχύ. Όπως φαίνεται στον Πίνακα %[^] η μονάδα Mica2 έχει σχεδόν οχταπλάσια μνήμη και εύρος ζώνης επικοινωνίας από τον προκάτοχό του, τη μονάδα Rene, σχεδιασμένη το 1999, παρότι έχουν ίδια ισχύ και κόστος. Οι συσκευές κατηγορίας πύλης (gateway devices) και μεγάλου εύρους ζώνης (high-bandwidth devices) έχουν επιτύχει παρόμοια άλματα απόδοσης, χωρίς σημαντική αλλαγή στις απαιτήσεις ισχύος και κόστους. Αντίθετα, οι μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού, όπως είναι η μονάδα Spec, χρησιμοποιούν προχωρημένες τεχνικές που απορρέουν από το νόμο του Moore, για να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος και το κόστος, ενώ διατηρούν την ίδια απόδοση. Μέρος της αυξημένης απόδοσης των μονάδων αισθητήρων γενικευμένης τάξης οφείλεται στους νέους CMOS ραδιοπομπούς, που έχουν σχεδιαστεί για εκπομπή χαμηλού ρυθμού και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον της αύξησης της απόδοσης των πομπών, οι διεπαφές επικοινωνίας που παρέχονται από πομπούς χαμηλής ισχύος, περιλαμβάνουν τώρα εξειδικευμένη υποστήριξη υλικού για να βοηθήσουν στη μείωση του υψηλού φόρτου της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας. Ελεγκτές χαμηλής ισχύος μπορούν να στείλουν δεδομένα μέσω RF καναλιού, με πολλαπλάσιες ταχύτητες των πομπών της προηγούμενης γενιάς. Επιπρόσθετα, προηγούμενοι σχεδιασμοί υλικού χρησιμοποιούσαν τον μικροελεγκτή για να καθορίζει τον κύκλο λειτουργίας του πομπού και να ελέγχει για δραστηριότητα στο κανάλι. Οι επόμενης γενιάς πομποί έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς που εκτελούν αυτόματα αυτή τη λειτουργία.

2.4.1.9 Σημερινές πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων οργανωμένες κατά τάξη συσκευής

Node	CPU	Power	Memory	I/O and Sensors	Radio	Remarks
------	-----	-------	--------	-----------------	-------	---------

Special -purpose Sensor Notes

Spec 2003	4-8Mhz Custom 8-bit	3mW peak 3uW idle	3K RAM	I/O Pads on chip, ADC	50-100 Kbps	Full custom silicon, traded RF range and accuracy for low-power
------------------	----------------------------	--------------------------	---------------	------------------------------	--------------------	--

Generic Sensor Notes

Rene 1999	ATMEL 8535	.036mW sleep 60mW active	512B RAM 8K Flash	Large expansion connector	10Kbps	Primary TinyOS development platform.
Mica-2 2001	ATMEGA 128	.036mW sleep 60mW active	4K RAM 128K Flash	Large expansion connector	76Kbps	Primary TinyOS development platform.
Telos 2004 (Tmote Sky)	Motorola HCS08	.001 mW sleep 32mW active	4K RAM	USB and Ethernet	250Kbps	Supports IEEE 802.15.4 standard. Allows higher-layer Zigbee standard. 1.8V operation
Mica-Z 2004	ATMEGA 128		4K RAM 128K Flash	Large expansion connector	250Kbps	Supports IEEE 802.15.4 standard. Allows higher-layer Zigbee standard.

High Bandwidth Sensor Notes

BT Node 2001	ATMEL Mega 128L 7.328Mhz	50MW idle 285MW active	128KB Flash 4KB EEPROM 4KB SRAM	8-channel 10-bit A/D, 2 UARTS Expandable connectors	Bluetooth	Easy connectivity with cell phones. Supports TinyOS. Multihop using
---------------------	---------------------------------	-------------------------------	--	--	------------------	--

						multiple radios/nodes
						.
Imote 1.0 2003	ARM 7TDMI 12- 48MHz	1mW idle 120mW active	64KB SRAM 512KB Flash	UART, USB, GPIO, 12C,SPI .	Bluetooth 1.1	Multihop using scatternets, easy connections to PDAs, phones,Tiny OS 1.0, 1.1

Gateway Nodes

Stargate 2003	Intel PXA255		64KNSRM	2PCMICA/C F, com ports, Ethernet, USB	Serial connection to sensor network	Flexible I/O and small form factor power management
						.
Inrysnc Cerfcube 2003	Intel PXA255		32KB Flash 64KB SRAM	Single CF card, general- purpose I/O		Small form factor, robust industrial support, Linux and Windows CE support.
PC 104 nodes	X86 processor		32KB Flash 64KB SRAM	PCI Bus		Embedded Linux or Windows support.

Πίνακας II - σημερινές πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων οργανωμένες κατά τάξη συσκευής

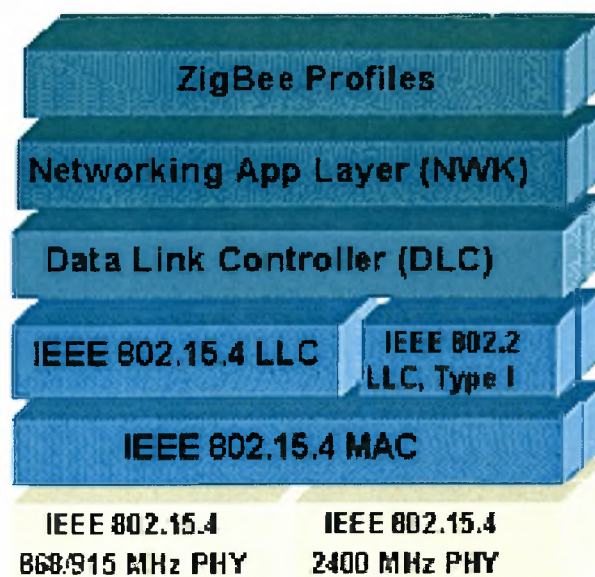
2.5 Πρότυπα λογισμικού και διεπαφών

Μηχανικοί και ερευνητές που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ασύρματης τεχνολογίας χαμηλής ισχύος χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο το πρότυπο 802.15.4. Το πρότυπο αυτό παρέχει μια προδιαγραφή του καναλιού RF και του πρωτοκόλλου σηματοδότησης. Το πρωτόκολλο Zigbee, που βασίζεται πάνω στο 802.15.4, είναι μια προδιαγραφή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας συσκευών σε επίπεδο εφαρμογής και θα περιγράψει αναλυτικά στη συνέχεια. Για να εισάγουμε το Zigbee και το 802.15.4 στη λογική των πλατφορμών που μελετάμε εδώ, το 802.15.4

αποφασίζει ποιο υλικό ασύρματης επικοινωνίας θα χρησιμοποιηθεί και το Zigbee καθορίζει το περιεχόμενο των μηνυμάτων που μεταδίδονται από κάθε μονάδα δικτύου. Ακολουθώντας τη διαθεσιμότητα των πρώτων 802.15.4 πομπών στις αρχές του 2004, οι ερευνητές αποφάσισαν να αναπτύξουν τους TinyOS οδηγούς, ώστε οι υπάρχουσες εφαρμογές να μπορέσουν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες των 802.15.4 στοιχείων (chips). Μολονότι η διαδικασία προτυποποίησης προοδεύει, δεν είναι σίγουρο αν ένα σύνολο τυποποιημένων πρωτοκόλλων θα είναι κάποτε ικανό να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Αντίθετα με τις παραδοσιακές εφαρμογές Internet, που σχεδόν όλες χρησιμοποιούν πρωτόκολλα TCP/IP, οι εφαρμογές του δικτύου αισθητήρων απαιτούν πρωτόκολλα που είναι βελτιστοποιημένα για τα μοναδικά τους σχήματα επικοινωνίας (communication patterns). Σε αυτό το περιβάλλον, η ικανότητα του TinyOS να επιτρέπει σε όσους αναπτύσσουν εφαρμογές να συγκεντρώνουν πρωτόκολλα από ανεξάρτητα δίκτυα, θα συνεχίσει να είναι η προτιμώμενη στρατηγική ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας ZigBee

Το πρωτόκολλο Zigbee παρέχει ένα ανοικτό πρότυπο ασύρματης δικτύωσης χαμηλής ισχύος, για παρακολούθηση και έλεγχο συσκευών. Χρησιμοποιώντας το πρότυπο IEEE 802.15.4 - που επικεντρώνεται σε δικτύωση χαμηλών ταχυτήτων και ορίζει τα πρωτόκολλα χαμηλών επιπέδων, όπως είναι π.χ. το φυσικό επίπεδο (PHY) και επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) – το Zigbee ορίζει τα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων, από το επίπεδο δικτύου έως της εφαρμογής, περιλαμβάνοντας κατανομές εφαρμογής (application profiles). Μπορούμε να φανταστούμε το 802.15.4 σαν το φυσικό ραδιοστρώμα και το Zigbee σαν το λογισμικό λογικού δικτύου και εφαρμογών. Το Zigbee χρησιμοποιεί την ISM (Industrial, Scientific and Medical) ζώνη συχνοτήτων, που επιτρέπει απεριόριστη γεωγραφική χρήση.



Εικόνα 2.11 - η δομή του πρωτοκόλλου Zigbee

Το πρωτόκολλο Zigbee αποσκοπεί σε εφαρμογές κτιριακού ελέγχου, στον αυτοματισμό, την ασφάλεια, τα ηλεκτρονικά προϊόντα, τα περιφερειακά Η/Υ, την ιατρική παρακολούθηση και τα παιχνίδια. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν τεχνολογία που επιτρέπει τροφοδότηση με μπαταρίες μεγάλης διάρκειας, αξιοπιστία, αυτόματη ή

ημιαυτόματη εγκατάσταση, την δυνατότητα εύκολης προσθήκης ή απομάκρυνσης κόμβων, καθώς και συστήματα χαμηλού κόστους.

Το Zigbee και το υποκείμενο πρότυπο 802.15.4, προσφέρουν στο σχεδιαστή του συστήματος συσκευές διαφόρων τάξεων: τη συσκευή μειωμένης λειτουργικότητας (reduced-functionality device, RFD), τη συσκευή πλήρους λειτουργικότητας (full functional device, FFD) και το συντονιστή δικτύου (network coordinator). Όλα τα Zigbee δίκτυα έχουν τουλάχιστον μία από τις παραπάνω συσκευές. Οι περισσότερες εφαρμογές αισθητήρων τοποθετούνται στην RFD κατηγορία, με τα εκτεταμένα δίκτυα να χρησιμοποιούν τόσο τις συσκευές FFD όσο και τους συντονιστές δικτύου προκειμένου να δημιουργήσουν τις απαραίτητες, για την τοπολογία του δικτύου, συνδέσεις. Τα δίκτυα Zigbee σχηματίζονται αυτόνομα, βασισμένα στη συνδεσιμότητα και τη λειτουργία.

2.5.1 Αξιοπιστία δεδομένων

Η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων είναι καθοριστικής σημασίας στις Zigbee εφαρμογές. Το υποκείμενο πρότυπο 802.15.4 παρέχει υψηλή αξιοπιστία μέσω διαφόρων μηχανισμών σε πολλαπλά επίπεδα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιεί 27 κανάλια σε 3 διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων

	BAND	COVERAGE	DATA RATE	CHANNEL NUMBERS
	2.4 GHz	ISM Worldwide	250 kbps	11-26
	868 MHz	Europe	20 kbps	0
	915 MHz	ISM Americas	40 kbps	1-10

Εικόνα 2.12 - το πρότυπο IEEE 802.15.4

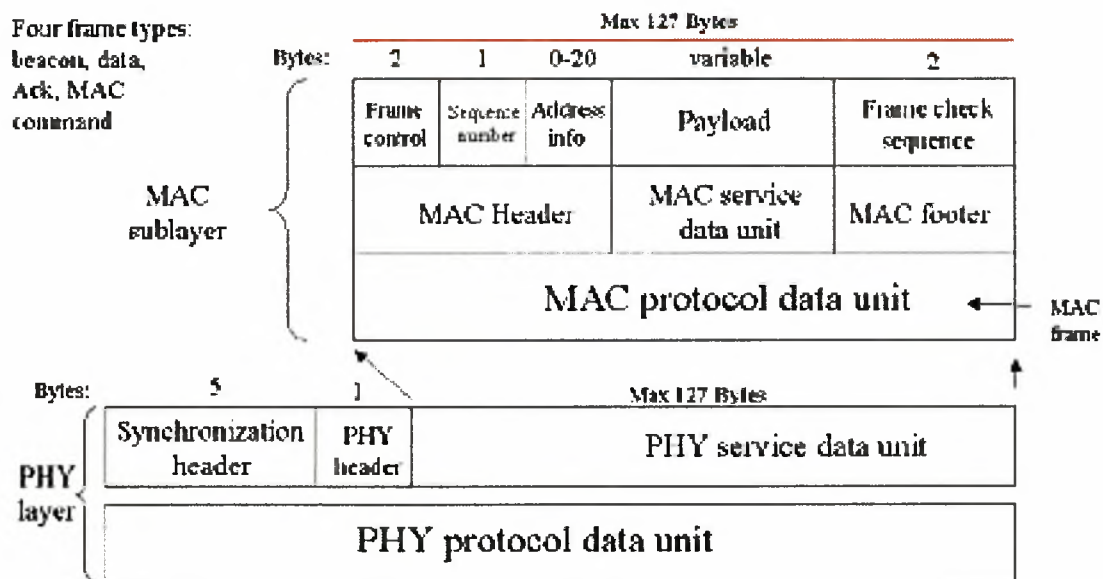
Το πρότυπο IEEE 802.15.4 παρέχει 3 ζώνες συχνοτήτων για επικοινωνία. Οι διαφορές από χώρα σε χώρα στη χρήση, τη διάδοση, τις απώλειες και την ταχύτητα αφήνουν τους σχεδιαστές του Zigbee να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος.

Η ζώνη των 2.4 GHz χρησιμοποιείται παγκοσμίως, έχει 16 κανάλια και υποστηρίζει μετάδοση δεδομένων με μέγιστη ταχύτητα 250 Kbps. Έχουν οριστεί επίσης και χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Η ζώνη 902–928 MHz παρέχει στην Αμερική και σε μεγάλο μέρος των ακτών του Ειρηνικού 10 κανάλια με μέγιστη ταχύτητα 40 Kbps. Οι ευρωπαϊκές εφαρμογές χρησιμοποιούν 1 κανάλι στη ζώνη 868–870 MHz, με μέγιστη ταχύτητα 20 Kbps. Αυτή η ποικιλία συχνοτήτων επιτρέπει σε εφαρμογές με κατάλληλη ρύθμιση υλικού, να προσαρμόζονται στις τοπικές συνθήκες παρεμβολής και διάδοσης.

Σε ένα συγκεκριμένο κανάλι, ο πομποδέκτης 802.15.4 βασίζεται σε έναν σύνολο μηχανισμών για να βεβαιώσει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Αρχικά, το φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί διαμόρφωση BPSK στις ζώνες 868/915 MHz και Ο-

QPSK στα 2.4 GHz. Και οι δύο διαμορφώσεις είναι στιβαρές και απλές και λειτουργούν καλά σε περιβάλλον χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου (SNR).

Η πληροφορία κωδικοποιείται στο φέρον με τεχνική DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum), μια ενδογενώς στιβαρή μέθοδος που βελτιώνει την απόδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath performance) και την ευαισθησία του δέκτη μέσω κέρδους από την επεξεργασία σήματος. Το μέγεθος της ωφέλιμης πληροφορίας (data payload) κυμαίνεται από 0 μέχρι 104 bytes, που είναι παραπάνω από αρκετό για να ικανοποιήσει τις περισσότερες ανάγκες των αισθητήρων.



Εικόνα 2.13 - το πακέτο δεδομένων Zigbee

Στη μονάδα δεδομένων του πρωτοκόλλου MAC, τα ωφέλιμα δεδομένα (data payload) αποτελούνται από τις διευθύνσεις αποστολέα και παραλήπτη, έναν αριθμό που επιτρέπει στον παραλήπτη να αναγνωρίσει ότι όλα τα πακέτα που μεταδόθηκαν έχουν παραληφθεί, bytes ελέγχου πλαισίου που καθορίζουν παραμέτρους του περιβάλλοντος του δικτύου και άλλες σημαντικές και, τέλος, από ένα πεδίο επαλήθευσης που επιτρέπει στον παραλήπτη να πιστοποιήσει ότι το πακέτο παραλήφθηκε χωρίς απώλειες. Αυτό το MAC πλαίσιο παρατίθεται στην επικεφαλίδα συγχρονισμού (synchronization header) και την φυσική επικεφαλίδα (PHY header), του φυσικού επιπέδου, και παρέχει ένα στιβαρό μηχανισμό που επιτρέπει στον παραλήπτη να αναγνωρίσει και να αποκωδικοποιήσει γρήγορα το πακέτο που έχει ληφθεί.

Αφού ληφθεί το πακέτο, ο παραλήπτης εκτελεί έναν 16-bit κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (cyclic redundancy check, CRC) για να επιβεβαιώσει ότι το πακέτο δεν αλλοιώθηκε κατά τη μετάδοση. Αν όλα είναι εντάξει, ο παραλήπτης μπορεί, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και του δικτύου, να μεταδώσει αυτόματα ένα πακέτο γνωστοποίησης που επιτρέπει στο σταθμό μετάδοσης να μάθει ότι το πακέτο παραλήφθηκε σε αποδεκτή μορφή. Αν ο έλεγχος δείξει ότι το πακέτο αλλοιώθηκε, το πακέτο απορρίπτεται και δε μεταδίδεται καμία γνωστοποίηση. Εάν ο σχεδιαστής έχει ρυθμίσει το δίκτυο ώστε να απαιτείται γνωστοποίηση, τότε ο σταθμός μετάδοσης επανεκπέμπει το αρχικό πακέτο, όσες φορές έχει προκαθοριστεί ώστε να εξασφαλιστεί η επιτυχής αποστολή του πακέτου. Αν το μονοπάτι ανάμεσα σε πομπό και δέκτη χάσει την αξιοπιστία του ή το δίκτυο καταρρεύσει, τότε το Zigbee παρέχει

στο δίκτυο δυνατότητες επανόρθωσης, εφόσον εναλλακτικά μονοπάτια μπορούν να εγκατασταθούν αυτόνομα.

2.5.2 Διάρκεια πηγής τάσης τροφοδοσίας

Ένας ασύρματος κόμβος δικτύων αισθητήρων, όπως σε οποιοδήποτε υπολογιστή γενικού σκοπού, αποτελείται από επεξεργαστή, μνήμη αποθήκευση, συσκευές επικοινωνίας, και συσκευές εισόδου εξόδου. Αλλά, "ασύρματο" δεν αναφέρεται στις επικοινωνίες αλλά ισχύει και για την πηγή ενέργειας. Το πιο σημαντικό κομμάτι του ασύρματος κόμβου δικτύων αισθητήρων είναι η συσκευή ενεργειακής αποθήκευσης, συνήθως μια μπαταρία. Πάνω από όλα είναι η συνειδητοποίηση αυτής της πεπερασμένης ενεργειακής πηγής που οδηγεί τον σχεδιασμό του υπόλοιπου συστήματος. Οι ασύρματες συσκευές ενεργειακής σάρωσης μπορούν να βοηθήσουν στην παράταση του ενεργειακού αποθέματος, αλλά το εύρος επέκτασης δικτύων αισθητήρων διαμορφώνεται τελικά από το ποσό ενέργειας που διαθέτει κάθε κόμβος. Όταν η ενέργεια τελειώσει, είτε η εφαρμογή σταματά είτε κάποιο πρόσωπο πρέπει να σταλεί επί τόπου για να ανανεώσει της πηγές, και επίσης να συλλέξει τα δεδομένα.

Αρχίζουμε με την εξέταση των διαθέσιμων επιλογών ενεργειακής αποθήκευσης. Η βασική αλκαλική μπαταρία AA αποθηκεύει 2850 ώρες μA ενέργειας. Ένας λαμπτήρας LED καταναλώνει περίπου 6 mA ρεύματος. Αυτός ο λαμπτήρας θα παραμείνει αναμμένος για περίπου 20 ημέρες, και προς το τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος, θα γίνει πιο αμυδρός ο φωτισμός όσο η τάση πέφτει κάτω από 1,5 βολτ. Τώρα εξετάζουμε την απλούστερη και αποτελεσματικότερη μορφή εναλλακτικής ενέργειας, την ηλιακή. Ένα αντιπροσωπευτικό φωτοβολταϊκό επιφάνειας 30cm^2 μπορεί να παραγάγει ρεύμα 40 mA σε 4,8 βολτ, και περίπου 6 mW/cm^2 με άμεσο φως του ήλιου. Αυτό απέχει από το συνολικό ποσό διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας, περίπου 100 mW/cm^2 , αλλά η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών μονάδων αυξάνει.

Πόση ενέργεια χρειάζονται αυτές οι συσκευές; Καθώς οι σχεδιαστές μικροεπεξεργαστών έχουν κατανοήσει το κενό μπαταρίας-χαμηλής ενέργειας το ρεύμα που απαιτούν οι επεξεργαστές μειώνεται. Ο μικροελεγκτής του Tmote MSP430 έχει ενεργό ρεύμα λειτουργίας 3 mW, αρκετό να τρέξει για έναν μήνα ή δύο στις τυποποιημένες μπαταρίες AA.

Αλλά, αυτό αγνοώντας το κόστος ραδιοεκπομπής. Μεταδίδοντας ένα μήνυμα, ο πομπός καταναλώνει ισχύ 35 mW, και αυτό το κόστος έχει παραμείνει κατά προσέγγιση σταθερό στη διάρκεια των ετών. Η ενέργεια που απαιτείται για να μεταδοθεί σε μια δεδομένη απόσταση d ανάλογη προς d^n , όπου το n ποικίλλει. Η ασύρματη μετάδοση απαιτεί πολλή ενέργεια, αλλά, δεν γίνεται συνεχώς.

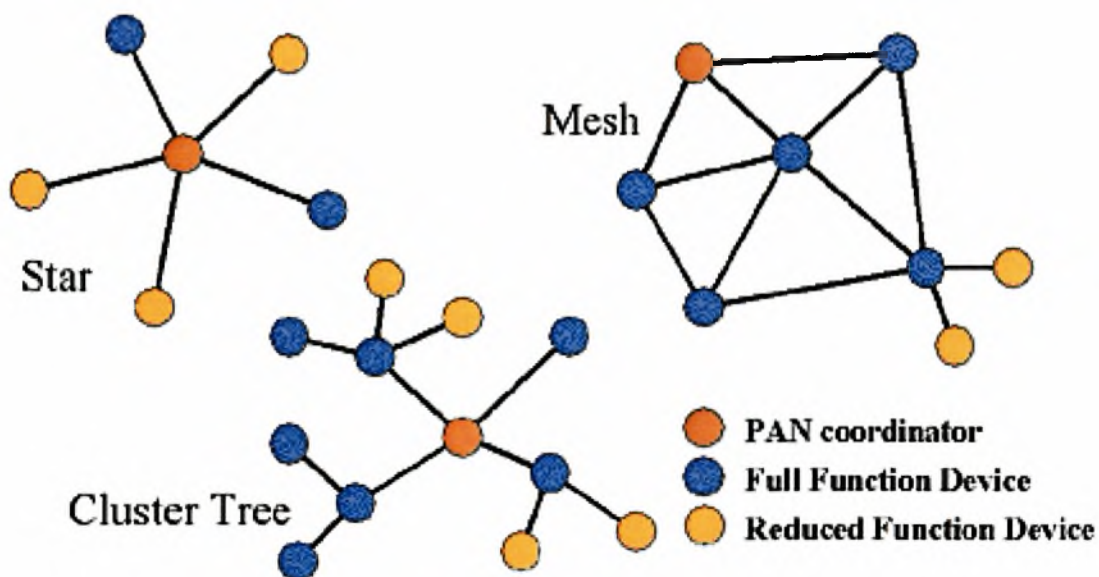
Εντούτοις, η λήψη γίνεται συνέχεια. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι πομποί έχουν γίνει πιο σύνθετοι, το κόστος λήψης για ένα μήνυμα έχει αυξηθεί δραστικά. Το radio που χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα motes UCB κατανάλωνε 9 mW ισχύ περιμένοντας τα μηνύματα. Στα νεότερα motes καταναλώνει 38 mW ισχύος κατά τη λήψη. Το πραγματικό ενεργειακό κόστος της ασύρματης επικοινωνίας δεν είναι στη μετάδοση αλλά στην αναμονή λήψης.

Το συμπέρασμα από την εξέταση των σχετικών ενεργειακών δαπανών του επεξεργαστή και του πομπού είναι ότι για επεξεργασία μιας εντολής (instruction) του CPU με κατανάλωση ισχύος 3 mW σε ένα ρολόι 4MHz απαιτούνται 0,75 nJ ανά εντολή. Για την αποστολή ή λήψη ενός bit για κατανάλωση 35 mW σε ρυθμό

250kbit/ανα κανάλι απαιτούνται 140 nJ ανά εντολή, περίπου 200 φορές περισσότερη ενέργεια. Η λειτουργία του πομπού στοιχίζει πολύ πιο ακριβά ενεργειακά σε σχέση με την επεξεργασία άρα όπου είναι δυνατό χρησιμοποιούμε την επεξεργασία για να ελαττώσετε τον χρόνο εκπομπής εξοικονομώντας έτσι τεράστια ενέργεια. Αυτό συνεπάγεται επεξεργασία μέσα στο δίκτυο, συμπίεσης των δεδομένων, και χρήση της λογικής επεξεργασίας των στοιχείων μέσα στα motes αντί να στέλνει τα ακατέργαστα στοιχεία. Φυσικά, αυτές οι λύσεις εισάγουν τις δικές τους περιπλοκές. Όταν εξετάζουμε το συνδυασμένο κόστος λειτουργίας της πλατφόρμας, 3mW για τον επεξεργαστή και 38 mW για τον ραδιοπομπό, ένα πράγμα γίνεται προφανές. Το συνολικό κόστος 41 mW θα εξαντλήσει ένα ζευγάρι μπαταρίες AA σε μια εβδομάδα. Σαφώς, αυτό είναι πάρα πολύ σύντομο για μια αποτελεσματική υλοποίηση WSN. Ο προτεινόμενος προτείνουν ότι ο ελάχιστος οικονομικώς αποδοτικός χρόνος εφαρμογής για χρησιμοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ένα με δύο έτη.

Σε πολλές εφαρμογές, δεν είναι εύκολη η συχνή αλλαγή του στοιχείου τροφοδοσίας (μπαταρία) του αισθητήρα. Ο βασικός 802.15.4 κόμβος είναι σημαντικά αποτελεσματικός όσον αφορά την απόδοση της μπαταρίας. Η διάρκεια της μπαταρίας από λίγους μήνες μπορεί να φτάσει τα πολλά χρόνια, όταν στο σύστημα υπάρχουν κόμβοι που εξοικονομούν ενέργεια και παράμετροι δικτύου που βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας, όπως είναι η σήμανση διαλειμμάτων (beacon intervals), οι καθορισμένες χρονοθυρίδες (guaranteed time slots) και οι δυνατότητες ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (enablement/disablement options).

Η υλοποίηση του δικτύου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Τα περισσότερα δίκτυα θεωρούνται ότι έχουν δομή τύπου αστέρα (star) ή συστοιχίας δέντρων (cluster trees), παρά πραγματικού βροχωτού δικτύου (mesh network) επιτρέποντας στις ανεξάρτητες συσκευές να εξοικονομούν ενέργεια. Για μεγαλύτερα φυσικά περιβάλλοντα, ο τύπος 'συστοιχία δέντρων' είναι ένας καλός τρόπος να συγκεντρώνονται πολλαπλά δίκτυα τύπου αστέρα σε ένα ευρύτερο δίκτυο. Κάποιες εφαρμογές κάνουν χρήση της βροχωτής (mesh) δομής, που παρέχει ευελιξία στην αλλαγή δρομολόγησης και τη δυνατότητα στο δίκτυο να επανορθώνεται μόνο του όταν ενδιάμεσοι κόμβοι απομακρύνονται ή τα RF μονοπάτια αλλάζουν.



Εικόνα 2.14 - μερικές μορφές τοπολογίας δικτύων

2.5.3 Κόστος

Το ZigBee και το 802.15.4 μεγιστοποιούν τη χρησιμότητά τους στον πολυδιάστατο τομέα του κόστους. Υπάρχει επαρκής ευελιξία και στα 2 πρότυπα ώστε να παρέχουν στο σχεδιαστή του συστήματος αισθητήρων μια ποικιλία τρόπων βελτιστοποίησης του κόστους, χωρίς να παραμελείτε η απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, η διάρκεια της μπαταρίας μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση του χρόνου μη εξυπηρέτησης, όπως επίσης, το κόστος και η πολυπλοκότητα κάθε κόμβου θα βελτιωθούν σε βάρος της πολυπλοκότητας του δικτύου.

Η απλότητα του συστήματος και η ευελιξία του πρότυπου 802.15.4 υπόσχονται στους σχεδιαστές του συστήματος ότι θα βρουν τις πλατφόρμες που βασίζονται στο πρωτόκολλο Zigbee, περισσότερο αποτελεσματικές όσον αφορά το κόστος (για μονάδες ίδιου όγκου) από το Bluetooth ή από άλλες αμφίδρομες ασύρματες λύσεις. Ενώσω το κόστος του υλικού των πλατφορμών είναι πάντα κρίσιμο μέρος του συνολικού κόστους του συστήματος, πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη τα κόστη της συντήρησης του συστήματος, της ευελιξίας και της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

2.5.4 Εύρος Μετάδοσης

Το Zigbee στηρίζεται στο βασικό 802.15.4 πρότυπο για να εγκαθιστά τη ραδιοεπικοινωνία. Αφού το 802.15.4 είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, δεν προσπαθεί να ανταγωνιστεί πομπούς υψηλής ισχύος αλλά υπερέχει σε διάρκεια ζωής μπαταρίας και σε χαμηλής ισχύος μετάδοση. Το πρότυπο καθορίζει ονομαστική τιμή ισχύος εκπομπής στα -3 dBm (0.5 mW), με το άνω όριο να ελέγχεται από τις κανονιστικές αρχές (regulatory agencies) της χώρας όπου θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας. Σε έξοδο -3 dBm, τα single-hop ranges από 10 μέχρι και πάνω από 100m είναι λογικά, ανάλογα με το περιβάλλον, την κεραία και το φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας.

Το Zigbee επεκτείνει το βασικό 802.15.4 πομπό και πρωτόκολλο με μια λειτουργία δικτύου που επιτρέπει multi-hop και ευέλικτη δρομολόγηση, παρέχοντας εύρη επικοινωνίας που ξεπερνούν τη βασική single-hop. Πράγματι, ανάλογα με τις απαιτήσεις για τη λανθάνουσα καθυστέρηση των δεδομένων (data latency), μπορούν πρακτικά να δημιουργηθούν δίκτυα που χρησιμοποιούν δεκάδες κόμβους (hops), με εύρη που αθροιζόμενα φτάνουν από εκατοντάδες σε χιλιάδες μέτρα. Τα δίκτυα μπορούν να έχουν δομή τύπου αστέρα, συστοιχίας δέντρων ή βροχωτού δικτύου, με την καθεμία να παρουσιάζει τις δικές της δυνατότητες.

2.5.5 Ρυθμός Μετάδοσης δεδομένων

Μπορεί να μην είναι εμφανές για ποιο λόγο ένας απλός αισθητήρας θερμοκρασίας ή εντοπισμού εισβολής χρειάζεται να μεταδίδει δεδομένα με 250 Kbps (στα 2.4 GHz), ή ακόμα με 20 Kbps (στα 868 MHz), αλλά ξεκαθαρίζει εάν αναλογιστούμε την ανάγκη για επέκταση της διάρκειας της μπαταρίας. Ακόμα και όταν ο αισθητήρας μεταδίδει μόνο μερικά bits ή bytes, το σύστημα μπορεί να

καταστεί πιο αποτελεσματικό αν μεταδίδει και λαμβάνει δεδομένα γρήγορα. Για παράδειγμα, ένας πομπός ισχύος 0.5mW καταναλώνει πολλά milliwatts είτε μεταδίδει με 100 ή με 100.000 bps. Για κάθε συγκεκριμένο ποσό δεδομένων, η μετάδοση σε υψηλότερο ρυθμό επιτρέπει στο σύστημα να κλείνει γρηγορότερα τον πομπό και το λήπτη, εξοικονομώντας σημαντική ενέργεια. Υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων για συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος, σημαίνει ότι υπάρχει μικρότερη ενέργεια ανά μεταδιδόμενο bit, που υποδηλώνει περιορισμένο εύρος. Τόσο το 802.15.4 όσο και το ZigBee αξιολογούν τη διάρκεια της μπαταρίας περισσότερο από το εύρος κάλυψης και παρέχουν μηχανισμούς που αυξάνουν το εύρος αυτό ενώ είναι πάντα επικεντρωμένοι στη διάρκεια της μπαταρίας.

2.5.6 Λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων

Τα συστήματα αισθητήρων έχουν μεγάλες απαιτήσεις όσον αφορά τη λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων. Αν γίνει αναγκαία η λήψη των δεδομένων του αισθητήρα μέσα σε δεκάδες milliseconds, σε αντίθεση με τις δεκάδες δευτερολέπτων, τότε αλλάζουν οι απαιτήσεις του δικτύου όσον αφορά τον τύπο και την έκτασή του. Για πολλές εφαρμογές αισθητήρων, η λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων είναι λιγότερο κρίσιμη από τη διάρκεια της μπαταρίας ή την αξιοπιστία των δεδομένων.

Για απλά δίκτυα τύπου αστέρα (πολλοί πελάτες, ένας συντονιστής δικτύου), το Zigbee μπορεί να παρέχει λανθάνουσες καθυστερήσεις τάξης ~16 ms σε ένα δίκτυο βασισμένο σε σήμανση (beacon-centric network). Μπορούμε να μειώσουμε περαιτέρω τις καθυστερήσεις σε μερικά milliseconds αν ξεφύγουμε από το μοντέλο που βασίζεται σε σήμανση (beacon environment) και είμαστε διατεθειμένοι να ρισκάρουμε ενδεχόμενη παρεμβολή από τυχαία σύγκρουση δεδομένων με άλλους αισθητήρες του δικτύου.

Η λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια της μπαταρίας. Γενικά, αν χαλαρώσουμε τις απαιτήσεις για την καθυστέρηση των δεδομένων, περιμένουμε η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κόμβων-πελατών να αυξάνει. Αυτό συμβαίνει ακόμα περισσότερο στους κεντρικούς σταθμούς του δικτύου (network hubs), που απαιτούνται για να συντονίσουν και να επιθεωρήσουν το δίκτυο. Ας υποθεθεί ότι ένα απλό δίκτυο έχει μεγάλες απαιτήσεις όσον αφορά τη λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων (π.χ. ένα ασύρματο πληκτρολόγιο και ποντίκι H/Y). Ο χρήστης περιμένει ότι ένα χτύπημα στο πληκτρολόγιο ή μια κίνηση του ποντικιού θα εμφανιστεί στην οθόνη μέσα σε 1 ή 2 ανανεώσεις της οθόνης, γενικά μεταξύ 16 και 32 ms. Για ένα τέτοιο είδος δικτύου τύπου αστέρα, μπορούμε να περιμένουμε ότι η λανθάνουσα καθυστέρηση δεδομένων θα ανταποκριθεί σ' αυτήν την απαίτηση.

2.5.7 Ασφάλεια δεδομένων

Όπως αναφέραμε ξανά, είναι σημαντικό να εφοδιαστεί ένα δίκτυο αισθητήρων με επαρκή ασφάλεια που θα εμποδίζει τα δεδομένα να εκτεθούν σε κίνδυνο, να κλαπούν ή να αλλοιωθούν. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 παρέχει υπηρεσίες επαλήθευσης, κρυπτογράφησης και διασφάλισης ακεραιότητας για ασύρματα συστήματα, που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να καθορίσουν οι ίδιοι τα επίπεδα ασφαλείας. Αυτά περιλαμβάνουν την απουσία κάθε ασφαλείας, λίστες ελέγχου πρόσβασης και 32-bit μέχρι 128-bit κρυπτογράφηση AES (Advanced Encryption

Standard) με επαλήθευση. Αυτό το πακέτο επιλογών ασφάλειας επιτρέπει στο σχεδιαστή να διαλέξει την ασφάλεια που απαιτεί η εφαρμογή, που είναι, σε ελεγχόμενα πλαίσια, εις βάρος του όγκου δεδομένων, της διάρκειας της μπαταρίας και των απαιτήσεων σε επεξεργαστική ισχύ. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 δεν παρέχει κάποιον μηχανισμό μετακίνησης των κλειδιών ασφαλείας γύρω από ένα δίκτυο. Αντίθετα την ανάγκη αυτή καλύπτει το Zigbee.

Το Zigbee περιλαμβάνει σημαντικά στοιχεία που επιτρέπουν την ασφαλή διαχείριση του δικτύου από απόσταση. Για εκείνα τα συστήματα όπου η ασφάλεια των δεδομένων δεν είναι σημαντικός παράγοντας (π.χ. μια ομάδα αισθητήρων που παρακολουθεί το κλίμα σε ένα δάσος), μπορούμε να αποφασίσουμε αντί να περιλάβουμε στοιχεία ασφαλείας, να βελτιώσουμε τη διάρκεια της μπαταρίας και να μειώσουμε το κόστος του συστήματος. Για το σχεδιαστή ενός περιμετρικού συστήματος ασφαλείας με αισθητήρες, σε μια βιομηχανική ή στρατιωτική περιοχή, η ασφάλεια των δεδομένων, και πολύ περισσότερο η δυνατότητα αντιμετώπισης προσπαθειών εξαπάτησης των αισθητήρων, πρέπει να έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Η ασφάλεια, επίσης, μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να θεωρηθούν προσωπικά, όπως για παράδειγμα τα φυσιολογικά δεδομένα ενός ατόμου που μεταδίδονται μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να ληφθεί υπόψη από το σχεδιαστή του συστήματος.

2.5.8 Το Zigbee συγκριτικά με εναλλακτικές τεχνολογίες

Υπάρχει ένας αριθμός άλλων ασύρματων τεχνολογιών για μεταδόσεις διαφόρων ταχυτήτων, σε οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. το Bluetooth, το IEEE 802.11 Wi-Fi και ιδιοταγή συστήματα). Καθεμιά κατέχει ιδιαίτερη θέση στον τομέα της ασύρματης επικοινωνίας αλλά, δεν έχει επιτευχθεί ακόμη η βέλτιστη αλληλοκάλυψη. Για εφαρμογές αισθητήρων όχι πολύ υψηλών ταχυτήτων, η τεχνολογία Bluetooth μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Το πρότυπο αυτό δύναται να σχηματίσει δίκτυα peer-to-peer ή δίκτυα σε σχηματισμό αστέρα (star networks), αλλά αυτά δεν υποστηρίζουν περισσότερες από 8 ενεργές συσκευές συγχρόνως. Το σχήμα της φασματικής εξάπλωσης με αναπήδηση συχνότητας (frequency hopping spread spectrum, FHSS) του Bluetooth, αναγκάζει συσκευές που δεν έχουν ακόμα ενσωματωθεί στο δίκτυο, να επανασυγχρονίζονται για 3-30 secs πριν να είναι ικανές να απαιτήσουν σύνδεση, κάνοντας το χρόνο απόκρισης σε διακοπτόμενη λειτουργία αρκετά μεγάλο για πολλές εφαρμογές. Και για ένα σύστημα προορισμένο για μεγάλης διάρκειας λειτουργία, με μπαταρία, η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τον συγχρονισμό του δικτύου μπορεί να είναι απαγορευτική.

Μολονότι η τεχνολογία Bluetooth είναι κατάλληλη για εφαρμογές φωνής και εφαρμογές υψηλότερων ταχυτήτων (π.χ. κινητά και σταθερά τηλέφωνα), η τεχνολογία Zigbee είναι περισσότερο κατάλληλη για εφαρμογές ελέγχου, που δεν απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων αλλά πρέπει να έχουν μεγάλη διάρκεια μπαταρίας, δίκτυα ποικίλης τοπολογίας και χαμηλή παρέμβαση από το χρήστη. Επίσης, η στοιβία του Zigbee είναι μικρή (28 KB) συγκρινόμενη με εκείνη του Bluetooth (250 KB). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πάρα πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι το κύριο σχεδιαστικό στοιχείο του προτύπου Zigbee, επιτρέποντας συσκευές αυξημένης διάρκειας λειτουργίας, ακόμα και με μπαταρίες μη επαναφορτιζόμενες, σε αντίθεση με τις επαναφορτιζόμενες συσκευές που υποστηρίζει το Bluetooth. Για παράδειγμα, η μετάβαση από την κατάσταση αδρανείας (sleep mode) στην κατάσταση μετάδοσης δεδομένων είναι γρηγορότερη στα Zigbee

συστήματα συγκριτικά με εκείνα που χρησιμοποιούν Bluetooth. Τα Zigbee δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν τουλάχιστον 65.534 συσκευές ανά δίκτυο, σε αντίθεση με τις 8 στα Bluetooth δίκτυα. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων στην τεχνολογία ZigBee είναι 250 Kbps, ενώ στην Bluetooth είναι 1 Mbps. Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται για σύγκριση κάποια βασικά χαρακτηριστικά του Zigbee και άλλων ασύρματων τεχνολογιών.

Standard	ZigBee™	Wi-Fi™	Bluetooth™
	802.15.4	802.11b	802.15.1
Transmission Range (m)	1 – 100*	1 - 100	1 – 10
Battery Life (days)	100 – 1,000	0.5 – 5.0	1 - 7
Network Size (# of nodes)	> 64,000	32	7
Application	Monitoring & Control	Web, Video	Email, Cable Replacement
Stack Size (KB)	4 – 32	1,000	250
Throughput (kb/s)	20 – 250	11,000	720

Πίνακας III - κάποια βασικά χαρακτηριστικά του Zigbee σε σχέση με άλλα πρότυπα ασύρματης μετάδοσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΔΥΟ ΤΡΟΧΩΝ

3.1 Εισαγωγή στη θεωρία σχεδιασμού και ελέγχου ρομποτικής κίνησης

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η κίνηση ενός οχήματος, για παράδειγμα μίας ρομποτικής πλατφόρμας, που είναι εφοδιασμένο με διαφορικό σύστημα οδήγησης. Αυτή η απλή αλλά αξιόπιστη προωθητική διάταξη με τροχούς χρησιμοποιείται συνήθως σε μικρά ρομπότ. Είναι ευρέως γνωστή στην καθημερινότητα γιατί πρακτικά πρόκειται για το ίδιο σύστημα με αυτό που χρησιμοποιείται στις αναπηρικές πολυθρόνες: δύο τροχοί στηριγμένοι σε έναν μονό άξονα τροφοδοτούνται και ελέγχονται ανεξάρτητα, παρέχοντας έτσι ταυτόχρονα λειτουργίες οδήγησης και «πηδαλιούχησης».

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτού του είδους την κίνηση, που εφεξής ονομάζεται διαφορική οδήγηση, είναι σχετικά απλοποιημένες και δίνουν την δυνατότητα της πρόγνωσης για το πώς μία ρομποτική πλατφόρμα με αυτό το σύστημα κίνησης θα ανταποκρίνεται σε αλλαγές όπως είναι η ταχύτητα των τροχών της, τον δρόμο (τραχύτητα, κατεύθυνση) που θα ακολουθεί σε διαφορετικές συνθήκες. Το όποιο σύστημα εξισώσεων καλείται επίσης να υπολογίζει την ακριβή θέση της πλατφόρμας σε περιπτώσεις εντοπισμού μόνο από οδομετρία, τεχνική που χρησιμοποιείται για να εκτιμάται η θέση της με βάση τις αποστάσεις που μετρούν συσκευές οδομετρίας με τις οποίες είναι εφοδιασμένος ο κάθε τροχός (encoders).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα περισσότερα μοντέλα διαφορικής κίνησης που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές πλατφόρμες, περιγράφονται οι έννοιες της θέσης και του προσανατολισμού σαν συναρτήσεις κίνησης των τροχών τους, αγνοώντας όμως την φυσική που περιλαμβάνουν κατά την δημιουργία της κίνησης αυτής. Θέματα όπως ροπές, δυνάμεις, τριβές, ενέργεια και αδράνεια δεν περιλαμβάνονται στην κινηματική προσέγγιση. Η τελευταία αγνοεί τα αίτια της κίνησης (που

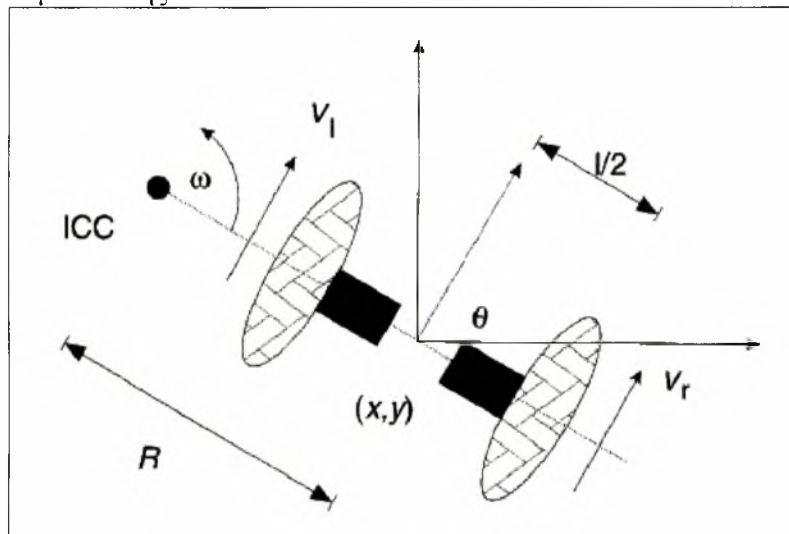
περιλαμβάνει η δυναμική προσέγγιση) και επικεντρώνεται στα αποτελέσματα της κίνησης.

3.2 Διαφορική οδήγηση δύο τροχών

3.2.1 Περιγραφή

Το διαφορικό σύστημα οδήγησης χρησιμοποιείται από πολλά κινητά ρομπότ σαν σύστημα κίνησης. Αποτελείται από δύο τροχούς οδήγησης πάνω σε έναν μονό και κοινό άξονα, ενώ κάθε τροχός μπορεί να οδηγείται ανεξάρτητα είτε προς το μπροστά είτε προς τα πίσω.

Ενώ υπάρχει η δυνατότητα να μεταβάλλεται η ταχύτητα του κάθε τροχού ξεχωριστά, προκειμένου το ρομπότ να εκτελεί κυκλική κίνηση, το τελευταίο πρέπει να περιστρέφεται γύρω από ένα σημείο που βρίσκεται κατά μήκος του κοινού άξονα των δύο τροχών. Το σημείο γύρω από το οποίο περιστρέφεται το ρομπότ είναι γνωστό σαν ICC- Instantaneous Center of Curvature (εικόνα 3.1), ή αλλιώς Κέντρο Στιγμιαίας Καμπύλωσης.



Εικόνα 3.1- κινηματική του Συστήματος Διαφορικής Οδήγησης (από Dudek and Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*)

3.2.2 Κινηματική

Στο μέρος αυτό του κεφαλαίου παραθέτονται οι εξισώσεις κίνησης των τροχών σε ένα ρομπότ με σύστημα διαφορικής οδήγησης, στην περίπτωση της κινηματικής προσέγγισης όπως ορίστηκε παραπάνω.

Μεταβάλλοντας τις ταχύτητες των δύο τροχών, μεταβάλλονται και οι τροχιές που χαράσσει το ρομπότ. Επειδή η τιμή της περιστροφής, γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από το ICC πρέπει να είναι η ίδια και στους δύο τροχούς, μπορούν να προκύψουν οι παρακάτω εξισώσεις (1), (2):

$$\omega(R + l/2) = V_r \quad (1)$$

$$\omega(R - l/2) = V_l \quad (2)$$

όπου l είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο τροχών, V_r , V_l είναι οι ταχύτητες του δεξιού και αριστερού τροχού αντίστοιχα κατά μήκος του εδάφους, και R είναι η απόσταση από το ICC μέχρι το μέσο του άξονα μεταξύ των τροχών. Για κάθε χρονική στιγμή μπορεί το σύστημα να επιλυθεί ως προς R και ω δίνοντας αντίστοιχα τις εξισώσεις (3), (4):

$$R = \frac{l V_l - V_r}{2 V_r - V_l} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{V_r - V_l}{l} \quad (4)$$

Υπάρχουν τρεις ενδιαφέρουσες περιπτώσεις για αυτά τα συστήματα οδήγησης:

1. Αν $V_l = V_r$, τότε θα εκτελεί το ρομπότ προς τα εμπρός (forward) γραμμική κίνηση πάνω σε ευθεία γραμμή. Το R θα τείνει στο άπειρο και θα υπάρχει σχεδόν μηδενική περιστροφή- το ω θα είναι μηδέν.
2. Αν $V_l = -V_r$, τότε το $R=0$ και θα υπάρχει περιστροφή γύρω από το μέσο του διαστήματος μεταξύ άξονα τροχών- επί τόπου περιστροφή.
3. Αν $V_l = 0$, τότε θα υπάρχει περιστροφή γύρω από τον αριστερό τροχό. Σε

αυτήν την περίπτωση $R = \frac{l}{2}$. Ομοίως στην περίπτωση όπου ισχύει $V_r = 0$.

Ας σημειωθεί ότι ένα ρομπότ διαφορικής οδήγησης δεν μπορεί να κινηθεί στη διεύθυνση κατά μήκος του άξονα που συνδέει τους δύο τροχούς- αυτό αποτελεί ιδιαιτερότητα του συστήματος. Τα οχήματα διαφορικής οδήγησης είναι πολύ ευαίσθητα σε μικρές αλλαγές στην ταχύτητα του καθενός από τους τροχούς. Μικρά σφάλματα στις σχετικές ταχύτητες μεταξύ των τροχών μπορούν να επηρεάσουν την τροχιά του ρομπότ. Είναι επίσης πολύ ευαίσθητα σε μικρές μεταβολές του επιπέδου του εδάφους και μπορεί να χρειαστούν επιπρόσθετους τροχούς (caster wheels- ρουλεμάν, σαν αυτούς που υπάρχουν στα τροχήλατα έπιπλα) για υποστήριξη και ισορροπία.

Ας υποθεθεί ότι το ρομπότ της εικόνα 3.1 βρίσκεται σε μία θέση (x,y) , κατευθυνόμενο προς μία διεύθυνση που σχηματίζει γωνία θ με τον X -άξονα. Ας υποθεθεί ότι το ρομπότ είναι κεντραρισμένο σε ένα σημείο στο μέσο της απόστασης κατά μήκος του άξονα τροχού. Παραποιώντας και αλλάζοντας τις παραμέτρους ελέγχου V_r , V_l , το ρομπότ μπορεί να κινηθεί προς διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς.

Γνωρίζοντας τις ταχύτητες V_r , V_l και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3), (4) προκύπτει η ακριβής θέση του σημείου ICC και δίνεται από την εξίσωση (5):

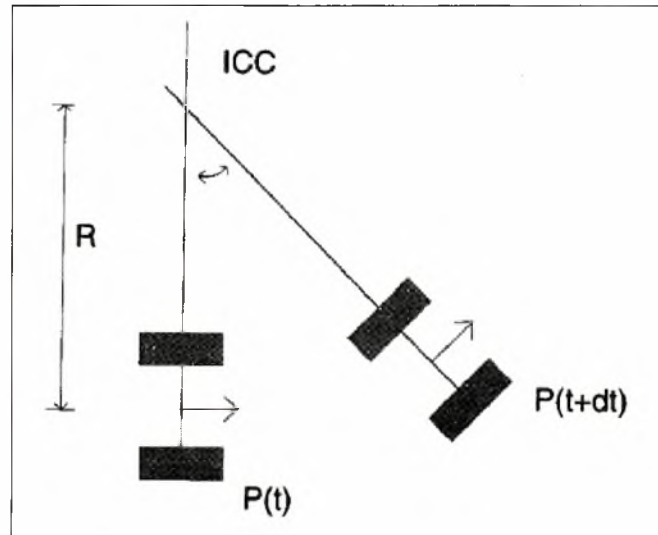
$$ICC = [x - R \sin(\theta), y + R \cos(\theta)] \quad (5)$$

και τη χρονική στιγμή $t+\delta t$ η θέση του ρομπότ θα έχει τις εξής συντεταγμένες:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega \delta t) & -\sin(\omega \delta t) & 0 \\ \sin(\omega \delta t) & \cos(\omega \delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - ICC_x \\ y - ICC_y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ICC_x \\ ICC_y \\ \omega \delta t \end{bmatrix} \quad (6)$$

Η εξίσωση (6) απλά περιγράφει την κίνηση ενός ρομπότ που περιστρέφεται σε μία απόσταση R γύρω από το ICC με μία γωνιακή ταχύτητα ω .

Παρατηρώντας την εικόνα 3.2, ένας άλλος τρόπος για να γίνει κατανοητό αυτό είναι ότι η κίνηση του ρομπότ είναι ισοδύναμη με: 1) να μεταφραστεί το ICC σαν την αρχή του συστήματος συντεταγμένων της κίνησης, 2) να περιστραφεί γύρω από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων με μία γωνιακή τιμή ωdt και 3) να μεταφραστεί εκ νέου πάνω στο ICC.



Εικόνα 3.2- προς τα εμπρός (forward) κινηματική ρομπότ με σύστημα διαφορικής οδήγησης (από Dudek and Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*)

Σε γενικές γραμμές η θέση ενός ρομπότ ικανού να κινηθεί προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση Θ , με μία γνωστή δεδομένη ταχύτητα $V(t)$ περιγράφεται από τις σχέσεις (7):

$$x(t) = \int_0^t V(t) \cos[\theta(t)] dt \quad (7)$$

$$y(t) = \int_0^t V(t) \sin[\theta(t)] dt \quad (8)$$

$$\Theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \quad (9)$$

Μία σχετική ερώτηση είναι η ακόλουθη: πώς να ελεγχθεί το ρομπότ έτσι ώστε να προσεγγίζει έναν δεδομένο σχηματισμό (x, y, θ) , κάτι που είναι γνωστό σαν πρόβλημα αντίστροφης κινηματικής.

Δυστυχώς, ένα ρομπότ εφοδιασμένο με σύστημα διαφορικής οδήγησης επιβάλλει μία συνθήκη μη-ολόνομων δεσμών για τον πλήρη καθορισμό της θέσης του. Για παράδειγμα το ρομπότ δεν μπορεί να μετακινηθεί πλευρικά κατά μήκος του άξονά του. Ένα παρόμοιο παράδειγμα μη ολόνομου δεσμού είναι το αυτοκίνητο που μπορεί να στρέφει μόνο τους μπροστινούς τροχούς του. Δεν μπορεί να μετατοπιστεί απευθείας πλάγια, και το να παρκάρει κανείς παράλληλα ένα αυτοκίνητο απαιτεί μία πιο πολύπλοκη σειρά ελιγμών. Έτσι δεν είναι αρκετό να καθοριστεί αυθαίρετα μία θέση του ρομπότ (x, y, θ) και απλά να υπολογιστούν οι ταχύτητες που το μετακίνησαν έως αυτή την θέση.

Στις ειδικές περιπτώσεις όπου ισχύει $v_l = v_r = v$ (το ρομπότ κινείται σε ευθεία γραμμή) οι εξισώσεις κίνησης τροποποιούνται ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + v \cos(\theta) \delta t \\ y + v \sin(\theta) \delta t \\ \theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

Αν $v_r = -v_l = v$, τότε το ρομπότ περιστρέφεται επί τόπου και οι εξισώσεις τροποποιούνται:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta + 2v\delta t / l \end{bmatrix} \quad (11)$$

Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μιας στρατηγικής κίνησης του ρομπότ σε μία ευθεία γραμμή, έπειτα περιστροφή του για μία επιτόπου στροφή, και στη συνέχεια την κίνησή του ξανά σε ευθεία γραμμή, σαν μέρος της στρατηγικής πλοήγησης των ρομπότ με διαφορεική σύστημα οδήγησης.

3.2.3 Οδομετρία

Στις περισσότερες εφαρμογές κινούμενων ρομπότ υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της θέσης τους: η σχετική και η απόλυτη τοποθέτηση. Η σχετική τοποθέτηση είναι συνήθως βασισμένη στην οδομετρία. Η οδομετρία είναι μια απλή μεθοδολογία, χαμηλού κόστους και εύκολο να επιταχυνθεί σε πραγματικό χρόνο. Το μειονέκτημά της είναι η ανεξέλεγκτη συσσώρευση σφαλμάτων.

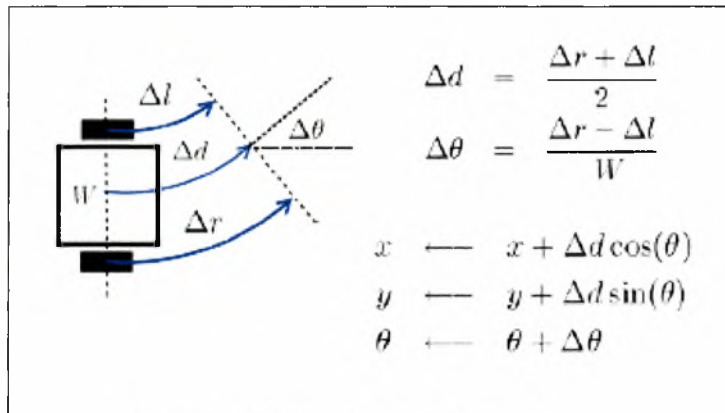
Στα κινούμενα ρομπότ η λογική είναι απλή, χρειάζεται να γνωρίζουν κάθε στιγμή την ακριβή τοποθεσία τους, αυτό βέβαια είναι κάπως δύσκολο αφού βασίζονται σε όχι τέλειους αισθητήρες. Η οδομετρία παρέχει την δυνατότητα χρήσης αισθητήρων κίνησης προκειμένου να υπολογίζεται η σχετική θέση ως προς ένα γνωστό σημείο.

Ο υπολογισμός με βάση την μεθοδολογία της οδομετρίας γίνεται ως εξής:

(α) Προσεγγίζεται η απόσταση που διανύεται χρησιμοποιώντας στροφές τροχού, κάθε στροφή ή αλλιώς γύρος έχει μήκος $2\pi R$.

(β) Χρησιμοποιούνται οδομετρητές, με σταθερό αριθμό παλμών για κάθε στροφή γύρο του τροχού.

Τα προβλήματα που εγείρονται σε αυτή την μεθοδολογία είναι συνήθως η ανακριβής διάμετρος του τροχού κίνησης, ανάστροφη κίνηση τροχού, επί τόπου περιστροφές, σφάλματα στην καταμέτρηση των παλμών, αργή επεξεργασία, διαφορετική διάμετρος των τροχών.



Εικόνα 3.3- παράδειγμα οδομετρίας

Βελτιωμένη οδομετρία μπορεί να μειώσει δραματικά το κόστος εγκατάστασης των κινούμενων ρομποτικών συστημάτων καθώς απλοποιεί το θεμελιώδες πρόβλημα του καθορισμού της ακριβούς θέσης. Παρόλα αυτά λίγη έρευνα έχει στοχεύσει απευθείας στην βελτίωση της οδομετρικής ακρίβειας των κινούμενων ρομπότ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΙΚΟ HARDWARE

4.1 Tmote Sky(Moteiv)

Η πλατφόρμα που χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή μας είναι η πλατφόρμα Tmote Sky από την εταιρεία Moteiv. Το tmote-sky είναι μια ασύρματη μονάδα (“mote”) πολύ χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων και σε εφαρμογές καταγραφής και παρακολούθησης σχεδιασμένες με σκοπό τόσο την ανεκτικότητα στο θόρυβο όσο και την ευκολία περαιτέρω ανάπτυξης και αξιοποίησης. Αποτελεί εξέλιξη του Telosb και είναι το πιο πρόσφατο προϊόν σε μια σειρά από motes που αναπτύχθηκαν από το Πανεπιστήμιο της California, Berkeley με σκοπό τη χρήση τους σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.



Εικόνα 4.1 - η ασύρματη μονάδα Tmote sky

Τα κυριότερα γνωρίσματα και τεχνικά χαρακτηριστικά του Tmote Sky φαίνονται περιληπτικά παρακάτω:

Mote Type Year	WeC 1998	Rene 1999	Rene2 2000	Dot 2000	Mica 2001	Mica2Dot 2002	Mica 2 2002	Telos 2004
Microcontroller								
Type	AT86L58595		ATmega163		ATmega128			TI MSP430
Program memory (KB)	8		16		128			48
RAM (KB)	0.5		1		4			10
Active Power (mW)	15		15		8		33	3
Sleep Power (μ W)	45		45		75		75	15
Wakeup Time (μ s)	1000		36		180		180	6
Nonvolatile storage								
Chip	24LC256			AT45DB041B			ST M25P80	
Connection type	I ² C			SPI			SPI	
Size (KB)	32			512			1024	
Communication								
Radio	TR1000			TR1000		CC1000		CC2420
Data rate (kbps)	10			40		38.4		250
Modulation type	OOK			ASK		FSK		O-QPSK
Receive Power (mW)	9			12		29		38
Transmit Power at 0dBm (mW)	36			36		42		35
Power Consumption								
Minimum Operation (V)	2.7		2.7		2.7			1.8
Total Active Power (mW)	24			27		44		89
Programming and Sensor Interface								
Expansion	none	51-pin	51-pin	none	51-pin	19-pin	51-pin	16-pin
Communication	IEEE 1284 (programming) and RS232 (requires additional hardware)							
Integrated Sensors	no	no	no	yes	no	no	no	yes

Πίνακας IV – Οικογένεια των Berkeley Motes – Πηγή: “Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research”, J. Polastre et. al., IPSN/SPOTS 2005”

4.1.1 Βασικά γνωρίσματα

- Ασύρματος πομποδέκτης 250kbps 2.4GHz IEEE 802.15.4 Chipcon
- Μικροελεγκτής 8MHz Texas Instruments MSP430 (10k RAM, 48k Flash)
- Ολοκληρωμένος ADC, DAC, Supply Voltage Supervisor και ελεγκτής DMA
- Onboard κεραία με εμβέλεια 50m σε εσωτερικούς χώρους / 125m σε εξωτερικούς.
- Ενσωματωμένοι αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και φωτός.
- Χαμηλή κατανάλωση ρεύματος
- Γρήγορη αφύπνιση (<6 μ s)
- Κωδικοποίηση και πιστοποίηση αυθεντικότητας στο στρώμα ζεύξης υλικού
- Προγραμματισμός και συλλογή δεδομένων μέσω USB
- Υποστήριξη επέκτασης 16pin και προαιρετικός συνδετήρας SMA για εξωτερική κεραία
- Υποστήριξη λειτουργικού συστήματος TinyOS

4.1.2 Κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά

CPU	
Bus Speed	8 MHz
RAM	10 kB

Program Space	48 kB
External Flash	1024KB
Serial Communications	DIO,SPI,I2C,UART
Current (active w/ Radio on)	19 mA
Current (sleep)	5.1 uA
Startup Time	6 us
Voltage	1.8-3.6 V
Radio	
Frequency	2400-2483 MHz
Data rate	250 kbps
Output Power Startup Time	-25 to 0 dBm 580 us
Antenna Type	Inverted-F or SMA Coax
Humidity Sensor	
Humidity Accuracy	3.5% RH
Temperature Accuracy	0.5 °C
Sampling Rate	90 Hz

Πίνακας V - κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά Tmote Sky

4.1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας Tmote Sky

Η υλοποίηση και ανάπτυξη του tmote στηρίχθηκε σε τρεις βασικούς στόχους: την ακόμα χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές πλατφορμών, την ευκολία χρήσης και την ευρωστία περαιτέρω ανάπτυξης και πειραματισμού. Ο σχεδιασμός της μονάδας Tmote Sky στηρίζεται στην ακόλουθη βασική αρχή που αναφέραμε και προηγουμένως: Η μονάδα-κόμβος βρίσκεται σε αδράνεια στο σύνολο του χρόνου, αφυπνίζεται άμεσα με την ύπαρξη ενός συμβάντος, επεξεργάζεται το συμβάν και επιστρέφει σε αδράνεια. Η ολοκληρωμένη σχεδίαση του προσφέρει όμως κάτι παραπάνω από απλά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του. Επιτρέπει στους σχεδιαστές να εκμεταλλευτούν την αυξημένη λειτουργικότητά του και να αναπτύξουν πιο εύρωστα συστήματα. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται πιο αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά της μονάδας tmote καθώς και τα πλεονεκτήματα της σε σχέση με άλλες πλατφόρμες, πλεονεκτήματα που μας οδήγησαν τελικά και στην επιλογή του προϊόντος αυτού για την εφαρμογή μας.

4.1.4 Τεχνολογικές τάσεις

Από την στιγμή που κυκλοφόρησε η μονάδα Mica2 το 2002, εμφανίστηκε ένα πλήθος νέων μικροελεγκτών που προσέφεραν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, περισσότερα ενσωματωμένα περιφερειακά και ποικίλα μεγέθη σε μνήμες RAM και flash.

Manufacturer	Device	RAM (kB)	Flash (kB)	Active (mA)	Sleep (μ A)	Release
Atmel	AT90LS8535	0.5	8	5	15	1998
	Mega128	4	128	8	20	2001
	Mega165/325/645	4	64	2.5	2	2004
General Instruments	PIC	0.025	0.5	19	1	1975
Microchip	PIC Modern	4	128	2.2	1	2002
Intel	4004 4-bit	0.625	4	30	N/A	1971
	8051 8-bit Classic	0.5	32	30	5	1995
	8051 16-bit	1	16	45	10	1996
Philips	80C51 16-bit	2	60	15	3	2000
Motorola	HC05	0.5	32	6.6	90	1988
	HC08	2	32	8	100	1993
	HCS08	4	60	6.5	1	2003
Texas Instruments	TSS400 4-bit	0.03	1	15	12	1974
	MSP430F14x 16-bit	2	60	1.5	1	2000
	MSP430F16x 16-bit	10	48	2	1	2004
Atmel	AT91 ARM Thumb	256	1024	38	160	2004
Intel	XScale PXA27X	256	N/A	39	574	2004

Πίνακας VI - Η ιστορία των μικροελεγκτών. Ο κύριος πίνακας παρουσιάζει παραδοσιακούς μικροελεγκτές και οι τελευταίες 2 συσκευές είναι 32-bit μικροελεγκτές που παρατίθενται για σύγκριση.

Η μονάδα tmote χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή MSP430, ο οποίος, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε καταστάσεις αδράνειας και ενεργής λειτουργίας. Ο μικροελεγκτής αυτός λειτουργεί με ελάχιστη τάση 1.8 V. Η απαίτηση χαμηλών τιμών τάσης είναι σημαντική για την εξαγωγή όλης της ενέργειας από μια πηγή τάσης. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες τύπου AA έχουν τάση αποκοπής στα 0.9V. Αν χρησιμοποιηθούν 2 μπαταρίες σε σειρά, η τάση αποκοπής του συστήματος είναι 1.8V, ακριβώς η ίδια με την ελάχιστη τάση που απαιτεί ο MSP430. Αντίθετα, ο μικροελεγκτής ATmega128 MCU (Mica family) λειτουργεί με ελάχιστη τάση 2.7V, αφήνοντας αχρησιμοποίητο σχεδόν το 50% των μπαταριών τύπου AA. Ο MSP430 έχει επιπλέον τον ταχύτερο χρόνο αφύπνισης από όλους τους μικροελεγκτές, μεταβαίνοντας από την κατάσταση αναμονής (standby 1 μ A) στην κατάσταση λειτουργίας το πολύ σε 6 μ s. Επίσης, διαθέτει έναν ελεγκτή DMA (Direct Memory Access controller) προσφέροντας τη δυνατότητα μείωσης του φορτίου στον πυρήνα του μικροελεγκτή και της κατανάλωση ενέργειας, καθώς και αύξησης της απόδοσης.

Η τάση που επικρατεί είναι να παραμένουν περίπου σταθερά τα μεγέθη των μνημών RAM και flash (όπως εμφανίζονται στον Πίνακα) και να προστίθενται επιπλέον στοιχεία επιτάχυνσης (accelerator modules) υλικού. Ο MSP430 παρέχει τη μεγαλύτερη ενσωματωμένη ενδιάμεση μνήμη RAM (RAM buffer 10 KB), χρήσιμη σε περιπτώσεις on-chip επεξεργασίας σήματος. Η δυνατότητα αποθήκευσης σε μεγαλύτερες μνήμες RAM παρόλο που μπορεί να φανεί χρήσιμη σε πιο απαιτητικές εφαρμογές δεν αποτελεί μέχρι σήμερα, γενικά, περιοριστικό παράγοντα στην εξέλιξη των εφαρμογών δικτύων ασύρματων αισθητήρων (WSN applications).

Operation	Telos	Mica2	MicaZ
Minimum Voltage	1.8V	2.7V	2.7V
Mote Standby (RTC on)	5.1 μ A	19.0 μ A	27.0 μ A
MCU Idle (DCO on)	54.5 μ A	3.2 mA	3.2 mA
MCU Active	1.8 mA	8.0 mA	8.0 mA
MCU + Radio RX	21.8 mA	15.1 mA	23.3 mA
MCU + Radio TX (0dBm)	19.5 mA	25.4 mA	21.0 mA
MCU + Flash Read	4.1 mA	9.4 mA	9.4 mA
MCU + Flash Write	15.1 mA	21.6 mA	21.6 mA
MCU Wakeup	6 μ s	180 μ s	180 μ s
Radio Wakeup	580 μ s	1800 μ s	860 μ s

Source: "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research", J. Polastre et. al., IPSN/SPOTS 2005.

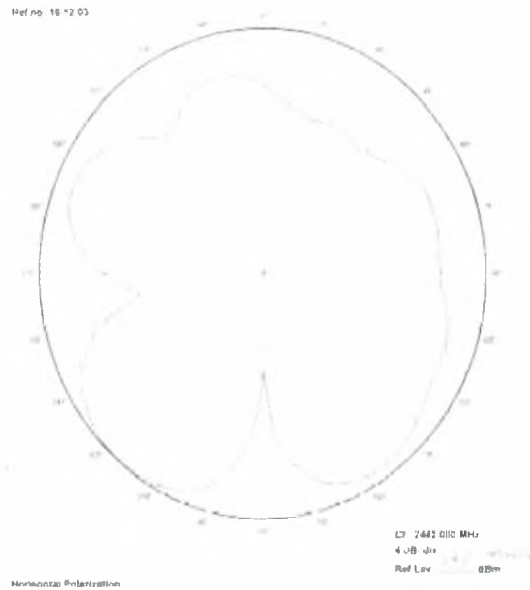
Reduced idle current (points to Mote Standby, MCU Idle, MCU Active)
Reduced active current (points to MCU + Radio RX, MCU + Radio TX, MCU + Flash Read, MCU + Flash Write)
Reduced wakeup time (points to MCU Wakeup, Radio Wakeup)
Lower cut-off voltage (points to Minimum Voltage)

Εικόνα 4.2 – κατανάλωση ρεύματος – πηγή: "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research", J. Polastre et. al., IPSN/SPOTS 2005"

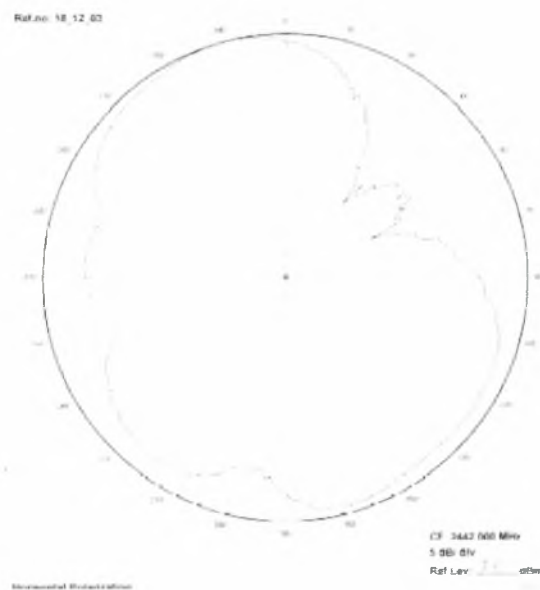
4.1.5 Ασύρματος πομποδέκτης

Υπάρχουν δύο τύποι ραδιοπομπών χαμηλής ισχύος, χαμηλού ρυθμού δεδομένων: οι στενής ζώνης (narrowband) και οι ευρυζωνικοί (wideband). Αρκετοί narrowband πομποδέκτες παρέχουν πολύ γρήγορους χρόνους εκκίνησης (startup times) καθώς συγχρονίζονται από τον μικροελεγκτή (MCU) αλλά, έχουν απλά σχήματα διαμόρφωσης, δεν έχουν εξάπλωση κώδικα και είναι ευάλωτοι στο θόρυβο. Οι wideband πομποδέκτες έχουν την ανάγκη ελέγχου από υψηλής ταχύτητας ταλαντωτές. Τα βελτιωμένα σχήματα διαμόρφωσης που εμφανίζονται σε αυτούς τους πομποδέκτες, όπως είναι οι διαμορφώσεις DSSS και O-QPSK, παρέχουν στιβαρότητα στο σήμα απέναντι στο θόρυβο και την παρεμβολή. Οι narrowband ραδιοπομποδέκτες λειτουργούν συνήθως σε χαμηλότερες συχνότητες και με χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων, σε αντίθεση με τους wideband που λειτουργούν συνήθως στη συχνότητα των 2.4GHz και προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Η επιλογή του κατάλληλου πομποδέκτη στηρίζεται σε ορισμένα κριτήρια που ο σχεδιαστής ενός συστήματος πρέπει να λάβει υπόψη του, όπως είναι η επίδραση του θορύβου, η ευελιξία που διατίθεται στην τελική εφαρμογή, η ευκολία επικοινωνίας με άλλες συσκευές, η κατανάλωση ενέργειας και το διαθέσιμο εύρος ζώνης δεδομένων.

Radiation Pattern



Εικόνα 4.3 - Πολικό διάγραμμα της κεραίας σε οριζόντια εκπομπή.



Εικόνα 4.4 - Πολικό διάγραμμα της κεραίας σε κατακόρυφη εκπομπή.

Παρουσιάζεται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κοινών ραδιοπομποδεκτών . Κανένας από τους αναγραφόμενους δεν είναι γενικά ο καλύτερος. Η εκλογή του κατάλληλου πομποδέκτη πρέπει να βασίζεται κάθε φορά στις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Radio Comparison

Type	Narrowband				Wideband		
Vendor Part no.	RFM TR1000	Chipcon CC1000	Chipcon CC2400	Nordic nRF2401	Chipcon CC2420	Motorola MC13191/92	Zeevo ZV4302
Max Data rate (kbps)	115.2	76.8	1000	1000	230	250	723.2
RX power (mW)	3.8	9.6	24	18 (25)	19.7	37(42)	65
TX power (mW/dBm)	12 / 1.5	16.5 / 10	19 / 0	13 / 0	17.4 / 0	34(30) / 0	65 / 0
Powerdown power (μ A)	1	1	1.5	0.4	1	1	140
Turn on time (ms)	0.02	2	1.13	3	0.58	20	*
Modulation	GOOK/ASK	FSK	FSK,GFSK	GFSK	DSSS-O-QPSK	DSSS-O-QPSK	FHSS-GFSK
Packet detection	no	no	programmable	yes	yes	yes	yes
Address decoding	no	no	no	yes	yes	yes	yes
Encryption support	no	no	no	no	128-bit AES	no	128-bit SC
Error detection	no	no	yes	yes	yes	yes	yes
Error correction	no	no	no	no	yes	yes	yes
Acknowledgments	no	no	no	no	yes	yes	yes
Interface	bit	byte	packet/byte	packet/byte	packet/byte	packet/byte	packet
Buffering (bytes)	no	1	32	16	128	133	yes *
Time-sync	bit	SFD/byte	SFD/packet	packet	SFD	SFD	Bluetooth
Localization	RSSI	RSSI	RSSI	no	RSSI/LQI	RSSI/LQI	RSSI

* Manufacturer's documentation does not include additional information.

Source: "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research". J. Polastre et. al. IPSN/SPOTS 2005.

Πίνακας VII - Χαρακτηριστικά σύγχρονων πομποδεκτών (COTS radios, commercial off-the-shelf) ιδανικών για δίκτυα ασύρματων αισθητήρων.

Η μονάδα tmote χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.15.4 και υποστηρίζει το πρωτόκολλο ZigBee. Χρησιμοποιώντας έναν τυποποιημένο πομποδέκτη, το tmote μπορεί να επικοινωνήσει με οποιοδήποτε αριθμό συσκευών που μοιράζονται το ίδιο φυσικό στρώμα, συμπεριλαμβάνοντας και συσκευές άλλων κατασκευαστών. Το Tmote Sky χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη Chipcon CC2420 στα 2.4 GHz, έναν ευρυζωνικό πομποδέκτη με διαμόρφωση O-QPSK με DSSS στα 250Kbps. Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων επιτρέπει μικρότερες περιόδους λειτουργίας μειώνοντας επιπλέον την κατανάλωση ενέργειας. Ο CC2420 είναι ένας πομποδέκτης με αυξημένη ευαισθησία και χαμηλή ισχύ λειτουργίας, ο οποίος παρέχει αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία. Η λειτουργία του ελέγχεται μέσω του TI MSP430 ενώ, και η ισχύς εξόδου μπορεί να προγραμματιστεί σύμφωνα με τις ανάγκες μας.

Ο CC2420 παρέχει επίσης ένα σύνολο από επιταχυντές υλικού προς βελτίωση της απόδοσης. Αυτοί περιλαμβάνουν κρυπτογράφηση και επαλήθευση, υποστήριξη χειρισμού πακέτων, αυτόματες γνωστοποιήσεις (auto acknowledgments) και αποκρυπτογράφηση διευθύνσεων (address decoding). Απ' τη στιγμή όμως που οι επιταχυντές υλικού είναι ενσωματωμένοι στον πομποδέκτη αντί στον μικροελεγκτή, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργίες γενικού σκοπού. Για παράδειγμα, ένα σύνολο δεδομένων μπορεί να είναι κρυπτογραφημένο και αποθηκευμένο σε μια μνήμη flash αλλά, από τη στιγμή που δε στέλνεται κάπου ασύρματα μέσω του πομπού, η μονάδα κρυπτογράφησης του υλικού του πομπού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Οι τυπικές συνθήκες λειτουργίας του ασύρματου πομποδέκτη φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

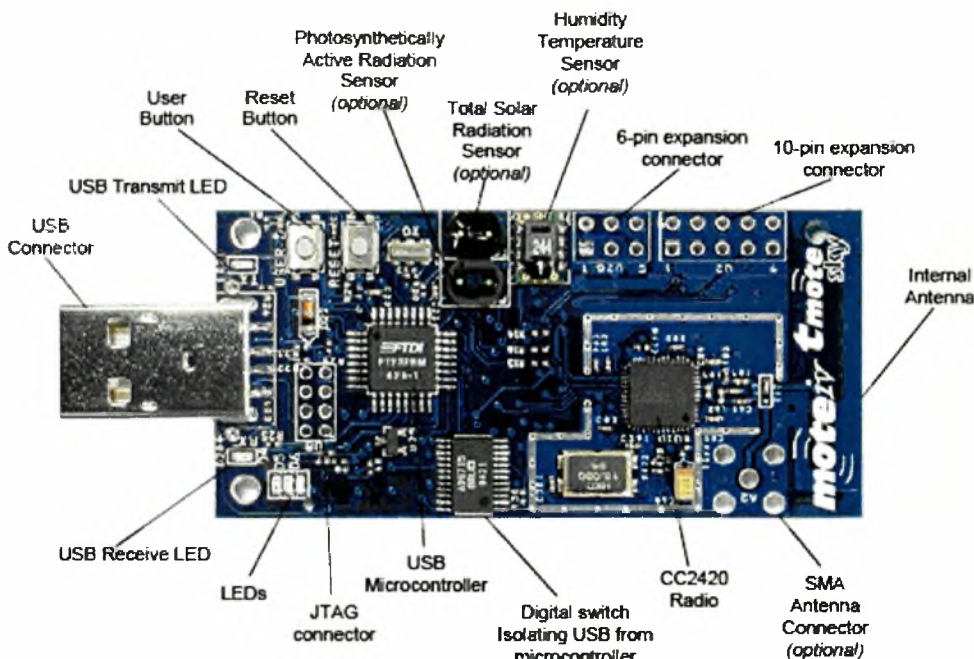
	MIN	NOM	MAX	Μονάδα
Τάση λειτουργίας κατά την ασύρματη εκπομπή (Vreg on)	2.1		3.6	V

Θερμοκρασία λειτουργίας	40	-	85	°C
Εύρος συχνοτήτων RF	2400		2483.5	MHz
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	250		250	kbps
Ονομαστική ισχύς εξόδου	3	-	0	dBm
Προγραμματιζόμενο εύρος ισχύς εξόδου		40		dBm
Ευαισθησία δέκτη	90	-	94	dBm
Κατανάλωση ρεύματος: ασύρματη μετάδοση σε 0 dBm			17.4	mA
Κατανάλωση ρεύματος: ασύρματη Λήψη			19.7	mA
Κατανάλωση ρεύματος: Radio on, ταλαντωτής on			365	μΑ
Κατανάλωση ρεύματος: κατάσταση αδράνειας, ταλαντωτής off			20	μΑ
Κατανάλωση ρεύματος: κατάσταση μη λειτουργίας, Vreg off			1	μΑ
Ρεύμα ρυθμιστή τάσης	13	20	29	μΑ
Χρόνος εκκίνησης ασύρματου ταλαντωτή		580	860	μs

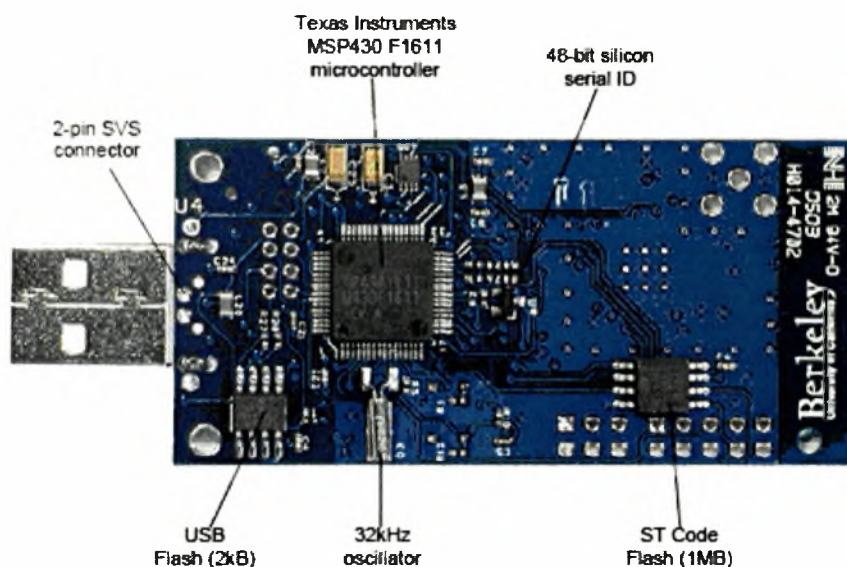
Πίνακας VIII - Τυπικές συνθήκες λειτουργίας ασύρματου πομποδέκτη Chipcon CC2420

4.1.6 Ολοκληρωμένη σχεδίαση

Το tmote-sky είναι μια μονάδα που συνδυάζει ενσωματωμένους αισθητήρες, δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, κεραία, μικροελεγκτή και προγραμματιστικές δυνατότητες. Η ολοκληρωμένη σχεδίασή του παρέχει μια εύχρηστη μονάδα-κόμβο με αυξημένη στιβαρότητα. Τα τμήματα απ' τα οποία αποτελείται η μονάδα αυτή φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 4.5 - εμπρός όψη του Tmote sky.

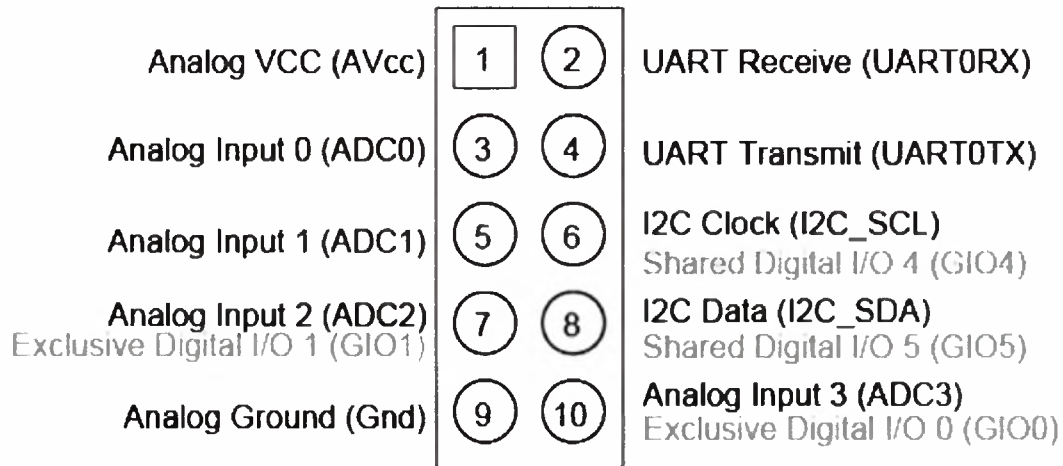


Εικόνα 4.6 - Οπίσθια όψη του Tmote sky.

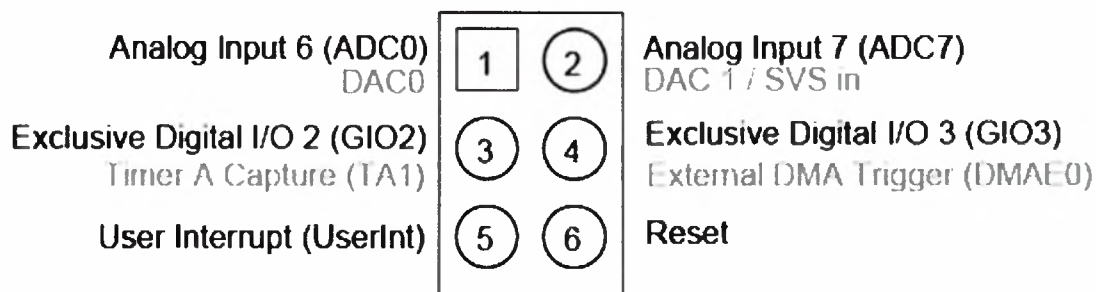
Το Tmote Sky χρησιμοποιεί μια ενσωματωμένη κεραία στα 2.4GHz, η οποία είναι μια μικροταινία σε σχήμα ανεστραμμένου F (Planar Inverted Folded Antenna – PIFA) και η οποία βρίσκεται τυπωμένη στην άκρη της πλακέτας, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (εμπρός όψη). Η κεραία αυτή επιτυγχάνει εμβέλεια 50 μέτρων σε εσωτερικούς χώρους και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 125 μέτρα σε ανοιχτούς. Μια προαιρετική SMA coax σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί της εσωτερικής κεραίας. Η ενσωμάτωση της κεραίας χαμηλώνει το συνολικό κόστος του mote αφού δεν απαιτείται άλλο ακριβό σύστημα εξωτερική κεραίας. Ο προγραμματισμός της μονάδας γίνεται μέσω σύνδεσης με τη θύρα USB ενός υπολογιστή. Για αυτό το λόγο ενσωματώνει πάνω του το κατάλληλο βύσμα USB που το απαλλάσσει από την ανάγκη χρήσης εξωτερικών καρτών διεπαφών.

4.1.7 Συνδετήρας επέκτασης

Το imote έχει δυο συνδετήρες επέκτασης, έναν των 10 ακροδεκτών (10-pin IDC header) και έναν των 6 ακροδεκτών (6-pin IDC header) οι οποίοι μπορούν να διαμορφωθούν κατάλληλα ώστε να συνδεθούν επιπλέον συσκευές, όπως αναλογικοί αισθητήρες, οθόνες LCD και άλλες περιφερειακές συσκευές, οι οποίες και θα ελέγχονται από τη μονάδα. Ο συνδετήρας των 10 pin παρέχει τόσο ψηφιακές εισόδους και εξόδους όσο και αναλογικές. Ένας δεύτερος συνδετήρας των 6pin δίνει πρόσβαση σε επιπλέον δυνατότητες του sky mote οι οποίες στην περίπτωση μας δεν χρειάστηκαν. Οι λειτουργίες που υποστηρίζουν οι ακροδέκτες φαίνονται στα παρακάτω σχήματα :

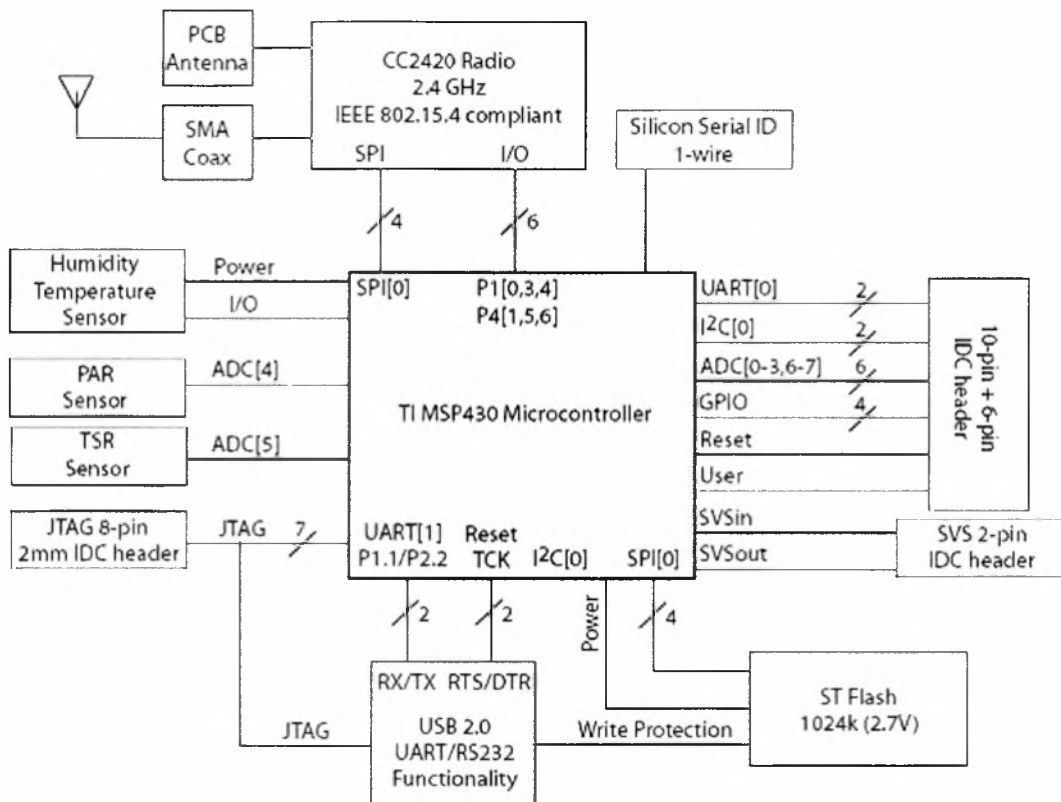


Εικόνα 4.7 - Συνδετήρας επέκτασης 10 θέσεων (pins)



Εικόνα 4.8 - Συνδετήρας επέκτασης 6 θέσεων (pins).

Η συσκευή λειτουργεί με δύο μπαταρίες τύπου AA οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργία στο εύρος τάσης 2.1V με 3.6V DC. Εάν η συσκευή τοποθετηθεί στη θύρα USB για προγραμματισμό ή επικοινωνία με τον H/Y τότε μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω της θύρας αυτής. Στην περίπτωση αυτή η τάση τροφοδοσίας είναι 3V και δεν είναι απαραίτητη η χρήση μπαταρίας. Στην εργασία μας η μονάδα που στέλνει ασύρματα το σήμα του ηλεκτροκαρδιογράφου τροφοδοτείται με μπαταρίες, ενώ η μονάδα που επικοινωνεί με τον H/Y για τη λήψη, απεικόνιση και επεξεργασία των δεδομένων τροφοδοτείται μέσω της θύρας USB.



Εικόνα 4.9 - Λειτουργικό μπλόκ διάγραμμα του Tmote.

Το tmote είναι η πρώτη μονάδα που περιλαμβάνει ‘προστασία εγγραφής’ στο υλικό (hardware write-protection). Όταν συνδέεται στη USB θύρα, η προστασία εγγραφής απενεργοποιείται και ο πρώτος τομέας της μνήμης flash μπορεί να εγγραφεί. Όταν λειτουργεί με μπαταρίες (χωρίς USB), ο τομέας αυτός έχει προστασία εγγραφής. Η προστασία εγγραφής είναι σημαντική σε συστήματα που μπορεί να αναπρογραμματιστούν ασύρματα. Και αυτό γιατί από τη στιγμή που θα έχει εγγραφεί στην προστατευμένη μνήμη μια ‘εικόνα’ ενός λειτουργικού προγράμματος θα υπάρχει πάντα ένας μηχανισμός επαναφοράς σε περίπτωση που χρειαστεί. Επίσης, κάθε στοιχείο-κομμάτι του υλικού είναι απομονωμένο. Η τροφοδοσία του κυκλώματος μπορεί να ανοίξει ή να κλείσει ανεξάρτητα από την υπόλοιπη πλατφόρμα. Η απομόνωση αυτή παρέχει μια στιβαρότητα έτσι ώστε σε περίπτωση αποτυχίας, τα στοιχεία που παρουσίασαν πρόβλημα να μπορούν να απενεργοποιηθούν ελαχιστοποιώντας την επίδραση τους στο κύκλωμα. Το κίνητρο για αυτή τη σχεδίαση ήρθε από την εμπειρία των πραγματικών δικτύων αισθητήρων στο Great Duck Island (GDI). Εκεί, ένας από τους κύριους λόγους αποτυχίας ενός κόμβου ήταν η ύπαρξη λάθους σε κάποιον αισθητήρα. Αφού το λάθος μπορεί να αναγνωριστεί από το λογισμικό, η δυνατότητα της διακοπής της τροφοδοσίας στο συγκεκριμένο τμήμα της πλακέτας θα μπορούσε να διασώσει το όλο σύστημα.

4.1.8 Κατανάλωση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας ενός αισθητήρα δεν αφορά μόνο τον μικροελεγκτή και/ή τον πομποδέκτη, αλλά επίσης και τα βοηθητικά στοιχεία από τα οποία

αποτελείται. Στον Πίνακα παρουσιάζεται η κατανάλωση ρεύματος σε διάφορες λειτουργίες της μονάδας tmote σε σύγκριση με τις πλατφόρμες Mica2 και MicaZ.

Operation	Telos	Mica2	MicaZ
Minimum Voltage	1.8V	2.7V	2.7V
Mote Standby (RTC on)	5.1 μ A	19.0 μ A	27.0 μ A
MCU Idle (DCO on)	54.5 μ A	3.2 mA	3.2 mA
MCU Active	1.8 mA	8.0 mA	8.0 mA
MCU + Radio RX	21.8 mA	15.1 mA	23.3 mA
MCU + Radio TX (0dBm)	19.5 mA	25.4 mA	21.0 mA
MCU + Flash Read	4.1 mA	9.4 mA	9.4 mA
MCU + Flash Write	15.1 mA	21.6 mA	21.6 mA
MCU Wakeup	6 μ s	180 μ s	180 μ s
Radio Wakeup	580 μ s	1800 μ s	860 μ s

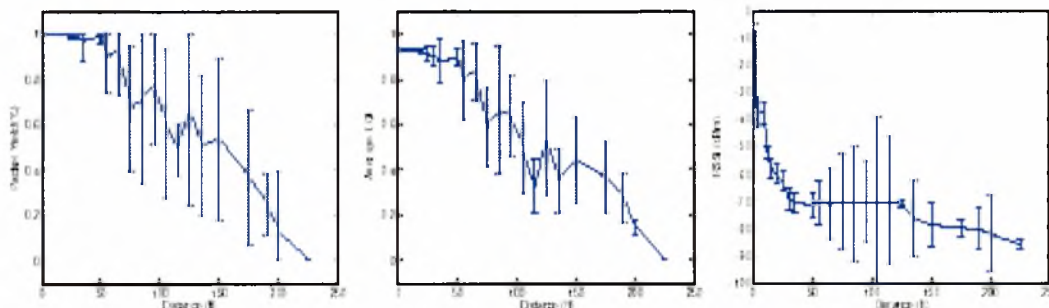
Πίνακας IX - Μετρημένη κατανάλωση ρεύματος του Telos σε σύγκριση με τα Mica2 και MicaZ motes.

Το tmote εμφανίζει χαμηλότερη κατανάλωση μνήμης flash και στον μικροελεγκτή, συγκριτικά με το Mica2 (Atmel με CC1000 radio) και το MicaZ (Atmel με CC2420 radio). Λόγω της ολοκληρωμένης σχεδίασης του, ένα επιπλέον ρεύμα της τάξης των 3 μ A καταναλώνεται, σε κατάσταση αδράνειας, σε διακόπτες και ενδιάμεσες μνήμες για την προστασία από ροή του ρεύματος προς αποσυνδεδεμένα στοιχεία, και κυρίως το κύκλωμα της USB. Παρά το μικρό trade off, η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε έναν κύκλο λειτουργίας (αφύπνιση, δειγματοληψία, μετάδοση και αδράνεια) είναι χαμηλότερη εκείνης των υπόλοιπων πλατφορμών. Η κατανάλωση ενέργειας ισούται με το συνολικό χρόνο ενεργής λειτουργίας της μονάδας, πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα που καταναλώνεται σε αυτό το χρόνο. Αφού το Tmote Sky έχει χαμηλότερη κατανάλωση ρεύματος, χαμηλότερο χρόνο αφύπνισης και χαμηλότερη τάση λειτουργίας, μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από προηγούμενους σχεδιασμούς. Με 1% duty cycle, το Telos μπορεί να διαρκέσει για σχεδόν 3 χρόνια. Συγκριτικά, η διάρκεια ζωής του Mica2 mote είναι 1.5 χρόνια και του MicaZ mote είναι 1 χρόνος. Η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας δε σημαίνει ότι το Tmote Sky εμφανίζει μικρότερη λειτουργικότητα, καθώς όλο και ισχυρότερα στοιχεία μικροεπεξεργαστών ενσωματώνονται στους μικροελεγκτές.

Η μονάδα Tmote Sky ενσωματώνει επίσης έναν ελεγκτή DMA ο οποίος λειτουργεί ενώ ο πυρήνας της μονάδας του μικροελεγκτή (MCU) βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Ο ελεγκτής DMA επιτρέπει σε εφαρμογές να εκτελούν διεργασίες όπως η δειγματοληψία του ADC, η έξοδος ενός σήματος στον ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα DAC καθώς και η ασύρματη μετάδοση δεδομένων χωρίς τη μεσολάβηση της MCU. Ο ελεγκτής DMA χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την αύξηση της επίδοσης, αλλά στην περίπτωση των ενσωματωμένων συστημάτων χαμηλής ισχύος, αυτό που κάνει στην πραγματικότητα είναι να χαμηλώνει το duty cycle, επιτρέποντας στον πυρήνα του μικροελεγκτή να παραμένει σε κατάσταση αδράνειας για περισσότερο χρόνο και να εξυπηρετεί λιγότερες διακοπές υλικού (hardware interrupts). Την έννοια αυτών των διακοπών υλικού θα την εξηγήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3). Η βελτίωση των επιδόσεων λόγω του DMA μας επιτρέπουν να φτάσουμε σε ρυθμό δειγματοληψίας μέχρι και 200ksamples/sec σε

σύγκριση με τη μέγιστη δυνατότητα των 10ksamples/sec σε μικροελεγκτές χωρίς DMA.

Για την ασύρματη επικοινωνία, ο πομποδέκτης της μονάδας tmote, όπως και κάθε άλλος που χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.15.4 παρέχει στις εφαρμογές πληροφορίες για το μεταδιδόμενο μήνυμα. Η ενσωματωμένη στο tmote κεραία εμφανίζει κυρίως ομοιοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Από μετρήσεις που έχουν γίνει για την επίδραση της απόστασης στην ισχύ του ληφθέντος σήματος (Received Signal Strength Indicator, RSSI), στο ρυθμό επιτυχών πακέτων και στην ποιότητα της ζεύξης (Link Quality Indicator, LQI) προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα για τις μέσες τιμές αυτών:



Εικόνα 4.10 - Ποσοστό πακέτων που λαμβάνονται-δείκτης ποιότητας-ισχύς λαμβανομένου σήματος

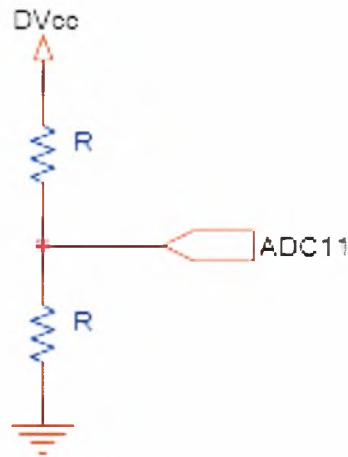
Ποσοστό ληφθέντων πακέτων (αριστερά), δείκτης ποιότητας ζεύξης (κέντρο) και ισχύς λαμβανομένου σήματος (δεξιά), σε εξωτερικό χώρο χρησιμοποιώντας τη μονάδα Tmote Sky και εσωτερική κεραία. Παρουσιάζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για 10 συνυπάρχοντες δέκτες.

Ο δείκτης LQI καθιερώθηκε στο 802.15.4 και μετράει το σφάλμα στην ενδοδιαμόρφωση των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων (πακέτα που πέρασαν τον CRC έλεγχο). Ο LQI του πομποδέκτη πλησιάζει σχηματικά το ρυθμό επιτυχών πακέτων. Ο RSSI ακολουθεί εκθετική μείωση καθώς ο ρυθμός επιτυχών πακέτων είναι υψηλός. Μετά από 18,29m (60 feet), το σήμα είναι πιο θορυβώδες και μειώνεται στην ελάχιστη ευαισθησία του πομποδέκτη. Επίσης, σε πειράματα που έγιναν σε ένα δίκτυο αποτελούμενο από τριάντα μονάδες-κόμβους Tmote Sky ώστε να μετρηθεί το πραγματικό εύρος ζώνης, προέκυψε ότι μια μονάδα (mote) είναι ικανή να χρησιμοποιήσει σχεδόν το μισό ενός πλήρους εύρους ζώνης δεδομένων του καναλιού ή 125kbps. Όταν και οι 30 κόμβοι μεταδίδουν όσο γρηγορότερα γίνεται, το Tmote Sky περιορίζεται σε ένα μέσο ρυθμό λήψης των 150kbps. Η απόδοση βέβαια, όπως είπαμε μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή DMA για την απευθείας μετάδοση δεδομένων χωρίς την μεσολάβηση της MCU καθώς και τη μείωση των συμβάντων διακοπής υλικού και υπερχειλίσης της ενδιάμεσης μνήμης.

4.1.9 Αισθητήρες υγρασίας/θερμοκρασίας και φωτός

Πάνω στην πλακέτα του sky mote βρίσκονται ενσωματωμένοι αισθητήρες υγρασίας/θερμοκρασίας και φωτός, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών. Ο αισθητήρας υγρασίας/θερμοκρασίας, κατασκευασμένος από την εταιρεία Sensirion AG, παράγεται χρησιμοποιώντας μια CMOS επεξεργασία και

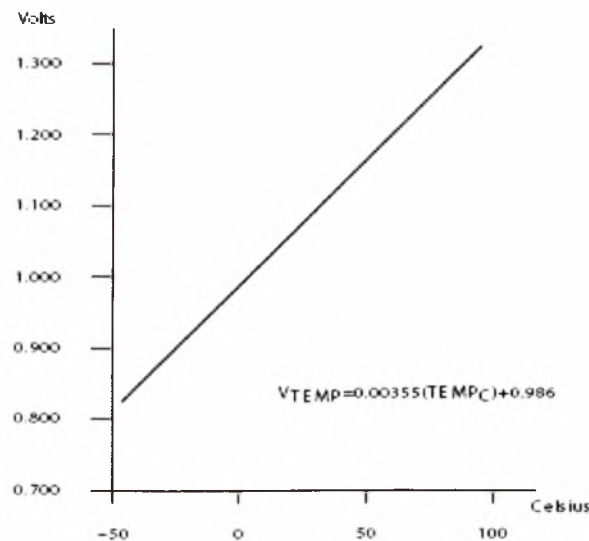
συνδυάζεται με έναν 14bit αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα (A/D converter). Ο αισθητήρας φωτός χρησιμοποιεί φωτοδιόδους, στη συγκεκριμένη περίπτωση κατασκευασμένους από την Hamamatsu Corporation, οι οποίοι 'αντιδρούν' στην ακτινοβολία φωτός. Τέλος, ο μικροελεγκτής MPS430 διαθέτει και εσωτερικούς αισθητήρες θερμοκρασίας και τάσης οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω της διεπαφής ADC του μικροελεγκτή. Η θύρα τάσης (είσοδος 11) στον 12-bit ADC καταγράφει την έξοδο από έναν διαχωριστή τάσης.



Εικόνα 4.11 - Διάγραμμα του κυκλώματος αισθητήρα θερμοκρασίας.

Η μετατροπή των μονάδων ADC που καταγράφονται, σε μονάδες τάσης γίνεται με βάση την παρακάτω σχέση:

Η είσοδος για τη θερμοκρασία είναι μια είσοδος θερμοκρασίας συνδεδεμένη στην εσωτερική θύρα 10 του ADC. Η τυπική απόκριση του αισθητήρα φωτός φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



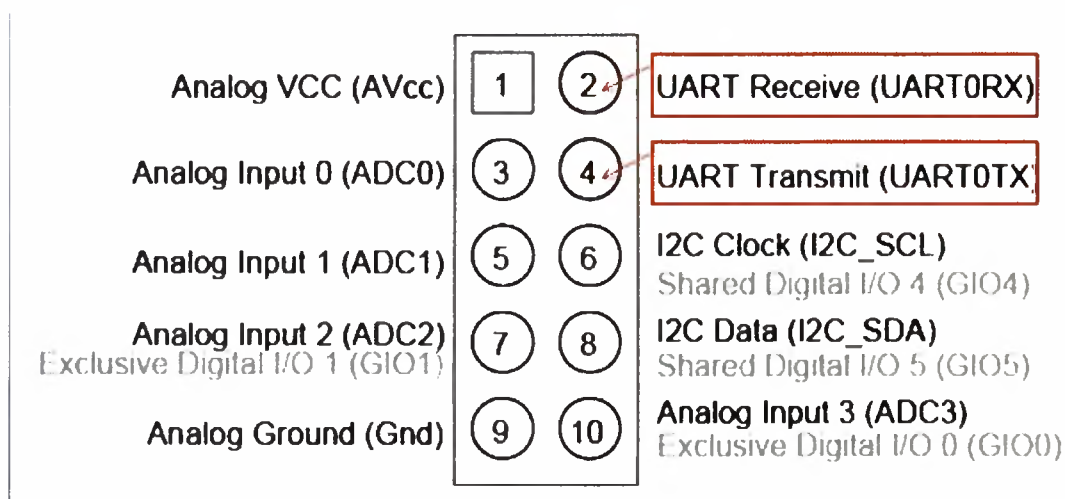
Εικόνα 4.12 - Παράσταση τυπικής απόκρισης του εσωτερικού αισθητήρα φωτός.

4.1.10 USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receive/Transmit)

Το USART είναι μια περιφερειακή επαφή της οικογένειας μικροελεγκτών MSP430x1xx που υποστηρίζει 3 τρόπους σειριακής σύνδεσης με ένα κύκλωμα. Η οικογένεια MSP430x16x στην οποία ανήκει και ο μικροελεγκτής του Tmote Sky παρέχει και δεύτερη USART (δηλαδή USART1 και USART0). Το USART υποστηρίζει 3 τρόπους UART, SPI και I2C, αλλά θα αναφερθούμε εκτενέστερα μόνο για το UART και το I2C με το οποίο συνδέεται το MD25.

4.1.10.1.1 USART: UART mode: Εισαγωγή

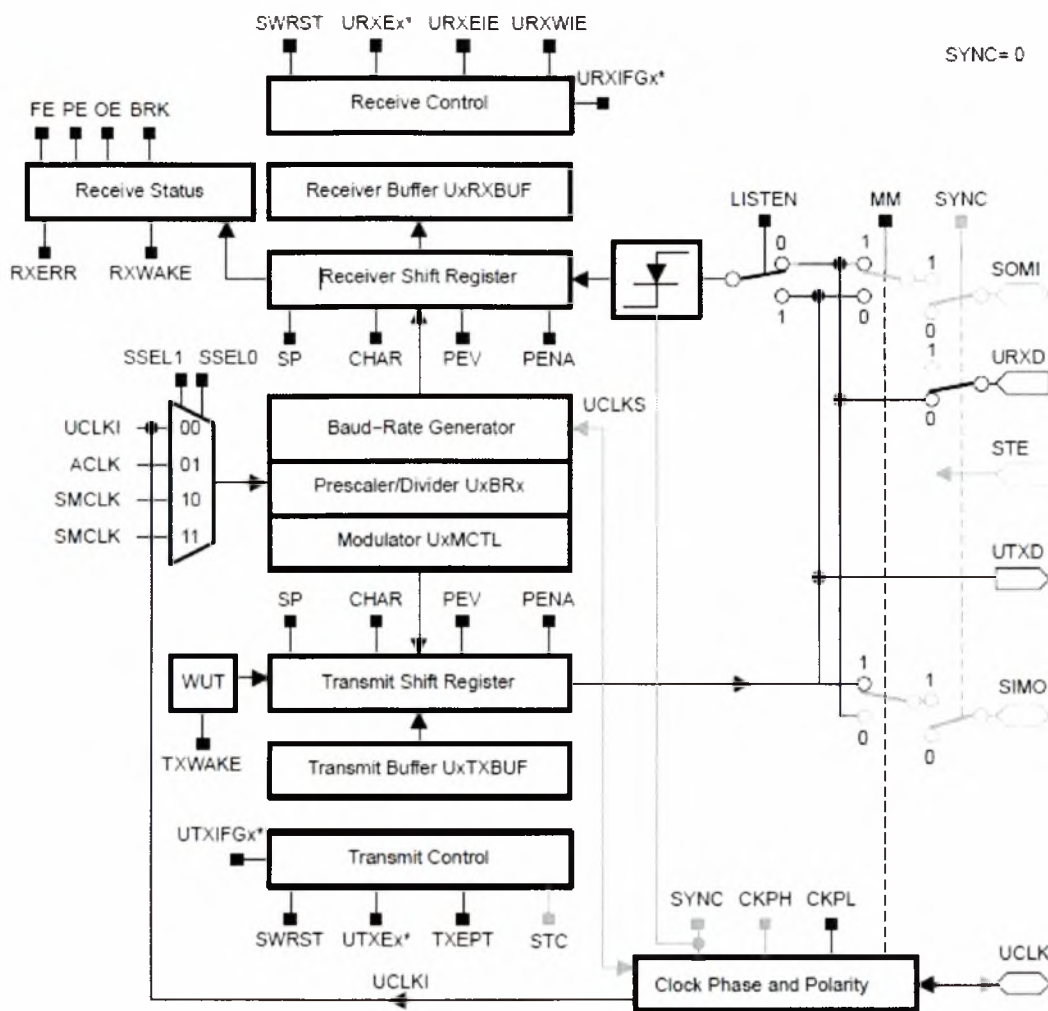
Στην ασύγχρονη φάση, το USART συνδέει το MS430 με ένα εξωτερικό σύστημα μέσω 2 εξωτερικών ακροδεκτών URXD και UTXD. Το UART επιλέγεται όταν το SYNC bit είναι απενεργοποιημένο.



Εικόνα 4.13- UART mode (a)

Τα χαρακτηριστικά του UART mode περιλαμβάνουν:

- 7- ή 8-bit δεδομένων με odd, even ή non-parity
- Ανεξάρτητους καταχωρητές ολίσθησης αποστολής και παραλαβής
- Ξεχωριστούς καταχωρητές προσωρινής αποθήκευσης αποστολής και παραλαβής
- LSB-first δεδομένων αποστολής και παραλαβής
- Ενσωματωμένα idle-line και address-bit πρωτόκολλα επικοινωνίας για πολυεπεξεργαστικά συστήματα
- Εντοπισμό παραλαβής start-edge για αυτόματο ξύπνημα από LPMx modes
- Προγραμματιζόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων με διαμόρφωση για υποστήριξη κλασματικών ρυθμών δεδομένων
- Status flags για εντοπισμό λαθών, καταστολή και εντοπισμό διεύθυνσης
- Ανεξάρτητη δυνατότητα διακοπής για αποστολή και παραλαβή



Εικόνα 4.14 - UART mode (b)

4.1.10.1.2 USART: UART mode: Εφαρμογή

Στη UART φάση, το USART μεταδίδει και λαμβάνει χαρακτήρες σε ασύγχρονο ρυθμό bit με μια άλλη συσκευή. Ο συγχρονισμός για κάθε χαρακτήρα εξαρτάται από το επιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης της USART. Οι λειτουργίες αποστολής και παραλαβής χρησιμοποιούν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης.

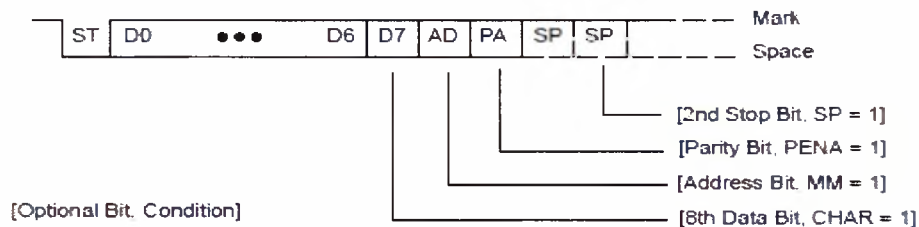
4.1.10.1.2.1 USART Αρχικοποίηση και επαναφορά αρχικών συνθηκών

Το USART επαναφέρεται από ένα PUC ή θέτοντας το SWRST bit. Μετά από ένα PUC, το SWRST bit αυτόματα θέτεται, κρατώντας το USART κατάσταση επαναφοράς. Όταν θέτεται, το SWRST bit επαναφέρει URXIE_x, UTXIE_x, URXIFG_x, RXWAKE, TXWAKE, RXERR, BRK, PE, OE, και FE bits και θέτει το UTXIFG_x και TXEPT bits. Οι σημαίες αποστολής και παραλαβής, URXEx και UTXEx, δεν επηρεάζονται από το SWRST. Μηδενίζοντας το SWRST απελευθερώνει το USART για εργασία.

4.1.10.1.2.2 Τυποποίηση χαρακτήρων

Η τυποποίηση των χαρακτήρων του UART, εικονίζεται στο σχήμα ... αποτελείται από ένα bit εκκίνησης (start bit), ακολουθούμενο από 7 ή 8 bits δεδομένων, ένα even/odd/no parity bit, ένα bit διεύθυνσης(address-bit mode) και ένα η δύο stop bits. Η περίοδος των bit ορίζεται από το επιλεγμένο ρολόι πηγής και από τους καταχωρητές του ρυθμού μετάδοσης. Στη συγκεκριμένη εργασία επειδή το MD25 επικοινωνεί σειριακά με 8 bits, no parity και 2 stop bits. Περισσότερες λεπτομέρειες θα δούμε στο κεφάλαιο του λογισμικού που περιγράφεται η εφαρμογή. Ενδεικτικά κομμάτι του κώδικα που προγραμματίζει τον MSP430 για UART σύνδεση επικοινωνήσιμη από το MD25:

```
U0CTL = SWRST;  
U0CTL |= CHAR; // CHAR enable: 8-bit data, UART-mode  
U0CTL &= ~PENA; // PENA disable: Parity disabled  
U0CTL |= SPB; // SPB enable: Two stop bits  
U0CTL &= ~SWRST;
```



Εικόνα 4.15- τυποποίηση χαρακτήρων του UART

4.1.10.1.2.3 USART Receive Enable & Transmit Enable

Το bit ενεργοποίησης παραλαβής, URXEx ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τη παραλαβή δεδομένων στο URDx. Στην εφαρμογή δεν χρησιμοποιείται καθώς δεν χρειάζεται παραλαμβάνουμε δεδομένα από το σύστημα οδήγησης αλλά να μεταδίδουμε. Θα χρειαζόταν βέβαια αν λαμβάναμε δεδομένα από τους οδομετρητές του MD25. Χρησιμοποιούμε το bit ενεργοποίησης μετάδοσης UTXEx, το οποίο όταν τεθεί στο 1 αρχικοποιείται γράφοντας δεδομένα στο UxTXBUF. Τα δεδομένα μετά μεταφέρονται στον καταχωρητή ολίσθησης της μετάδοσης στον επόμενο κύκλο αφού ο TX καταχωρητής ολίσθησης είναι άδειος και η μετάδοση ξεκινάει. Αυτή η εργασία φαίνεται στο διάγραμμα κατάστασης του Transmit enable (εικόνα 4.16).

Baud Rate	Divide by		A: BRCLK = 32,768 Hz						B: BRCLK = 1,048,576 Hz				
	A:	B:	UxBR1	UxBR0	UxMCTL	Max. TX Error %	Max. RX Error %	Synchr. RX Error %	UxBR1	UxBR0	UxMCTL	Max. TX Error %	Max. RX Error %
1200	27.31	873.81	0	1B	03	-4/3	-4/3	±2	03	69	FF	0/0.3	±2
2400	13.65	436.91	0	0D	6B	-6/3	-6/3	±4	01	B4	FF	0/0.3	±2
4800	6.83	218.45	0	06	6F	-9/11	-9/11	±7	0	DA	55	0/0.4	±2
9600	3.41	109.23	0	03	4A	-21/12	-21/12	±15	0	6D	03	-0.4/1	±2
19,200		54.61							0	36	6B	-0.2/2	±2
38,400		27.31							0	1B	03	-4/3	±2
76,800		13.65							0	0D	6B	-6/3	±4
115,200		9.1							0	09	08	-5/7	±7

Πίνακας X - ρυθμοί μετάδοσης και χαρακτηριστικά του MSP430

Το tmote sky ρυθμίστηκε να μεταδίδει στα 38400 με αντίστοιχες εντολές:

call UartControl.setClockSource(SSEL_2);

call UartControl.setClockRate(UBR_SMCLK_38400, UMCTL_SMCLK_38400);

4.1.10.1.3 USART καταχωρητές: UART Mode

Ο καταχωρητής ο οποίος είναι πιο σημαντικός για την εφαρμογή είναι ο καταχωρητής ελέγχου του USART, ο UxCTL.

7	6	5	4	3	2	1	0
PENA	PEV	SPB	CHAR	LISTEN	SYNC	MM	SWRST
rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-1

- PENA Bit 7 Ενεργοποίηση parity
0 Απενεργοποίηση parity
1 Ενεργοποίηση parity
- PEV Bit 6 Επιλογή Parity. Το PEV δεν χρησιμοποιείται όταν το parity είναι απενεργοποιημένο
0 Μονό parity
1 Ζυγό parity
- SPB Bit 5 Επιλογή stop bit. Αριθμός από stop bits που μεταδίδονται. Ο αποστολέας πάντα ελέγχει για ένα stop bit τουλάχιστον
0 Ένα stop bits
1 Δύο stop bits
- CHAR Bit 4 Μήκος χαρακτήρα. Επιλέγεις είτε 7-bit είτε 8-bit μήκος χαρακτήρα
0 7-bit δεδομένων
1 8-bit δεδομένων
- LISTEN Bit 3 Ενεργοποίηση listen. Το bit LISTEN επιλέγει loopback mode
0 Απενεργοποίηση
1 Ενεργοποίηση. Ο καταχωρητής UTXDx εσωτερικά τροφοδοτείται πίσω στον παραλήπτη.
- SYNC Bit 2 Ενεργοποίηση σύγχρονου τρόπου
0 UART mode
1 SPI mode
- MM Bit 1 Επιλογή επεξεργαστικού τρόπου

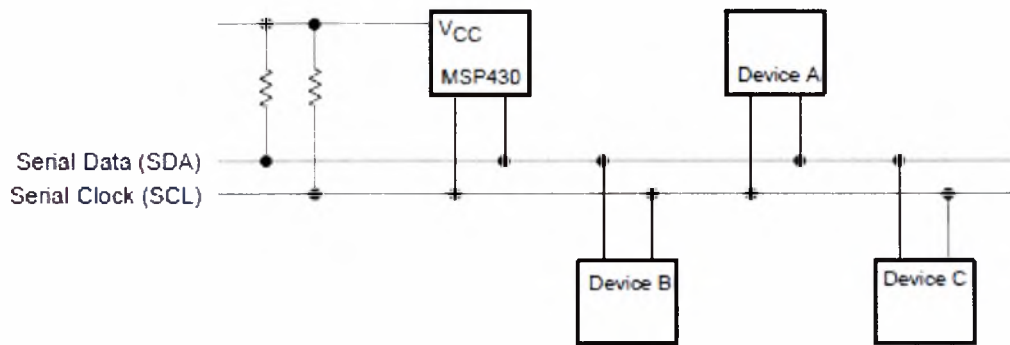
		0	Πρωτόκολλο επεξεργαστή αδρανής-γραμμής
		1	Πρωτόκολλο επεξεργαστή address-bit
SWRST	Bit 0		Ενεργοποίηση software reset
		0	Απενεργοποίηση
		1	Ενεργοποίηση

4.1.10.2 USART: I2C mode

4.1.10.2.1 USART: I2C mode: Εισαγωγή

Η ηλεκτρονική υπομονάδα I2C παρέχει μια διεπαφή μεταξύ του MSP430 και I2C-συμβατών συσκευών συνδεδεμένα με 2 γραμμές I2C σειριακού διαύλου. Τα χαρακτηριστικά του I2C υποκυκλώματος είναι:

- Σύμφωνα με τις προδιαγραφές v2.1 της Philips Semiconductor:
 - Μετάδοση με Byte / λέξη format
 - 7-bit ή 10-bit μήκος διεύθυνσης συσκευής
 - Γενική κλήση
 - START/RESTART/STOP
 - Υποστήριξη Multi-master transmitter/slave receiver mode
 - Υποστήριξη Multi-master receiver/slave transmitter mode
 - Υποστήριξη συνδυασμένου master transmit/receive και receive/transmit mode
 - Υποστήριξη κανονικού τρόπου 100kbps και γρήγορου τρόπου 400kbps
- Εενσωματωμένη FIFO για αποθήκευση εγγραφής και ανάγνωσης
- Προγραμματιζόμενος παραγωγός ρολογιού
- 16-bit μέγεθος προσπέλασης δεδομένων για μεγιστοποίηση εξόδου διαύλου
- Αυτόματη μέτρηση byte των δεδομένων



Εικόνα 4.19 - Διάγραμμα σύνδεσης I2C διαύλου

4.2 RD02 Σύστημα Ρομποτικής Οδήγησης

Το RD02 είναι ένα πλήρες ρομποτικό σύστημα οδήγησης που υποστηρίζει τη διαφορική οδήγηση 2 τροχών. Αποτελείται από το md25 που είναι το κύκλωμα της οδήγησης των κινητήρων, 2 EMG30 ηλεκτροκινητήρων διαφόρων ταχυτήτων με οδομετρητές και επίσης περιλαμβάνει πλαστικές ρόδες των 100mm οι οποίες αντικαταστάθηκαν από μικρότερης διαμέτρου λόγω της φύσης του οχήματος. Τροφοδοτείται εξολοκλήρου από μπαταρία τάσεως 12V ικανή να τροφοδοτήσει με ρεύμα 6Amps για τις απαιτήσεις του συστήματος.

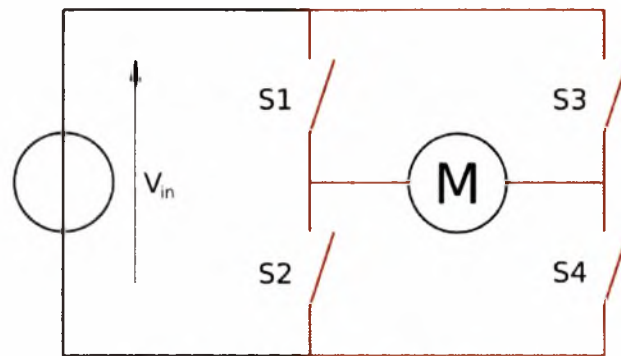


Εικόνα 4.20 - RD02 Σύστημα οδήγησης

4.2.1 MD25

Το MD25 είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο ονομάζεται H-γέφυρα και το οποίο δίνει τάση ώστε να εφαρμοστεί πάνω σε ένα φορτίο σε οποιαδήποτε

κατεύθυνση. Ο όρος «H-γέφυρα» απορρέει από την τυπική γραφική αναπαράσταση ενός τέτοιου κυκλώματος. Στην εικόνα 4.21 φαίνεται καθαρά η δομή μιας H-γέφυρας.

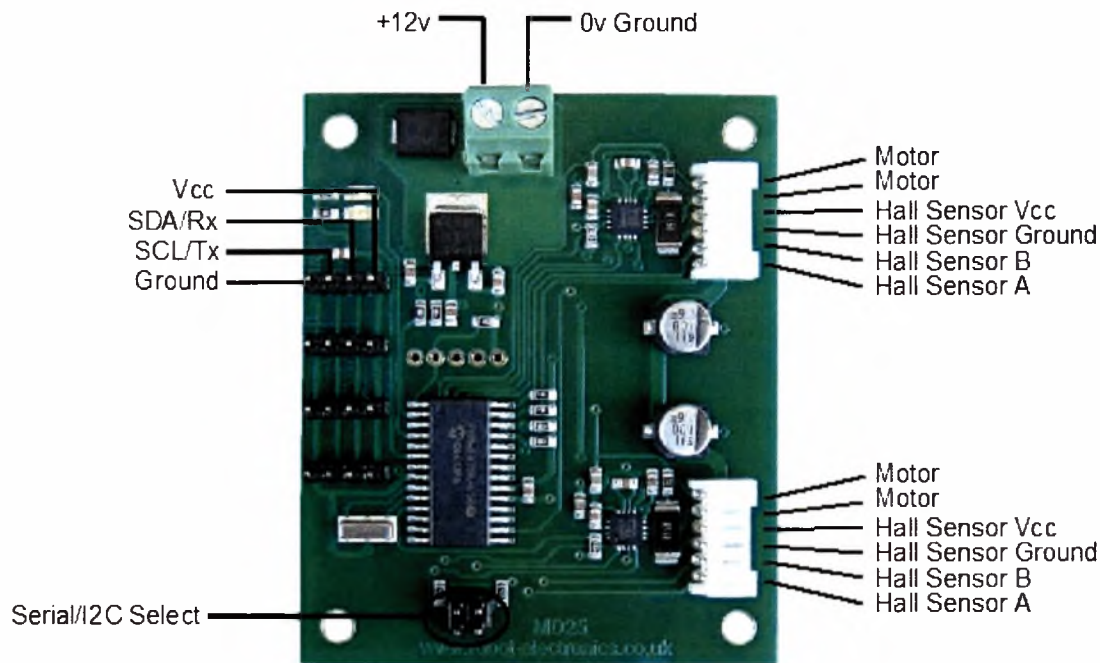


Εικόνα 4.21 - δομή H-γέφυρας

Το MD25 έχει σχεδιαστεί για να δουλεύει με τους EMG30 κινητήρες και μπορεί να οδηγήσει 2 από αυτούς παράλληλα. Παρέχει σειριακή ή I2C επαφή για τον έλεγχο του και 2 τρόπους λειτουργίας είτε άμεσα με απευθείας έλεγχο των κινητήρων είτε στέλνοντας εντολές ταχύτητας και στριψίματος. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

1. Διαβάζει τους οδομετρητές των κινητήρων και παρέχει μετρήσεις για τον προσδιορισμό της απόστασης που διανύθηκε και της κατεύθυνσης
2. Οδηγεί 2 κινητήρες με ανεξάρτητο ή συνδυασμένο έλεγχο
3. Το ρεύμα του κινητήρα είναι αναγνώσιμο
4. 12V απαιτούνται για την τροφοδοσία του κυκλώματος
5. Ενσωματωμένος ρυθμιστής 5V μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι 1Amp και 300mA συνεχόμενα σε εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό θα μπορούσαμε να το εκμεταλλευτούμε για να τροφοδοτήσουμε το Imote παρεμβάλλοντας έναν ρυθμιστή των 3.3V.
6. Περιλαμβάνεται επίσης ρύθμιση για τη μεταβολή της επιτάχυνσης των κινητήρων και της τροφοδοσίας.

Οι συνδέσεις φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 4.22:



Εικόνα 4.22 - συνδέσεις του MD25

Έχει τέσσερις επιλογές σύνδεσης:

Χωρίς τα jumper: I2C mode

Μόνο δεξί jumper: Serial mode στα 9600 bps, 1 start bit, 2 stop bits, no parity

Μόνο αριστερό jumper: Serial mode στα 19200 bps, 1 start bit, 2 stop bits, no parity

Και τα δύο jumper: Serial mode στα 38400 bps, 1 start bit, 2 stop bits, no parity

Για το tmote sky και κατ' επέκταση για το robomote αξιολογήθηκε ως ο καλύτερος τρόπος σύνδεσης ο τελευταίος δηλαδή σειριακός και στα 38400bps.

4.2.1.1 MD25: I2C mode και προβλήματα

Αρχικά επιλέχθηκε το I2C καθώς είναι πιο σταθερό, έχει δικό του συγχρονισμό και είναι πιο γρήγορο από το ασύγχρονο σειριακό. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά τη προσπάθεια σύνδεσης του md25 με το tmote έγκειται στο ότι ο μικροελεγκτής του md25 καταλαβαίνει σήματα pulled-up των 5V, ενώ το tmote παράγει I2C σήματα το πολύ των 3.3V όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες ή στη καλύτερη περίπτωση μέχρι 3.6V που έχει ανοχή. Οπότε αν κάνουμε άμεσα pull-up τις γραμμές SCL και SDA του tmote στα 5V είναι σίγουρο πως θα προκληθεί ανεπανόρθωτη ζημιά στον αισθητήρα. Η λύση αυτού του προβλήματος λύθηκε με τη παρεμβολή ενός τρίτου κυκλώματος το οποίο ονομάζεται I2C level converter.

4.2.1.2 MD25: Serial mode στα 38400bps

Το tmote sky υποστηρίζει και τις τρεις ταχύτητες του MD25 αλλά επιλέχθηκε η πιο γρήγορη στα 38400 καθώς μας ενδιαφέρει η γρήγορη απόκριση των εντολών του αισθητήρα με την οδηγό κίνησης. Το MD25 έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με σειριακό δίαυλο επικοινωνίας επιπέδου TTL (5V levels). Σε περίπτωση που απαιτείται να συνδεθεί με RS232 άμεσα, πρέπει να παρεμβάλουμε έναν μετατροπέα επιπέδου τάσης όπως το ST232 ή μια σειριακή επαφή όπως το S13 (για περισσότερες πληροφορίες δείτε στο www.robot-electronics.co.uk/acatalog/Serial_Interface.html).

Τα bytes των εντολών πρέπει να σταλθούν με την εξής σειρά: αρχικά ένα byte συγχρονισμού ίσο με το δυαδικό 0 ακολουθούμενο πάντα από ένα byte που ο αριθμός του αντιπροσωπεύει την κάθε εντολή και έπειτα από bytes δεδομένων όπως π.χ. την ταχύτητα του κινητήρα. Το MD25 θα ανταποκριθεί μόνο αν οι εντολές είναι απόλυτα σωστές. Όσον αφορά την περίπτωση να πάρουμε δεδομένα από το MD25 στέλνουμε πάλι το byte συγχρονισμού, το byte της εντολής που θέλουμε και έπειτα επιστρέφει τα δεδομένα που ζητήσαμε. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας όλων των εντολών:

Εντολή	Όνομα	Αριθμός bytes που στέλνονται	Αριθμός bytes που επιστρέφονται	Περιγραφή
0x21	<u>GET SPEED 1</u>	2	1	Επιστρέφει την ταχύτητα του κινητήρα 1
0x22	<u>GET SPEED 2</u>	2	1	Επιστρέφει την ταχύτητα του κινητήρα 2
0x23	<u>GET ENCODER 1</u>	2	4	Οδομετρητής του κινητήρα 1, επιστρέφει 4 high bytes first(signed)
0x24	<u>GET ENCODER 2</u>	2	4	Οδομετρητής του κινητήρα 2, επιστρέφει 4 high bytes first(signed)
0x25	<u>GET ENCODERS</u>	2	8	Επιστρέφει 8 bytes του οδομετρητή 1 και 2 μαζί
0x26	<u>GET VOLTS</u>	2	1	Επιστρέφει την τάση της μπαταρίας
0x27	<u>GET CURRENT 1</u>	2	1	Επιστρέφει το παρόν ρεύμα του κινητήρα 1
0x28	<u>GET CURRENT 2</u>	2	1	Επιστρέφει το παρόν ρεύμα του κινητήρα 2
0x29	<u>GET VERSION</u>	2	1	Επιστρέφει την έκδοση λογισμικού του MD25
0x2A	<u>GET ACCELERATION</u>	2	1	Επιστρέφει την παρούσα επιτάχυνση
0x2B	<u>GET MODE</u>	2	1	Επιστρέφει το παρόν mode κίνησης
0x2C	<u>GET VI</u>	2	3	Επιστρέφει την προσωρινή τάση του κινητήρα 1 και

				έπειτα του κινητήρα 2
0x31	<u>SET SPEED 1</u>	3	0	Θέτει το SPEED 1
0x32	<u>SET SPEED 2 / TURN</u>	3	0	Θέτει το SPEED 2 ή το TURN ανάλογα με το mode
0x33	<u>SET ACCELERATION</u>	3	0	Θέτει τη νέα επιτάχυνση
0x34	<u>SET MODE</u>	3	0	Θέτει το mode κίνησης
0x35	RESET ENCODERS	2	0	Μηδενίζει και τους δύο οδομετρητές
0x36	DISABLE REGULATOR	2	0	Απενεργοποίηση του REGULATOR
0x37	ENABLE REGULATOR	2	0	Ενεργοποίηση του REGULATOR
0x38	DISABLE TIMEOUT	2	0	Απενεργοποίηση του TIMEOUT
0x39	ENABLE TIMEOUT	2	0	Ενεργοποίηση του TIMEOUT

Πίνακας XI - Πίνακας Εντολών

MODE: Υπάρχουν 4 επιλογές κίνησης ανάλογα με τον αν θέλουμε με μια εντολή να ελέγχουμε και τους 2 κινητήρες ή με δυο εντολές για κάθε κινητήρα ξεχωριστά όπως και ανάλογα με το αν θέτουμε το εύρος της ταχύτητας από το 0 – 255 ή -128 – 127. Το mode αλλάζει τον τρόπο που οι καταχωρητές SPEED/TURN χρησιμοποιούνται.

MODE 0: (Προεπιλεγμένο) Η ταχύτητα του κάθε κινητήρα προσαρμόζεται από τον κάθε αντίστοιχο SPEED καταχωρητή. Οι τιμές της ταχύτητα κυμαίνονται από το 0 έως το 255 όπου 0 (Ολική όπισθεν), 128(σταμάτημα), 255(Ολικό εμπρός).

MODE 1: Ίδιο με την επιλογή 0, εκτός του ότι το εύρος της ταχύτητας κυμαίνεται ως προσημασμένες τιμές όπου -128(ολικό όπισθεν), 0(σταμάτημα), 127(Ολικό εμπρός).

MODE 2: Ο καταχωρητής SPEED1 ελέγχει και τους 2 κινητήρες και ο SPEED2/TURN αντιστοιχεί στη στροφή. Τα δεδομένα των καταχωρητών κυμαίνονται από το 0-255

MODE 3: Όπως το 2, με τη διαφορά ότι το εύρος των τιμών των καταχωρητών κυμαίνεται από το -128 έως το 127.

SPEED1: Ανάλογα με το mode, ο καταχωρητής επηρεάζει την ταχύτητα του ενός κινητήρα ή και των δύο. Αν είναι στο mode 0 ή 1 θέτει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του κινητήρα 1. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός που γράφεται στον καταχωρητή, περισσότερη ισχύς εφαρμόζεται στον κινητήρα. Στο mode 2 ή 3 ελέγχει την ταχύτητα και την κατεύθυνση και των 2 κινητήρων (σε συνδυασμό με τον SPEED2/TURN καταχωρητή).

SPEED2/TURN: Στο mode 0 ή 1 χειρίζεται την ταχύτητα και την κατεύθυνση του κινητήρα 2. Όταν είναι στο mode 2 ή 3 μετατρέπεται σε καταχωρητή στροφής (TURN) σε συνδυασμό με τον SPEED1 για την ηδαιλιούχηση της συσκευής.

TURN mode: Στο mode στροφής (2 ή 3) ελέγχεται ο καταχωρητής SPEED1 για να αποφασίσει αν η κατεύθυνση είναι όπισθεν ή εμπρός και έπειτα εφαρμόζει πρόσθεση ή αφαίρεση της τιμής της στροφής σε κάθε κινητήρα.

Έτσι, αν η κατεύθυνση είναι εμπρός:

Motor speed1 = speed1 – turn

Motor speed2 = speed1 + turn

Αλλιώς, αν η κατεύθυνση είναι όπισθεν:

Motor speed1 = speed1 + turn

Motor speed2 = speed1 – turn

Εάν κάποιος κινητήρας δεν δύναται να πετύχει την απαιτούμενη ταχύτητα για την στροφή (πέρα από την μέγιστη ισχύ), τότε ο άλλος κινητήρας αυτόματα αλλάζει από το πρόγραμμα του MD25 ώστε να συναντήσει την απαιτούμενη διαφορά.

GET ENCODER 1, GET ENCODER 2 ή GET ENCODERS

Όταν εκδίδεται μια εντολή ανάγνωσης οδομετρική (read encoder) τότε το MD25 στέλνει 4 high bytes first, τα οποία πρέπει να ενωθούν ώστε να σχηματίσουν ένα 32bit προσημασμένο αριθμό.

BATTERY VOLTS: Η ανάγνωση της τάσης της συνδεδεμένης μπαταρίας είναι εφικτή. Επιστρέφει την τάση πολλαπλασιασμένη 10 φορές, οπότε για παράδειγμα πάρουμε την τιμή 121, η τάση είναι 12,1V.

MOTOR1 και MOTOR2 CURRENT: Γίνεται ανάγνωση της τιμής του ρεύματος των κινητήρων. Επιστρέφει την τιμή του ρεύματος πολλαπλασιασμένη 10 φορές σε Amps.

Software Revision number: Αποκρίνεται με τον αριθμό της έκδοσης του λειτουργικού του PIC16F873 που είναι ο μικροελεγκτής του MD25.

Acceleration Rate: Το MD25 προσφέρει τη δυνατότητα του ελέγχου της επιτάχυνσης των κινητήρων. Λειτουργεί με την αποστολή τιμών επιτάχυνσης στον κατάλληλο καταχωρητή υπεύθυνο για τον βαθμό της επιτάχυνσης. Η εντολή WRITE ACCELARATION (εγγραφή επιτάχυνσης) επιτρέπει τιμές από το 1 έως το 10 με προεπιλογή το 5. Το 10 αντιστοιχεί στην 0,65sec τιμή της περιόδου για να τρέξει από μέγιστη ταχύτητα σε μια κατεύθυνση στην αντίθετη κατεύθυνση.

Καταχωρητής επιτάχυνσης	Χρόνος/Βήμα	Παρούσα Ταχύτητα	Νέα ταχύτητα	Βήματα	Χρόνος επιτάχυνσης
1	25ms	0	255	255	6.375s
2	25ms	127	255	64	1.6s
3	25ms	80	0	27	0.675s
5(προεπιλεγμένο)	25ms	0	255	51	1.275s
10	25ms	255	0	26	0.65s

Πίνακας XII - χαρακτηριστικές τιμές του καταχωρητή επιτάχυνσης

GET VI ή SET VI: Αυτή η εντολή δίνει οδηγίες στο MD25 να στείλει την τιμή της τάσης της μπαταρίας, έπειτα την τιμή του ρεύματος στον κινητήρα 1 και τέλος την τιμή ρεύματος στον 2.

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (REGULATOR): Το MD25 έχει ένα σύστημα για την αυτόματη ρύθμιση της ταχύτητας το οποίο είναι ζωτικής σημασίας καθώς έτσι ελαχιστοποιούμε τα λάθη που έχουμε στους κινητήρες λόγω της φύσεώς τους και της μπαταρίας με αποτέλεσμα να έχουμε γενικά ένα πιο σταθερό σύστημα και το ρομπότ να κινείται ευθεία σχεδόν πάντοτε. Χρησιμοποιώντας συνεχώς τα δεδομένα από τους οδομετρητές του MD25 είναι δυνατόν να αυξάνει δυναμικά όποτε χρειάζεται την ισχύ. Αν η απαιτούμενη ταχύτητα δεν εφαρμόζεται, το MD25 θα αυξήσει την ισχύ στους κινητήρες έως ότου φτάσει τον επιθυμητό ρυθμό περιστροφής ή οι κινητήρες πάρουν την μέγιστη έξοδο. Η αυτόματη ρύθμιση ταχύτητας (regulator) ενεργοποιείται και απενεργοποιείται από τους αντίστοιχους καταχωρητές REGULATOR ENABLE και REGULATOR DISABLE.

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΠΑΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ (AUTOMATIC MOTOR TIMEOUT): Το MD25 αυτόματα θα σταματήσει τους κινητήρες αν δεν υπάρχει σειριακή ή I2C επικοινωνία μέσα σε 2 δευτερόλεπτα. Αυτό γίνεται για να αποτρέψει το ρομπότ να τρέχει απρόβλεπτα όταν ο μικροελεγκτής αποτύχει. Αυτή η λειτουργία μπορεί να απενεργοποιηθεί και να ενεργοποιηθεί από τους αντίστοιχους καταχωρητές DISABLE TIMEOUT και ENABLE TIMEOUT.

4.2.2 EMG30

Ο EMG30 (οδομετρητής, κινητήρας, κιβώτιο ταχυτήτων 30:1) είναι ένας κινητήρας των 12V πλήρως εξοπλισμένος με οδομετρητές και με 30:1 μείωση κιβώτιο ταχυτήτων. Είναι ιδανικό για μικρού και μεσαίου βεληνεκούς εφαρμογές, παρέχοντας εξοικονομητική οδήγηση και ανάδραση για το χρήστη. Επίσης, περιλαμβάνει έναν πυκνωτή καταστολής θορύβου ανάμεσα στις στροφές του κινητήρα.



Εικόνα 4.23 – EMG30 κινητήρας όπου φαίνεται χαρακτηριστικά και η φίσα σύνδεσης με το MD25.

Το EMG30 εφοδιάζεται με έναν JST κονέκτορα 6 δρόμων. Οι συνδέσεις είναι:
Χρώμα καλωδίου Σύνδεση

Μωβ (1)	Έξοδος τάσης Αισθητήρα Β για οδομετρήσεις
Μπλε (2)	Έξοδος τάσης Αισθητήρα Α
Πράσινο (3)	Γείωση
Καφέ (4)	Πηγή τάσης
Κόκκινο (5)	+ Motor
Μαύρο (6)	- Motor

Σημειώνεται πως pull up αντιστάσεις (συνήθως 4k7) απαιτούνται στις εξόδους των αισθητήρων των οδομετρητών και τα χρώματα είναι τα χρώματα από τα καλώδια.

Χαρακτηριστικά

Τάση λειτουργίας:	12V
Ροπή λειτουργίας:	1.5kg/cm
Ταχύτητα λειτουργίας:	170rpm
Ρεύμα λειτουργίας:	530mA
Στάσιμο Ρεύμα:	2.5A
Ισχύς λειτουργίας:	4.22W
Αριθμός οδομετρήτη ανά πλήρη περιστροφή:	360

Μέγιστη και Ελάχιστη Ταχύτητα πλήρων στροφών ανά λεπτό που έχει μετρηθεί

Ελάχιστη ταχύτητα:	1.5rpm
Μέγιστη ταχύτητα:	200rpm

4.3 USBee AX Test Pod

4.3.1 Περιγραφή

Το USBee είναι ένα ψηφιακό πολυεργαλείο που συνδέεται μέσω USB στον υπολογιστή και με κατάλληλο πρόγραμμα μπορεί να λειτουργήσει ως παλμογράφος, ψηφιακό βολτόμετρο, λογικός αναλυτής που μας ενδιαφέρει περισσότερο, γεννήτορας ψηφιακών σημάτων, αποκωδικοποιητής I2C, SPI, ασύγχρονων σειριακών και USB σημάτων, γεννήτορας συχνοτήτων, ελεγκτής PWM (γενικά σημαντικό για τους κινητήρες) μετρητής παλμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το χρησιμοποιήσαμε ως λογικό αναλυτή για να αποκωδικοποιήσουμε τα I2C και τα ασύγχρονα σειριακά (UART) σήματα που παράγονται από το tmote για τον έλεγχο του MD25. Στη φάση της υλοποίησης αρχικά δοκιμάστηκε η σύνδεση I2C του tmote, η οποία αποδείχθηκε αναποτελεσματική καθώς ενώ είδαμε από τον λογικό αναλυτή ότι έστελνε σωστά τα bytes δεδομένων δηλαδή start bit, τη σωστή I2C διεύθυνση του MD25, έπειτα το σωστό καταχωρητή, το κατάλληλο byte δεδομένων και το stop bit, το MD25 είτε εκτελούσε είτε δεν εκτελούσε τις εντολές που θα έπρεπε αλλά επίσης όταν τις εκτελούσε δεν τις εκτελούσε σωστά. Αυτό οφειλόταν στο ότι τα 2 modules λειτουργούσαν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Γι' αυτό δημιουργήθηκε η ανάγκη της χρήσης του I2C μετατροπέα επιπέδου τάσης ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω.

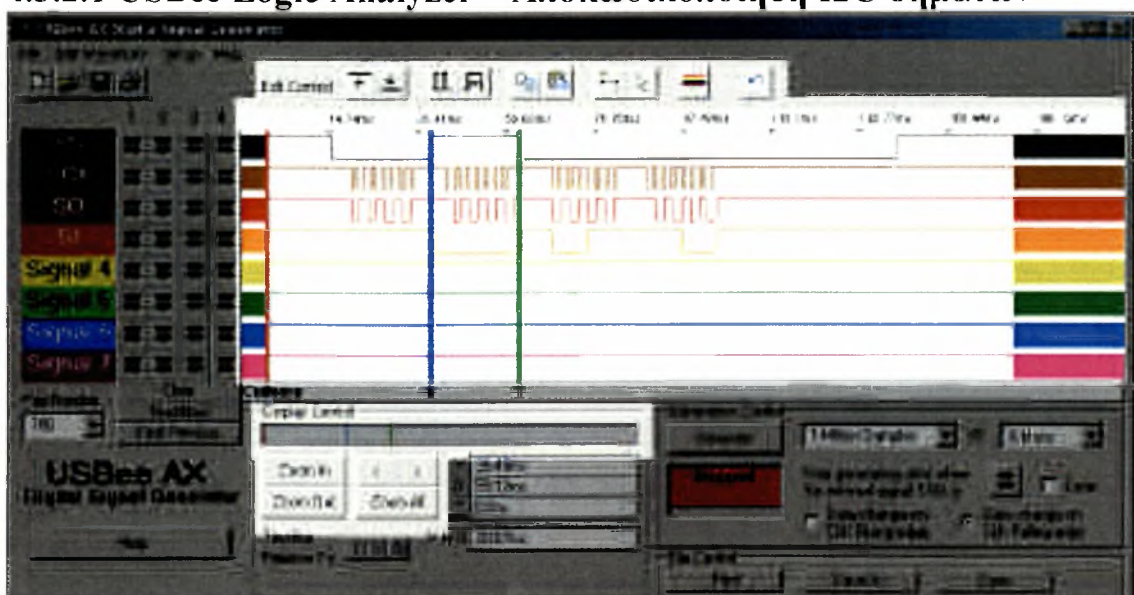


Εικόνα 4.24 - USBBe AX Test Pod

4.3.2 USBBe Logic Analyzer

Λογικός αναλυτής είναι ένα ηλεκτρονικό εργαλείο που εμφανίζει τα σήματα ενός ψηφιακού κυκλώματος τα οποία είναι πάρα πολύ γρήγορα έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί πιο εύκολα να ελέγξει τη λειτουργία του ψηφιακού συστήματος με ακρίβεια. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τη λήψη δεδομένων σε συστήματα με πάρα πολλά κανάλια που πρέπει να εξεταστούν με έναν παλμογράφο. Στον λογικό αναλυτή εκτελείται λογισμικό που μπορεί να μετατρέψει τα δεδομένα που συλλαμβάνονται σε διαγράμματα χρόνου, να αποκωδικοποιήσει το πρωτόκολλο και μηχανές κατάστασης.

4.3.2.1 USBBe Logic Analyzer – Αποκωδικοποίηση I2C σημάτων



Εικόνα 4.25 - USBBe AX Εφαρμογή του λογικού αναλυτή

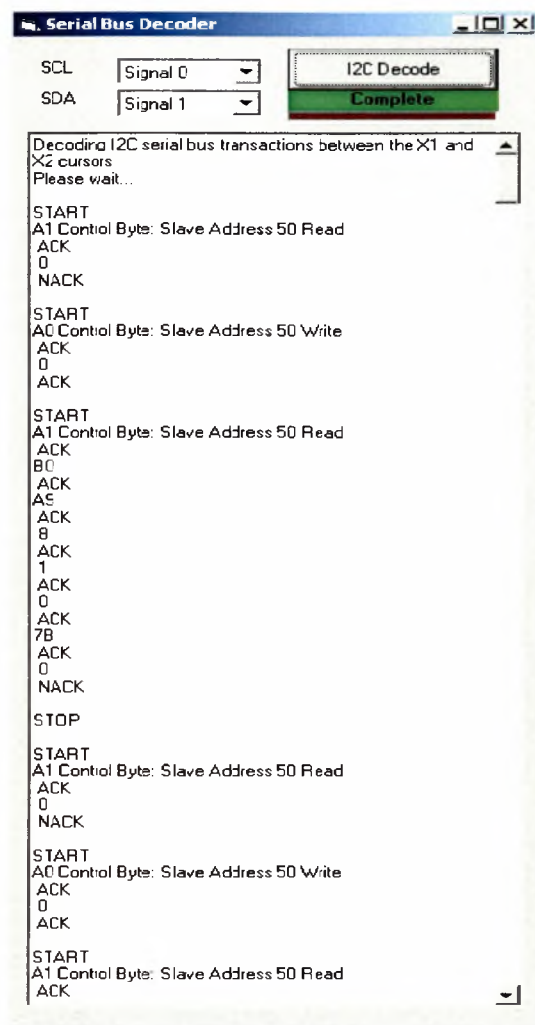
Βήμα προς βήμα η σύνδεση του tmote με τον λογικό αναλυτή

- Αρχικά, συνδέουμε τον ακροδέκτη της γείωσης του USBee με την γείωση του tmote
- Συνδέουμε τον ακροδέκτη του Signal 0 του USBee με το tmote στον ακροδέκτη της SDA γραμμής
- Συνδέουμε τον ακροδέκτη του Signal 1 του USBee με το tmote στον ακροδέκτη της SCL γραμμής
- Τρέχουμε την εφαρμογή του λογικού αναλυτή στον υπολογιστή
- Διαλέγουμε τον ρυθμό δειγματοληψίας και πατάμε το κουμπί "Run" αφού έχουμε βάλει το tmote η οποιαδήποτε συσκευή να στέλνει συνεχώς I2C σήματα
- Πατάμε το κουμπί "Stop" τοποθετούμε τους κέρσορες X και O στην αρχή και στο τέλος του χρονικού διαστήματος που θέλουμε να αποκωδικοποιήσουμε
- Στο menu διαλέγουμε View και έπειτα I2C Decoder
- Διαλέγουμε τις σωστές SDA και SCL γραμμές δηλαδή Signal 0 και Signal 1 αντίστοιχα
- Πατάμε το κουμπί Decode της αποκωδικοποίησης
- Στο τέλος εμφανίζονται τα δεδομένα αποκωδικοποιημένα σε μορφή κειμένου όπως στην εικόνα 4.26.

4.4 I2C-TRN Dual Bidirectional I2C Voltage-Level Translator

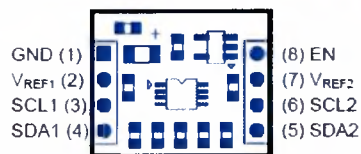
Το I2C-TRN κύκλωμα είναι μια 8-pin CMOS συσκευή που μετατρέπει το επίπεδο τάσης. Αυτό επιτρέπει την αμφίδρομη μετάφραση τάσης μεταξύ 1.2V και 5V, χωρίς τη χρήση ενός pin κατεύθυνσης. Η χαμηλή ON-state αντοχή του διακόπτη επιτρέπει συνδέσεις που πραγματοποιούνται με ελάχιστη καθυστέρηση διάδοσης. Δεν απαιτούνται άλλα εξωτερικά κυκλώματα. Αυτό το καθιστά ιδανικό για ενσωματωμένα συστήματα που απαιτούν μετάφραση τάσης μεταξύ master και slave.

Με το μεταφραστική επιπέδου τάσης λύθηκε το πρόβλημα εν μέρει καθώς ενώ το MD25 ανταποκρινόταν πλήρως στις εντολές του tmote, όταν συνδυάζαμε σε μια εφαρμογή tinyos I2C εντολές ασύρματης μετάδοσης, η ασύρματη μετάδοση μπλοκαριζόταν λόγω του ότι τα pin του SDA και SCL σχετίζονται με το κύκλωμα της ασύρματης σύνδεσης CC2420. Αυτό λύνεται εάν: όταν απενεργοποιούμε το I2C για να μεταδώσουμε να κλείνουμε με το pin 8 EN το I2C-TRN κάνοντας χρήση ενός διαφορετικού pin από το tmote το οποίο είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του I2C-TRN. Αυτό βέβαια το κάνει ιδιαίτερα πολύπλοκο ενώ με τη σειριακή δε χρειάζεται ούτε τον μετατροπέα αλλά γλιτώνονται και οι διάφορες κλήσεις συστήματος για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του I2C-TRN. Αυτός είναι και ο λόγος που τελικά επιλέχθηκε η ασύγχρονη σειριακή σύνδεση.



Εικόνα 4.26: αποκωδικοποιητής

Pin Configuration



Pin No.	Name	Type	Description
1	GND	PWR	Supply ground
2	V _{REF1}	PWR	Low-voltage-side reference supply voltage for SCL1 and SDA1
3	SCL1	I/O	Serial clock line, low-voltage side
4	SDA1	I/O	Serial data line, low-voltage side
5	SDA2	I/O	Serial data line, high-voltage side
6	SCL2	I/O	Serial clock line, high-voltage side
7	V _{REF2}	PWR	High-voltage-side reference supply voltage for SCL1 and SDA1
8	EN	Input	Switch enable input

Εικόνα 4.27 – διαμόρφωση της συσκευής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

5.1 Λογισμικό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

5.1.1 Εισαγωγή

Τα λειτουργικά συστήματα για τους ασύρματους κόμβους δικτύων αισθητήρων είναι λιγότερο σύνθετα από τα γενικής χρήσης λειτουργικά συστήματα και λόγω των πρόσθετων απαιτήσεων των εφαρμογών δικτύων αισθητήρων και λόγω των περιορισμών των πόρων στο hardware των πλατφόρμων των δικτύων αισθητήρων. Παραδείγματος χάριν, οι εφαρμογές δικτύων αισθητήρων δεν είναι αλληλοδραστικές με τον ίδιο τρόπο όπως οι εφαρμογές για τα PC. Για αυτόν τον λόγο, το λειτουργικό σύστημα δεν χρειάζεται να υποστηρίζει interfaces για την επικοινωνία με τον χρήστη. Επιπλέον, οι περιορισμοί του hardware όσον αφορά την μνήμη και την χαρτογράφηση της μνήμης καθιστά τους μηχανισμούς όπως η εικονική μνήμη είτε άχρηστους είτε αδύνατους να εφαρμοστούν.

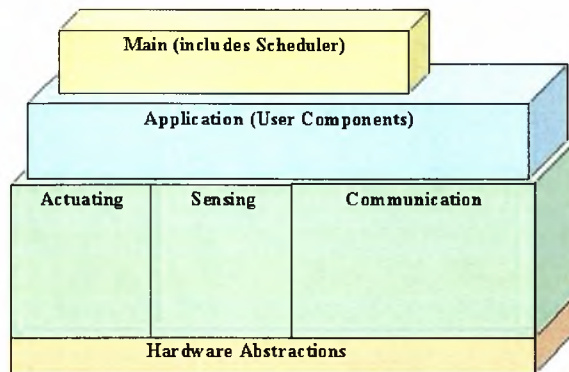
5.1.2 Το λειτουργικό σύστημα TinyOS

Το TinyOS είναι ίσως το πρώτο λειτουργικό σύστημα που σχεδιάστηκε συγκεκριμένα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, από το οποίο προέρχεται σε μεγάλο βαθμό η επιτυχία και η δημοτικότητα που γνωρίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα τελευταία χρόνια.

Οι προκλήσεις που είχε να αντιμετωπίσει και να λύσει το TinyOS ήταν:

- Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- Ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις για συγχρονισμό:
 1. Ροή πληροφορίας από πολλές πηγές (αισθητήρες, πομποδέκτης)
 2. Μικρή μνήμη, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να γίνει buffering, άρα πρέπει να επεξεργαστούμε γρήγορα τα μηνύματα που δεχόμαστε, αλλιώς μπορεί να τα χάσουμε
- Μικρό μέγεθος συνολικά του συστήματος
- Η σχεδίαση να είναι modular για να μπορούμε να φτιάξουμε γρήγορα και εύκολα εφαρμογές

Μια απλοποιημένη εκδοχή της αρχιτεκτονικής του TinyOS φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.1 - Η αρχιτεκτονική του TinyOS

(εικόνα από <http://www.ceid.upatras.gr/courses/katanemhmena/wiki>)

Όταν λέμε ότι ένας κόμβος τρέχει TinyOS, εννοούμε ότι έχει εγκατεστημένο στη flash μνήμη του ένα binary εκτελέσιμο image με τις βιβλιοθήκες του TinyOS που χρειαζόμαστε, συνδεδεμένες με την εφαρμογή που θέλουμε να εκτελέσουμε. Το image αυτό από εδώ και πέρα θα το αναφέρουμε ως εφαρμογή TOS (TinyOS application). Το TinyOS από μόνο του δεν εκτελεί κάποια ιδιαίτερη λειτουργία και ούτε έχει κάποιο user interface (όπως π.χ. το shell στο Unix), οπότε δεν έχει κανένα νόημα να το εγκαταστήσουμε μόνο του σε έναν κόμβο.

Αντίθετα από τα περισσότερα άλλα λειτουργικά συστήματα, το TinyOS είναι βασισμένο σε ένα event-driven πρότυπο προγραμματισμού αντί για multithreading. Τα προγράμματα TinyOS αποτελούνται από event-handler και tasks. Όταν συμβαίνει ένα εξωτερικό γεγονός, όπως ένα εισερχόμενο πακέτο στοιχείων ή μια ανάγνωση αισθητήρων, το TinyOS καλεί τον αρμόδιο event-handler για να χειριστεί το γεγονός. Το σύστημα TinyOS καθώς και τα προγράμματα που γράφονται για TinyOS γράφονται σε μια ειδική γλώσσα προγραμματισμού αποκαλούμενη nesC που είναι μια επέκταση της γλώσσας προγραμματισμού C. Η nesC^[8] έχει ως σκοπό να ανιχνεύει τις συνθήκες μετάβασης μεταξύ tasks και event-handlers.

5.1.3 NesC και βασικά της χαρακτηριστικά

Η γλώσσα προγραμματισμού nesC αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια Berkeley σε συνεργασία με την ομάδα που δημιούργησε το TinyOS.

Μερικές από τις αρχές που διέπουν τη σχεδίαση της nesC είναι:

- **Η nesC βασίζεται στη C:** Αυτή η επιλογή έγινε διότι οι μεταγλωττιστές της C παράγουν αποδοτικό κώδικα για όλους του microcontrollers που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επεξεργαστές σε συστήματα έξυπνης σκόνης. Επίσης, ένα μεγάλο μέρος των προγραμματιστών σε embedded συστήματα χρησιμοποιεί τη C ως γλώσσα προγραμματισμού.
- **Ολική ανάλυση προγράμματος κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης (compiling):** Η ξεχωριστή μεταγλώττιση μερών ενός προγράμματος δεν είναι διαθέσιμη ως επιλογή στη nesC. Αυτό γίνεται για να είναι πιο ακριβής ο έλεγχος για λάθη και συγχρονισμό (race conditions) στο πρόγραμμα και για πιο

αποδοτικό κώδικα (μικρότερο μέγεθος), το οποίο είναι αρκετά βολικό, δεδομένου του μικρού μεγέθους της διαθέσιμης μνήμης.

- **Στατικός κώδικας:** Η μνήμη κατανέμεται στατικά σε μια εφαρμογή TOS κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης και επίσης το γράφημα διασυνδέσεων μεταξύ των διάφορων component είναι σταθερό και γνωστό. Το μοντέλο των component εξαλείφει την ανάγκη για δυναμική δέσμευση μνήμης και ενθαρρύνει ένα ευέλικτο σχεδιασμό.
- **Η nesC υποστηρίζει και αντικατοπτρίζει τη φιλοσοφία του TinyOS .**

Μια εφαρμογή **nesC** αποτελείται από ένα ή περισσότερα **components** που συνδέονται για να διαμορφώσουν ένα εκτελέσιμο. Ένα **component** παρέχει και χρησιμοποιεί τα **interfaces**. Αυτά τα **interfaces** είναι το μόνο σημείο της πρόσβασης στο **component** και είναι αμφίδρομες. Ένα **interface** δηλώνει ένα σύνολο λειτουργιών, τις οποίες ονομάζουμε **commands**, και τις οποίες πρέπει να υλοποιήσει ο **interface provider**. Καθώς και ένα σύνολο λειτουργιών, τις οποίες ονομάζουμε **events**, και τις οποίες πρέπει να υλοποιήσει ο χρήστης. Για να μπορέσει ένα **component** να καλέσει τα **commands** ενός **interface**, θα πρέπει πρώτα να υλοποιήσει τα **events** αυτού του **interface**. Ένα **interface** μπορεί να χρησιμοποιεί ή να παρέχει πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου **interface**.

Υπάρχουν δύο είδη component στη **nesC**: τα **modules** και τα **configurations**. Τα **modules** παρέχουν τον κώδικα εφαρμογής, υλοποιώντας ένα ή περισσότερα **interfaces**. Τα **configurations** χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώσουν άλλα **components** μαζί, ενώνοντας τα **interface** διαφορετικών **component** μεταξύ τους. Αυτό ονομάζεται **wiring**. Κάθε **nesC** εφαρμογή περιγράφεται από ένα **top-level configuration** το οποίο ενώνει μεταξύ τους τα εσωτερικά **components**.

5.2 Λογισμικό στο Tmote Sky

5.2.1 Το λειτουργικό σύστημα των Tmote Sky (Boomerang)

Το Boomerang είναι το λειτουργικό σύστημα της εταιρίας Moteiv. Αποτελεί έκδοση του λειτουργικού συστήματος TinyOS, κατάλληλα τροποποιημένο για τις απαιτήσεις και τις ανάγκες των συσκευών της Moteiv, όπως είναι τα: Tmote Sky και Tmote Invent. Το Boomerang περιέχει αρκετές βιβλιοθήκες ικανές να οικοδομήσουν σταθερές, χαμηλής κατανάλωσης εφαρμογές ασύρματων αισθητήρων. Συνδυάζει τις καινοτόμες τεχνολογίες του open-source λογισμικού με ένα σταθερό και αξιόπιστο σύστημα, καθιστώντας το ικανό να δημιουργήσει αποτελεσματικές ασύρματες λύσεις.

Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι:

- Αξιόπιστη, χαμηλής κατανάλωσης, δικτύωση πλέγματος.
- Εκτενείς βιβλιοθήκες αισθητήρων.
- Πλήρεις παραδείγματα εφαρμογών και server-side εργαλεία.
- Πλήρη συμβατότητα με υπάρχουσες εφαρμογές του TinyOS 1.x.
- Ενσωματώνει τα κύρια χαρακτηριστικά του TinyOS 2.x

- Ικανότητα συνύπαρξης με οποιαδήποτε υπάρχουσα εγκατάσταση TinyOS.
- Οι open-source βιβλιοθήκες επιτρέπουν την τροποποίηση κατ' επιλογή του χρήστη.
- Ιδανικό για χρήση στους Moteiv Tmote Sky και Tmote Invent αισθητήρες.

5.2.2 Εγκατάσταση και προγραμματισμός των Tmote Sky.

Για να προγραμματίσουμε τα Tmote Sky αρχικά θα πρέπει να γίνει εγκατάσταση του Boomerang στο σύστημα μας. Το αρχείο εγκατάστασης διατίθεται δωρεάν μέσω του Internet από την διεύθυνση URL: <http://www.moteiv.com>. Το συγκεκριμένο εκτελέσιμο αρχείο αναλαμβάνει να κάνει την εγκατάσταση όλων των αναγκαίων εργαλείων στο σύστημά μας ώστε να λειτουργήσει αποτελεσματικά το Boomerang.

Τα σημαντικότερα από αυτά τα εργαλεία είναι:

- **Cygwin:** είναι ένα περιβάλλον παρεμφερές με το Linux το οποίο όμως λειτουργεί στα Windows. Παρέχει το βασικό περιβάλλον ανάπτυξης για το TinyOS και τα Tmote.
- **Java:** χρησιμοποιείται για την υποστήριξη των εργαλείων τα οποία αναλαμβάνουν την επικοινωνία ανάμεσα σε ένα mote και στο PC.
- **JavaComm:** είναι ένα επιπλέον πακέτο βιβλιοθηκών της Java το οποίο παρέχει πρόσβαση στις serial ports. Είναι απαραίτητο για εργαλεία όπως είναι το SerialForwarder.
- **FTDI VirtualComm USB Drivers:** παρέχει τους drivers που είναι απαραίτητοι για την επικοινωνία των USB-to-RS232 chips των Windows, σαν μια κλασική COM θύρα.
- **TinyOS:** παρέχει όλες τις βιβλιοθήκες και τα εργαλεία του TinyOS, τα οποία αποτελούν την βάση πάνω στην οποία θα υλοποιηθούν οι εφαρμογές.
- **nesC:** παρέχει τον compiler της γλώσσας προγραμματισμού η οποία είναι απαραίτητη για την λειτουργία του TinyOS, αλλά και για την υλοποίηση των εφαρμογών.
- **Moteiv scripts:** παρέχει scripts και διάφορες εφαρμογές οι οποίες βοηθούν τα παραπάνω συστήματα να συνεργαστούν αποδοτικότερα με τις Tmote συσκευές. Για παράδειγμα το motelist είναι μια εντολή κονσόλας η οποία εμφανίζει όλες τις σειριακές θύρες οι οποίες έχουν επικοινωνία με μια Tmote συσκευή.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της εγκατάστασης των απαραίτητων εργαλείων και βιβλιοθηκών, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στον προγραμματισμό των Tmote Sky.

Το Cygwin είναι το εργαλείο που χρησιμοποιείτε για να γίνει το compile και ο επαναπρογραμματισμός των Tmote. Αρχικά ανοίγουμε το κεντρικό shell του Cygwin. Αυτό ανοίγει στον φάκελο `/opt/moteiv`. Πηγαίνουμε στον φάκελο στον οποίο υπάρχει η εφαρμογή η οποία θέλουμε να κάνουμε compile. Στον φάκελο αυτό θα υπάρχουν τα απαραίτητα nesC αρχεία της εφαρμογής. Τα αρχεία αυτά τα κάνουμε compile εκτελώντας την εντολή **make tmote**. Μέσω αυτής της εντολής δίνουμε εντολή στο μεταφραστή, η εκτελέσιμη εφαρμογή που θα δημιουργηθεί να είναι συμβατή με τις συσκευές tmote.

Τα motes θα τα συνδέσουμε μέσω της USB θύρας που διαθέτουν στο PC. Μέσω αυτής της σύνδεσης θα είναι δυνατή η μεταφορά των εκτελέσιμων αρχείων στα motes. Για να δούμε ποια tmote sky είναι συνδεδεμένα και σε ποιο port μπορούμε να εκτελέσουμε την εξής εντολή:

```
$ motelist
Reference  CommPort  Description
-----
M4A3S3UF  COM8      tmote sky
```

Για να εγκαταστήσουμε μια εφαρμογή όταν μόνο ένα tmote είναι συνδεδεμένο εκτελούμε την επόμενη εντολή:

make tmote reinstall, 1

«reinstall, 1» σημαίνει προγραμματίσει το mote με την ήδη compiled binary image και θέσει την διεύθυνση του δικτύου του mote σε 1.

Για να εγκαταστήσουμε μια εφαρμογή σε ένα tmote αν περισσότερα από ένα είναι συνδεδεμένα πρέπει να καθορίσουμε τη σειριακή port όπου πρέπει να εγκατασταθεί, χρησιμοποιώντας την εντολή:

make tmote reinstall, 1 bsl, 3

“bsl, 3” σημαίνει ότι πρέπει να στείλει το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας το Boot Strap Loader στην COM4, αφού το πρόγραμμα bsl χρησιμοποιεί την δεικτοδότηση των Linux για τις COM θύρες, οπότε το COM4 χαρακτηρίζεται ως “3” για το bsl.

Για κάθε πλήρη εφαρμογή χρειάζονται 2 διαφορετικά εκτελέσιμα αρχεία. Το ένα παίρνει όλες τις μετρήσεις από τον αισθητήρα στον οποίο είναι εγκαταστημένη, και το δεύτερο φορτώνεται στον αισθητήρα εκείνον ο οποίος θα παίζει τον ρόλο της βάσης, δηλαδή θα είναι συνδεδεμένος με τον υπολογιστή και θα συλλέγει τις μετρήσεις από τους υπόλοιπους αισθητήρες στους οποίους έχουμε εγκαταστήσει το πρώτο.

Τέλος για να γίνει εκτέλεση της εφαρμογής που μόλις εγκαταστήσαμε εκτελούμε την εντολή:

MOTECOM=serial@COM4:tmote java com.moteivrobomot.MD25Sky.

Η παραπάνω εντολή αναλαμβάνει να εκτελέσει την εφαρμογή *com.moteiv.trawler.robomot.MD25Sky*. Η μεταβλητή “*MOTECOM=serial@COM4*”, λέει στα Java tools να επικοινωνήσουν χρησιμοποιώντας το σειριακό πρωτόκολλο πάνω από την θύρα COM4 όπου είναι προσαρτημένο ένα mote.

5.2.3 HPLSUART0C.nc και ασφαλής UART επικοινωνία

Το HPLSUART0C.nc περιγράφει την υλοποίηση των λειτουργιών του χαμηλού επιπέδου της UART0. Περιλαμβάνει λειτουργίες για την ενεργοποίηση, απενεργοποίηση και διαμόρφωση του I2C, UART και SPI. Το Tmote Sky

χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή MSP430 και εξωτερικεύει τις I2C και UART0 γραμμές στον 10-pin κονέκτορα επέκτασης. Όμως, όταν χρησιμοποιείται ο I2C ή ο UART0 διάυλος θέλει προσοχή καθώς οι γραμμές είναι φυσικά συνδεδεμένες με τον SPI διάυλο δεδομένων που συνδέει το ράδιο με τον μικροελεγκτή. Ακολουθούν οδηγίες για να χρησιμοποιηθεί ο UART0 διάυλος με ασφάλεια και χωρίς απώλεια δεδομένων.

Το Boomerang, η tinyos παραλλαγή του Tmote περιλαμβάνει ένα σύστημα διαιτησίας πόρων που επιτρέπει σε ένα TinyOS component να ζητήσει έναν πόρο και να κοινοποιηθεί αργότερα, όταν ο πόρος γίνει διαθέσιμος. Για το UART, ο πόρος ονομάζεται `MSP430ResourceUART0C`. Είναι ένα generic component και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσες φορές χρειαστεί. Για να λειτουργήσει αυτό το, πρέπει να δημιουργηθεί ένας νέος πόρος με τις παρακάτω ρυθμίσεις:

```
components new MSP430ResourceUART0C();
```

Η μονάδα μπορεί να χρησιμοποιήσει μία από τις τέσσερις διεπαφές που παρέχονται από το `MSP430ResourceUARTC`. Αυτές είναι οι `ResourceCmd`, `ResourceCmdAsync`, `Resource`, και `ResourceValidate`. Για το I2C και UART, χρησιμοποιήθηκε το `ResourceCmd`.

Για τη configuration του robotot, έγινε “wiring” με τον πόρο:

```
Impl.ResourceCmd -> MSP430ResourceUART0C;
```

Για το module, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω διεπαφή πόρου (resource interface)

```
uses interface ResourceCmd;
```

Όταν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο πόρος, πρέπει να ζητηθεί, μέσω του `ResourceCmd` interface. Δύο λειτουργίες παρέχονται: `request()` (αίτηση), η οποία μπορεί να κληθεί από το πλαίσιο εργασίας (task context) και `deferRequest()`, η οποία μπορεί να κληθεί από διακοπή (async) πλαίσιο και θα δώσει την ενότητα των πόρων στο module με task context. Για να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από αυτές τις λειτουργίες, καλούνται με τον μηδενικό χειριστή πόρων, `RESOURCE_NONE`

```
call ResourceCmd.request( RESOURCE_NONE );
```

Όταν ο πόρος είναι στη διάθεσή για χρήση, σηματοδοτείται το γεγονός που έχει χορηγηθεί (granted event):

```
event void ResourceCmd.granted() {  
    // do work here  
    call ResourceCmd.release();  
}
```

Όταν σταματήσει να χρησιμοποιείται πόρος-πηγή, θα πρέπει ρητά να κάνουμε αποδέσμευση `release()` τον πόρο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλα modules.

5.2.4 MSP430I2CM.nc

Στοιχειώδεις εντολές, γεγονότα και διεργασίες για να αποκτήσει αποδοχή στη μονάδα υλικού I2C των MSP430 μικροελεγκτών. Αυτή η μονάδα υποθέτει ότι ο δίαυλος είναι διαθέσιμος και έχουν συμπεριληφθεί οι σημαντικότερες εντολές γι' αυτή τη μονάδα. Στις περισσότερες εφαρμογές εφαρμογές όπως και στη περίπτωση του robotot χρησιμοποιείται η readPacket και η writePacket διεπαφές καθώς παρέχουν στο master-mode λειτουργίες ανάγνωσης και εγγραφής από και προς τη slave συσκευή. Η υλοποίηση για το slave-mode δεν παρέχεται αλλά μπορεί να δημιουργηθεί με συναρτήσεις που παρέχονται για τη μονάδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ Robomot

6.1 Εισαγωγή

Η συνολική εφαρμογή του robomot αποτελείται από 3 κύρια μέρη λογισμικού όπως και το υλικό του. Το πρώτο είναι το TmoteMD25.nc που είναι «καμμένο» πάνω στον αισθητήρα tmote sky που βρίσκεται στη ρομποτική πλατφόρμα, το δεύτερο είναι το TOSBase.nc στον δεύτερο σταθερό αισθητήρα tmote sky που είναι συνδεδεμένος με τον υπολογιστή και το τρίτο μέρος είναι το MD25Sky.java που είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή και παρέχει το γραφικό περιβάλλον του χρήστη για την πλοήγηση του «robomot» και την αποκόμιση των δεδομένων των αισθητήρων.

6.2 TOSBase.nc

Η εφαρμογή TOSBase χρησιμοποιεί τα παρακάτω interfaces:

```
interface BareSendMsg as UARTSend;  
interface ReceiveMsg as UARTReceive;  
interface TokenReceiveMsg as UARTTokenReceive;  
interface StdControl as RadioControl;  
interface BareSendMsg as RadioSend;  
interface ReceiveMsg as RadioReceive;
```

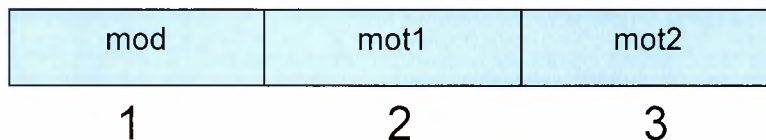
Τα συγκεκριμένα interfaces χρησιμοποιούνται για να του δώσουν τη δυνατότητα να λαμβάνει και να στέλνει από τη σειριακή (UART) που είναι στην ουσία η σύνδεση USB και κατ' επέκταση η εφαρμογή MD25Sky.java όπως επίσης να λαμβάνει και να στέλνει από το ράδιο και κατ' επέκταση από την εφαρμογή tinyos του tmote TmoteMD25.nc. Το TOSBase.nc είναι ο ενδιάμεσος μεταξύ των εφαρμογών MD25Sky.java και TmoteMD25.nc ή μεταξύ χρήστη και πλατφόρμας και

κύρια και μοναδική δουλειά του είναι να προωθεί ο,τι λαμβάνει από το ράδιο στην UART και ο,τι στέλνεται από την UART να προωθείται στο ράδιο. Γεφυρώνει δηλαδή τα πακέτα μεταξύ σειριακού καναλιού και ραδίου. Τα μηνύματα που μετακινούνται από τη σειριακή στο ράδιο επισημαίνονται με το group id και όταν αυτά φθάνουν από το ράδιο στη σειριακή φιλτράρονται από το ίδιο το group id.

6.3 MD25Msg.h

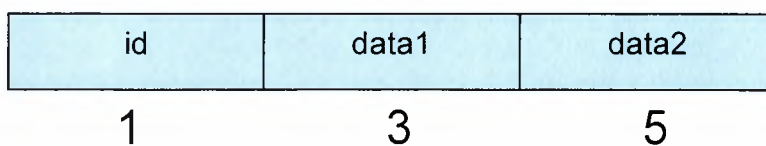
Περιγράφει τα περιεχόμενα και τα μεγέθη των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μέσω ραδίου μεταξύ του υπολογιστή και του αισθητήρα. Καθένας στέλνει διαφορετικού μεγέθους και περιεχομένου μηνύματα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επικοινωνία και να γίνει κατ' επέκταση πιο ομαλή η κίνηση. Υπάρχουν 2 ειδών μηνύματα:

MD25Msg: Έχει μέγεθος 3 bytes και αποστέλλεται προς τον αισθητήρα



```
typedef struct MD25Msg {
    uint8_t mode;           //1 byte για το είδος της εντολής
    uint8_t mot1;          //1 byte τιμή της εντολής π.χ. τιμή ταχύτητας
    περιστροφής του κιν. 1
    uint8_t mot2;          //1 byte τιμή της εντολής π.χ. τιμή ταχύτητας
    περιστροφής του κιν. 2
};
```

PCMsg: Έχει μέγεθος 5 bytes και αποστέλλεται προς τον υπολογιστή



```
typedef struct PCMsg {
    uint8_t id;            //1 byte το πακέτο δεδομένων
    uint16_t data1;        //2 bytes για την τιμή της μέτρησης 1
    uint16_t data2;        //2 bytes για την τιμή της μέτρησης 2
};
```

Οι μετρήσεις των διαφόρων οργάνων στέλνονται ανά 2, δηλαδή υγρασία και εσωτερική τάση μαζί. Για τα 6 μεγέθη που γίνονται οι μετρήσεις χρειάζονται 3 τέτοια μηνύματα. Και τα 3 μηνύματα στέλνονται διαδοχικά μαζί και ανά 6 δευτερόλεπτα. Μ' αυτό τον τρόπο δεν έχουμε μεγάλα μηνύματα αλλά μικρά σε μέγεθος και λίγα ώστε να δίνουμε περισσότερο χώρο στην επικοινωνία όσον αφορά τη κίνηση. Το μήνυμα MD25Msg είναι το μικρότερο δυνατόν για να γίνεται γρηγορότερα η ανανέωση των εντολών τηλεχειρισμού.

6.4 TmoteMD25.nc

Το κομμάτι αυτό βρίσκεται στον αισθητήρα της πλατφόρμας και είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τον σταθμό βάσης – υπολογιστή, την κίνηση που ουσιαστικά είναι η επικοινωνία με την Η-γέφυρα MD25 και τις μετρήσεις από τους αισθητήρες του tmote.

Χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διεπαφές:

```
interface ResourceCmd; //διεπαφή υπεύθυνη για τη σωστή
                        //διαιτησία των πόρων μεταξύ
                        //ραδίου και UART

interface Leds; //Χρησιμοποιούνται για την
                //ενεργοποίηση/απενεργοποίηση
                //των LEDS ώστε να βλέπουμε
                //οπτικά ότι λαμβάνει και στέλνει
                //τα μηνύματα

interface Timer; //Ο μετρητής χρόνου είναι
                 //υπεύθυνος ώστε να στέλνει ο
                 //αισθητήρας περιοδικά τις
                 //μετρήσεις

interface HPLUSARTControl as UartControl; //Υπεύθυνη για τη
                                           //ενεργοποίηση της UART
                                           //και τη λειτουργία της

interface ReceiveMsg; //Διεπαφή για την παραλαβή
                      //μηνυμάτων από το ράδιο

interface SendMsg; //Για την αποστολή μηνυμάτων
                   //μέσω του CC2420 radio

interface ADC as InternalVoltage; //Για τη μέτρηση της εσωτερικής
                                  //τάσης και κατ' επέκταση τη ζωή
                                  //της μπαταρίας

interface ADC as InternalTemperature; //Για τη μέτρηση της εσωτερικής
//θερμοκρασίας

interface ADC as TSR; //Για την ολική ηλιακή
//ακτινοβολία

interface ADC as PAR; //Για την φωτοσυνθετική
//ακτινοβολία

interface ADC as Humidity; //Για τη μέτρηση της υγρασίας
interface ADC as Temperature; //Για την εξωτερική θερμοκρασία
interface ADCError as HumidityError; //Για την βελτίωση της μέτρησης
//της υγρασίας

interface ADCError as TemperatureError; //Για την βελτίωση της μέτρησης
//της θερμοκρασίας
```

Αρχικά, μέσω της StdControl.init() αρχικοποιούνται τα LEDS, τα όργανα των μετρήσεων όπως στην περίπτωση της μέτρησης της υγρασίας με τη κλήση της HumidityControl.init() και οι μεταβλητές που πρέπει να αρχικοποιηθούν. Έπειτα στο StsControl.start() καλείται η HumidityControl.start() και μέσα από αυτήν ο μετρητής χρόνου timer ο οποίος πυροδοτεί τις μετρήσεις περιοδικά ανά 6 δευτερόλεπτα. Η έναρξη του timer καλείται μέσα στην HumidityControl.start() για να είμαστε σίγουροι πως αν ξεκινήσουν οι κλήσεις για τις μετρήσεις το όργανο μέτρησης της υγρασίας θα είναι έτοιμο ώστε να έχουμε σωστές μετρήσεις. Για τα 6 μεγέθη στέλλονται 3 μηνύματα που το καθένα περιέχει μετρήσεις από 2 μεγέθη.

- DATA1: Υγρασία και εσωτερική τάση για τον υπολογισμό της ζωής της μπαταρίας του αισθητήρα
- DATA2: Ολική ηλιακή ακτινοβολία και εσωτερική θερμοκρασία
- DATA3: Εξωτερική θερμοκρασία και φωτοσυνθετική ακτινοβολία

Αξίζει να τονισθεί ότι στο μοντέλο αυτό ο αισθητήρας από μόνος του στέλνει τις μετρήσεις περιοδικά χωρίς να στέλνει ο υπολογιστής αιτήσεις. Και με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται η επικοινωνία για τις μετρήσεις. Ο υπολογιστής στέλνει μόνο αίτηση μέσω μηνύματος τύπου MD25Msg είτε για να σταματήσουν οι μετρήσεις είτε για να επανεκκινηθούν. Η επιλογή των ζευγαριών δεν είναι τυχαία. Η κλήση για την μέτρηση της υγρασίας γίνεται μακριά από την κλήση για την μέτρηση της εξωτερικής θερμοκρασίας καθώς το όργανο που εξωτερικεύει τις μετρήσεις για τα δύο μεγέθη είναι το ίδιο.

Ο αισθητήρας περιμένει ανά πάσα στιγμή να παραλάβει μηνύματα από το ράδιο μέσω του γεγονότος **TOS_MsgPtr ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr msg)**. Το γεγονός αυτό πυροδοτείται με την κάθε παραλαβή ενός μηνύματος. Έπειτα ελέγχεται Προτεραιότητα δίνεται στα μηνύματα MD25Msg με mod ίσο με SET_MOTORS που αφορά την κίνηση των κινητήρων ή αλλιώς την επικοινωνία με το MD25. Μόλις ανακαλυφθούν, διαβάζονται τα περιεχόμενα τους με τις τιμές που πρέπει να πάρει ο κάθε κινητήρας, αυτές προωθούνται στη serial και ταυτόχρονα κλείνει το ράδιο μέσω του μηχανισμού διαιτησίας πόρων ResourceCmd. Η UART κάθε φορά που καλείται πρέπει να αρχικοποιείται για την ομαλή λειτουργία της. Κατά την αρχικοποίηση, απενεργοποιείται SPI και I2C και το UARTControl τίθεται ως UART. Το ρολόι συγχρονίζεται στα 38400, ενεργοποιείται το CHAR ώστε να στέλνονται 8 bits τη φορά, απενεργοποιείται το PENA για no parity επικοινωνία και ενεργοποιείται το SPB για 2 stop bits. Σε μια ολοκληρωμένη εντολή κίνησης αντιστοιχούν 6 κλήσεις της UartControl.tx().

UartControl.tx(0x00); //byte έναρξης και αφύπνισης MD25 προς ετοιμότητα παραλαβής εντολών

UartControl.tx(command1); //byte υπεύθυνο για τον τύπο της εντολής π.χ. επιταχυνση:0x33

UartControl.tx(mot1_in); //byte υπεύθυνο για την τιμή της εντολής π.χ. ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα 1

UartControl.tx(0x00); //byte έναρξης

UartControl.tx(command2); //byte υπεύθυνο για το τύπο της δεύτερης εντολής, συνήθως χρησιμοποιείται για τον 2^ο κινητήρα και παίρνει τιμή 0x32

UartControl.tx(mot2_in); //byte για την τιμή της δεύτερης εντολής, συνήθως περιγράφει την ταχύτητα περιστροφής του 2^{ου} κινητήρα.

Μετά από κάθε κλήση της **UartControl.tx()** καλείται η UartControl.isTxEmpty() η οποία ελέγχει αν

Είναι άδειος ο καταχωρητής που το περιεχόμενό του είναι προς αποστολή μέσω UART συνέχεια μέχρι να αδειάσει

ώστε να κληθεί η επόμενη **UartControl.tx()**.

Εκτός από τη βασική εντολή κίνησης υπάρχουν και άλλα είδη εντολών που παραλαμβάνονται από τα μηνύματα MD25Msg. Αυτές οι εντολές εκτελούνται μέσα σε ένα task και έτσι όταν είναι ήδη σε εκτέλεση όλα τα εισερχόμενα μηνύματα αγνοούνται.

mod	Όνομα	Περιγραφή
128	SET_ACCEL	αντιστοιχεί στην 0x33 εντολή και είναι υπεύθυνη για την επιτάχυνση των κινητήρων
64	SET_MODE	0x34. Αλλάζει τον τύπο της κίνησης του MD25
32	DIS_TIMEOUT	0x38 Απενεργοποιεί το TIMEOUT
16	EN_TIMEOUT	0x39. Ενεργοποιεί το TIMEOUT
160	STOP_DATA	Σταματάει τον timer και κατ' επέκταση τις μετρήσεις
208	RESTART_DATA	επανεκκινεί τον timer και τις μετρήσεις

Πίνακας XIII - συγκεντρωτικά τα διάφορα modes

6.5 Java Εφαρμογή MD25Sky.java

Το MD25Sky.java είναι υπεύθυνο για την αποστολή εντολών κίνησης, την παραλαβή των μετρήσεων και την γραφική απεικόνισή τους όπως επίσης και την γραφική απεικόνιση του τηλεχειρισμού. Βασική απαίτηση για να λειτουργήσει είναι να έχει ήδη ξεκινήσει ο SerialForwarder ο οποίος προωθεί τα μηνύματα και τα παραλαμβάνει από το TOSBase που τα παραλαμβάνει από ή τα στέλνει στο ράδιο. Οι βιβλιοθήκες που είναι υπεύθυνες γι αυτό είναι:

```
import net.tinyos.util.*;
```

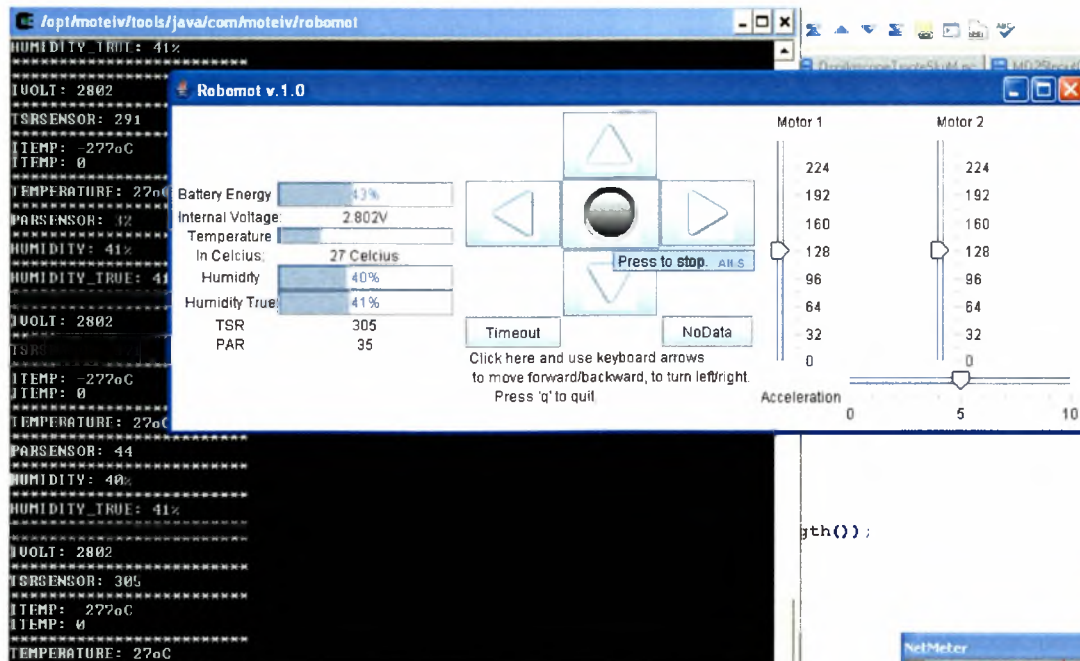
```
import net.tinyos.message.*;
```

Για τα γραφικά χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες της swing:

```
import java.awt.*;
```

```
import javax.swing.*;
```

Ένα στιγμιότυπο από το γραφικό περιβάλλον είναι αυτό της παρακάτω εικόνας 6.1.



Εικόνα 6.1: το γραφικό περιβάλλον

- Αριστερά φαίνονται οι μετρήσεις με τη σειρά:
- Επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας σε ποσοστό με βάση την εσωτερική τάση
 - Εσωτερική τάση της μπαταρίας του αισθητήρα
 - Εξωτερική θερμοκρασία σε μορφή μπάρας και σε μορφή κειμένου σε βαθμούς Κελσίου
 - Υγρασία σε ποσοστό
 - Πραγματική υγρασία σε ποσοστό
 - Ολική ηλιακή ακτινοβολία
 - Φωτοσυνθετική ακτινοβολία

Στη μέση είναι το panel πλοήγησης. Το ρομπότ μπορεί να κινηθεί είτε με το ποντίκι πατώντας τα βελάκια που υπάρχουν στο γραφικό περιβάλλον είτε με τα βελάκια του πληκτρολογίου. Με κάθε πάτημα από τα βελάκια του πληκτρολογίου στέλνεται μια εντολή κίνησης (το πάνω για μπροστά, το δεξιά για επί τόπου περιστροφή προς τα δεξιά κλπ.). Όταν αφηθεί το κουμπί στέλνεται εντολή για να σταματήσουν και οι 2 κινητήρες. Το κουμπί TIMEOUT είναι ToggleButton και είναι για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του TIMEOUT του MD25. Το NODATA επίσης είναι ToggleButton για την απενεργοποίηση/ενεργοποίηση του timer για την πυροδότηση των μετρήσεων.

Δεξιά στο γραφικό περιβάλλον φαίνονται τρεις sliders. Οι 2 κάθετοι είναι για την ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων με προκαθορισμένη τιμή 128 που αντιστοιχεί στο stop. Ο οριζόντιος slider είναι για την επιτάχυνση των κινητήρων με προκαθορισμένη τιμή το 5 όπως και στον MD25.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

7.1 Μελλοντικές επεκτάσεις

Σε αυτήν την υλοποίηση δόθηκε πιο πολύ βάρος στην σύνδεση μεταξύ της Η-γέφυρας και του αισθητήρα σε επίπεδο υλικού και λογισμικού. Υλοποιήθηκε το βασικό component για την κίνηση του αισθητήρα και καταφέραμε να φτιάξουμε έναν κινητό αισθητήρα τηλεχειριζόμενο από έναν υπολογιστή. Χρησιμοποιώντας τη γνώση από τη διαφορική οδήγηση θα μπορούσε να επεκταθεί το γραφικό περιβάλλον ώστε να έχει ένα panel πλοήγησης με 2 άξονες x και y , όπου προσομοιώνουν το δάπεδο. Έτσι με κλικάρισμα σε κάποιο σημείο του panel να προχωρεί από τη μια τοποθεσία $(x1,y1)$ που είναι αρχικά σε μια άλλη $(x2,y2)$ δίνοντας ο υπολογιστής τις κατάλληλες εντολές κίνησης στον κάθε κινητήρα ώστε να στρίψει ή να προχωρήσει ευθεία και τελικά να φθάσει στον προορισμό.

Οι επεκτάσεις είναι πολλές επίσης αν προσθέσουμε πάνω στον αισθητήρα μέσω του I2C που είναι ελεύθερο αξελερόμετρο. Αυτό θα μας δώσει επιπλέον πληροφορίες για την τρισδιάστατη κίνησή του που είναι ωφέλιμες για την έξυπνη πορεία του. Μπορούν να προστεθούν επίσης αισθητήρες υπερήχων για την ανακάλυψη εμποδίων και την αποφυγή τους.

Είναι αξιοσημείωτο πως μπορούν να μελετηθούν κατανεμημένοι αλγόριθμοι σε κινητούς κόμβους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Barrett Technologies, Cambridge, MA 02142, <http://www.barretttechnology.com/robot>.
- Borenstein J. and L. Feng, 1996: Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 6, pp **869-880**
- [BTnodes - A Distributed Environment for Prototyping Ad Hoc Networks: Main - Overview browse \(www.btnode.ethz.ch/\)](http://www.btnode.ethz.ch/)
- Chevanier, F. and J. Crowley, 1992: Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry. *In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice France, May 12-14, 1992*, pp. **2588-2593**
- Chih-Chieh Han, Ram Kumar Rengaswamy, Roy Shea, Eddie Kohler and Mani Srivastava. [SOS: A dynamic operating system for sensor networks](#), *Proceedings of the Third International Conference on Mobile Systems, Applications, And Services (Mobisys), 2005*.
- Costescu, N., Dawson, D. M., and Loffler, M., 1999: QMotor 2.0 - a PC based real-time multitasking graphical control environment. *IEEE Control Systems Mag.* **19**(3) (1999) 68-76.
- Costescu, N., Loffler, M., Feemster, M., and Dawson, D., 2001: QMotor 3.0 - An object oriented system for PC control program implementation and tuning, in: *Proc. of the American Control Conference*, Arlington, VA, June 2001.
- Crowley, J. L. and P. Reignier, 1992: Asynchronous Control of Rotation and Translation for a Mobile Robot. *Robot. Autonom. Syst.*, Vol. 10, pp. 243-251
- Dorf, R. C., 1989: *Modern Control Systems*. Addison Wesley Publ. comp., Reading, MA.
- Dudek and Jenkin: Computational Principles of Mobile Robotics. Notes, CS W4733.
- Everett, H. R.: Sensors for Mobile Robots. *A. K. Peters Ltd.*, Wellesley, MA, 1995, ISBN 1-56881-048-2.
- G. L. Foresti, C. S. Regazzoni, Multisensor Data Fusion for Autonomous Vehicle Navigation in Risky Environments. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 51, 2002.
- Gourley, C. and M. Trivedi, 1994. Sensor based Obstacle Avoidance and Mapping for fast Mobile Robots. *IEEE Int. Robotics and Automation, San Diego, CA, May 8-13, 1994*, pp. **1306-1311**
- Ivanjko, E., I. Komsic, I. Petrovic, 2007: Simple off-line Odometry Calibration of Differential Drive Mobile Robots. *Proc. Of 16th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region- RAAD 2007, Ljubljana, June 7-9, 2007*
- LaValle, Steven and James Kuffner. "RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning." Copyright 2000. ICRA.
- Loffler, M., Dawson, D., Zergeroglu, E., and Costescu, N., Object-oriented techniques in robot manipulator control software development, in: *Proc. of the American Control Conference*, Arlington, VA, June 2001.
- Mark Yim, David G. Duff, and Kimon D. Roufas. "PolyBot: a Modular Reconfigurable Robot." *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. April 20

- Martin, Martin C. and Hans Moravec. "Robot Evidence Grids." CMU RI TR 96-06, 1996.
- Miller, D. J. and Lennox, R. C.: An object-oriented environment for robot system architectures, *IEEE Control Systems* (February 1991) **14-23**.
- Moravec, Hans. "Robots, After All." *Communications of the ACM*. October 2003. Vol. 46, No. **10**
- Nakju D., H. Choset, W. K. Chung, 2003: Accurate Relative Localization Using Odometry. *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003.
- Papadopoulos E. G., Poulakakis I., Papadimitriou I., 2002: On Path Planning and Obstacle Avoidance for Nonholonomic Platforms with Manipulators: A Polynomial Approach. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 21, No. 4. April 2002, pp. **367-383**.
- Papadopoulos, E. and M. Misailidis, 2007: On differential Drive Robots Odometry with Application to Path Planning. *Proc. Of the European Control Conference*, Kos, Greece, July 2-5, 2007, pp. **5492-5499**
- Philippsen, R. and R. Siegwart, 2003: Smooth and Efficient Obstacle Avoidance for a Tour Guide Robot. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, (ICRA 2003)*, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003, pp. **446-451**
- Ratnasamy, S. and K., Brad and Shenker, Scott and Estrin, Deborah and Govindan, Ramesh and Yin. Li and Yu, Fang, 2003:Data-Centric Storage in Sensornets with GHT, a Geographic Hash Table. *ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET), Special Issue on Wireless Sensor Networks*, August 2003.
- Rich LeGrand, 2004: Differential Robot-Application Note. Version 1.0 Export User's Guide, Charmed Labs (support@charmedlab.com)
- Schlegel, C., "Fast local obstacle avoidance under kinematic and dynamic constraints for a mobile robot", *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, B. C. Canada, 1998, pp.**594-599**
- Stewart, D. B., Schmitz, D. E., and Khosla, P. K.: CHIMERA II: A real-time UNIX-compatible multiprocessor operating system for sensor-based control applications, Report CMU-RI-TR- 89-24, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, September 1989.
- Thoma, M. and M. Morari: *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Vol. 335, springer.com
- Thrun, Sebastian. "Robotic Mapping: A Survey." CMU-CS-02-111, February 2002.
- [TinyOS Community Forum || An open-source OS for the networked sensor regime \(www.tinyos.net/\)](http://www.tinyos.net/)
- Vaughan, R. N. Sumpter, A. Frost, and S. Cameron. "Experiments in Automatic Flock Control." Edinburgh, UK, 1998.
- Wan Ulrich and Johann Borenstein. VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium, pp. **1572--1577**, 1998.





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073651

