



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΡΟΣΩΠΩΝ ΚΑΙ
ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ
ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΜΑΖΑΡΑΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ
ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΡΟΣΩΠΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ
ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΜΑΖΑΡΑΚΗΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αβαριτσιώτης
Ευστάθιος Συκάς
Μιλτιάδης Αναγνώστου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 29^η Οκτωβρίου 2007.

Ιωάννης Αβαριτσιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ελευθέριος Καγιάφας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πέτρος Μαραγκός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Μήτρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Σταμούλης
Αναπ. Καθηγητής ΤΜΗΥΤΑ
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007

.....
Γεώργιος Π. Μαζαράκης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Π. Μαζαράκης, 2007.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, θα ήθελα πρώτα να ευχαριστήσω με την καρδιά μου τους ανθρώπους που μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Καταρχήν ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις συμβουλές του, σε κάθε βήμα της έρευνάς μου. Στάθηκε πάντοτε δίπλα μου ως Δάσκαλος και η αμέριστη βοήθειά του σε κάθε τομέα θα μου μείνει αξέχαστη.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κ. κ. Ευστάθιο Συκά και Μιλτιάδη Αναγνώστου, καθώς και όλα τα μέλη της επταμελούς επιτροπής, που αξιολόγησε την εργασία μου αυτή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω επίσης προς τους φίλους και συνεργάτες μου από το Εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και ιδιαίτερα τους κ. κ. Ιωάννη Θανασόπουλο, Αθανάσιο Κόλλια και Παναγιώτη Κίικρα για την πολύτιμη βοήθειά τους τόσο σε επιστημονικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο συναισθηματικής στήριξης.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης:

Στο ειδικό διδακτικό προσωπικό του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητήρων κ. κ. Απόστολο Ψαρρό και Ιωάννη Κολιόπουλο, για την τεχνική και όχι μόνο υποστήριξη.

Στον κ. Γεώργιο Σταμούλη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Η/Υ Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, καθώς και στον Δρ. Παναγιώτη Κίικρα, από το ίδιο Τμήμα, για την παραχώρηση των Ασύρματων Κόμβων Αισθητήρων και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν.

Τέλος, η εργασία αυτή αφιερώνεται σε όλους όσους με στήριξαν με την αγάπη, την ανιδιοτέλεια, την υπομονή και τις πολύτιμες συμβουλές τους και ιδιαίτερα στους γονείς μου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η σεισμική ανίχνευση προσωπικού και η σεισμική και ακουστική αναγνώριση και κατηγοριοποίηση οχημάτων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση και την χαμηλή κατανάλωση.

Οι συγκεκριμένες εφαρμογές αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα ενός ολοκληρωμένου συστήματος φυσικής ασφάλειας χώρων, όπως συνόρων και μεγάλων εγκαταστάσεων, στις οποίες δεν είναι πάντα αυτονόητη η ύπαρξη μόνιμης πηγής ενέργειας για την τροφοδότησή του. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αποτελούνται από μικρές αυτόνομες συσκευές, τους Ασύρματους Κόμβους, που είναι ικανοί να «αισθάνονται» τον φυσικό κόσμο, μέσω κατάλληλων αισθητήρων, να επεξεργάζονται ή και να αποθηκεύουν τις μετρήσεις και να επικοινωνούν ασύρματα. Τροφοδοτούνται συνήθως από μπαταρίες, που η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται άμεσα από το χρησιμοποιούμενο υλικό, την επεξεργαστική ισχύ της υπολογιστικής μονάδας, αλλά κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο το λογισμικό του κόμβου διαχειρίζεται το διαθέσιμο υλικό και την επικοινωνία. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές φυσικής ασφάλειας χώρων. Η ανίχνευση και αναγνώριση προσωπικού και οχημάτων όμως, έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε επεξεργασία σήματος και πολλές φορές απαιτούν ασύρματους κόμβους με γρηγορότερους και ισχυρότερους μικροεπεξεργαστές, γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και μειώνει τον χρόνο ζωής τους.

Στα πλαίσια της εργασίας ερευνώνται τεχνικές και λύσεις τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και σε επίπεδο λογισμικού και διαχείρισης υλικού από το λογισμικό, οι οποίες θα επιτρέψουν την επιτυχή ανίχνευση προσωπικού και την αναγνώριση οχημάτων από έναν ασύρματο κόμβο, εφοδιασμένο με ακουστικούς και σεισμικούς αισθητήρες και έναν απλό μικροελεγκτή των 8-bit. Ταυτόχρονα οι λύσεις θα πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικές, ώστε ο κόμβος, να λειτουργεί ανεπιτήρητος, για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα.

Συγκεκριμένα, στον τομέα της ανίχνευσης προσωπικού αναζητούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της σεισμικής διαταραχής, που προκαλεί ένας άνθρωπος, όταν περπατά. Οι δονήσεις του εδάφους καταγράφονται από ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο και διενεργείται η κατάλληλη επεξεργασία του σήματος από τον κόμβο, ο οποίος λαμβάνει και την απόφαση για την προέλευσή τους, αν δηλαδή προέρχονται από ένα άτομο, που περπατά ή από κάποιο άλλο αίτιο. Οι προτεινόμενες μέθοδοι δοκιμάζονται με πραγματικά σήματα σε επίπεδο προσομοίωσης και τελικά υλοποιούνται στον κόμβο Mica2Dot. Με χρήση τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, όπως την προγραμματισμένη απενεργοποίηση των υποσυστημάτων του κόμβου, όταν αυτά δεν χρησιμοποιούνται, η μέση κατανάλωση μπορεί να μειωθεί έως και 82%, φτάνοντας τα 9,89 mW και η μέγιστη εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του Ασύρματου Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού να φτάσει τις 37,53 ημέρες, όταν τροφοδοτείται από 2 απλές μπαταρίες τύπου AA των 2700 mAh.

Στον τομέα της ακουστικής και σεισμικής αναγνώρισης οχημάτων αναζητούνται λύσεις, που ξεφεύγουν από τις κλασικές μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας του σήματος στο πεδίο της συχνότητας ή του μετασχηματισμού κυματιδίων. Για την αποφυγή των αυξημένων αναγκών τους σε επεξεργαστική ισχύ, άρα και ενέργεια, προτείνεται η ανάλυση με χρήση μιας μεθόδου κωδικοποίησης και επεξεργασίας του σήματος στο πεδίο του χρόνου, της μεθόδου TESPAP, που έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν επιτυχώς για την αναγνώριση φωνής. Η μέθοδος προσαρμόζεται κατάλληλα, ώστε να κωδικοποιεί με μεγάλη ακρίβεια τις ακουστικές και σεισμικές υπογραφές των οχημάτων, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κωδικοποιημένου σήματος, που επιτρέπουν την διάκριση μεταξύ των οχημάτων, συγκεντρώνονται σε ένα μονοδιάστατο πίνακα, το χαρακτηριστικό διάνυσμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση των οχημάτων με χρήση ενός κατηγοριοποιητή Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου και ενός κατηγοριοποιητή ελάχιστης απόστασης. Η μέθοδος δοκιμάζεται και βελτιώνεται σε επίπεδο προσομοίωσης με πραγματικά ακουστικά και σεισμικά σήματα δύο τύπων οχημάτων, ενός τροχοφόρου φορτηγού και ενός ερπυστριοφόρου οχήματος. Η επίδοση της μεθόδου σε

περιβάλλον προσομοίωσης φτάνει το 88 %, ποσοστό συγκρίσιμο με άλλες μεθόδους, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούν το ίδιο σύνολο πειραματικών δεδομένων. Στη συνέχεια η μέθοδος προσαρμόζεται και υλοποιείται στον Ασύρματο Κόμβο Mica2 και δοκιμάζεται η επίδοση της ακουστικής αναγνώρισης τριών κλάσεων οχημάτων (λεωφορείου, αυτοκινήτου, μοτοσικλέτας) με ποσοστό ορθών ανιχνεύσεων 62–90%. Η μέση κατανάλωση ενέργειας μπορεί να φτάσει τα 3,35 mW, όταν η κατηγοριοποίηση γίνεται από τον κόμβο και η μέγιστη εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του Ασύρματου Κόμβου Αναγνώρισης Οχήματος φτάνει τις 110 ημέρες.

Abstract

The subject of this Doctoral Thesis is seismic personnel detection and seismic and acoustic vehicle recognition and classification in Wireless Sensor Networks, with emphasis on energy efficiency and low power consumption.

These applications form part of a complete physical security system used to protect large areas of interest such as large facilities or borders, where permanent power supply is not always available. Wireless Sensor Networks consist of small, battery powered devices, also known as Sensor Nodes, which are able to sense the surrounding environment with electronic sensors, process and/or store data and communicate wirelessly. The span of life of the nodes depends on their hardware, the processing capabilities of the processing unit and the algorithms used, but mostly on the way hardware and communications are used by the node's software. The unique characteristics of WSNs make them ideal for physical security applications. However, personnel and vehicle detection is quite demanding in signal processing and Sensor Nodes often require a faster and more capable microprocessor, which consume extra power reducing their operational life.

In this work we investigate both hardware and software low- power techniques, which will enable successful personnel detection and vehicle recognition on a simple Sensor Node, equipped with acoustic and seismic sensors and a simple 8-bit microcontroller.

In the field of personnel detection the special characteristics of the seismic vibrations, produced by a walking person, are examined. Ground vibrations are recorded using a piezoelectric accelerometer and processed accordingly by the wireless sensor node, which decides if they are generated from a walking person or some other seismic event. The proposed algorithms are tested in simulation level with real signals. They are finally implemented in hardware on the Mica2Dot sensor node. Using power saving techniques such as scheduled disabling of unused subsystems of the node, average power consumption can be reduced by 82%, reaching 9,89 mW. Maximum estimated battery life of the

Personnel Detection Node can reach 37,53 days, when powered by 2 simple 2700 mAh, AA type batteries.

In the field of acoustic and seismic vehicle recognition approaches other than traditional frequency-domain signal processing or wavelets are investigated. Such methods are very demanding in processing resources and energy. A time-domain signal processing and encoding method, used in the speaker identification task, known as TESPAP, is introduced instead. The method is adapted to the new environment and further extended to accurately encode the acoustic and seismic signatures of vehicles almost in real time. The special characteristics of the encoded signal, that enable good discrimination between different vehicle types, are grouped in a one-dimensional matrix, the feature vector. Classification of the feature vectors is performed by an Artificial Neural Network and a minimum distance classifier. Simulation tests with real acoustic and seismic signals from two vehicles, a heavy wheeled truck and a tracked vehicle, showed that performance can reach as high as 88%. The performance is comparable with existent, more complex methods using the same dataset. The method is implemented in hardware on the Mica2 sensor node and the resulting Vehicle Recognition Node is able to recognize three classes of vehicles (car, bus, and motorcycle) based on their acoustic signature with an accuracy of 62-90%. Average power consumption can reach 3,35 mW when classification is done by the sensor node and maximum battery life is estimated to 110 days.

Περιεχόμενα

<i>Ευχαριστίες</i>	7
<i>Περίληψη</i>	9
<i>Abstract</i>	13
<i>Περιεχόμενα</i>	15
<i>Ευρετήριο Εικόνων</i>	18
<i>Ευρετήριο Πινάκων</i>	20
1. Εισαγωγή	21
1.1. Γενικά.....	21
1.2. Σύντομη Ανασκόπηση της Ανίχνευσης Προσωπικού και Οχημάτων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	23
1.3. Εντοπισμός Προβλήματος - Κίνητρο.....	27
1.4. Σκοποί και Στόχοι	28
1.5. Καινοτομίες.....	30
1.6. Δομή.....	32
2. Υπόβαθρο	35
2.1. Σεισμική - Ακουστική Ανίχνευση Προσωπικού και Οχημάτων.....	35
2.1.1. Φαινομενολογία Σεισμικού Σήματος.....	35
2.1.2. Σεισμικοί Αισθητήρες	37
2.1.3. Φαινομενολογία Ακουστικού Σήματος.....	39
2.1.4. Ακουστικοί Αισθητήρες.....	40
2.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	41
2.2.1. Αίσθηση.....	44
2.2.2. Επεξεργασία Δεδομένων	47
2.2.3. Επικοινωνία.....	50
2.2.4. Ενέργεια.....	52
2.3. Η Ασύρματη Πλατφόρμα Υλοποίησης του Συστήματος.....	53
2.3.1. Περιγραφή Ασύρματων Κόμβων Mica2 και Mica2Dot.....	55
2.3.2. Αισθητήρες	57
2.3.3. Ενεργειακή Κατανάλωση	58
2.3.4. Λειτουργικό Σύστημα Ασύρματων Κόμβων - TinyOS 1.x	59
3. Σεισμική Ανίχνευση Προσωπικού	61
3.1. Ανασκόπηση.....	61
3.1.1. Φαινομενολογία.....	61
3.1.2. Υφιστάμενες Μέθοδοι	63
3.2. Προτεινόμενες Λύσεις.....	66
3.3. Ανάπτυξη Μεθόδου Ανίχνευσης Προσωπικού	66
3.3.1. Αισθητήρας.....	66
3.3.2. Σύνολο Δεδομένων Αξιολόγησης Αλγορίθμων.....	68
3.3.3. Αλγόριθμος Ανίχνευσης Ανθρώπινης Παρουσίας	70
3.3.4. Υπολογισμός Κατωφλίων.....	73
3.3.4.1. Σταθερό Κατώφλι	73

3.3.4.2.	Μεταβλητό Κατώφλι βάσει της Περιβάλλουσας του Σήματος.....	76
3.3.4.1.	Επιλογή βέλτιστης τιμής συντελεστή α με χρήση της καμπύλης ROC.....	77
3.3.4.2.	Μεταβλητό Κατώφλι βάσει Στατιστικής Επεξεργασίας του Σήματος.....	79
3.3.5.	Αποτελέσματα.....	81
3.4.	Ασύρματος Κόμβος Ανίχνευσης Προσωπικού.....	83
3.4.1.	Προδιαγραφές και Απαιτήσεις.....	83
3.4.1.1.	Προδιαγραφές Ασύρματων Κόμβων.....	83
3.4.1.2.	Προδιαγραφές Σταθμού Βάσης.....	84
3.4.2.	Υλοποίηση.....	84
3.4.2.1.	Γενική Περιγραφή.....	84
3.4.2.2.	Modules - Components - Wiring.....	85
3.4.2.3.	Ρυθμός Δειγματοληψίας.....	87
3.4.2.4.	Ασύρματη Επικοινωνία.....	88
3.4.3.	Κατανάλωση Ενέργειας.....	88
3.5.	Σύγκριση και Σχόλια.....	99
4.	Ακουστική και Σεισμική Αναγνώριση και Κατηγοριοποίηση Οχήματος 101	
4.1.	Ανασκόπηση.....	101
4.1.1.	Υφιστάμενες Μέθοδοι.....	101
4.1.1.1.	Επεξεργασία Σήματος.....	101
4.1.1.2.	Αλγόριθμοι Κατηγοριοποίησης.....	104
4.2.	Προτεινόμενες Λύσεις.....	105
4.3.	Μέθοδος Αναγνώρισης Οχημάτων με Κωδικοποίηση Σήματος στο Πεδίο του Χρόνου.....	106
4.3.1.	Σχετική Εργασία.....	107
4.3.2.	Περιγραφή της Μεθόδου TESPAP.....	109
4.3.3.	Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Διανυσμάτων από την Ακουστική και τη Σεισμική Υπογραφή Οχήματος.....	111
4.3.3.1.	Σύνολο Δεδομένων Αξιολόγησης Αλγορίθμων.....	111
4.3.3.2.	Προ-επεξεργασία Σήματος.....	113
4.3.3.3.	Αλφάβητο.....	114
4.3.3.3.1.	Προσαρμοσμένο Αλφάβητο.....	115
4.3.3.3.1.1.	Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ (C1).....	117
4.3.3.3.1.2.	Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 5\%$ (C5).....	118
4.3.3.3.1.3.	Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ και συχνοτικό διαμερισμό της διάστασης D (C1 - f).....	118
4.3.3.3.2.	Αλφάβητο Αυτοοργανούμενου Χάρτη (SOM).....	122
4.3.3.3.3.	Τυπικό.....	124
4.3.3.3.4.	Σύγκριση Χαρακτηριστικών Αλφάβητων.....	125
4.3.3.4.	Δημιουργία Πίνακα S.....	125
4.3.4.	Αλγόριθμοι Κατηγοριοποίησης.....	126
4.3.4.1.	Κατηγοριοποίηση με χρήση Γρήγορου Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.....	128
4.3.4.1.1.	Εκπαίδευση.....	129
4.3.4.1.2.	Δοκιμή.....	131
4.3.4.2.	Κατηγοριοποίηση με χρήση ταξινομητή Αρχετύπου.....	131
4.3.5.	Αποτελέσματα.....	132
4.4.	Ασύρματος Κόμβος Αναγνώρισης και Κατηγοριοποίησης Οχημάτων... 135	
4.4.1.	Προδιαγραφές και Απαιτήσεις.....	135
4.4.1.1.	Προδιαγραφές Ασύρματων Κόμβων.....	135
4.4.1.2.	Προδιαγραφές Σταθμού Βάσης.....	136
4.4.2.	Υλοποίηση.....	137
4.4.2.1.	Γενική Περιγραφή.....	137
4.4.2.2.	Ακουστικός Αισθητήρας.....	139

4.4.2.3.	Modules - Components - Wiring.....	140
4.4.2.4.	Ρυθμός Δειγματοληψίας.....	141
4.4.2.5.	Αλφάβητο.....	141
4.4.2.6.	Αλγόριθμος Υπολογισμού Ενέργειας.....	145
4.4.2.7.	Αλγόριθμος Κωδικοποίησης TESPAP.....	146
4.4.2.8.	Αλγόριθμος Κατηγοριοποίησης.....	146
4.4.2.9.	Ασύρματη Επικοινωνία.....	147
4.4.2.10.	Σταθμός Βάσης.....	149
4.4.3.	Επιδόσεις.....	151
4.4.3.1.	Κατανάλωση Ενέργειας.....	151
4.4.3.2.	Πειραματική Δοκιμή του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων.....	156
4.5.	Σχόλια.....	161
5.	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία.....	163
6.	Βιβλιογραφία.....	167
7.	Παράρτημα.....	181
7.1.	Λογισμικό Ασύρματου Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού.....	181
	Makefile.....	181
	Step.h.....	181
	Step_Detector.nc.....	182
	HPLADCM.nc.....	188
	Accel_PiezoM.nc.....	189
	Access_Connector_Pins.h.....	189
	Connector_Pins.nc.....	189
	Connector_PinsC.nc.....	190
7.2.	Λογισμικό Ασύρματου Κόμβου Αναγνώρισης Οχήματος.....	191
	Makefile.....	191
	Tespar.h.....	191
	Tespar_Custom_alphabet.h.....	192
	Mic_Tespar.nc.....	193
	Mic_TesparM.nc.....	194

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Τα υποσυστήματα ενός Ασύρματου Κόμβου Αισθητήρων	43
Εικόνα 2: α) Επικοινωνία με ένα βήμα (single-hop), β) Επικοινωνία με πολλαπλά βήματα (multi-hop).....	51
Εικόνα 3: Ο Ασύρματος Κόμβος Αισθητήρων Mica2 (αριστερά) και ο Mica2Dot (δεξιά)	55
Εικόνα 4: Πλακέτα αισθητήρων MTS310 για τους ασύρματους κόμβους Mica2 (πραγματικό μέγεθος).....	57
Εικόνα 5: Σεισμική απόκριση εδάφους από ένα βήμα.....	62
Εικόνα 6: Σεισμική απόκριση εδάφους από το βάδισμα ενός ανθρώπου	63
Εικόνα 7: Πιεζοηλεκτρικό Επιταχυνσιόμετρο και σημείο στήριξης πάνω στην πλακέτα	67
Εικόνα 8: Καταγεγραμμένο σήμα βαδίσματος από τον αισθητήρα 1 προς τον αισθητήρα 3. Για λόγους παρουσίασης τα σήματα βρίσκονται γύρω από τα 0, 1.5, 3 V αντίστοιχα	69
Εικόνα 9: Αλγόριθμος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας	72
Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας από βήματα	72
Εικόνα 11: (α) Σταθερό κατώφλι 53 mV σε τμήμα του σήματος S, (β) Σταθερό κατώφλι 29 mV στο ίδιο τμήμα του σήματος S'	75
Εικόνα 12: Καμπύλη ROC κατωφλίου περιβάλλουσας	78
Εικόνα 13: Μεταβλητό κατώφλι βάσει της περιβάλλουσας	79
Εικόνα 14: Μεταβλητό κατώφλι βάσει στατιστικής επεξεργασίας του σήματος για διάφορες τιμές των συντελεστών C και a	81
Εικόνα 15: Διάγραμμα Ροής του προγράμματος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας	85
Εικόνα 16: Κατανάλωση ρεύματος κατά την κανονική λειτουργία	90
Εικόνα 17: Κατανάλωση ρεύματος κατά την αποστολή μηνύματος	90
Εικόνα 18: Σύγκριση Κατωφλίων	93
Εικόνα 19: Σύγκριση Ενεργειακών Προφίλ	95
Εικόνα 20: Μέση κατανάλωση ισχύος των ενεργειακών προφίλ 1 έως 3	97
Εικόνα 21: Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Κόμβου συναρτήσει του Χρόνου Αφύπνισης	97
Εικόνα 22: Ποσοστιαία συμμετοχή του κάθε υποσυστήματος στην κατανάλωση ενέργειας στα τέσσερα ενεργειακά προφίλ.....	98
Εικόνα 23: Διάρκεια ζωής συναρτήσει του αριθμού ανιχνεύσεων ανά ημέρα.....	98
Εικόνα 24: Η μέθοδος κωδικοποίησης TESPAP: α) Βήματα 1 και 2, β) Βήμα 3, γ) Βήμα 4	107
Εικόνα 25: Η μέθοδος του Ατέρμονος Ψαλιδισμού του πλάτους.....	109
Εικόνα 26: Χωροταξικό Σχεδιάγραμμα των 23 Κόμβων [56].....	112
Εικόνα 27: Κατανομή των ζευγών D/S του ακουστικού σήματος για τα οχήματα AAV, DW και η συνδυασμένη τους κατανομή για την δημιουργία του ακουστικού αλφαβήτου	116
Εικόνα 28: Κατανομή των ζευγών D/S του ακουστικού σήματος για τα οχήματα AAV, DW και η συνδυασμένη τους κατανομή για την δημιουργία του ακουστικού αλφαβήτου	116
Εικόνα 29: Ακουστικοί κανονικοποιημένοι πίνακες S για τα οχήματα AAV και DW με χρήση του αλφαβήτου C5.....	126
Εικόνα 30: Σεισμικοί κανονικοποιημένοι πίνακες S για τα οχήματα AAV και DW με χρήση του αλφαβήτου C5.....	126
Εικόνα 31: Διαδικασία εκπαίδευσης Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.....	129

Εικόνα 32: Διάγραμμα Ροής του προγράμματος Ανίχνευσης και Κατηγοριοποίησης Οχημάτων	138
Εικόνα 33: Σχηματικό κυκλώματος μικροφώνου πλακέτας αισθητήρων MTS310. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται το υπερερατό φίλτρο που αλλάχθηκε	139
Εικόνα 34: Επίδραση του συντελεστή AVRG_DECAY_FCTR στον υπολογισμό της ενέργειας του σήματος	145
Εικόνα 35: Επίδραση του συντελεστή ENRG_DECAY_FCTR στον υπολογισμό της ενέργειας του σήματος	146
Εικόνα 36: Ποσοστιαία συμμετοχή του κάθε υποσυστήματος στην κατανάλωση ενέργειας στα δύο ενεργειακά προφίλ	154
Εικόνα 37: Χρόνος Ζωής συναρτήσει του Χρόνου Εκτέλεσης Αλγορίθμου Κατηγοριοποίησης	155
Εικόνα 38: Διάρκεια ζωής συναρτήσει του αριθμού ανιχνεύσεων ανά ημέρα.....	155
Εικόνα 39: Τοποθεσία εγκατάστασης Ασύρματου Δικτύου	156
Εικόνα 40: Λεπτομέρεια τοποθεσίας εγκατάστασης Ασύρματου Δικτύου.....	156
Εικόνα 41: Αρχέτυπος Πίνακας S Αυτοκινήτου	157
Εικόνα 42: Αρχέτυπος Πίνακας S Λεωφορείου.....	158
Εικόνα 43: Αρχέτυπος Πίνακας S Μοτοσυκλέτας	158
Εικόνα 44: Αρχέτυποι Πίνακες των τριών κλάσεων	159

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Συγκριτικά Χαρακτηριστικά Σεισμικών Αισθητήρων.....	39
Πίνακας 2: Σύγκριση των Ασύρματων Πλατφόρμων Τελευταίας Τεχνολογίας – Τεχνικά Χαρακτηριστικά [126].....	56
Πίνακας 3: Σύγκριση των Ασύρματων Πλατφόρμων Τελευταίας Τεχνολογίας – Ασύρματος Πομποδέκτης [126].....	56
Πίνακας 4: Αναλυτική ενεργειακή κατανάλωση Ασύρματου Κόμβου Mica2 και πλακέτας αισθητήρων MTS310 [127].....	58
Πίνακας 5: Σύγκριση των Ασύρματων Πλατφόρμων Τελευταίας Τεχνολογίας – Κατανάλωση Ενέργειας [126].....	58
Πίνακας 6: Σύγκριση σταθερών κατωφλίων.....	76
Πίνακας 7: Επιδόσεις με κατώφλι περιβάλλουσας, συναρτήσε του συντελεστή α	78
Πίνακας 8: Αναλυτικά Αποτελέσματα Αλγορίθμου Ανίχνευσης Προσωπικού.....	82
Πίνακας 9: Αναλυτική κατανάλωση των υποσυστημάτων του Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού.....	91
Πίνακας 10: Απαιτούμενος χρόνος για κάθε λειτουργία/υποσύστημα του Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού.....	92
Πίνακας 11: Σύγκριση Αλγορίθμων Κατωφλίου.....	92
Πίνακας 12: Αναλυτική Ενεργειακή Κατανάλωση ανά Προφίλ Λειτουργίας.....	94
Πίνακας 13: Κατανομή Συχνοτήτων στα αλφάβητα C1 και C1 - f.....	119
Πίνακας 14: Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ (C1).....	120
Πίνακας 15: Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 5\%$ (C5).....	120
Πίνακας 16: Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ και συχνοτικό διαμερισμό της διάστασης D (C1 - f).....	121
Πίνακας 17: Αλφάβητο Αυτοοργανούμενου Χάρτη.....	123
Πίνακας 18: Τυπικό Αλφάβητο 28 Συμβόλων.....	124
Πίνακας 19: Σύγκριση Αλφαβητών.....	125
Πίνακας 20: Αποτελέσματα ταξινόμησης Νευρωνικού Δικτύου (FANN).....	133
Πίνακας 21: Αποτελέσματα ταξινόμησης Αρχετύπου L1.....	134
Πίνακας 22: Αποτελέσματα ταξινόμησης Αρχετύπου L2.....	134
Πίνακας 23: Κατανομή των συχνοτήτων συναρτήσε των παραμέτρων D και S.....	143
Πίνακας 24: Αλφάβητο που χρησιμοποιήθηκε στους Ασύρματους Κόμβους Αναγνώρισης Οχήματος.....	144
Πίνακας 25: Δομή Πακέτου Tespar_Send_Msg.....	148
Πίνακας 26: Δομή Πακέτου Tespar_Receive_Msg.....	148
Πίνακας 27: Δομή Πακέτου Tespar_DS_Send_Msg.....	149
Πίνακας 28: Αναλυτική κατανάλωση των υποσυστημάτων του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων.....	151
Πίνακας 29: Απαιτούμενος χρόνος για κάθε λειτουργία/υποσύστημα του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων.....	151
Πίνακας 30: Αναλυτική Ενεργειακή Κατανάλωση ανά σενάριο Λειτουργίας.....	153
Πίνακας 31: L1 Απόσταση μεταξύ των κλάσεων.....	159
Πίνακας 32: Αποτελέσματα κατηγοριοποίησης Ασύρματου Δικτύου Αναγνώρισης Οχημάτων – 3 κλάσεις.....	160
Πίνακας 33: Αποτελέσματα κατηγοριοποίησης Ασύρματου Δικτύου Αναγνώρισης Οχημάτων – 2 κλάσεις.....	160

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Ο Mark Weiser σε ένα άρθρο του στο Scientific American του 1991 σκιαγραφεί με την φαντασία του, τις εξελίξεις στον χώρο του διάχυτου υπολογισμού (pervasive computing) και προετοιμάζει το έδαφος για τις μεγάλες εξελίξεις και το πλήθος εφαρμογών, που προβλέπεται να έχει η νέα τεχνολογία [1]. Οι προβλέψεις του, επιβεβαιώνονται και μάλιστα σε βαθμό, που ξεπερνά κατά πολύ τις αρχικές του εκτιμήσεις. Η τεχνολογία για την δημιουργία ενός έξυπνου και αλληλεπιδραστικού περιβάλλοντος είναι πλέον, σε μεγάλο βαθμό, διαθέσιμη στους επιστήμονες και προσφέρεται για την ανάπτυξη πλήθους εφαρμογών. Σημαντικό ρόλο προς τη κατεύθυνση αυτή έχουν παίξει τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.

Με τον όρο Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks ή WSN όπως θα αναφέρεται στο εξής χάριν συντομίας) εννοούμε τα δίκτυα από μικρές, αυτόνομες συσκευές, που διαθέτουν το κατάλληλο υλικό και λογισμικό για την αίσθηση του φυσικού κόσμου, μέσω ηλεκτρονικών αισθητήρων, για την επεξεργασία και την αποθήκευση των δεδομένων και για την αποστολή και λήψη των μεμονωμένων ή συλλογικών αποφάσεων, με χρήση των δυνατοτήτων τους για ασύρματη επικοινωνία.

Ο όρος «Ασύρματα» αποτελεί ίσως την αιτία της ιδιαίτερης προσοχής και ραγδαίας ανάπτυξης, που παρατηρείται στον επιστημονικό τομέα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, κυρίως την τελευταία δεκαετία. Δίκτυα Αισθητήρων υπήρχαν και παλαιότερα, όμως η πρόσθετη δυνατότητα της ασύρματης επικοινωνίας απελευθέρωσε την φαντασία και την δημιουργικότητα των ερευνητών. Οι ασύρματες επικοινωνίες επιτρέπουν την δημιουργία δικτύων αισθητήρων, που είναι αυτόνομα, ευέλικτα και εύκολα στην υλοποίηση, την αναβάθμιση και την αλλαγή. Τα πλεονεκτήματα αυτά, σε συνδυασμό με την απουσία καλωδιακής υποδομής καθώς και την μείωση του κόστους των

ασύρματων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έχουν ήδη καταστήσει τα WSN από μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία, σε οικονομικά βιώσιμη και επιτυχημένη λύση με πλήθος εφαρμογών [2],[3].

Οι εφαρμογές αυτές ποικίλουν, από απλή καταγραφή μεμονωμένων φυσικών φαινομένων και την αποστολή των μετρήσεων σε κάποιο απομακρυσμένο σταθμό βάσης, μέχρι πολύπλοκα συστήματα διασυνδεδεμένων κόμβων, που αυτοδιοργανώνονται σε ένα δυναμικό δίκτυο, βρίσκουν αυτόματα τις θέσεις τους στον χώρο και συνεργάζονται για να λάβουν από κοινού μια απόφαση, στηριζόμενοι στις μεμονωμένες αποφάσεις του κάθε κόμβου. Ευφυή συστήματα με παρόμοιες δυνατότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ενός τεχνητού «δέρματος», που θα παρέχει πληροφορίες για το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, χωρίς όμως να παρεμβαίνει σε αυτό, λόγω των ολοένα και μικρότερων διαστάσεων των δομικών «κυττάρων», που θα το αποτελούν, δηλαδή τους ασύρματους κόμβους. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- Παρακολούθηση χώρου,
- Παρακολούθηση αντικειμένων, και
- Παρακολούθηση των αλληλεπιδράσεων των αντικειμένων με τον χώρο που τα περικλείει, καθώς και μεταξύ τους.

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων μπορεί να αποτελέσει την ιδανική λύση για υλοποίηση εφαρμογών, όπως την παρακολούθηση περιβαλλοντικών φαινομένων και της άγριας ζωής, την γεωργία ακριβείας, τον κλιματικό έλεγχο εσωτερικών χώρων, την διαχείριση κρίσεων και καταστροφών, την παρακολούθηση της κατάστασης μηχανολογικού υλικού και κατασκευών (structural monitoring), τον διαγνωστικό έλεγχο μηχανημάτων, την ιατρική διάγνωση και γενικά για την υλοποίηση έξυπνων συστημάτων μικρής ή μεγάλης κλίμακας [4] - [17]. Σημαντική εφαρμογή αποτελεί και η φυσική ασφάλεια χώρων, που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων:

- Επιτήρηση μεγάλων χώρων και εγκαταστάσεων (αεροδρόμια, ναυστάθμους, διυλιστήρια, εργοστάσια, εργοτάξια)

- Επιτήρηση αρχαιολογικών χώρων
- Παρακολούθηση συνόρων
- Παρακολούθηση αγωγών (πετρελαίου, φυσικού αερίου)
- Επιτήρηση στρατιωτικών εγκαταστάσεων, μονάδων, στόχων
- Παρακολούθηση πεδίου μάχης

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων τα καθιστούν ιδανικά για την υλοποίηση ενός εύχρηστου συστήματος εντοπισμού εισβολέων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ασφάλειας [18]. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει συμβάλλει η αλματώδης ανάπτυξη στους τομείς της μικροηλεκτρονικής και των μικροσυστημάτων, της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος καθώς και των ασύρματων επικοινωνιών. Η πρόοδος αυτή, καθιστά πλέον εφικτή την υλοποίηση συστημάτων, που αποτελούνται από μικρούς, αυτόνομους ασύρματους κόμβους, εξοπλισμένους με ποικίλους, χαμηλού κόστους, παθητικούς ή ενεργητικούς αισθητήρες, ικανούς να ανιχνεύσουν, να αναγνωρίσουν και να παρακολουθήσουν μια ποικιλία στόχων όπως ανθρώπους, οχήματα, αεροπλάνα και ελικόπτερα [19]-[21],[81].

1.2.Σύντομη Ανασκόπηση της Ανίχνευσης Προσωπικού και Οχημάτων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ουσιώδες τμήμα μιας εφαρμογής φυσικής ασφάλειας, αποτελεί η αναγνώριση και κατηγοριοποίηση προσωπικού και οχημάτων, δεδομένου ότι αποτελούν τους πιθανότερους στόχους, που θα πρέπει να αντιληφθεί το σύστημα. Η έρευνα στον τομέα αυτό, είναι ιδιαίτερα έντονη τα τελευταία χρόνια και οι επιστήμονες αναζητούν τα χαρακτηριστικά εκείνα, που επιτρέπουν την ανίχνευση ενός ανθρώπου ή ενός οχήματος από την διαταραχή, που προκαλούν στο φυσικό περιβάλλον. Τα χαρακτηριστικά αυτά ερευνώνται στην εκπεμπόμενη θερμική, μαγνητική, χημική, μηχανική, ηλεκτρική και οπτική ενέργεια [22]. Ειδικότερα:

- **Προσωπικό.** Η διαταραχή που δύναται να προκαλέσει στο περιβάλλον, η παρουσία ενός ανθρώπου, είναι θερμική, σεισμική, ακουστική, ηλεκτρική,

χημική και οπτική. Η θερμότητα του σώματος εκπέμπεται σαν υπέρυθρη ενέργεια ομοιόμορφα. Η επαφή του πέλματος με το έδαφος προκαλεί την σεισμική του διέγερση και τη διάδοση σεισμικών κυμάτων, κυρίως στην επιφάνεια του μέσου διάδοσης. Προκαλούν επίσης ακουστικά κύματα, που διαδίδονται στον αέρα με την ταχύτητα του ήχου, που είναι όμως διαφορετική από την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Το ανθρώπινο σώμα μπορεί να θεωρηθεί σαν διηλεκτρικό, που προκαλεί την μεταβολή του υπάρχοντος ηλεκτρικού πεδίου. Αφήνει επίσης, πολύπλοκα χημικά ίχνη που ανιχνεύονται εύκολα από σκύλους. Τέλος, προκαλεί την ανάκλαση και την απορρόφηση των φωτεινών ακτίνων και μπορεί εξάλλου να εντοπιστεί με τη χρήση οπτικών μέσων και γενικά, το σώμα αυτό, ανακλά και διαχέει οπτικά, ηλεκτρομαγνητικά, ακουστικά και υπερηχητικά σήματα. Στην ειδική περίπτωση, που ο άνθρωπος φέρει κάποιο μεταλλικό αντικείμενο, όπως για παράδειγμα ένα όπλο, τότε θα προκαλέσει και διαταραχή στο υπάρχον Γήινο μαγνητικό πεδίο λόγω των φερρομαγνητικών υλικών, που απαρτίζουν το όπλο. Κατ' επέκταση, αναμένεται να ανιχνευθεί τόσο από κάποιο μαγνητικό αισθητήρα, όσο και από κάποιο ραντάρ, λόγω της αυξημένης ανάκλασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το συγκεκριμένο μεταλλικό αντικείμενο.

- **Όχημα.** Ένα όχημα αναμένεται, να προκαλέσει θερμική, σεισμική, ακουστική, ηλεκτρική, μαγνητική, χημική και οπτική διαταραχή στο περιβάλλον. Όπως και οι άνθρωποι, έτσι και τα οχήματα έχουν μια θερμική υπογραφή, που απαρτίζεται από ένα θερμό σημείο στην μηχανή, στην εξάτμιση και στα θερμά αέρια, που βγαίνουν από αυτή. Επίσης, τόσο τα τροχοφόρα, όσο και τα ερπυστριοφόρα οχήματα έχουν άμεσα ανιχνεύσιμη σεισμική και ακουστική υπογραφή. Διαθέτουν επίσης μεγάλη μεταλλική μάζα και επιφάνεια, που επηρεάζει τόσο το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο υποβάθρου, σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ένα στρατιώτη. Τα οχήματα εκπέμπουν χημικές ενώσεις, όπως το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, προϊόντα της καύσης. Τέλος, ανακλούν, διαχέουν και

Η ανίχνευση των παραπάνω χαρακτηριστικών, μπορεί να επιτευχθεί από ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων, έχοντας πάντα υπ' όψιν, ότι προορίζονται για χρήση σε έναν ασύρματο κόμβο, ο οποίος υπόκειται σε περιορισμούς διαστάσεων, ενέργειας και επεξεργαστικής ισχύος.

Κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί, ότι κανένας αισθητήρας, όσο τέλειος και αν είναι, δεν μπορεί από μόνος του, να ανιχνεύσει και να παρακολουθήσει κάθε στόχο, με βεβαιότητα 100%. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα ασφαλείας πρέπει να στηρίζεται τόσο σε πολλούς, διαφορετικού είδους αισθητήρες, όσο και σε μεγάλο πλήθος ανεξάρτητων μετρήσεων από αισθητήρες ίδιου τύπου, για την εξαγωγή της απόφασης, με την μεγαλύτερη δυνατή βεβαιότητα. Για τον λόγο αυτό, οι έρευνες είναι προσανατολισμένες στην εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού αισθητήρων, με τους οποίους, θα επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απόδοση. Παράλληλα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν παράγοντες, όπως το κόστος, οι δυνατότητες του ασύρματου κόμβου, που θα τους φιλοξενήσει, οι απαιτήσεις της εφαρμογής και η κατανάλωση ενέργειας.

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των σύγχρονων λύσεων και υλοποιήσεων, που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση οχημάτων και προσωπικού.

Στον τομέα των αισθητήρων οι ερευνητές στην [22], ύστερα από μια εκτενή μελέτη και κατάταξή τους, επιλέγουν τη χρήση μαγνητικών αισθητήρων και ραντάρ κυρίως γιατί πρόκειται για αισθητήρες, που δε χρειάζονται ιδιαίτερη συσκευασία, έχουν λογικές απαιτήσεις σε επεξεργασία σήματος και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και επιτυχώς παλαιότερα, ιδιαίτερα οι μαγνητικοί [23],[24]. Σε παρόμοιες εργασίες το ραντάρ αντικαθίσταται από χαμηλότερου κόστους λύσεις, όπως υπέρυθρους και ακουστικούς αισθητήρες [21],[52] ή παραμένουν μόνο οι μαγνητικοί και οι ακουστικοί [60]. Η λύση των υπέρυθρων αισθητήρων, είναι επίσης, πολύ διαδεδομένη και συνδυάζεται συνήθως με ακουστικούς αλλά και σεισμικούς αισθητήρες [56]. Σε ορισμένες περιπτώσεις

χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ακουστικοί αισθητήρες με αρκετά καλά αποτελέσματα τόσο στην ανίχνευση οχημάτων [51], [54] όσο και στον εντοπισμό μεμονωμένων γεγονότων, όπως πυροβολισμών [50].

Ο πιο διαδεδομένος συνδυασμός αισθητήρων, που επιτρέπει την αξιόπιστη αλλά και οικονομική ανίχνευση τόσο προσωπικού όσο και οχημάτων, παρέχοντας πληροφορίες για τη φύση του στόχου, για την κατεύθυνση κίνησης και την ταχύτητά του, είναι η χρήση ακουστικών ή/και σεισμικών αισθητήρων [56],[62],[72],[77]-[84]. Τα ογκώδη γεώφωνα, που χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανίχνευση των σεισμικών κυμάτων, μπορούν να αντικατασταθούν με μικρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα [76], μειώνοντας το κόστος και το μέγεθος του ασύρματου κόμβου, έχοντας όμως σημαντικά υποδεέστερες επιδόσεις. Υπάρχουν όμως μικρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα χαμηλού θορύβου και ιδιαίτερα υψηλών προδιαγραφών, που μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τα γεώφωνα αλλά με σαφώς υψηλότερο κόστος [88].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας σεισμικός αισθητήρας (πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο) για την Ανίχνευση Προσωπικού και συνδυασμός ενός ακουστικού και ενός σεισμικού αισθητήρα για την Αναγνώριση Οχήματος.

Στον τομέα της επεξεργασίας του σήματος οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται συνήθως ποικίλουν από πολύ απλή επεξεργασία στο πεδίο του χρόνου έως πολύπλοκη συχνοτική ή συνδυασμό χρονικής - φασματικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στην ανίχνευση προσωπικού, συνήθως επιτυγχάνεται με χρήση κάποιου σεισμικού αισθητήρα και αναζητώντας στο σήμα κρουστικές διεγέρσεις ικανού πλάτους με συχνότητα από 1 - 3 Hz. Η συχνότητά τους μετράται συνήθως είτε από την περιβάλλουσα του σήματος είτε απευθείας [65], ή και με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier (FFT) [74], [75]. Χρησιμοποιούνται επίσης τεχνικές, με τις οποίες διακρίνεται, αν μια σεισμική διέγερση έχει προκληθεί από βήμα ή από κάποια άλλη πηγή με χρήση στατιστικών χαρακτηριστικών του σήματος, όπως η κυρτότητα [72], καθώς επίσης και με χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων [73]. Όσον αφορά στην ανίχνευση και κυρίως

στην αναγνώριση οχημάτων, η επεξεργασία που απαιτείται είναι πιο πολύπλοκη, δεδομένου ότι πρέπει να αναζητηθούν εκείνα τα χαρακτηριστικά, που θα κάνουν εφικτή τη διάκριση διαφορετικών τύπων οχημάτων, από την ακουστική ή/και τη σεισμική τους υπογραφή. Συνεπώς χρησιμοποιούνται κυρίως φασματικές μέθοδοι με πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα του FFT, όπως στις [56], [61], [67] και του μετασχηματισμού κυματιδίων [58], [73].

1.3. Εντοπισμός Προβλήματος - Κίνητρο

Οι περισσότερες από τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες μεθόδους έχουν αναπτυχθεί με γνώμονα τις υψηλές επιδόσεις, θεωρώντας δεδομένη την ύπαρξη ενός ισχυρού υπολογιστικού συστήματος ικανού να συλλέγει και να επεξεργάζεται ταχύτητα μεγάλο όγκο δεδομένων, χωρίς κανένα ενεργειακό περιορισμό [66],[79]. Η υιοθέτησή τους όμως από ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων δεν είναι κάτι το άμεσα υλοποιήσιμο. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και κυρίως οι περιορισμοί σε υπολογιστική ισχύ, μνήμη, ενέργεια και επικοινωνία, επιβάλλουν μια διαφορετική αντιμετώπιση του προβλήματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο μικροελεγκτής ATMega128L, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλούς κόμβους, με ταχύτητα ρολογιού τα 4 MHz χρειάζεται 30 δευτερόλεπτα για τον υπολογισμό ενός FFT 512 σημείων με αριθμητική κινητής υποδιαστολής, ενώ απαιτούνται τουλάχιστον $2 \times 512 \times 2 = 2$ Kbyte μνήμης RAM, από τα διαθέσιμα 4 KB μόνο για τον υπολογισμό αυτό [52]. Οι ερευνητές της [93] έχουν υλοποιήσει στον ίδιο επεξεργαστή, χρονισμένο όμως στα 8 MHz, τον αλγόριθμο FFT 64 σημείων, με χρήση ακεραίων, ο οποίος απαιτεί 56 msec για τον υπολογισμό του. Ακόμα όμως και αυτός ο χρόνος είναι απαγορευτικός για μια εφαρμογή, που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και απαιτεί ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Το γεγονός αυτό καθιστά την πολύ κοινή αυτή μέθοδο εξαγωγής των ιδιαίτερων φασματικών χαρακτηριστικών ενός σήματος, μια δαπανηρή ενεργειακά επιλογή. Η προφανής λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η προσθήκη ενός ισχυρότερου επεξεργαστή ή ενός DSP [74]. Οι ενεργειακές απαιτήσεις όμως του κόμβου, αυξάνουν ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η διάρκεια ζωής του, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται η ίδια πηγή ενέργειας. Η

κατάσταση γίνεται δυσκολότερη στην περίπτωση που ο κόμβος θα πρέπει να κάνει τοπικά και την κατηγοριοποίηση ενός στόχου. Ο αλγόριθμος κατηγοριοποίησης θα πρέπει να είναι τόσο υλοποιήσιμος στον κόμβο, όσο και ενεργειακά αποδοτικός, έναντι της αποστολής του χαρακτηριστικού διανύσματος σε κάποιον ισχυρότερο υπολογιστή, που θα λειτουργεί ως σταθμός βάσης και θα αναλάβει την κατηγοριοποίηση.

Η ιδιαίτερη ανάπτυξη των WSN τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην εκτενέστερη μελέτη και αναθεώρηση του προβλήματος της ανίχνευσης και αναγνώρισης προσωπικού και οχημάτων, με γνώμονα την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, την αποτελεσματικότητα και την απόδοση. Οι τεχνικές και οι λύσεις αναζητούνται τόσο σε επίπεδο υλικού (αισθητήρες, ηλεκτρονικά, επεξεργαστής, ασύρματος πομποδέκτης) όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Η χρήση του διαθέσιμου υλικού ενός κόμβου από το λογισμικό είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την διάρκεια ζωής του. Ταυτόχρονα, η επεξεργασία σήματος, που θα επιτελεστεί, επηρεάζει τόσο την ενεργειακή κατανάλωση, όσο και την απόδοση ανίχνευσης και κατηγοριοποίησης του κόμβου. Τέλος, η επικοινωνιακή πολιτική, που θα επιλεγεί για την αποστολή των μετρήσεων ή των αποφάσεων κάθε μεμονωμένου κόμβου προς το σταθμό βάσης έχει άμεση επίπτωση στην κατανάλωση.

1.4.Σκοποί και Στόχοι

Η διδακτορική αυτή διατριβή επικεντρώνεται, κυρίως, στην ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων για την αναγνώριση προσωπικού από τη σεισμική διαταραχή, που προκαλεί ο βηματισμός και την κατηγοριοποίηση οχημάτων με χρήση της ακουστικής και της σεισμικής τους υπογραφής, αξιοποιώντας τις δυνατότητες, που προσφέρουν τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Προτείνονται λύσεις, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού και επεξεργασίας σήματος. Βασικός άξονας της έρευνας είναι η απλότητα αλλά και η αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και αποσκοπεί στην βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ενός ασύρματου κόμβου, που θα χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιες εφαρμογές.

Ειδικότερα στόχοι της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι:

- Να ερευνηθεί η χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου για την καταγραφή από έναν Ασύρματο Κόμβο των σεισμικών δονήσεων, που προκαλούνται από έναν άνθρωπο, που κινείται εντός της εμβέλειας του αισθητήρα.
- Να αναπτυχθούν αλγόριθμοι, που θα επιτρέψουν την ανίχνευση ενός κινούμενου ανθρώπου και να μελετηθεί η επίδοσή τους με πραγματικά σήματα.
- Να εκτιμηθεί η ενεργειακή απόδοση των αλγορίθμων ανίχνευσης βημάτων και να επιλεγεί ο καταλληλότερος, για υλοποίηση σε έναν Ασύρματο Κόμβο, με κριτήρια τις επιδόσεις του και την ενεργειακή του κατανάλωση.
- Να μελετηθεί η καταλληλότητα μιας μεθόδου επεξεργασίας σήματος στο πεδίο του χρόνου, που έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην αναγνώριση φωνής, για την εξαγωγή χαρακτηριστικών διανυσμάτων, που θα επιτρέπουν την κατηγοριοποίηση οχημάτων από τις ακουστικές και τις σεισμικές τους υπογραφές.
- Να προσαρμοστεί η μέθοδος στις απαιτήσεις μιας εφαρμογής, που προορίζεται για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.
- Να δοκιμαστεί με πραγματικά ακουστικά και σεισμικά σήματα σε ένα σενάριο κατηγοριοποίησης οχημάτων και να μελετηθούν τρόποι βελτίωσης των επιδόσεών της.
- Να υλοποιηθεί η πλήρης εφαρμογή ανίχνευσης προσωπικού και αναγνώρισης οχημάτων σε εμπορικά διαθέσιμους Ασύρματους Κόμβους και να μετρηθούν οι επιδόσεις του συστήματος.
- Να μετρηθεί η ενεργειακή κατανάλωση των κόμβων και να εκτιμηθεί η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας τους, βάσει συγκεκριμένων ενεργειακών προφίλ και σεναρίων κατανάλωσης, ανάλογα με τις απαιτήσεις, που πρέπει να ικανοποιήσει το Ασύρματο Δίκτυο.

1.5.Καινοτομίες

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω σημεία:

1. Την ανάπτυξη ενός απλού ευρετικού αλγορίθμου ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας, βάσει των σεισμικών δονήσεων, που προκαλούνται από τα βήματα, με γνώμονα την υλοποιησιμότητά του σε έναν μικροελεγκτή των 8-bit. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί σαν δεδομένα την κρουστική φύση της διέγερσης του εδάφους από τα βήματα, καθώς και τον επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα τους, με συχνότητα τα 0,8 - 3 Hz, για να τα διαχωρίσει από κάποια άλλη σεισμική διαταραχή. Για την εύρεση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των βημάτων, ο αλγόριθμος λειτουργεί σαν μια μηχανή καταστάσεων λαμβάνοντας σαν είσοδο το σεισμικό σήμα καθώς και ένα κατώφλι. Διερευνώνται τρεις μέθοδοι δημιουργίας ενός μεταβλητού κατωφλίου και επιλέγεται το καλύτερο βάσει απόδοσης/κατανάλωση ενέργειας.
2. Την ενσωμάτωση ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιομέτρου σε έναν Ασύρματο Κόμβο, τύπου Mica2Dot και την επιτυχή μεταφορά της μεθόδου ανίχνευσης προσωπικού στον κόμβο.
3. Την ανάπτυξη τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού, του Ασύρματου Κόμβου για την βελτίωση της κατανάλωσης ενέργειας από τις ~131 mAh, που κατανάλωνε αρχικά το σύστημα χωρίς καμία ενεργειακή μέριμνα, στις ~72 mAh ημερησίως. Δηλαδή κατά ένα ποσοστό 82%. Με χρήση 2 απλών μπαταριών τύπου AA των 2700 mAh, ο χρόνος ζωής επεκτείνεται από τις 20,67 ημέρες στις 37,53 ημέρες, συνεχούς λειτουργίας.
4. Την αναγνώριση και κατηγοριοποίηση οχημάτων με κωδικοποίηση και επεξεργασία του σήματος στο πεδίο του χρόνου, ξεφεύγοντας από πολύπλοκες μεθόδους συχνοτικής ανάλυσης του ακουστικού και του σεισμικού σήματος. Η μέθοδος βασίζεται στη μέθοδο TESPAN , που έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην αναγνώριση φωνής.

5. Τη διερεύνηση της επίδρασης του αλφάβητου κωδικοποίησης στην επίδοση της αναγνώρισης και την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου αλφάβητου στις ανάγκες της κατηγοριοποίησης οχημάτων, βάσει των σεισμικών και ηχητικών υπογραφών τους. Το προταθέν αλφάβητο βελτιώνει την επίδοση της μεθόδου σε σχέση με το τυπικό αλφάβητο. Η απόδοση της κατηγοριοποίησης σε επίπεδο προσομοίωσης, με πραγματικά όμως σήματα από δύο κλάσεις οχημάτων, ένα βαρύ φορτηγό και ένα ερπυστριοφόρο όχημα, φτάνει το 98% και 79% αντίστοιχα χρησιμοποιώντας και τους δύο αισθητήρες (ακουστικό, σεισμικό). Η μέθοδος αυτή είναι άμεσα υλοποιήσιμη σε έναν μικροελεγκτή των 8-bit με συχνότητα λειτουργίας τα 7.3728 MHz και αποφεύγεται η χρήση DSP ή ισχυρότερου επεξεργαστή.
6. Την υλοποίηση της μεθόδου στον Ασύρματο Κόμβο Mica2. Ο Ασύρματος Κόμβος Αναγνώρισης Οχημάτων είναι σε θέση να δειγματοληπτεί τον ακουστικό αισθητήρα με συχνότητα 8 kHz και να δημιουργεί σε πραγματικό χρόνο το χαρακτηριστικό διάνυσμα, που επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των ανιχνευμένων οχημάτων. Γίνονται αναλυτικές μετρήσεις της ενεργειακής κατανάλωσης του κόμβου, η οποία μετράται στις 34,2 mAh ημερησίως. Η διάρκεια ζωής του εκτιμάται στις 79 ημέρες συνεχούς λειτουργίας.
7. Για ένα δεδομένο μήκος χαρακτηριστικού διανύσματος και δεδομένο αριθμό ανιχνεύσεων ανά ημέρα, διερευνάται αν είναι οικονομικότερο ενεργειακά να γίνει η κατηγοριοποίηση στον ασύρματο κόμβο και να αποσταλεί το αποτέλεσμα ή να αποσταλεί ολόκληρο το χαρακτηριστικό διάνυσμα, για κατηγοριοποίηση στον σταθμό βάσης. Η μελέτη δείχνει ότι η κατηγοριοποίηση στον κόμβο για έναν απλό αλγόριθμο κατηγοριοποίησης βάσει αρχετύπου, που απαιτεί 1ms για την εκτέλεσή του, μειώνει την ημερήσια κατανάλωση ενέργειας στις 24,4 mAh, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη διάρκεια ζωής στις 111 ημέρες, δηλαδή κατά ένα ποσοστό 40%. Βρίσκεται τέλος ο μέγιστος χρόνος, που μπορεί να εκτελείται ο αλγόριθμος

κατηγοριοποίησης, πριν γίνει ασύμφορη η κατηγοριοποίηση επάνω στον κόμβο.

1.6.Δομή

Η σύντομη αυτή εισαγωγή αποτελεί και το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Στο κεφάλαιο 2 δίδονται οι βασικές αρχές της σεισμικής και ακουστικής ανίχνευσης προσωπικού και οχημάτων. Παρουσιάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, καθώς και η αρχιτεκτονική των κόμβων Mica2Dot και Mica2, που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του Ασύρματου Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού και Αναγνώρισης Οχήματος αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 3 μελετάται η σεισμική ανίχνευση προσωπικού στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Καλύπτεται βιβλιογραφικά το θέμα και προτείνονται τεχνικές βελτίωσης των υπάρχόντων μεθόδων. Οι λύσεις δοκιμάζονται με πραγματικά σήματα τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης, όσο και στον ασύρματο κόμβο Mica2Dot και μετράται αναλυτικά η ενεργειακή τους κατανάλωση. Ο Ασύρματος Κόμβος Ανίχνευσης Προσωπικού, που αναπτύσσεται, είναι ικανός να εντοπίζει έναν άνθρωπο, που περπατά σε ακτίνα μέχρι 8 μέτρα από αυτόν, χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο για την ανίχνευση των σεισμικών δονήσεων, που προκαλεί.

Στο κεφάλαιο 4 μελετάται η σεισμική και ακουστική αναγνώριση και κατηγοριοποίηση οχημάτων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Καλύπτεται βιβλιογραφικά το θέμα και προτείνεται μια μέθοδος κωδικοποίησης στο πεδίο του χρόνου ακουστικών και σεισμικών σημάτων. Στόχος είναι η δημιουργία ενός χαρακτηριστικού διανύσματος, από το οποίο είναι δυνατή η αναγνώριση του οχήματος και η διάκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων οχημάτων. Η απόδοση της μεθόδου δοκιμάζεται με πραγματικά σήματα από δύο κλάσεις οχημάτων, ένα βαρύ φορτηγό και ένα ερπυστριόφορο όχημα. Στη συνέχεια περιγράφεται η υλοποίηση, η εγκατάσταση και η δοκιμή ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων για την αναγνώριση και κατηγοριοποίηση οχημάτων, βάσει των ακουστικών τους υπογραφών. Χρησιμοποιούνται οι Ασύρματοι Κόμβοι Mica2 σαν πλατφόρμα

υλικού, πάνω στην οποία θα αναπτυχθεί το σύστημα και η μέθοδος κωδικοποίησης στο πεδίο του χρόνου, ως βάση για την επεξεργασία του σήματος. Ο Ασύρματος Κόμβος Αναγνώρισης Οχημάτων, που αναπτύσσεται, είναι ικανός να διακρίνει με αρκετά μεγάλη αξιοπιστία οχήματα διαφορετικών τύπων όπως αυτοκίνητο, λεωφορείο και μοτοσικλέτα.

Τέλος, το κεφάλαιο 5 ολοκληρώνει την παρούσα διατριβή, παραθέτοντας τα σημαντικότερα συμπεράσματα, που προέκυψαν. Γίνονται επίσης προτάσεις για μελλοντική εργασία, που μπορεί να επιτελεστεί σαν συνέχεια της διατριβής.

Την εργασία αυτή συμπληρώνει η βιβλιογραφία, καθώς και ένα παράρτημα με τους κώδικες των εφαρμογών, που υλοποιήθηκαν στην έκδοση 1.15 του TinyOS.

2. Υπόβαθρο

2.1. Σεισμική - Ακουστική Ανίχνευση Προσωπικού και Οχημάτων

2.1.1. Φαινομενολογία Σεισμικού Σήματος

Το έδαφος, όπως και κάθε άλλο ελαστικό μέσο, επιτρέπει στα σεισμικά κύματα, που προκαλούνται από τις διαταραχές πάνω στην επιφάνειά του, να διαδίδονται μέσω αυτού. Η μέγιστη απόσταση διάδοσης των κυμάτων σχετίζεται άμεσα με τον συντελεστή απόσβεσης του εδάφους, για τον συγκεκριμένο τύπο κύματος, που διαδίδεται σε αυτό. Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες σεισμικών κυμάτων, τα κύματα χώρου, τα οποία διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις στο εσωτερικό της γης και τα επιφανειακά κύματα, τα οποία διαδίδονται μόνο κατά μήκος των επιφανειακών στρωμάτων της γης.

Τα κύματα χώρου τα διακρίνουμε σε επιμήκη P (πρώτα) κύματα και σε εγκάρσια S (δεύτερα) κύματα, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους στην ταχύτητα διάδοσης και στον τρόπο δόνησης των μορίων του μέσου διάδοσης. Στα επιμήκη κύματα τα μόρια της ύλης δονούνται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης δημιουργώντας έτσι πυκνώματα και αραιώματα. Στα εγκάρσια κύματα τα μόρια της ύλης δονούνται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης, δημιουργώντας όρη και κοιλίες.

Στα επιφανειακά κύματα διακρίνουμε τα *Love* και τα *Rayleigh*. Τα κύματα *Love* δημιουργούνται όταν στρώμα μικρής ταχύτητας διάδοσης υπέρκειται στρώματος μεγαλύτερης ταχύτητας διάδοσης. Κατά τη διάδοσή τους τα μόρια της ύλης δονούνται παράλληλα προς την επιφάνεια και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης. Είναι, δηλαδή, εγκάρσια κύματα οριζοντίως πολωμένα. Τα κύματα *Rayleigh* είναι κύματα μεγάλης περιόδου. Δημιουργούνται στην ελεύθερη επιφάνεια του μέσου, και κατά τη διάδοσή τους τα μόρια δονούνται σε ελλειπτικές τροχιές, με το μεγάλο άξονα κάθετο προς την επιφάνεια και τη διεύθυνση διάδοσης και το μικρό άξονα παράλληλο και ομόρροπο προς τη

διεύθυνση διάδοσης. Το πλάτος των κυμάτων φθίνει καθώς αυτά διαδίδονται μέσα στο έδαφος, ανάλογα με το είδος τους. Τα κύματα *Rayleigh* φθίνουν ανάλογα του $1 / R$, όπου R η απόσταση από την πηγή της διαταραχής, ενώ τα υπόλοιπα κύματα φθίνουν ανάλογα του $1 / R^2$. Τα σημαντικότερα από τα επιφανειακά κύματα είναι τα κύματα *Rayleigh*, τα οποία και μεταφέρουν το 70% της ενέργειας, ενώ τα κύματα *Love* δεν λαμβάνονται υπ' όψη λόγω της μικρής τους επίδρασης.

Όταν κινείται ένα όχημα, ένας άνθρωπος ή ζώο, παράγονται σεισμικά κύματα πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, εξαιτίας της πρόσκρουσης του κινούμενου σώματος με το έδαφος. Οι δονήσεις αυτές διαδίδονται μέσα στο έδαφος, κυρίως με την μορφή επιφανειακών κυμάτων *Reyleigh*. Η ταχύτητα διάδοσής τους είναι σε άμεση εξάρτηση από την μορφολογία του εδάφους.

Η κίνηση ενός ανθρώπου ή ενός οχήματος, μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια σειρά από κάθετες προσκρούσεις στο έδαφος. Η διαφορά μεταξύ των δύο, είναι ο ρυθμός με τον οποίο επαναλαμβάνονται αυτές οι προσκρούσεις. Στην περίπτωση των βημάτων, οι προσκρούσεις, που προκαλεί η επαφή του πέλματος με το έδαφος, επαναλαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, που όμως είναι πολύ μεγαλύτερα από την πραγματική χρονική διάρκεια της κρουστικής διέγερσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ταλάντωση, που προκαλείται στο έδαφος από ένα βήμα, αποσβένεται πριν ξεκινήσει η επόμενη, δημιουργώντας μια χαρακτηριστική σεισμική υπογραφή. Αντίθετα, οι δονήσεις, που προκαλούνται από ένα όχημα, συμβαίνουν με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα, πριν προλάβει να αποσβεστεί η προηγούμενη. Ειδικά για την περίπτωση ενός οχήματος, οι δονήσεις αυτές δημιουργούνται εξαιτίας τριών φαινομένων [65]:

- Της πρόσκρουσης των τροχών ή της ερπύστριας του οχήματος στις ανωμαλίες του εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι ένα σεισμικό σήμα μεγάλου εύρους ζώνης, χωρίς σαφώς καθορισμένα χαρακτηριστικά.
- Της περιοδικής πρόσκρουσης των αυλακώσεων των ελαστικών ή της ερπύστριας με το έδαφος. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση δονήσεων με μεγάλη ενέργεια, κατανεμημένων σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων, που

σχετίζονται άμεσα με την απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων και με την ταχύτητα του οχήματος.

- Του ήχου, που μεταδίδεται και μέσα στο έδαφος. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση χαρακτηριστικών της ακουστικής υπογραφής του οχήματος μέσα στην σεισμική του υπογραφή.

2.1.2. Σεισμικοί Αισθητήρες

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι αισθητήρων για την μέτρηση των δονήσεων του εδάφους είναι τα γεώφωνα και τα επιταχυνσιόμετρα, κυρίως τα πιεζοηλεκτρικά και τα MEMS. Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή ενός σεισμικού αισθητήρα, είναι η ευαισθησία του, ο θόρυβος, το εύρος ζώνης, η συχνότητα συντονισμού, η κατανάλωση, το μέγεθος και τέλος το κόστος.

- **Γεώφωνο.** Το γεώφωνο είναι ένα όργανο για την μέτρηση της ταχύτητας κίνησης του εδάφους. Τα περισσότερα γεώφωνα είναι κατασκευασμένα από ένα πηνίο, τυλιγμένο γύρω από μια μάζα, η οποία είναι ανηρτημένη από ένα ελατήριο. Το όλο σύστημα βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η κίνηση του εδάφους, μεταφέρεται στο περίβλημα του γεωφώνου, το οποίο είναι πακτωμένο σε αυτό μέσω μιας ακίδας. Λόγω αδράνειας, η ανηρτημένη μάζα τείνει να διατηρήσει την θέση της και έτσι επάγονται μικρά ρεύματα μέσα στο πηνίο καθώς αυτό μετακινείται εντός του μαγνητικού πεδίου. Τυπικά γεώφωνα, που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές ανίχνευσης οχημάτων και προσωπικού, είναι το GS-14L9 (μονού άξονα) και το GS-20DM/DX (τριπλού άξονα) της εταιρείας Geospace [72],[75],[81] καθώς και γεώφωνα της εταιρείας Sensor Nederland [66]. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται ευρέως τα γεώφωνα είναι γιατί παρέχουν υψηλή ευαισθησία και χαμηλό επίπεδο θορύβου με ένα λογικό κόστος.
- **Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.** Το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο αποτελείται από ένα τεμάχιο πιεζοηλεκτρικού υλικού, συνήθως ένα τεχνητά πολωμένο φερροηλεκτρικό κεραμικό, που παρουσιάζει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, την παραγωγή δηλαδή φορτίων σε κάθε μεταβολή των φυσικών του διαστάσεων. Όταν το υλικό αυτό υπόκειται σε τάσεις, είτε συνθλιπτικές

είτε εφελκτικές, παράγει ηλεκτρικό φορτίο στους πόλους του, που είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης σε αυτό δύναμης. Στα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, η σεισμική μάζα στερεώνεται πάνω στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, ο οποίος είναι στερεωμένος πάνω στο σώμα του επιταχυνσιομέτρου, το οποίο και πακτώνεται στο έδαφος. Σε αντιστοιχία με το γεώφωνο, κίνηση του εδάφους προκαλεί κίνηση του επιταχυνσιομέτρου και λόγω αδρανείας, η σεισμική μάζα τείνει να διατηρήσει την θέση της πιέζοντας ή τραβώντας τον κρύσταλλο. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται φορτία στην έξοδο του αισθητήρα, που είναι ανάλογα της επιτάχυνσης του εδάφους [70]. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα δεν είναι τόσο διαδεδομένα στις εφαρμογές σεισμικής ανίχνευσης στόχων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, αλλά έχει αναφερθεί η χρήση τους στη μελέτη των ανθρώπινων βημάτων [71].

- **Επιταχυνσιόμετρα τεχνολογίας MEMS (Micro-Electro-Mechanical System).** Στη κατηγορία αυτή ανήκουν αισθητήρες, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί με την τεχνολογία της μικρομηχανικής, είτε τρισδιάστατης, είτε επιφανειακής, με την οποία, καθίσταται δυνατή η κατασκευή μικροαισθητήρων και μηχανικών δομών, εξαιρετικά μικρών διαστάσεων (στην περιοχή του μικρομέτρου). Οι τεχνολογίες, που χρησιμοποιούνται είναι συμβατές με παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, που χρησιμοποιούν σαν βάση τους το πυρίτιο και έτσι επιτρέπεται η ενσωμάτωση τόσο του μικροαισθητήρα, όσο και των απαραίτητων ηλεκτρονικών για την προετοιμασία και επεξεργασία του σήματος στο ίδιο ολοκληρωμένο. Ευρέως χρησιμοποιούμενα μικρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα, για εφαρμογές στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι τα χαμηλού κόστους ADXL202 της εταιρίας Analog Devices [85], που περιλαμβάνονται στην πλακέτα αισθητήρων MTS310 των Ασύρματων Κόμβων MICA2 [33]. Τα συγκεκριμένα όμως επιταχυνσιόμετρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ανίχνευσης προσωπικού, λόγω του υψηλού θορύβου που έχουν (της τάξης των $200 \mu g/\sqrt{Hz}$, που στα 500 Hz είναι περίπου 9 μg), με αποτέλεσμα το χρήσιμο σήμα να χάνεται

μέσα σε αυτόν. Σημειώνεται ότι το σεισμικό σήμα από το βάδισμα είναι της τάξης των 1 – 10 μg ενώ του οχήματος μπορεί να φτάσει τα δεκάδες mg . Οι ερευνητές της [76] αναφέρουν την καταγραφή σεισμικών υπογραφών οχημάτων, με χρήση ενός αντίστοιχου επιταχυνσιόμετρου (ADXL05) και την επιτυχή κατηγοριοποίησή τους χωρίς όμως να παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες για τις συνθήκες λήψης των μετρήσεων. Η εταιρεία Colibrys (πρώην Applied MEMS) έχει κατασκευάσει μικρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα χαμηλού θορύβου με επιδόσεις αντίστοιχες των γεωφώνων [87],[89]. Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε εφαρμογές σεισμικής ανίχνευσης οχημάτων και προσωπικού με πολύ καλές επιδόσεις [88]. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό τους κόστος.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των σεισμικών αισθητήρων, που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής για την ανίχνευση οχημάτων και προσωπικού. Για λόγους σύγκρισης θα συμπεριληφθεί και το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο, που θα χρησιμοποιηθεί στον Ασύρματο Κόμβο Ανίχνευσης Προσωπικού, το οποίο περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.1.

Πίνακας 1: Συγκριτικά Χαρακτηριστικά Σεισμικών Αισθητήρων

Μοντέλο	Τύπος	Ελάχιστη Συχνότητα (Hz)	Μέγιστη Συχνότητα (Hz)	Συντονισμός (Hz)	Ευσαιθησία	Θόρυβος 10 - 500 Hz (μg)	Εύρος (g)	Τροφοδοσία (V)	Κατανάλωση (mA)	Εταιρεία
Si-Flex1500S	MEMS	DC	5000	-	1.2 V/g	0.95 - 6.7	± 3	$\pm 6 - \pm 15$	< 10	Colibrys
ADXL202	MEMS	DC	6000	>6000	0.312 V/g	633 - 4472	± 2	3 - 5.25	0.6	Analog Devices
356B18	Piezo	0.3	3000	>3000	1 V/g	13 - 22	± 5	20 - 30	2 - 20	PCB Piezotronics
GS-20DX	Geophone	8	1500	<8	28 V/m/s					Geospace
GS-14-L3	Geophone	24	3000	<24	11.4 V/m/s					Geospace
MLAB Piezoelectric Accelerometer	Piezo	DC	200	Sensor 1: 357 Sensor 2: 386 Sensor 3: 387	Normal: $\sim 500 \text{ pC/g}$ Resonance: $\sim 10 \mu\text{C/g}$	0.8 - 5.6		3.3	2.2	

2.1.3. Φαινομενολογία Ακουστικού Σήματος

Ο ήχος που δημιουργεί ένα όχημα οφείλεται σε δύο κυρίως πηγές. Την μηχανή και τα υπόλοιπα κινούμενα μέρη του συστήματος μετάδοσης και τους τροχούς ή τις ερπύστριες. Στην περίπτωση απουσίας σιγαστήρα στην εξάτμιση, όπως συμβαίνει συχνά σε ένα στρατιωτικό όχημα με πετρελαιοκινητήρα, ο ήχος που παράγεται μπορεί να γίνει πολύ δυνατός και να είναι ανιχνεύσιμος από μεγάλη απόσταση, η οποία μπορεί να φτάσει τα 1000 με 1500 μέτρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και τα 3000 με 4000 μέτρα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η ισχύς του

ακουστικού σήματος, που παράγεται από ένα σύγχρονο αυτοκίνητο ή ένα SUV είναι σαφώς μικρότερη και οφείλεται κυρίως στην κύλιση των τροχών και στην επαφή τους με το οδόστρωμα, μειώνοντας την απόσταση ανίχνευσης στα 200 με 400 μέτρα και δυσχεραίνοντας την αναγνώρισή του [64]. Η φύση του ήχου είναι περιοδική γιατί προέρχεται από περιστρεφόμενα εξαρτήματα, όπως τους κυλίνδρους της μηχανής και περιστροφή των τροχών ή της ερπίστριας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας της ακουστικής υπογραφής ενός οχήματος βρίσκεται στο εύρος των 50 - 2000 Hz και το φασματικό της περιεχόμενο εξαρτάται άμεσα από τον τύπο του κινητήρα (βενζινοκινητήρας ή πετρελαιοκινητήρας), από τις στροφές του, τον αριθμό των κυλίνδρων που διαθέτει, αλλά και από την ταχύτητα του οχήματος. Ο συνδυασμός όλων αυτών παράγει μια χαρακτηριστική, για κάθε όχημα, ηχητική υπογραφή, που επιτρέπει τόσο την αναγνώρισή του, όσο και τη διάκρισή του από κάποιο άλλο όχημα, διαφορετικών χαρακτηριστικών [53].

Η ακουστική διάδοση είναι εξαρτώμενη από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα από τα ρεύματα του αέρα και την ταχύτητά τους. Ο αέρας αποτελεί την σημαντικότερη πηγή θορύβου υποβάθρου, ο οποίος καταγράφεται από τα μικρόφωνα σαν ισχυρό ευρυζωνικό, χαμηλόσυχο σήμα. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού οι ακουστικοί αισθητήρες πρέπει να καλύπτονται από ανεμοφράκτες κατασκευασμένους συνήθως από αφρώδες συνθετικό υλικό.

2.1.4. Ακουστικοί Αισθητήρες

Ο ήχος που παράγεται από το κινούμενο όχημα καταγράφεται από ακουστικούς αισθητήρες. Ο όρος, ακουστικός αισθητήρας ή μικρόφωνο αναφέρεται σε μία συσκευή, που μετατρέπει την ακουστική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ένα ακουστικό σήμα μεταδίδεται στον αέρα με τη μορφή πυκνωμάτων και αραιωμάτων του μέσου διάδοσης. Τα κύματα αυτά προσπίπτουν στην ευαίσθητη επιφάνεια του μικροφώνου, την οποία θέτουν σε κίνηση και μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα. Τα μικρόφωνα μπορεί να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους: Ηλεκτρο-δυναμικά, πυκνωτικά, πιεζοηλεκτρικά. Συνήθως, για τις συγκεκριμένες εφαρμογές

χρησιμοποιούνται πυκνωτικά ομοιοκατευθυντικά μικρόφωνα (electret condenser), όπως για παράδειγμα το WM-62A της Panasonic, που είναι ενσωματωμένο στην πλακέτα αισθητήρων MTS-310, η οποία είναι συμβατή με τους ασύρματους κόμβους Mica2.

2.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ο Κόμβος Αισθητήρων αποτελεί το δομικό στοιχείο κάθε Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων. Η συμπεριφορά του δικτύου εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του κόμβου και από τις τεχνολογικές λύσεις, τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και λογισμικού, που έχουν υιοθετηθεί για την κατασκευή και λειτουργία του. Είναι χρήσιμο να γίνει μια πρώτη διάκριση των κόμβων ως προς το μέγεθός τους, που τις περισσότερες φορές είναι σε άμεση εξάρτηση από τις δυνατότητές του [41].

- **Μικροί Κόμβοι Αισθητήρων:** Η φιλοσοφία της υλοποίησης ενός Ασύρματου Δικτύου, που αποτελείται από μικρούς κόμβους έγκειται στο να γίνει αυτό διαφανές στο περιβάλλον, που πρόκειται να αναπτυχθεί. Αυτό ήταν το αρχικό όραμα και παραμένει ο τελικός στόχος της έρευνας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Από τις πιο αξιόλογες προσπάθειες για υλοποίηση μικροσκοπικών κόμβων είναι του προγράμματος “Smart Dust” του πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας, Berkeley [31] καθώς και οι κόμβοι “SPEC nodes” [32] με μέγεθος της τάξης των μερικών τετραγωνικών εκατοστών. Μεγαλύτερου μεγέθους κόμβοι αποτελούν οι κόμβοι της σειράς MICA/MICA2 που κατασκευάζονται από την εταιρία Crossbow καθώς και άλλες υλοποιήσεις όπως ο MoteIV [34], ο Nympha στα πλαίσια το προγράμματος MANTIS του πανεπιστημίου του Colorado [35] και ο iMote της Intel [36]. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω υλοποιήσεων αποτελεί η χρήση ενός μικροελεγκτή 8 ή 16 bits για τον έλεγχο των βασικών λειτουργιών και την επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στον μικροελεγκτή A/D μετατροπέα για την δειγματοληψία των αισθητήρων και υλοποιείται το υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας με κάποιο ολοκληρωμένο χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας,

μικρής εμβέλειας (100-200 m περίπου σε ανοιχτούς χώρους) και σχετικά μικρής ταχύτητας μετάδοσης (<115 kbps).

- **Μεγάλοι Κόμβοι Αισθητήρων:** Σε πολλές περιπτώσεις, θα πρέπει να αυξηθεί το μέγεθος του κόμβου, χάριν της ανάγκης για περισσότερη επεξεργαστική ισχύ, μεγαλύτερη αυτονομία και περισσότερες δυνατότητες επικοινωνίας και συνδεσιμότητας. Κατά αυτό τον τρόπο, χρησιμοποιούνται συνήθως επεξεργαστές ή μικροελεγκτές των 32-bit με την υποστήριξη αρκετής εξωτερικής μνήμης. Παραδείγματα υλοποιήσεων κόμβων που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία είναι η πλατφόρμα AWAIRS της εταιρίας Rockwell [37] καθώς και ο κόμβος μAMPS από το MIT [38]. Και οι δύο υλοποιήσεις χρησιμοποιούν τον μικροεπεξεργαστή StrongARM της εταιρίας Intel. Πιο πρόσφατες υλοποιήσεις χρησιμοποιούν τον επεξεργαστή XScale, όπως για παράδειγμα ο κόμβος Stargate, που κατασκευάζεται από την Intel για την εταιρία Crossbow, σαν κεντρικός κόμβος - αποδέκτης δικτύων βασισμένων στους κόμβους MICA. Ο κόμβος WINS NG 2.0 αποτελεί ένα ακόμα παράδειγμα υλοποίησης κόμβου για την ταυτόχρονη δειγματοληψία πολλών αισθητήρων (με μέγιστη συχνότητα τα 20kHz, αθροιστικά σε όλα τα κανάλια) και την εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων επεξεργασίας του σήματος, όπως φιλτράρισμα και FFT [39]. Ακουστικά και σεισμικά σήματα από οχήματα, που έχουν καταγραφεί με τους εν λόγω κόμβους, χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αλγορίθμων αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχημάτων, οι οποίοι αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Παρόμοιες υλοποιήσεις βρίσκονται στο ενδιάμεσο ενός κόμβου αισθητήρα και ενός embedded PC με αντίστοιχο προσανατολισμό για χρήση σαν κόμβο αισθητήρα [40].

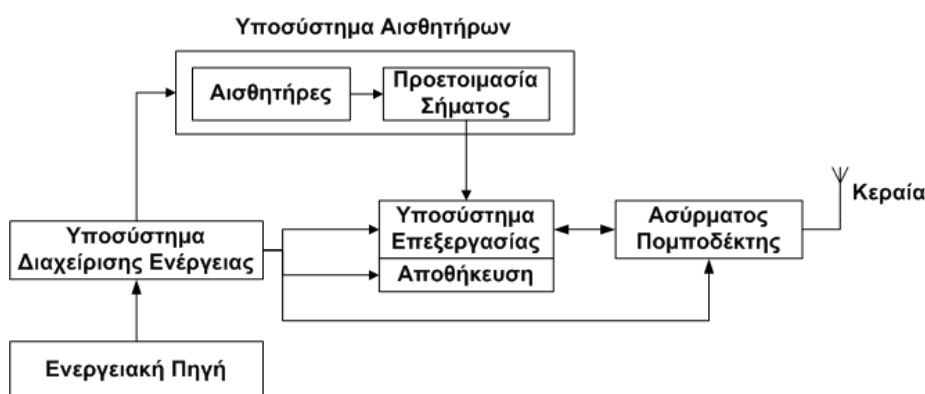
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αλλά ταυτόχρονα και μειονέκτημα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων αποτελεί ο περιορισμός των Ασύρματων Κόμβων Αισθητήρων σε οποιοδήποτε μέγεθος τα περιγράφει, όπως:

- το μέγεθος (διαστάσεις)
- η επεξεργαστική ικανότητα

- ο αποθηκευτικός χώρος
- η διαθέσιμη ενέργεια
- η επικοινωνία (τοπολογία, εμβέλεια, ρυθμός μετάδοσης, εύρος ζώνης)
- η υποστήριξη λογισμικού και το μέγεθος του κώδικα

Η δυσκολία, αλλά ταυτόχρονα η μαγεία και η πρόκληση, στην υλοποίηση των διάφορων εφαρμογών, έγκειται σε αυτούς ακριβώς τους περιορισμούς. Η μεγάλη διαφοροποίηση στις απαιτήσεις και ανάγκες κάθε εφαρμογής, αλλά και οι προαναφερθείσες περιορισμένες δυνατότητες ενός δικτύου αισθητήρων, εμποδίζει την ενιαία αντιμετώπιση κάθε προβλήματος. Συνήθως, η αρχιτεκτονική του δικτύου και οι κόμβοι που θα χρησιμοποιηθούν, είναι προσαρμοσμένα στην εκάστοτε εφαρμογή. Ανεξαρτήτως όμως εφαρμογής, θα πρέπει το δίκτυο να διαθέτει τρεις βασικές δυνατότητες: Την αίσθηση, την επεξεργασία των δεδομένων και την επικοινωνία. Ουσιαστική προϋπόθεση για να εκτελεί το Ασύρματο Δίκτυο τις απαραίτητες λειτουργίες του, είναι η τροφοδοσία των κόμβων με την απαραίτητη ενέργεια και η αυτονομία τους, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Ένας Ασύρματος Κόμβος αποτελείται από τέσσερα βασικά υποσυστήματα, τα οποία είναι παρόντα σε κάθε κόμβο: το υποσύστημα αισθητήρων, το υποσύστημα επεξεργασίας, το υποσύστημα επικοινωνιών και το υποσύστημα τροφοδοσίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Τα υποσυστήματα ενός Ασύρματου Κόμβου Αισθητήρων

2.2.1. Αίσθηση

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων υλοποιούν έναν επαναστατικό εναλλακτικό τρόπο αίσθησης. Μέχρι τώρα οι αισθητήρες ετοποθετούντο με δύο βασικούς τρόπους:

- Τοποθέτηση μικρού αριθμού αισθητήρων, που διαθέτουν υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία, άρα και ανάλογα υψηλό κόστος. Η τοποθέτηση γίνεται σχετικά μακριά από το μετρούμενο φαινόμενο, γιατί είναι δύσκολο να προσεγγιστεί. Οι αισθητήρες αυτοί πρέπει να είναι σε θέση να διεξάγουν την απαραίτητη επεξεργασία του σήματος για να το διαχωρίσουν από τον θόρυβο ή από την ανεπιθύμητη πληροφορία, με χρήση αναλογικής, αλλά συνήθως και ψηφιακής επεξεργασίας.
- Τοποθέτηση πολλών αισθητήρων, οι οποίοι δεν διαθέτουν υποσυστήματα επεξεργασίας, κοντά στο φαινόμενο. Οι θέσεις και ο τρόπος επικοινωνίας τους είναι συνήθως καθορισμένες και προσδιορισμένες ύστερα από μελέτη. Μεταδίδουν τις μετρήσεις σε κάποιο κομβικό σημείο του δικτύου και η επεξεργασία του σήματος γίνεται κεντρικά, σε έναν υπολογιστή, που διαθέτει την ανάλογη επεξεργαστική ισχύ.

Στην περίπτωση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων η αίσθηση γίνεται από μικρές αυτόνομες συσκευές, τους λεγόμενους κόμβους αισθητήρων (sensor nodes), οι οποίοι τοποθετούνται μέσα ή πολύ κοντά στο μετρούμενο φαινόμενο, και συνήθως σε μεγάλη πυκνότητα [17]. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR ratio) του μετρούμενου σήματος ακόμα και με χρήση φθηνών αισθητήρων [26].

Το υποσύστημα αισθητήρων αποτελεί το μέσο με το οποίο ο κόμβος αντιλαμβάνεται το φυσικό κόσμο και σκοπός του είναι η μετατροπή ενός φυσικού ή χημικού μεγέθους σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο συνήθως πρόκειται για μια αναλογική τάση. Αποτελείται, κατά κανόνα, από τρία μέρη: τον ηλεκτρονικό αισθητήρα, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά για την προετοιμασία του σήματος και την τελική του μετατροπή σε τάση, αν αυτό απαιτείται (Signal-Conditioning) και τέλος τον A/D μετατροπέα (Analog to Digital Converter) για την ψηφιακή

μετατροπή του αναλογικού σήματος τάσης. Πολλές φορές, τα τρία αυτά μέρη, είναι δυσδιάκριτα, αφού μπορεί να ενσωματώνονται στο πακέτο του αισθητήρα ή/και του επεξεργαστή, αν πρόκειται για μικροελεγκτή.

Ένας σχεδιαστής έχει στη διάθεσή του πλήθος αισθητήρων, που μπορεί να ενσωματώσει σε έναν κόμβο. Η τελική επιλογή είναι σε άμεση εξάρτηση από την εκάστοτε εφαρμογή. Κοινός τόπος όλων των προσπαθειών βελτίωσης των υπαρχόντων αισθητήρων, αποτελεί η σμίκρυνσή τους, χωρίς όμως αυτό να έχει αρνητική επίδραση στις επιδόσεις τους. Προς την κατεύθυνση αυτή κινούνται τα μικρομηχανικά συστήματα (MEMS), τα οποία γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και αποτελούν, για πολλές εφαρμογές, ιδανικές λύσεις για έναν κόμβο.

Κατά την επιλογή ενός αισθητήρα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

- *Όγκος του αισθητήρα.* Η παράμετρος αυτή θα κρίνει αν ο αισθητήρας θα ενσωματωθεί πάνω στον κόμβο ή αν θα συνδέεται εξωτερικά σε αυτόν, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τα γεώφωνα.
- *Επιδόσεις του αισθητήρα.* Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα όπως η ευαισθησία του, η διακριτική του ικανότητα, ο θόρυβος και το εύρος ζώνης παίζουν σημαντικό ρόλο στην ικανότητά του να διακρίνει τις μεταβολές του μετρούμενου μεγέθους.
- *Απαιτήσεις τροφοδοσίας και κατανάλωση ενέργειας.* Για τη λήψη μιας μέτρησης ο αισθητήρας και τα ηλεκτρονικά του τροφοδοτούνται, και η μέτρηση γίνεται μετά από ένα χρονικό διάστημα, απαραίτητο για την σταθεροποίηση τους. Η ίδια η μέτρηση διαρκεί κάποιο πεπερασμένο χρόνο, ο οποίος συνήθως εξαρτάται από τον τύπο του μικροελεγκτή και του A/D, που χρησιμοποιείται. Ο συνολικός αυτός χρόνος για την τελική λήψη της μέτρησης, καθώς και η κατανάλωση ισχύος σε αυτό το χρονικό διάστημα, είναι παράγοντες που επιδρούν στην συνολική ενεργειακή κατανάλωση.

- *Περιοδική Τροφοδότηση Ενέργειας.* Ίσως η απλούστερη, αλλά και η πιο αποτελεσματική μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας, είναι η τροφοδοσία του συστήματος των αισθητήρων μόνο, όταν απαιτείται από την εφαρμογή και για όσο χρόνο απαιτείται για την λήψη μιας ή περισσότερων μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο οι αισθητήρες να μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται γρήγορα. Το κέρδος είναι σαφώς μεγαλύτερο σε αισθητήρες, που δεν απαιτείται η συχνή δειγματοληψία, όπως για παράδειγμα ένας αισθητήρας θερμοκρασίας. Υπάρχουν όμως και αισθητήρες, που δεν μπορούν να λειτουργήσουν αρκετά γρήγορα μετά την τροφοδότησή τους, αλλά απαιτούν κάποιο χρονικό διάστημα πριν δώσουν αξιόπιστες μετρήσεις. Το πρόβλημα γίνεται έντονο, όταν ο αισθητήρας πρέπει να δειγματοληπτείται διαρκώς με μεγάλη συχνότητα (συνήθως πάνω από 50Hz), όπως συμβαίνει συχνά στους ακουστικούς και τους σεισμικούς αισθητήρες. Στην περίπτωση αυτή, είναι αναπόφευκτη η διαρκής τροφοδότηση του αισθητήρα. Μπορεί όμως, σε αυτή την περίπτωση, να διακόπτεται η τροφοδοσία των κυκλωμάτων προετοιμασίας σήματος (ενισχυτών, φίλτρων), δεδομένου ότι αυτά σχεδιάστηκαν με γνώμονα τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, το ποσό της άεργης ισχύος, που καταναλώνεται, περιορίζεται σημαντικά.

2.2.2. Επεξεργασία Δεδομένων

Στις περισσότερες εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων δεν αποστέλλονται όλες οι μετρήσεις από τους αισθητήρες σε κάποιον κεντρικό κόμβο. Η τακτική αυτή έχει υπερβολικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, το οποίο είναι ανάλογο του ρυθμού δειγματοληψίας των αισθητήρων και του αριθμού των κόμβων, που αποτελούν το δίκτυο. Αντιθέτως, η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται τοπικά, και στέλνεται μέρος τους, ή κατευθείαν το αποτέλεσμα της επεξεργασίας. Η επεξεργασία αυτή μπορεί να γίνεται με δύο βασικούς τρόπους:

- Σε επίπεδο κόμβου, όπου ο κάθε κόμβος εκτελεί την επεξεργασία των δικών του μετρήσεων. Λαμβάνει την δική του ανεξάρτητη απόφαση, και την γνωστοποιεί σε κάποιον καθορισμένο κεντρικό κόμβο, για παράδειγμα σε ένα φορητό υπολογιστή ή ένα PDA. Στην περίπτωση αυτή, ο κεντρικός κόμβος θα είναι υπεύθυνος για την τελική εξαγωγή κάποιου χρήσιμου αποτελέσματος από τις μεμονωμένες αυτές αποφάσεις.
- Με συνεργασία μεταξύ των κόμβων. Στην περίπτωση αυτή, ένας αριθμός κόμβων δημιουργεί μια ομάδα, η οποία ανταλλάσει διαφορετικές «απόψεις» του φαινομένου και καταλήγει σε μια από κοινού απόφαση, την οποία και γνωστοποιεί είτε σε κάποιον κεντρικό κόμβο, είτε στις υπόλοιπες ομάδες.

Κάθε ασύρματος κόμβος, είναι «χτισμένος» γύρω από έναν επεξεργαστή, που αποτελεί την καρδιά του συστήματος και ο ρόλος του είναι να ελέγχει και να εκτελεί τις περισσότερες λειτουργίες του ασύρματου κόμβου. Μερικές από αυτές είναι ο έλεγχος και η δειγματοληψία των αισθητήρων, η επεξεργασία των δεδομένων και η λήψη αποφάσεων, η εκτέλεση των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και των αλγορίθμων δρομολόγησης και εξοικονόμησης ενέργειας. Η υπολογιστική απόδοση του κόμβου και οι ενεργειακές του απαιτήσεις καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την επεξεργαστική μονάδα, η οποία και αποτελεί τον δεύτερο σε σειρά καταναλωτή ενέργειας του κόμβου, μετά το υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας. Πολλοί επεξεργαστές, μικροελεγκτές, DSPs ακόμα και FPGA είναι διαθέσιμοι στην αγορά και προσφέρονται για χρήση. Η

επιλογή κάποιου μικροελεγκτή προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα γιατί ενσωματώνει πλήθος περιφερειακών και καταναλώνει λίγη ενέργεια. Οι περισσότεροι μικροί κόμβοι (χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό που έγινε στο κεφάλαιο 2.3) στηρίζονται σε κάποιο μικροελεγκτή 8-bits ή σπανιότερα 16-bits. Οι μεγάλοι κόμβοι στηρίζονται σε μικροεπεξεργαστές ή μικροελεγκτές των 32-bit, που σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούν αρχιτεκτονική κινητής υποδιαστολής, προσφέροντας σημαντικά ανώτερες επιδόσεις, συνήθως όμως, με την ανάλογη ενεργειακή επιβάρυνση [48],[49].

Η επιλογή της επεξεργαστικής μονάδας πρέπει να γίνεται με γνώμονα την εφαρμογή και πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν παράγοντες, όπως [42],[45]:

- *Απόδοση και Ταχύτητα:* Η επεξεργαστική μονάδα καλείται να εκτελέσει όλες τις λειτουργίες του ασύρματου κόμβου, στο συντομότερο δυνατό χρόνο, ώστε να μπορέσει να εισέλθει σε κάποια κατάσταση ύπνωσης. Για τις περισσότερες σημερινές εφαρμογές, ταχύτητες μερικών δεκάδων MHz είναι αρκετές. Στην περίπτωση όμως, που απαιτούνται αυξημένες επιδόσεις ή υπάρχουν πολύπλοκοι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος σε πραγματικό χρόνο (υλοποίηση ψηφιακών φίλτρων, FFT, wavelet), θα πρέπει να επιλεγεί κάποιος γρηγορότερος επεξεργαστής με ταχύτητες, που μπορούν να φτάσουν τα 400 MHz. Έχουν επίσης προταθεί λύσεις, που χρησιμοποιούν ταυτόχρονα έναν μικροελεγκτή, για τον έλεγχο των υποσυστημάτων του κόμβου και ένα DSP για την επεξεργασία του σήματος [44],[74].
- *Κατανάλωση ενέργειας:* Κυμαίνεται από 0.25 μέχρι 2.5 mA ανά MHz λειτουργίας (για μικροελεγκτές 8 ή 16 bits), ανάλογα με την οικογένεια, την αρχιτεκτονική και τον κατασκευαστή. Η υποστήριξη από τον επεξεργαστή καταστάσεων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (sleep modes) και η ενεργειακή κατανάλωση σε αυτές τις στάθμες, είναι ιδιαίτερα σημαντικά, χαρακτηριστικά δεδομένου ότι ο επεξεργαστής αναμένεται να βρίσκεται σε ύπνωση το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας του. Στην κατάσταση ύπνωσης, τα περισσότερα περιφερειακά του μικροελεγκτή είναι

απενεργοποιημένα και έτσι η κατανάλωση του ρεύματος μειώνεται στο 1 – 300 μA , ανάλογα με τον τύπο του.

- *Χρόνος αφόπνισης:* Είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο επεξεργαστής για την μετάβαση από την κατάσταση πλήρους λειτουργίας σε κάποια κατάσταση ύπνωσης. Ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από 6 μsec φτάνοντας μέχρι τα 10 ms σε ορισμένες περιπτώσεις. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αυτός, τόσο πιο εύκολα και γρήγορα μπορεί να μπει ο μικροελεγκτής σε ύπνωση, εξοικονομώντας ενέργεια.
- *Τάση τροφοδοσίας:* Όσο μικρότερη είναι η τάση τροφοδοσίας ενός ολοκληρωμένου, τόσο μικρότερη είναι η κατανάλωση ενέργειας πάνω σε αυτό. Οι περισσότεροι μικροελεγκτές με τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης λειτουργούν στα 2.7 με 3.3 Volts αλλά γίνονται προσπάθειες για μείωση της τάσης λειτουργίας στα 1.8 V.
- *Μνήμη:* Η ύπαρξη μνήμης σε ένα ασύρματο κόμβο είναι απαραίτητη, τόσο στην αποθήκευση του λειτουργικού συστήματος του κόμβου, στην αποθήκευση προσωρινών δεδομένων για την εκτέλεση των διάφορων αλγορίθμων, όσο και στην ημι-μόνιμη ή μόνιμη αποθήκευση επεξεργασμένων ή αναγκαίων δεδομένων. Οι περισσότεροι μικροελεγκτές διαθέτουν από 1 έως 128 KB μνήμη τύπου FLASH για την αποθήκευση του κώδικα του λειτουργικού και 128 Bytes έως 32 KB μνήμη RAM. Επίσης, ορισμένοι διαθέτουν μνήμη τύπου EEPROM για την μόνιμη αποθήκευση κάποιων δεδομένων. Η προσθήκη πρόσθετης εξωτερικής μνήμης κοστίζει, τόσο σε χρήματα, όσο και σε ενέργεια αλλά απαιτείται σε ορισμένες εφαρμογές.
- *Υποστήριξη περιφερειακών:* Η υποστήριξη πολλών περιφερειακών από έναν μικροελεγκτή αυξάνει την λειτουργικότητά του, μειώνει τον απαιτούμενο αριθμό πρόσθετων εξαρτημάτων, τα οποία αυξάνουν το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας, περιορίζει τον συνολικό όγκο του κόμβου και διευκολύνει την συνδεσιμότητα του με άλλες συσκευές. Στα περιφερειακά μπορεί να περιλαμβάνονται A/D μετατροπείς, αναλογικοί συγκριτές,

κανάλια PWM, μνήμη, ψηφιακές εισόδους και εξόδους, σειριακή και σε ορισμένες περιπτώσεις και ασύρματη επικοινωνία, ακόμα και υλοποιήσεις με υποστήριξη πολύπλοκων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων, όπως το TCP/IP, το Wi-Fi, το Bluetooth και το Zigbee.

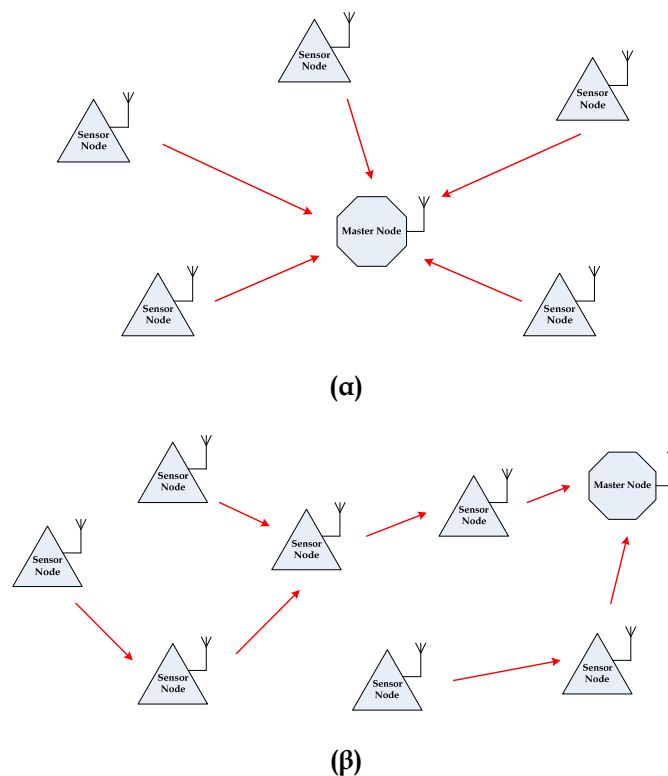
2.2.3. Επικοινωνία

Ουσιαστική ανάγκη ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων αποτελεί η ύπαρξη στοιχειώδους ασύρματης επικοινωνίας των κόμβων με κάποιον κεντρικό κόμβο ή και μεταξύ τους.

Σε ένα τυπικό Ασύρματο Δίκτυο οι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε μια μεγάλη περιοχή, πολλές φορές μεγαλύτερη από την εμβέλεια του πομποδέκτη κάθε κόμβου, και πρέπει να μεταδώσουν τις μετρήσεις ή τις αποφάσεις, που θα έχουν λάβει, σε έναν κεντρικό κόμβο - αποδέκτη (sink node) ή σε ένα σταθμό βάσης [17]. Δεδομένης της πυκνής εγκατάστασης των κόμβων, η μετάδοση της πληροφορίας μεταξύ τους μπορεί να γίνει με δύο κυρίως τρόπους: Α) Με ένα βήμα (single-hop). Β) Με πολλαπλά βήματα (multi-hop) (Εικόνα 2). Η πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται όταν ο κόμβος - αποδέκτης είναι εντός της εμβέλειας όλων των κόμβων. Η εκπομπή πιθανώς να πρέπει να γίνει με την μέγιστη δυνατή ισχύ, για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή εμβέλεια. Η επικοινωνία με πολλαπλά βήματα είναι πιο ρεαλιστική και προσφέρει περισσότερες δυνατότητες στον σχεδιαστή του δικτύου. Χρησιμοποιώντας την εμβέλεια του κάθε κόμβου, μπορεί να δημιουργηθεί ένα επεκτάσιμο δίκτυο, που θα καλύπτει μια μεγάλη περιοχή και οι πληροφορίες θα μετακινούνται από κόμβο σε κόμβο μέχρι τον τελικό προορισμό τους. Η μέθοδος αυτή αυξάνει κατά πολύ την συνολική κάλυψη του δικτύου, μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια, αλλά απαιτεί πιο εξειδικευμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας και ισχυρότερους κόμβους από πλευράς υλικού [27].

Οι περισσότεροι Ασύρματοι Κόμβοι χρησιμοποιούν ασύρματους πομποδέκτες που λειτουργούν στην ISM (Industrial, Scientific, Medical) μπάντα, στις συχνότητες των 433.5 - 437.9 MHz, 868.0 - 868.6 MHz και 2400 - 2483.5 MHz. Χρησιμοποιούν δημοφιλείς μεθόδους διαμόρφωσης όπως OOK (On/Off Key), ASK (Amplitude Shift Key) και FSK (Frequency Shift Key). Η κατανάλωση ισχύος

είναι σχεδόν ίδια κατά την εκπομπή και τη λήψη δεδομένων και κυμαίνεται στα 15 - 300 mW, ανάλογα με το ολοκληρωμένο, τη συχνότητα και τη μέθοδο που χρησιμοποιεί για την επικοινωνία. Η ακτίνα επικοινωνίας κυμαίνεται από τα 25 - 200 m, με το μέγιστο να παρατηρείται σε εξωτερικούς χώρους, με οπτική επαφή. Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται είναι της τάξης των 10 - 100 Kbps και ο χρόνος που χρειάζονται συνήθως τα ολοκληρωμένα, από την στιγμή που θα τροφοδοτηθούν μέχρι να είναι έτοιμα για επικοινωνία, είναι της τάξης των μερικών ms (πάνω από 5 ms θεωρείται απαράδεκτο). Την επικοινωνία των ασύρματων κόμβων μεταξύ τους αναλαμβάνουν τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα, που φροντίζουν για την ομαλή διεξαγωγή των επικοινωνιών [30],[41],[47].



Εικόνα 2: α) Επικοινωνία με ένα βήμα (single-hop), β) Επικοινωνία με πολλαπλά βήματα (multi-hop)

2.2.4. Ενέργεια

Από τη στιγμή, που θα εγκατασταθεί ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων σε έναν χώρο, προβλέπεται να λειτουργήσει, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, χωρίς την ανθρώπινη επίβλεψη. Αυτό σημαίνει, ότι θα πρέπει να διαχειριστεί τους ενεργειακούς του πόρους με τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής του. Κύρια πηγή ενέργειας των κόμβων είναι οι μπαταρίες, οι οποίες συνήθως δεν είναι επαναφορτιζόμενες, αλλά έχουν προταθεί και μέθοδοι παραγωγής ενέργειας επάνω στον κόμβο και αποθήκευσής της σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και υπέρ-πυκνωτές, με σκοπό την παράταση του χρόνου ζωής του [28]. Η ενεργειακή κατανάλωση είναι ο δείκτης εκείνος που θα καθορίσει την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου.

Ο σχεδιασμός του δικτύου και των κόμβων, που το αποτελούν, θα πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας και κάθε υποσύστημα του κόμβου θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο με υλικό χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Ειδική μέριμνα θα πρέπει να ληφθεί και σε επίπεδο λογισμικού, αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Μόνο ένας καθολικός σχεδιασμός χαμηλής ενέργειας θα προσφέρει στο δίκτυο την αναμενόμενη απόδοση και μακροζωία [25]-[30].

2.3. Η Ασύρματη Πλατφόρμα Υλοποίησης του Συστήματος

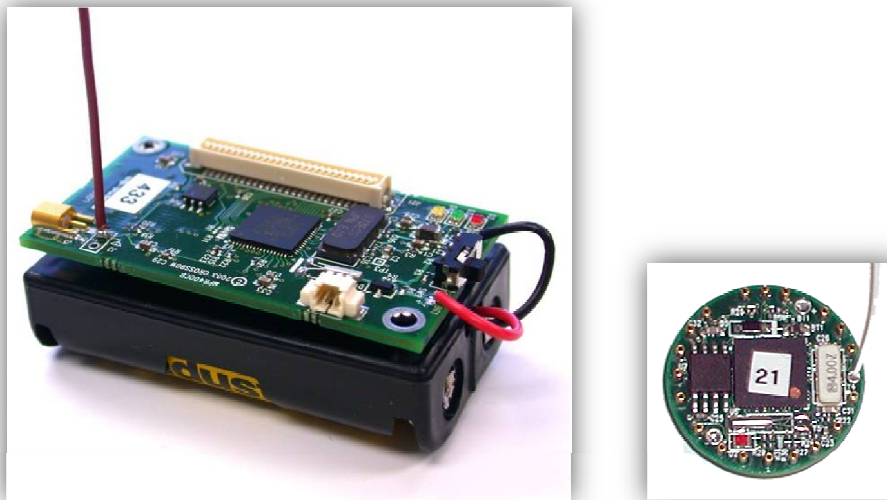
Οι ασύρματοι κόμβοι, που προήλθαν από την ερευνητική εργασία της ομάδας του David Culler στο Πανεπιστήμιο του Berkeley το 2000 (γνωστοί και ως Berkeley Motes ή Mica Motes) και διατίθενται εμπορικά πλέον από την εταιρία Crossbow, σε συνδυασμό με την πλατφόρμα λογισμικού TinyOS αποτελούν τα στάνταρντ στις πλατφόρμες ανάπτυξης εφαρμογών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων [120] - [125]. Ο συνδυασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος υλικού και λογισμικού, στο οποίο έχουν γίνει σοβαρές προσπάθειες αντιμετώπισης των προβλημάτων μιας τέτοιας υλοποίησης, με ενιαίο τρόπο, έδωσε συγκεκριμένη υπόσταση και ώθηση στην έρευνα πάνω στον τομέα των Ασύρματων Δικτύων. Για πρώτη φορά διατέθηκε στην ευρεία ερευνητική κοινότητα μια πλατφόρμα, που είχε αναπτυχθεί από υλικά COTS (Components-off-the-shelf), ανοιχτής αρχιτεκτονικής, τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και λογισμικού.

Το παράδειγμα των Berkeley Motes ακολούθησαν και άλλες ερευνητικές ομάδες, καθώς και εταιρείες, με αποτέλεσμα σήμερα, να διατίθεται μια πληθώρα επιλογών κυρίως σε επίπεδο υλικού. Έτσι, στην οικογένεια των κόμβων, που βασίζονται στον μικροελεγκτή Atmel AVR μαζί με ένα ασύρματο πομποδέκτη, είχαμε παλαιότερους πρωτότυπους κόμβους, όπως οι WeC, Rene, Rene2, Dot και Mica Motes αλλά κυρίως τους πολύ δημοφιλείς Mica2 και Mica2Dot. Στην οικογένεια αυτή, έρχονται να προστεθούν και οι νεότεροι MicaZ, που χρησιμοποιούν το νέο πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.15.4 ή αλλιώς Zigbee και διαφέρουν με τους Mica2 μόνο στην αρχιτεκτονική του υποσυστήματος ασύρματων επικοινωνιών. Πολύ διαδεδομένες υλοποιήσεις είναι οι κόμβοι Telos, Eyes, BT Nodes και οι κόμβοι Tmote Sky της εταιρείας MoteIV, οι οποίοι βασίζονται στον μικροελεγκτή MSP430 της Texas Instruments, ο οποίος και έχει καλύτερες επιδόσεις από τον Atmel. Τέλος, ενδιαφέρουσες επιλογές αποτελούν οι κόμβοι Imote2, που βασίζονται στον ισχυρό μικροεπεξεργαστή Intel PXA271. Σε επίπεδο λογισμικού προσφέρονται αρκετές άλλες επιλογές, που όμως δεν είναι τόσο δημοφιλείς στην ερευνητική κοινότητα, όσο το TinyOS.

Η μεταφορά των προτεινόμενων μεθόδων ανίχνευσης προσωπικού και αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχημάτων σε κάποια εμπορική πλατφόρμα Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και η δοκιμή τους σε πραγματικές συνθήκες, αποτελεί κύριο στόχο της παρούσας εργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν οι Ασύρματοι Κόμβοι Mica2 της εταιρείας Crossbow. Επιλογή κάποιου άλλου Ασύρματου Κόμβου, όπως για παράδειγμα του Tmote Sky με κατανάλωση 58.5 mW έναντι των 117 mW των κόμβων Mica2 προφανώς θα μείωνε την συνολική κατανάλωση. Η εργασία όμως εστιάζεται κυρίως σε τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, που μπορούν να επιτευχθούν με ένα δεδομένο υλικό και αφορούν στο υποσύστημα του αισθητήρα αλλά και του λογισμικού της εφαρμογής (μέθοδοι επεξεργασίας σήματος, ενεργειακή πολιτική, επικοινωνιακή πολιτική). Θεωρούμε λοιπόν, ότι δεν βλάπτει την γενικότητα των προτεινόμενων μεθόδων η επιλογή μιας συγκεκριμένης Ασύρματης Πλατφόρμας, έστω και αν αυτή δεν έχει την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Είναι επόμενο, ότι η χρήση πιο προηγμένων Ασύρματων Κόμβων με μικρότερη κατανάλωση ανά υποσύστημα θα βελτιώσει και τη διάρκεια ζωής του, στην ίδια εφαρμογή.

2.3.1. Περιγραφή Ασύρματων Κόμβων Mica2 και Mica2Dot

Πυρήνας του Ασύρματου Κόμβου Mica2 και Mica2Dot (Εικόνα 3) είναι ο μικροελεγκτής ATMega128L της εταιρίας Atmel, ο οποίος είναι χρονοσιμμένος στα 7.3728 MHz. Καρδιά του υποσυστήματος της ασύρματης δικτύωσης αποτελεί το ολοκληρωμένο CC1000 της εταιρείας Chipcon, που επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης 38.400 bps στη μπάντα των 868/916 MHz.



Εικόνα 3: Ο Ασύρματος Κόμβος Αισθητήρων Mica2 (αριστερά) και ο Mica2Dot (δεξιά)

Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του κόμβου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 2, Πίνακας 3). Ταυτόχρονα γίνεται και σύγκριση μεταξύ δύο ακόμα Ασύρματων Κόμβων, των πολύ διαδεδομένων Imote Sky της εταιρείας MoteIV καθώς και των Imote της Intel.

Πίνακας 2: Σύγκριση των Ασύρματων Πλατφόρμων Τελευταίας Τεχνολογίας - Τεχνικά Χαρακτηριστικά [126]

Πλατφόρμες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων				
Τεχνικά Χαρακτηριστικά				
Πλατφόρμα	Mica2	Mica2Dot	Tmote Sky	Imote
Μικροελεγκτής	AtMega128L	AtMega128L	MSP430F	ARM7
Αρχιτεκτονική	8-bit	8-bit	16-bit	32-bit
Συχνότητα (MHz)	7.3728	4	8	12
Μνήμη Προγράμματος (kB)	128	128	48	512
Μνήμη RAM (kB)	4	4	10	11
Μνήμη FLASH (kB)	512	512	1024	-
Ακρίβεια A/D	10-bit	10-bit	12-bit	-
Εισοδοι/Εξοδοι	51	18	16	30
Ενσωματωμένοι Αισθητήρες	2	2	5	-
Αλληλεπίδραση με τον Χρήστη	3 LED	1 LED	3 LED, 1 Button	1 LED
Τρόπος Προγραμματισμού	ISP, JTAG, Bootloader	ISP, JTAG, Bootloader	USB,JTAG	JTAG
Μέγεθος (mm ²)	1856	492	2621	900

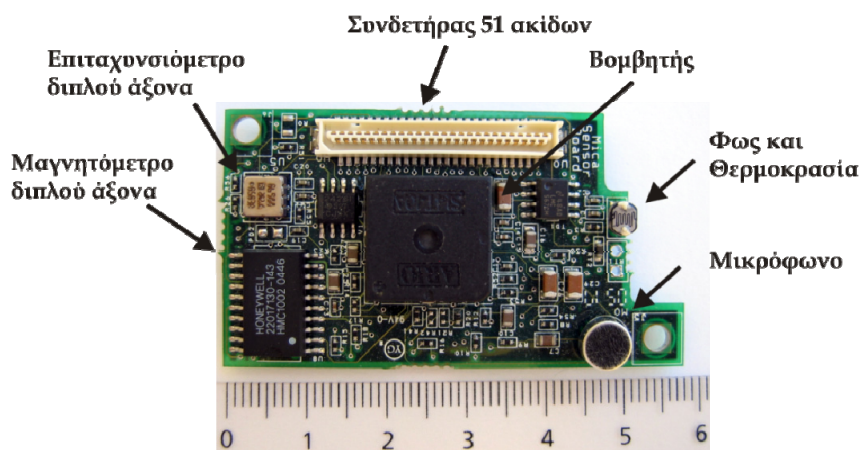
Πίνακας 3: Σύγκριση των Ασύρματων Πλατφόρμων Τελευταίας Τεχνολογίας - Ασύρματος Πομποδέκτης [126]

Πλατφόρμες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων				
Ασύρματος Πομποδέκτης				
Πλατφόρμα	Mica2	Mica2Dot	Tmote Sky	Imote
Ολοκληρωμένο	Chipcon CC1000	Chipcon CC1000	Chipcon CC2420	Zeevo TC2001
Στάνταρ	ISM	ISM	802.15.4	Bluetooth 1.1
Περιοχή Συχνοτήτων	315-916 MHz	315-916 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Ρυθμός Μετάδοσης	38.4 kbps	38.4 kbps	250 kbps	723.2 kbps
Χρόνος Ενεργοποίησης	<50 msec	<50 msec	< 1 msec	< 500 msec
TX Powerctrl	30 dB	30 dB	24 dB	-
TX Power	-/+10 dBm	-/+10 dBm	-3/+0 dBm	+0.5/+4 dBm
Ευσαιθησία	-101 dBm	-101 dBm	- 94 dBm	-80 dBm
Διαμόρφωση	FSK	FSK	DSSS-QPSK	FHSS-GFSK
Εσωτερική Κεραία	-	Wire	embed. PIFA	GigaAnt
Εξωτερική Κεραία	MMCX Connector	-	SMA Connector	U.FL Connector
Εμβέλεια Εξωτερικού Χώρου	150 m	150 m	125 m	30 m
Εμβέλεια Εσωτερικού Χώρου	40 m	40 m	50 m	30 m

2.3.2. Αισθητήρες

Οι Ασύρματοι Κόμβοι Mica2 και Mica2Dot διαθέτουν τους κατάλληλους συνδετήρες, ώστε να μπορούν να συνδεθούν σε αυτούς θυγατρικές πλακέτες επέκτασης. Έτσι, μπορούν να συνδεθούν στον κόμβο πλακέτες αισθητήρων, ενεργοποιητών, ρελέ, λήψεως δεδομένων, GPS αλλά και πλακέτες προσαρμοσμένες στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Στην περίπτωση του Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού, για τον οποίο χρησιμοποιείται ο κόμβος Mica2Dot, είναι απαραίτητη η σύνδεση ενός σεισμικού αισθητήρα, ο οποίος συνδέεται κατάλληλα με τον κόμβο, ενώ στην περίπτωση του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων είναι απαραίτητο το μικρόφωνο.

Η εταιρία Crossbow διαθέτει μια έτοιμη πλακέτα αισθητήρων, που περιλαμβάνει μικρόφωνο με ικανοποιητικές επιδόσεις για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Η πλακέτα διατίθεται στην αγορά με τον κωδικό MTS310 και διαθέτει πέντε αισθητήρες (φωτός, θερμοκρασίας, μικρόφωνο, επιταχυνσιόμετρο διπλού άξονα, μαγνητόμετρο διπλού άξονα) και ένα βομβητή (Εικόνα 4). Η μετατροπή του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό γίνεται από τον ενσωματωμένο 10-bit A/D μετατροπέα του μικροελεγκτή.



Εικόνα 4: Πλακέτα αισθητήρων MTS310 για τους ασύρματους κόμβους Mica2 (πραγματικό μέγεθος)

2.3.3. Ενεργειακή Κατανάλωση

Τόσο ο Ασύρματος Κόμβος, όσο και η πλακέτα αισθητήρων είναι ειδικά σχεδιασμένα για ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, οι αισθητήρες δεν είναι ενεργοποιημένοι από την αρχή, αλλά μπορούν να τροφοδοτηθούν ανεξάρτητα μέσω ηλεκτρονικών διακοπών, που ελέγχονται από τον μικροελεγκτή και το λειτουργικό σύστημα TinyOS. Στον Πίνακα 4, δίδεται η αναλυτική ενεργειακή κατανάλωση διάφορων υποσυστημάτων του Ασύρματου Κόμβου για διάφορα προφίλ λειτουργίας, καθώς και των αισθητήρων της πλακέτας MTS310 μαζί με το απαραίτητο κύκλωμα προετοιμασίας σήματος. Στον Πίνακα 5 γίνεται μια σύγκριση της ενεργειακής κατανάλωσης με του κόμβους TmoteSky και Imote.

Πίνακας 4: Αναλυτική ενεργειακή κατανάλωση Ασύρματου Κόμβου Mica2 και πλακέτας αισθητήρων MTS310 [127]

Αναλυτική Ενεργειακή Κατανάλωση του Ασύρματου Κόμβου Mica2					
	Current (mA)	Power (mW)		Current (mA)	Power (mW)
CPU			Radio		
<i>Active</i>	8	24	<i>Rx</i>	7	21
<i>Idle</i>	3,2	9,6	<i>Tx (-20 dBm)</i>	3,7	11,1
<i>ADC Noise Reduce</i>	1	3	<i>Tx (-19 dBm)</i>	5,2	15,6
<i>Power-down</i>	0,103	0,309	<i>Tx (-15 dBm)</i>	5,4	16,2
<i>Power-save</i>	0,11	0,33	<i>Tx (-8 dBm)</i>	6,5	19,5
<i>Standby</i>	0,216	0,648	<i>Tx (-5 dBm)</i>	7,1	21,3
<i>Extended Standby</i>	0,223	0,669	<i>Tx (-0 dBm)</i>	8,5	25,5
<i>Internal Oscillator</i>	0,93	2,79	<i>Tx (+4 dBm)</i>	11,6	34,8
			<i>Tx (+6 dBm)</i>	13,8	41,4
LEDs	2,2	6,6	<i>Tx (+8 dBm)</i>	17,4	52,2
			<i>Tx (+10 dBm)</i>	21,5	64,5
Sensor Board MTS310	0,7	2,1	EEPROM access		
<i>Microphone</i>	4,7	14,1	<i>Read</i>	6,2	18,6
<i>Accelerometer</i>	0,6	1,8	<i>Read Time</i>	595 μsec	
<i>Magnetometer</i>	5	15	<i>Write</i>	18,4	55,2
<i>Buzzer</i>	2	6	<i>Write Time</i>	12,9 msec	

Πίνακας 5: Σύγκριση των Ασύρματων Πλατφόρμων Τελευταίας Τεχνολογίας - Κατανάλωση Ενέργειας [126]

Πλατφόρμες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων				
Τροφοδοσία και Κατανάλωση Ενέργειας				
Πλατφόρμα	Mica2	Mica2Dot	Tmote Sky	Imote
Τύπος Μπαταρίας	2 AA cells	1 coin cell	2 AA cells	2 CR2 cells
Ελάχιστη Τάση	2.7 V	2.7 V	2.1 V	3.0 V
Χωρητικότητα Μπαταρίας	2000 mAh	560 mAh	2900 mAh	1600 mAh
Ρυθμιζόμενη Τροφοδοσία	-	-	-	yes
CPU Sleep, Radio off	0.054 mW	0.054 mW	0.0153 mW	9 mW
CPU on, Radio off	36 mW	36 mW	5.4 mW	27 mW
CPU on, Radio listen	66 mW	66 mW	65.4 mW	62.1 mW
CPU on, Radio RX/TX	117 mW	117 mW	58.5 mW	112.5 mW
Max Power	165 mW	165 mW	69 mW	195 mW

2.3.4. Λειτουργικό Σύστημα Ασύρματων Κόμβων - TinyOS 1.x

Το TinyOS είναι ένα λειτουργικό σύστημα σχεδιασμένο να διευκολύνει την ανάπτυξη εφαρμογών στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Χρησιμοποιείται ήδη ευρέως από πολλές ερευνητικές ομάδες και μπορεί να υποστηριχθεί από πολλές πλατφόρμες υλικού. Είναι σχεδιασμένο με αρθρωτή αρχιτεκτονική, και ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί στην ικανότητα επικοινωνίας. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, το καθιστά ιδανικό για χρήση στα Δίκτυα Αισθητήρων, όπου οι εφαρμογές και οι προσφερόμενες υπηρεσίες από το δίκτυο είναι κατανεμημένες σε πολλές, ανεπιτήρητες και περιορισμένων δυνατοτήτων συσκευές, που διαρκώς συλλέγουν πληροφορίες από το φυσικό περιβάλλον.

Ο σκοπός ενός λειτουργικού συστήματος είναι να διευκολύνει την ανάπτυξη αξιόπιστων εφαρμογών λογισμικού, κρύβοντας από το χρήστη το υλικό, πάνω στο οποίο θα εκτελεστούν οι εφαρμογές αυτές. Στους προσωπικούς υπολογιστές, το λειτουργικό σύστημα κατανέμει τα υπολογιστικά νήματα, που προέρχονται από την εφαρμογή στους επεξεργαστές, δεσμεύει και εκμεταλλεύεται δυναμικά την διαθέσιμη μνήμη και διαχειρίζεται όλους τους άλλους διαθέσιμους πόρους, όπως σκληρούς δίσκους, δίκτυα και περιφερειακά για λογαριασμό της εφαρμογής. Ο σαφής διαχωρισμός που υπάρχει μεταξύ λειτουργικού συστήματος και εφαρμογής, που είναι σύνηθες στην κλασσική πληροφορική, δεν υφίσταται στην περίπτωση των ενσωματωμένων συστημάτων και ειδικά στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Εδώ, η εφαρμογή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το συγκεκριμένο υλικό, και στην ουσία λειτουργικό και εφαρμογή, είναι τόσο αλληλένδετα και περιπλεγμένα με το υλικό, που μπορούν να θεωρηθούν ενιαία.

Το TinyOS στοχεύει σε τρεις στόχους υψηλού επιπέδου στην αρχιτεκτονική των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων:

- Να λαμβάνει υπ' όψιν την υφιστάμενη και τη μελλοντική αρχιτεκτονική των Ασύρματων Δικτύων και των Ασύρματων Κόμβων
- Να επιτρέπει την υλοποίηση τόσο των λειτουργιών του λειτουργικού συστήματος, όσο και των εφαρμογών, σε μια ευρεία γκάμα υλικού (διαφορετικές πλατφόρμες) και λογισμικού

- Να επιλαμβάνεται των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, απαιτήσεων και περιορισμών των Δικτύων Αισθητήρων, όπως: Περιορισμένοι πόροι, απαιτητική ταυτοχρονισμένη λειτουργία, αντοχή και ανθεκτικότητα και ειδικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Το TinyOS υλοποιεί ένα δομημένο μοντέλο εκτέλεσης κώδικα βασισμένο σε συμβάντα (event-driven) και μια αρχιτεκτονική σχεδιασμού εφαρμογών βασισμένη σε επιμέρους δομικά στοιχεία (component-based). Υποστηρίζει υψηλό βαθμό ταυτοχρονισμού, δεσμεύει πολύ μικρό χώρο στη μνήμη προγράμματος και στη μνήμη RAM, βελτιώνει τη σταθερότητα, επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση κώδικα, προσαρμόζεται στο υφιστάμενο υλικό και είναι σχεδιασμένο για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, δίνοντας όμως τη δυνατότητα για υλοποίηση πολύπλοκων εφαρμογών και τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων [120]-[124].

3. Σεισμική Ανίχνευση Προσωπικού

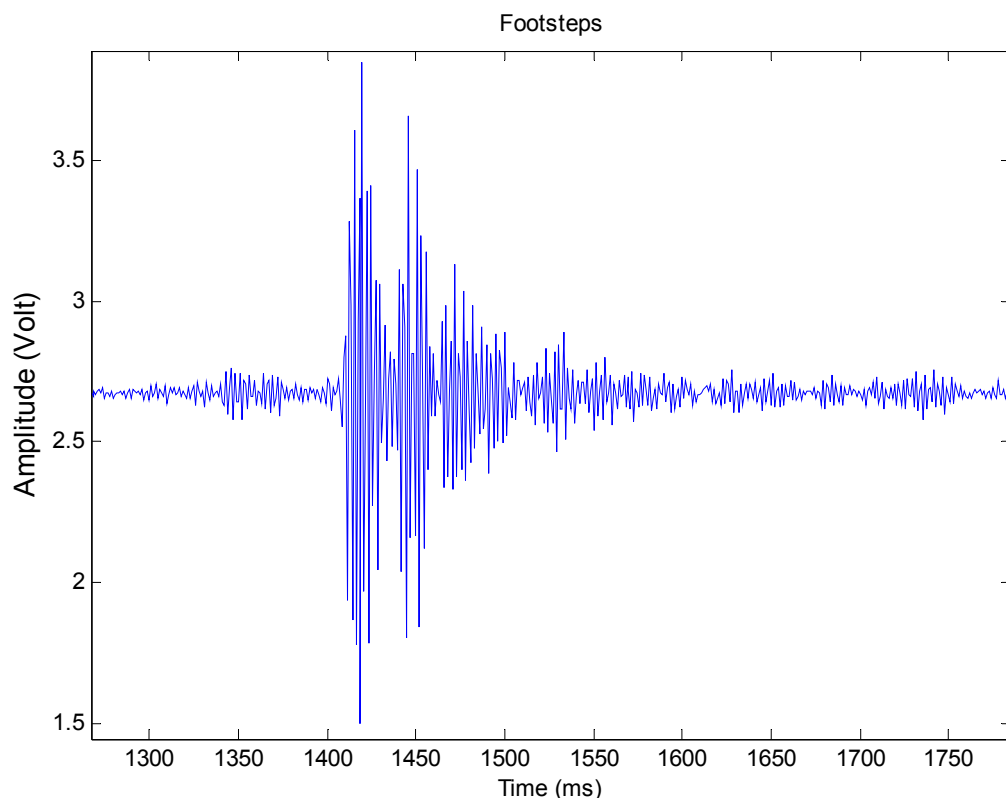
3.1. Ανασκόπηση

3.1.1. Φαινομενολογία

Το βάδισμα αποτελεί μια επαναλαμβανόμενη, ρυθμική κίνηση του σώματος, που σκοπό έχει να το μετακινήσει από το σημείο επαφής του με το έδαφος. Για να επιτευχθεί η κίνηση απαιτείται η εφαρμογή κατάλληλης δύναμης από το πέλμα στο έδαφος, η αντίδραση της οποίας θα μετακινήσει το σώμα, σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα. Το βάδισμα είναι μια πολύπλοκη κίνηση, η οποία όμως, χάριν απλότητας μπορεί να χωριστεί σε δύο κυρίως φάσεις: Την στάση (stance) και την ταλάντευση (swing). Η φάση της στάσης ξεκινάει τη στιγμή, που η φτέρνα ακουμπά στο έδαφος και ακολουθείται σχεδόν αμέσως από ολόκληρο το πέλμα. Στη συνέχεια, μεταφέρεται το βάρος από το ένα πόδι στο άλλο, σηκώνεται η φτέρνα, λυγίζει το γόνατο και σηκώνονται τα δάκτυλα. Ακολουθεί η φάση της ταλάντευσης κατά την οποία το σηκωμένο πόδι θα μετακινηθεί προς τα εμπρός για την προετοιμασία της επόμενης φάσης στάσης. Οι δύο αυτές φάσεις επαναλαμβάνονται περιοδικά, ανάλογα με τον ρυθμό του βαδίσματος ή τρεξίματος [69]. Κατά τη φάση της στάσης η επιτάχυνση του πέλματος μειώνεται απότομα στο μηδέν τη στιγμή που ακουμπά η φτέρνα και αυξάνεται πάλι απότομα τη στιγμή που τα δάκτυλα σπρώχνουν προς τα εμπρός το πέλμα. Η μεταβολή αυτή στην επιτάχυνση προκαλεί δυνάμεις, που με τη σειρά τους διεγείρουν σεισμικά το έδαφος και μεταδίδονται μέσα σε αυτό, με τη μορφή επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, τα οποία και μπορούν να καταγραφούν από κατάλληλους αισθητήρες. Μετρήσεις, που έχουν ληφθεί με γεώφωνα, έχουν δείξει ότι η απόσταση ανίχνευσης μπορεί να φτάσει τα 64 μέτρα για το βάδισμα και τα 84 μέτρα για το τρέξιμο. Σε περίπτωση προσεκτικού βαδίσματος η απόσταση αξιόπιστου εντοπισμού μπορεί να πέσει και κάτω από τα 10 μέτρα [75].

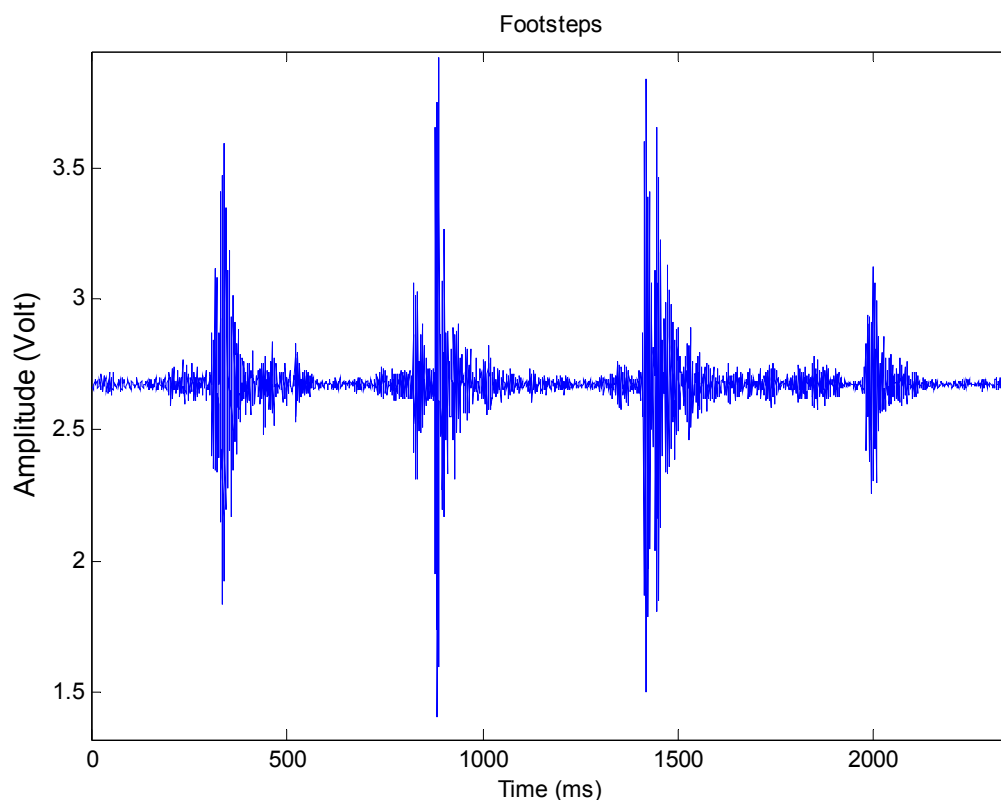
Συνοψίζοντας, αναφέρουμε ότι τα βήματα ενός ανθρώπου έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της παρουσίας του:

- **Κρουστική - Παλμική φύση της διέγερσης.** Η κρουστική διέγερση, που προκαλεί το χτύπημα του πέλματος στο έδαφος προκαλεί τη διέγερση του εδάφους στις φυσικές του συχνότητες, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5. Οι ερευνητές της [71] προχωρούν σε μια λεπτομερή ανάλυση ενός βήματος χρησιμοποιώντας κάμερα και επιταχυνσιόμετρο από την οποία προκύπτει ότι ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της φάσης της στάσης είναι περίπου 200 ms, ανάλογα βέβαια με τον τύπο του βαδίσματος. Το μεγαλύτερο ποσό της σεισμικής ενέργειας κατανέμεται στο εύρος των 10 - 100 Hz [72] και η επιτάχυνση, που προκαλείται στο έδαφος είναι της τάξης των 10^{-6} με 10^{-5} g, ενώ για ένα κινούμενο όχημα, είναι της τάξης των 10^{-5} με 10^{-3} g.



Εικόνα 5: Σεισμική απόκριση εδάφους από ένα βήμα

- **Ρυθμός - Περιοδικότητα.** Ο ρυθμός, με τον οποίο προκαλούνται οι κρουστικές διεγέρσεις του εδάφους, εξαρτάται από την ταχύτητα του ανθρώπου που περπατά, αλλά συνήθως, παραμένει επαναλαμβανόμενος, παρέχοντας μια χαρακτηριστική σεισμική υπογραφή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6. Η συχνότητα είναι συνήθως γύρω στα 2 Hz, κυμαίνεται όμως από τα 0,9 - 1 Hz για αργό, προσεκτικό βάδισμα, μέχρι και τα 3,5 Hz για γρήγορο τρέξιμο. Η χαρακτηριστική, περιοδική σειρά από αιχμές μπορεί να διαχωριστεί εύκολα από άλλου είδους σήματα ή θόρυβο, όπως τα κινούμενα οχήματα, τις σεισμικές δονήσεις που προκαλεί η κίνηση των θάμνων και των δέντρων ή από άλλες πηγές. Σε συνδυασμό με την κρουστική φύση της διέγερσης, ο ρυθμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση ενός κινούμενου ανθρώπου [72], [73].



Εικόνα 6: Σεισμική απόκριση εδάφους από το βάδισμα ενός ανθρώπου

3.1.2. Υφιστάμενες Μέθοδοι

Οι περιοδικά επαναλαμβανόμενες κρουστικές διεγέρσεις είναι το βασικό στοιχείο, που επιτρέπει την αναγνώριση ενός ανθρώπου, ο οποίος κινείται εντός

της εμβέλειας ενός σεισμικού αισθητήρα. Σκοπός της επεξεργασίας του σεισμικού σήματος είναι ο εντοπισμός αυτών των χαρακτηριστικών και η διάκρισή τους, τόσο από τον σεισμικό θόρυβο, που επικρατεί στη συγκεκριμένη περιοχή, όσο και από παρόμοια σήματα, που μπορεί να έχουν προκληθεί με τυχαίο τρόπο ή από κάποια άλλη σεισμική δραστηριότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο εντοπισμός του ρυθμού των διεγέρσεων επιτυγχάνεται είτε χρησιμοποιώντας κάποιο ελάχιστο κατώφλι στο πλάτος του σήματος και μετρώντας τη συχνότητα υπέρβασής του, είτε αναλύοντας την περιβάλλουσα του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, υπολογίζοντας τη συχνότητα των κρουστικών διεγέρσεων.

Οι ερευνητές της [65] χρησιμοποιούν την περιβάλλουσα του σεισμικού σήματος και μια μέθοδο windowing για την διαίρεση των δεδομένων σε αλληλεπικαλυπτόμενα χρονικά παράθυρα εύρους 4 δευτερολέπτων. Για τον εντοπισμό ενός βήματος υπολογίζεται η συχνότητα των διαδοχικών μέγιστων μέσα στο χρονικό παράθυρο, μετρώντας τον αριθμό τους και διαιρώντας τον με το χρονικό διάστημα του παραθύρου. Αν η συχνότητα αυτή είναι κοντά στα 2 Hz τότε πρόκειται για βήματα. Ο εντοπισμός των μέγιστων επιτυγχάνεται με την χρήση ενός ρυθμιζόμενου κατωφλίου.

Αντίστοιχα χαρακτηριστικά του βαδίσματος χρησιμοποιούνται και σε άλλες εργασίες [74], [75]. Ο υπολογισμός όμως της συχνότητας γίνεται με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier (FFT) στο σήμα που προκύπτει μετά από τον υπολογισμό της περιβάλλουσας. Η παρουσία ενός ανθρώπου υποδηλώνεται από την εύρεση των εξής χαρακτηριστικών: 1) Μια βασική συχνότητα στην περιοχή των 0,5 με 3,5 Hz, 2) η βασική συχνότητα πρέπει να έχει μια δεύτερη ή τρίτη αρμονική, 3) η βασική συχνότητα πρέπει να είναι τουλάχιστον 11 dB πάνω από το επίπεδο θορύβου και η αρμονική να είναι τουλάχιστον 7 dB πάνω από το επίπεδο θορύβου ή και το ανάποδο. Το σύστημα που έχει υλοποιηθεί αποτελείται από έναν μικροελεγκτή της Texas Instruments (MSP430) για τον έλεγχο όλων των λειτουργιών και για τον υπολογισμό του FFT χρησιμοποιείται ένας DSP της Texas Instruments (TMS320VC5509). Το σύστημα καταναλώνει 1,15 mW σε power-saving mode, 30,85 mW, όταν λειτουργεί ο μικροελεγκτής και ο DSP είναι σε

κατάσταση αναμονής και 55,75 mW, όταν λειτουργεί ο μικροελεγκτής και ο DSP επεξεργάζεται τα δεδομένα. Σε κάθε περίπτωση το υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας είναι σβηστό. Για τη λειτουργία του, πρέπει να προστεθούν άλλα 314,88 mW στις παραπάνω καταναλώσεις.

Για τη διάκριση του βήματος από κάποιο άλλο σεισμικό γεγονός αναφέρονται στη βιβλιογραφία δύο κυρίως μέθοδοι. Η πρώτη είναι μέσω της κυρτότητας, ενός στατιστικού μεγέθους του πλάτους του σήματος. Σύμφωνα με τους ερευνητές της [72] τα βήματα μπορούν να διακριθούν από τις υπόλοιπες σεισμικές πηγές, όπως οχήματα, κίνηση δέντρων και άνεμος από την κρουστική τους φύση. Η κρουστική τους μορφή φαίνεται καθαρά στη σεισμική τους υπογραφή και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με χρήση του στατιστικού μέγεθος της κυρτότητας. Απότομα σήματα, που διαρκούν λίγο και φθίνουν γρήγορα, όπως τα βήματα, παρουσιάζουν μεγάλη τιμή για την κυρτότητα. Η δεύτερη είναι με την χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων (wavelet transform). Χρησιμοποιείται η πιο απλή συνάρτηση κυματιδίου, η Haar, για την τελική εξαγωγή ενός χαρακτηριστικού διανύσματος (feature vector). Το διάνυσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό μιας κρουστικής διέγερσης, που έχει προέλθει από βήμα ή από κάποιο άλλο αίτιο, όπως για παράδειγμα από την πτώση ενός αντικειμένου [73].

Οι ερευνητές της [77] συνδυάζουν την τιμή της κυρτότητας με τη συχνότητα των βημάτων, η οποία προκύπτει από τον ανάστροφο FFT του φυσικού λογάριθμου του μετασχηματισμού FFT του σήματος (cepstrum). Χρησιμοποιούνται 2.048 δευτερόλεπτα, τα οποία θεωρητικώς περιλαμβάνουν 4-5 βήματα, για τα οποία υπολογίζεται η κυρτότητα και συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Σε περίπτωση που το κριτήριο της κυρτότητας ικανοποιείται και η συχνότητα των βημάτων αντιστοιχεί σε αυτή του βαδίσματος, τότε ο στόχος κατηγοριοποιείται σαν άνθρωπος.

Ενδιαφέρουσα προσέγγιση στο πρόβλημα αποτελούν οι εργασίες των Pakhomov και Goldburt [81]-[84]. Σαν αισθητήρας χρησιμοποιείται και εδώ ένα γεώφωνο, η επεξεργασία του σήματος, γίνεται στο πεδίο του χρόνου με ορισμό κατωφλίων στο πλάτος του σήματος ενώ η μέση κατανάλωση των τριών γενιών

πρωτότυπων κόμβων είναι 200, 45 και 6 mW αντίστοιχα, και δεν αφορούν τον ασύρματο πομποδέκτη, ο οποίος μπορεί να προστεθεί εξωτερικά.

Οι σεισμικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε όλες τις παραπάνω εργασίες είναι τα γεώφωνα.

3.2.Προτεινόμενες Λύσεις

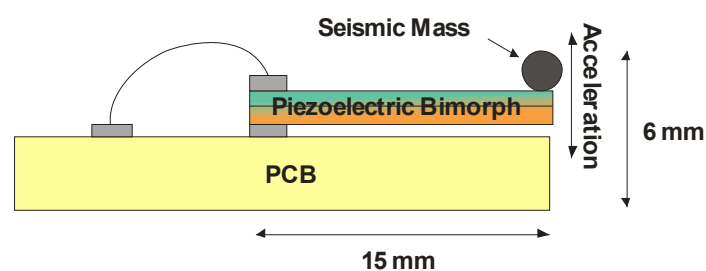
Προτείνεται η χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιομέτρου, που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής του Ε.Μ.Π. στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του κ. Κόλλια [90], το οποίο έχει πολύ μικρό κόστος και πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας, δεδομένου ότι ο πιεζοκρύσταλλος είναι ενεργός αισθητήρας, παράγοντας φορτία. Η εμβέλεια ανίχνευσης του συγκεκριμένου αισθητήρα περιορίζεται στα 7-10 μέτρα αλλά το μικρό μέγεθος και κόστος τον καθιστά ενδιαφέρουσα επιλογή έναντι των γεωφώνων και των MEMS. Επίσης, προτείνεται ένας απλός αλλά αξιόπιστος αλγόριθμος για τον εντοπισμό ενός ανθρώπου, που περπατάει σε μικρή απόσταση από αυτόν, ο οποίος βασίζεται σε ένα μεταβλητό κατώφλι για τον εντοπισμό των σεισμικών διεγέρσεων και μια μηχανή καταστάσεων για την λήψη της απόφασης για την ανθρώπινη παρουσία [92]. Οι λύσεις που προτείνονται στόχο έχουν την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μετά την ανάπτυξη των αλγορίθμων υλοποιείται ο Ασύρματος Κόμβος Ανίχνευσης Προσωπικού χρησιμοποιώντας ένα κόμβο Mica2Dot και γίνονται αναλυτικές μετρήσεις για την κατανάλωση ενέργειας και τη διάρκεια ζωής του βάσει συγκεκριμένων προφίλ λειτουργίας με σκοπό την επίτευξη χρόνου διαρκούς λειτουργίας τουλάχιστον 30 ημερών. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι για να λειτουργήσει ο Ασύρματος Κόμβος ένα μήνα με 2 απλές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μεγέθους AA των 2700 mAh θα πρέπει να έχει μια μέση κατανάλωση των 3.75 mA ή 12.375 mW.

3.3.Ανάπτυξη Μεθόδου Ανίχνευσης Προσωπικού

3.3.1. Αισθητήρας

Το επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ερευνητικής εργασίας του κ. Κόλλια [90]. Είναι ένα πιεζοηλεκτρικό

επιταχυνσιόμετρο κάμψης, το οποίο βασίζεται στα πιεζοηλεκτρικά δίμορφα στοιχεία και αποτελείται από μια πιεζοηλεκτρική δοκό από PZT (Lead Zirconate Titanate), η οποία πακτώνεται σταθερά στο ένα της άκρο πάνω στην τυπωμένη πλακέτα με χρήση λεπτού στρώματος κόλλησης. Το σημείο πάκτωσης αποτελεί και τον ένα ακροδέκτη του αισθητήρα. Ο δεύτερος ακροδέκτης ενώνεται σε κάποιο άλλο σημείο της πλακέτας μέσω ενός λεπτού σύρματος. Στο ελεύθερο άκρο της δοκού στερεώνεται η σεισμική μάζα, η οποία είναι μια σφαίρα μολύβδου κατάλληλης μάζας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Το σύστημα πλακέτας - αισθητήρα τοποθετείται παράλληλα προς το κινούμενο επίπεδο. Όταν υπάρχει κίνηση, η δοκός κάμπτεται λόγω αδράνειας και λειτουργεί σαν σύστημα μάζας - ελατηρίου με συγκεκριμένη σταθερά απόσβεσης και συχνότητα συντονισμού. Η σταθερά αυτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού, από το υλικό που είναι κατασκευασμένη και από τη θέση και τη μάζα της μολύβδινης σφαίρας. Λεπτομερής θεωρητική μελέτη της εξάρτησης της ευαισθησίας και της συχνότητας συντονισμού από την σεισμική μάζα υπάρχει στην [91]. Κατασκευάστηκαν τρεις αισθητήρες, των οποίων ο συντονισμός μετρήθηκε στα 357 Hz, 385 Hz και 386 Hz αντίστοιχα. Οι μικρές διαφορές μεταξύ τους οφείλονται σε κατασκευαστικά λάθη κατά την πάκτωση της δοκού και την κόλληση της μάζας. Σύμφωνα με την [91] ο θόρυβος του επιταχυνσιόμετρου είναι $\sim 250 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$, γεγονός που επιτρέπει την ανίχνευση των βημάτων.



Εικόνα 7: Πιεζοηλεκτρικό Επιταχυνσιόμετρο και σημείο στήριξης πάνω στην πλακέτα

Γενικά, ένας αισθητήρας επιτάχυνσης είναι κατασκευασμένος να λειτουργεί στη γραμμική περιοχή του, δηλαδή, μακριά από τον συντονισμό, στην περιοχή όπου η συνάρτηση μεταφοράς του είναι ευθεία γραμμή. Για ένα γεώφωνο, ο συντονισμός βρίσκεται σε πολύ χαμηλές συχνότητες (μερικά Hz) και η χρήσιμη περιοχή λειτουργίας είναι πάνω από αυτόν. Το αντίθετο συμβαίνει στην

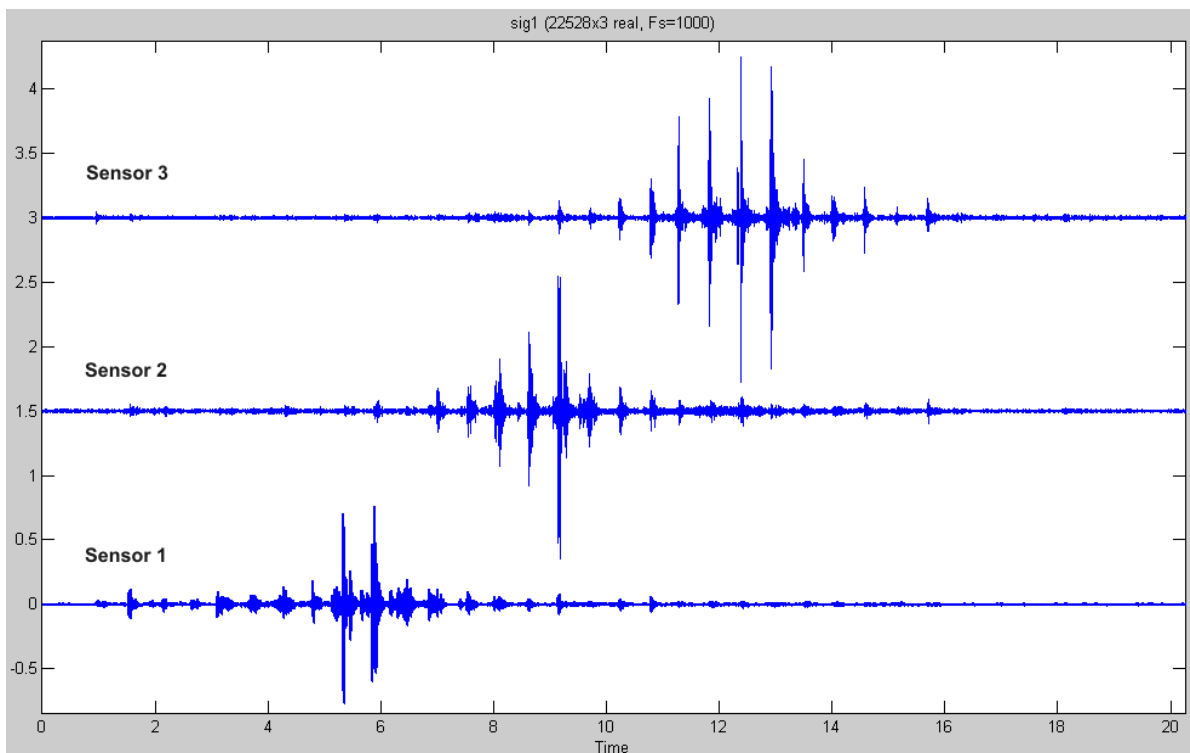
περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών ή των MEMS επιταχυνσιομέτρων, στα οποία ο συντονισμός βρίσκεται πολύ ψηλά (μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες kHz). Στην περιοχή του συντονισμού, η ευαισθησία αυξάνεται μη γραμμικά συναρτήσει της συχνότητας, παρουσιάζοντας μια χαρακτηριστική ακμή στο διάγραμμα της ευαισθησίας του αισθητήρα. Για την ανίχνευση των βημάτων ενός ανθρώπου δεν απαιτείται η γνώση της ακριβούς σεισμικής απόκρισης του εδάφους στην κρουστική διέγερση του βήματος. Αυτό που ενδιαφέρει είναι ο εντοπισμός των ρυθμικών, κρουστικών διεγέρσεων από την μεγαλύτερη δυνατή απόσταση. Η λήψη της σεισμικής υπογραφής με χρήση ενός ακριβούς, γραμμικού και με μεγάλη ευαισθησία αισθητήρα είναι περιττή. Κατ' επέκταση, ο αισθητήρας δεν είναι αναγκαίο να λειτουργεί στην γραμμική του περιοχή, αλλά ενδιαφέρει κυρίως να λειτουργεί στην περιοχή μέγιστης ευαισθησίας. Η περιοχή αυτή είναι γύρω από το συντονισμό, σημείο στο οποίο η ευαισθησία μεγιστοποιείται, αλλά παράλληλα μεγιστοποιείται και η μη γραμμικότητα της εξόδου. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι συχνότητες στις οποίες μεταδίδεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας για ένα βήμα είναι η περιοχή των 10 - 100 Hz. Για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής εξόδου του αισθητήρα, άρα και απόστασης ανίχνευσης ενός βήματος, θα πρέπει να κατέβει ο συντονισμός του κοντά στις συχνότητες αυτές, στόχος που δεν επιτεύχθηκε απόλυτα.

Η κατανάλωση του αισθητήρα μαζί με το κύκλωμα προετοιμασίας του σήματος μετρήθηκε στα 2,2 mA.

3.3.2. Σύνολο Δεδομένων Αξιολόγησης Αλγορίθμων

Για τη λήψη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τρία πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, τα οποία τοποθετήθηκαν σε ευθεία γραμμή και σε απόσταση 5 μέτρων μεταξύ τους. Λήφθηκαν σεισμικές υπογραφές για βάδισμα και τρέξιμο από δύο ανθρώπους βάρους 60 και 75 κιλών αντίστοιχα. Οι άνθρωποι περπατούν σε ευθεία γραμμή παράλληλη αυτής που ορίζουν οι αισθητήρες, ξεκινώντας 10 μέτρα πριν και σταματώντας 10 μέτρα μετά από τους αισθητήρες. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της διαδρομής και των αισθητήρων είναι 1 μέτρο. Λήφθηκαν μετρήσεις από 16 διαδρομές εκ των οποίων οι 8 (4 το κάθε άτομο) αφορούν

βάδισμα και 8 τρέξιμο. Θεωρώντας τις μετρήσεις από κάθε αισθητήρα ανεξάρτητες, προκύπτει ένα σύνολο δεδομένων με 48 σήματα των 20 δευτερολέπτων, που το καθένα περιέχει 10 - 20 καταγεγραμμένα βήματα. Τα σήματα μελετήθηκαν με εποπτική μέθοδο και μετρήθηκαν συνολικά 896 βήματα εκ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό είναι ευδιάκριτα, αλλά υπάρχουν και αρκετά με πολύ θόρυβο, ο οποίος οφείλεται κυρίως στην μετακίνηση των καλωδίων σύνδεσης από τον άνεμο και σε σύρσιμο των ποδιών κατά το βηματισμό λόγω του ανώμαλου οδοστρώματος. Η λήψη των σημάτων έχει γίνει με μια κάρτα λήψης δεδομένων της National Instruments (USB-6009) με 14-bit ακρίβεια και συχνότητα δειγματοληψίας τα 1000 Hz. Η τάση τροφοδοσίας των αισθητήρων είναι τα 6 V. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σήμα βαδίσματος από ένα άτομο 60 kg με κατεύθυνση από τον αισθητήρα 1 προς τον αισθητήρα 3.



Εικόνα 8: Καταγεγραμμένο σήμα βαδίσματος από τον αισθητήρα 1 προς τον αισθητήρα 3. Για λόγους παρουσίασης τα σήματα βρίσκονται γύρω από τα 0 , 1.5, 3 V αντίστοιχα

3.3.3. Αλγόριθμος Ανίχνευσης Ανθρώπινης Παρουσίας

Ο αλγόριθμος για την ανίχνευση της ανθρώπινης παρουσίας βάσει των βημάτων, αποτελεί μια ευρετική μέθοδο (heuristic), η οποία έχει προκύψει μετά από μελέτη τόσο της βιβλιογραφίας, όσο και των δεδομένων που ελήφθησαν και δημιουργήθηκε με τις εξής προδιαγραφές:

1. Ένα σεισμικό γεγονός ξεκινά τη στιγμή, που η τάση εξόδου του αισθητήρα ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο κατώφλι.
2. Η σεισμική διέγερση που προκαλείται από ένα βήμα, απαιτεί λιγότερο από 250 msec για να αποσβεσθεί (Single_Step_Delay).
3. Στην περίπτωση αργού βαδίσματος ο χρόνος μεταξύ δύο βημάτων είναι μικρότερος του 1 sec ή του 1 Hz (Slow_Step).
4. Στην περίπτωση γρήγορου βαδίσματος ή τρεξίματος ο χρόνος μεταξύ δύο βημάτων είναι μεγαλύτερος των 334 msec ή 3 Hz (Fast_Step).
5. Θα πρέπει να ανιχνευθούν τουλάχιστον 3 βήματα.

Βάσει των παραπάνω εμπειρικών προδιαγραφών αναπτύσσεται ο αλγόριθμος σαν μια μηχανή τεσσάρων καταστάσεων στις οποίες μεταβαίνει το σύστημα ανάλογα με τις προκαλούμενες σεισμικές διαταραχές και τον χρόνο εντοπισμού τους.

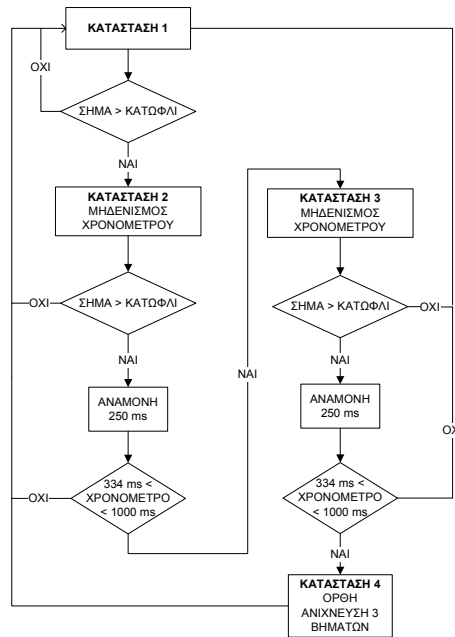
- **Κατάσταση 1** - Πρόκειται για την αρχική κατάσταση του συστήματος στην οποία βρίσκεται, όταν δεν έχει ανιχνευθεί κάποιο σεισμικό γεγονός και στην οποία επιστρέφει, όταν αναγνωρισθεί επιτυχώς ένας άνθρωπος ή όταν αναγνωρισθεί, ότι η σεισμική διαταραχή οφείλεται σε κάποιο άλλο αίτιο.
- **Κατάσταση 2** - Στην κατάσταση 2 μεταβαίνει το σύστημα μόλις το σήμα του σεισμικού αισθητήρα ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο κατώφλι (το οποίο παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και θα μελετηθεί εκτενώς στην παράγραφο 0). Ταυτόχρονα ξεκινάει ένας μετρητής (count) να μετράει τον χρόνο που περνάει από την πρώτη ανίχνευση. Το σύστημα αγνοεί πιθανές διαταραχές, που προκαλούνται σε χρόνο μικρότερο των 250 ms (Single_Step_Delay - προδιαγραφή 1) έτσι ώστε να δοθεί ο απαραίτητος χρόνος να αποσβεστεί η

ταλάντωση. Σε περίπτωση που το επόμενο σεισμικό γεγονός ανιχνευθεί εντός του χρονικού διαστήματος των 334 – 1000 ms (Fast_Step – Slow_Step), χρόνοι που ορίζονται εμπειρικά και αντιστοιχούν στον ρυθμό βαδίσματος – τρεξίματος του μέσου ανθρώπου (προδιαγραφές 3 και 4), τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση 3. Σε περίπτωση που το επόμενο σεισμικό γεγονός ανιχνευθεί σε χρόνο από 250 – 334 ms ή σε χρόνο μεγαλύτερο των 1000 ms τότε δεν προέρχεται από άνθρωπο και έτσι το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση 1.

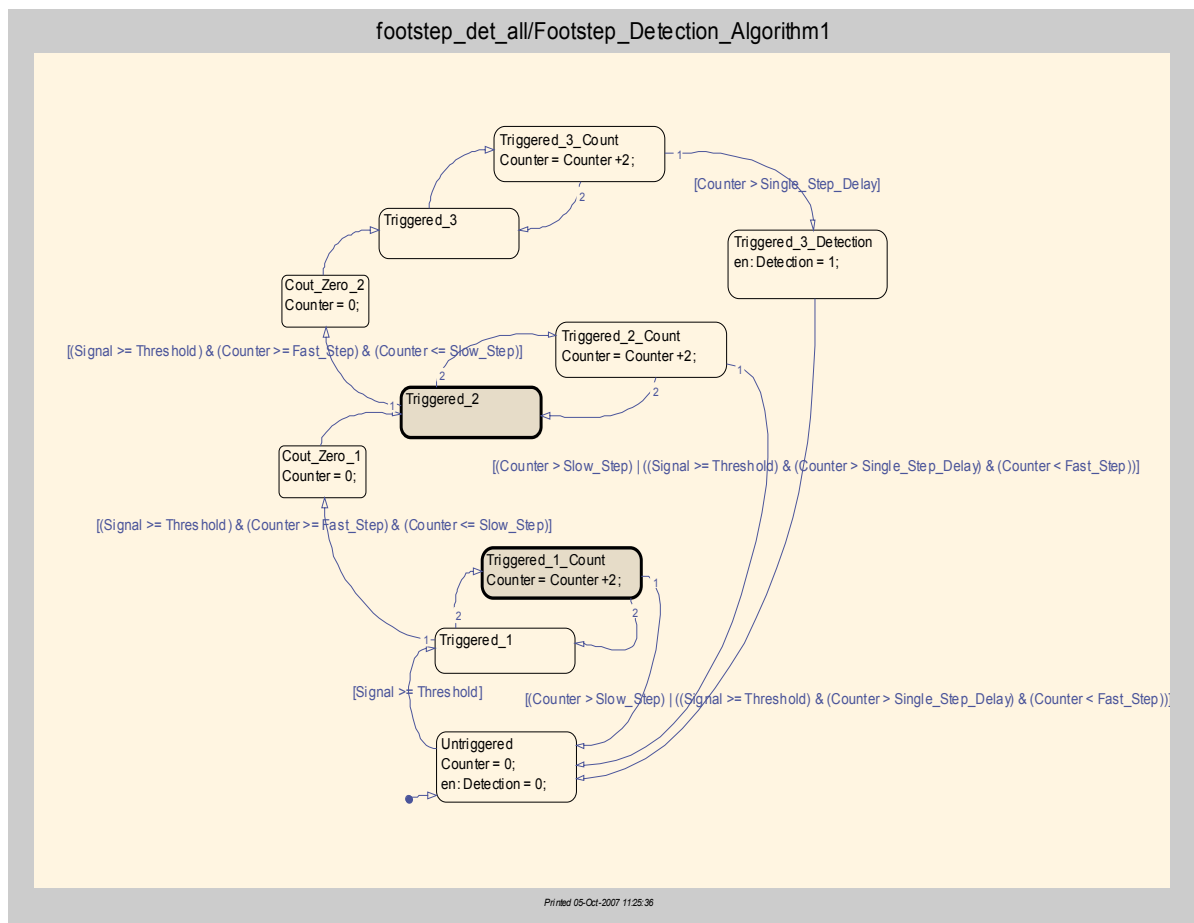
- **Κατάσταση 3** – Στην κατάσταση 3 μεταβαίνει το σύστημα σε περίπτωση που η σεισμική διέγερση προκλήθηκε μέσα στον χρονικό διάστημα των 334 – 1000 ms. Ο μετρητής μηδενίζεται και το σύστημα περιμένει να ικανοποιηθούν οι ίδιες συνθήκες, όπως και κατά την μετάβαση από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 3 ή στην κατάσταση 1. Σε περίπτωση που υπάρξει σεισμικό γεγονός, που έχει τα χαρακτηριστικά βήματος τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση 4, διαφορετικά επιστρέφει στην κατάσταση 1.
- **Κατάσταση 4** – Στην κατάσταση 4 μεταβαίνει το σύστημα μετά από ορθή ανίχνευση 3 ρυθμικών σεισμικών διαταραχών, που έχουν τα χαρακτηριστικά ενός βήματος. Με αρκετά μεγάλη βεβαιότητα η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να αποδοθεί σε ανθρώπινο βηματισμό. Αποστέλλεται το κατάλληλο μήνυμα και το σύστημα επιστρέφει στην κατάσταση 1.

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου. Η υλοποίησή του έγινε σε Stateflow διάγραμμα, που υποστηρίζεται από την Matlab Simulink και παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. Οι καταστάσεις 1-4 εμφανίζονται σαν Untriggered, Triggered_1, Triggered_2, Triggered_3 αντίστοιχα και οι συνθήκες, που πρέπει να ικανοποιηθούν για τη μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη φαίνονται πάνω στο βέλος, που οδηγεί προς τις διάφορες καταστάσεις. Είσοδος στο μπλοκ Ανίχνευσης Προσωπικού αποτελεί το σήμα (Signal), το

κατώφλι (Threshold) καθώς και οι μεταβλητές Single_Step_Delay, Fast_Step, Slow_Step για τους χρόνους των βημάτων.



Εικόνα 9: Αλγόριθμος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας



Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας από βήματα

3.3.4. Υπολογισμός Κατώφλιων

Ουσιώδες στοιχείο του αλγορίθμου ανίχνευσης προσωπικού αποτελεί ο κατάλληλος καθορισμός του κατώφλιου εντοπισμού ενός σεισμικού γεγονότος. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, το επίπεδο του σεισμικού θορύβου σε μια περιοχή αλλάζει, ειδικά αν ο χώρος στον οποίο είναι εγκατεστημένος ο κόμβος έχει έντονη σεισμική δραστηριότητα. Επίσης η DC τάση εξόδου των αισθητήρων μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία της περιοχής αλλά και συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας των μπαταριών, η οποία ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία μέχρι το ελάχιστο όριο τροφοδοσίας του κόμβου. Το κατώφλι θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμο σε αυτές τις μεταβολές και κυρίως στο θέμα του θορύβου, δεδομένου ότι στον Ασύρματο Κόμβο δεν υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης κάποιου αλγορίθμου αποθορυβοποίησης. Αναπτύχθηκαν τρεις αλγόριθμοι για τον υπολογισμό του κατώφλιου και δοκιμάστηκαν με χρήση πραγματικών δεδομένων. Ο πρώτος είναι ένας απλός αλγόριθμος, που δημιουργεί ένα σταθερό κατώφλι μερικά mV πάνω από τον μέσο όρο της κυματομορφής, ο δεύτερος δημιουργεί ένα μεταβλητό κατώφλι βάσει της διαφοράς του τρέχοντος δείγματος από την μέση τιμή του σήματος και ο τρίτος δημιουργεί ένα μεταβλητό κατώφλι βάσει της τυπικής απόκλισης και της μέσης τιμής του σήματος.

3.3.4.1. Σταθερό Κατώφλι

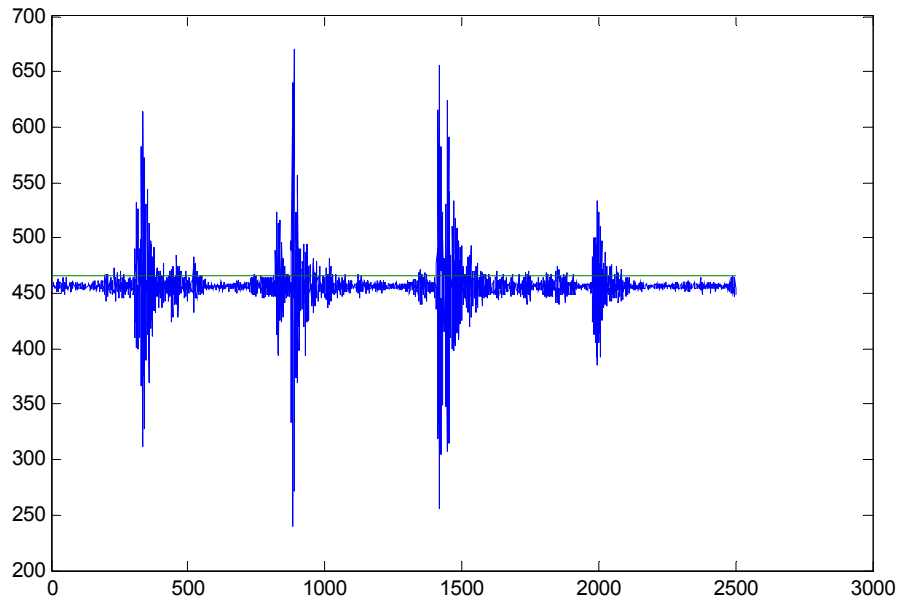
Η πιο απλή μέθοδος υπολογισμού ενός κατώφλιου βασίζεται στην εύρεση της μέσης τιμής του σήματος και της πρόσθεσης σε αυτή μιας σταθεράς, έτσι, ώστε το κατώφλι, που προκύπτει, να είναι μεγαλύτερο του θορύβου. Επιλέγεται η εύρεση της μέσης τιμής κάθε 128 ms ή κάθε 128 σημεία με ρυθμό δειγματοληψίας τα 1000 Hz για την διευκόλυνση της πράξης της διαιρέσης στον μικροεπεξεργαστή, αφού η διαίρεση με δυνάμεις του 2 γίνεται με απλό shift του καταχωρητή, που περιέχει τον διαιρετέο. Ως σήμα εισόδου μπορεί να δοθεί απευθείας η έξοδος του επιταχυνσιομέτρου, έστω S , αλλά παρατηρείται μικρή βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου και σημαντική βελτίωση των επιδόσεων της ανίχνευσης αν υπολογιστεί η απόλυτος τιμή του σήματος, αφού πρώτα του αφαιρεθεί η μέση

τιμή του (\bar{S}). Δηλαδή το νέο σήμα θα είναι: $S' = |S - \bar{S}|$. Συνήθως υπολογίζεται η ενέργεια του σήματος που είναι $E = (S - \bar{S})^2$ αλλά για την αποθήκευση του αποτελέσματος απαιτούνται 20-bit, δεδομένου ότι το σήμα μπορεί να φτάσει μέχρι το 2^{10} (10-bit A/D). Οι πράξεις όμως με απλούς ακεραίους των 16-bit γίνονται πολύ γρηγορότερα στον μικροελεγκτή και έτσι προτιμάται ο υπολογισμός του \bar{S} , για την αποθήκευση του οποίου, αρκούν τα 16-bits. Αποτέλεσμα της εκτέλεσής του αλγορίθμου για τα σήματα S και S' παρουσιάζεται στην Εικόνα 11, όπου το κατώφλι φαίνεται με πράσινο χρώμα και είναι ορισμένο στα 53 mV και τα 29 mV πάνω στο αρχικό σήμα αντίστοιχα.

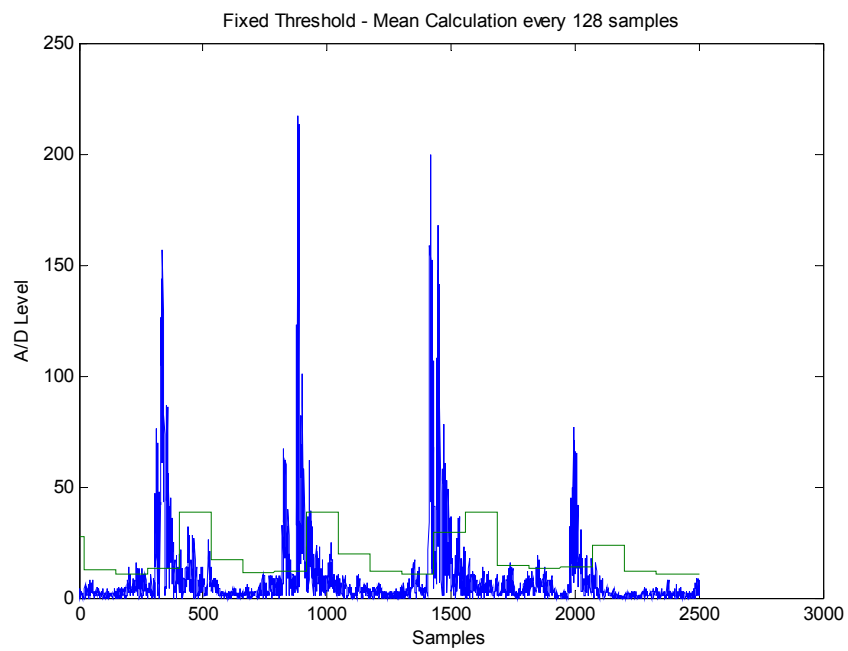
Παρατηρείται, ότι η τιμή του κατωφλίου αλλάζει κάθε 128 σημεία, λόγω της νέας τιμής του \bar{S} . Η αργή αυτή μεταβολή είναι επιθυμητή και επιτρέπει στο κατώφλι, να ακολουθεί το επίπεδο θορύβου του σήματος. Για την διερεύνηση της απόδοσης του αλγορίθμου ανίχνευσης προσωπικού με χρήση των σημάτων S και S' εκτελέστηκε ο αλγόριθμος, σε όλα τα διαθέσιμα σήματα με τις παρακάτω συνθήκες:

1. Χρήση του σήματος S, υπολογισμός της \bar{S} κάθε 128 σημεία, ορισμός του κατωφλίου στα 53 mV
2. Χρήση του σήματος S, υπολογισμός της \bar{S} κάθε 128 σημεία, ορισμός του κατωφλίου στα 41 mV
3. Χρήση του σήματος S', υπολογισμός της \bar{S} κάθε 128 σημεία, ορισμός του κατωφλίου στα 29 mV

Η ανώτερη επίδοση της χρήσης του S' γίνεται φανερή στον Πίνακα 6 και το επεξεργασμένο σήμα S' θα χρησιμοποιείται από εδώ και πέρα από όλους τους αλγορίθμους.



(α)



(β)

Εικόνα 11: (α) Σταθερό κατώφλι 53 mV σε τμήμα του σήματος S, (β) Σταθερό κατώφλι 29 mV στο ίδιο τμήμα του σήματος S'

Πίνακας 6: Σύγκριση σταθερών κατωφλίων

	S / 53 mV		S / 41 mV		S' / 29 mV		Αριθμός Βημάτων
	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	
Άτομο 1 - Περπάτημα	111	6	153	12	177	0	280
Άτομο 1 - Τρέξιμο	108	6	111	9	165	12	223
Άτομο 2 - Περπάτημα	78	18	102	12	102	15	186
Άτομο 2 - Τρέξιμο	84	3	99	18	117	9	208
Σύνολο	381	33	465	51	561	36	897
Ποσοστό	42,47%	3,68%	51,84%	5,69%	62,54%	4,01%	

3.3.4.2. Μεταβλητό Κατώφλι βάσει της Περιβάλλουσας του Σήματος

Για τον υπολογισμό του κατωφλίου απαιτείται αρχικά ο υπολογισμός της μέσης τιμής του σήματος, ο οποίος μπορεί να γίνει από την παρακάτω αναδρομική σχέση, που υλοποιεί στην ουσία ένα βαθυπερατό φίλτρο.

$$A_i = dA_{i-1}/2^b \text{ με}$$

$$dA_i = dA_{i-1} + (S'_i - A_i) \text{ για } i=1,2,\dots,N$$

Από κάθε νέα τιμή του σήματος αφαιρείται η μέση τιμή που είχε υπολογιστεί κατά τη λήψη του προηγούμενου δείγματος και η διαφορά αυτή διαιρείται με ένα συντελεστή 2^b . Το αποτέλεσμα προστίθεται στην προηγούμενη τιμή της μέσης τιμής του σήματος και προκύπτει η νέα μέση τιμή.

Για τον υπολογισμό του κατωφλίου υπολογίζεται η απόλυτος τιμή της διαφοράς της νέας τιμής του σήματος από τη μέση τιμή και αφαιρείται από την τιμή του κατωφλίου. Το αποτέλεσμα διαιρείται με ένα συντελεστή 2^a και αφαιρείται από την προηγούμενη τιμή του κατωφλίου. Η τελική τιμή του κατωφλίου, που εισάγεται στον αλγόριθμο ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας, προκύπτει από την τιμή του T_i με πρόσθεση σε αυτό μιας σταθεράς για να ανεβάσει το κατώφλι μερικά mV πάνω από το σήμα.

$$T_i = dT_{i-1}/2^a$$

$$dT_i = dT_{i-1} - (T_i - |S'_i - A_i|)$$

$$Final_Threshold = T_i + C$$

Οι τιμές των συντελεστών a , b και C επηρεάζουν την απόδοση του αλγόριθμου ανίχνευσης και οι τιμές που ορίστηκαν προέκυψαν μετά από δοκιμές και παρατηρήσεις, χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων αξιολόγησης. Η τιμή του συντελεστή C επιλέχθηκε ίση με 5 (A/D στάθμες), ώστε το κατώφλι που δημιουργείται, απουσία διέγερσης, να έχει ίδια περίπου τιμή με το σταθερό κατώφλι για να υπάρχει αμεσότερη σύγκριση μεταξύ των δύο. Για τον συντελεστή b επιλέγεται η τιμή 6, ώστε η μέση τιμή του σήματος να μην επηρεάζεται από τις γρήγορες και απότομες μεταβολές, που προκαλούν τα βήματα. Ο συντελεστής που επηρεάζει κατά μεγάλο ποσοστό την απόδοση του συστήματος είναι κυρίως ο συντελεστής a . Η βέλτιστη τιμή του θα βρεθεί μέσω της καμπύλης ROC.

3.3.4.1.Επιλογή βέλτιστης τιμής συντελεστή a με χρήση της καμπύλης ROC

Η καμπύλη ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) ή καμπύλη λειτουργικών χαρακτηριστικών, εκφράζει τη σχέση του ποσοστού των αληθώς θετικών και ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων του πειράματος, καθώς μεταβάλλεται προοδευτικά η τιμή μιας μεταβλητής, εν προκειμένω της μεταβλητής a .

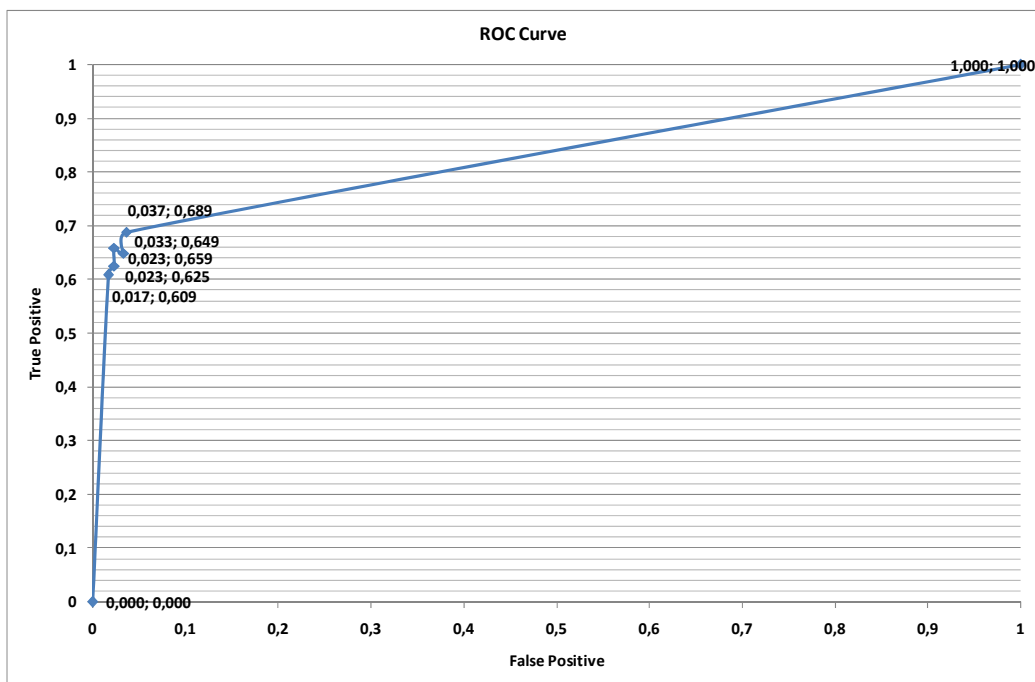
Η θέση κάθε σημείου της «εμπειρικής» καμπύλης ROC προσδιορίζεται από ένα ορισμένο ποσοστό αληθών θετικών και ψευδών θετικών αποτελεσμάτων του πειράματος, που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής. Η καμπύλη αυτή εγγράφεται μέσα σε ένα τετράγωνο, στις τέσσερις γωνίες του οποίου, αντιστοιχούν οι ακραίες τιμές (0 και 1) του ποσοστού Αληθών Θετικών και των Ψευδών Θετικών αποτελεσμάτων, καθώς και των συμπληρωματικών αυτών ποσοστών Ψευδών Αρνητικών και Αληθών Αρνητικών.

Για τη κατασκευή των καμπύλων ROC του πειράματος, εκτελείται ο Αλγόριθμος Ανίχνευσης Ανθρώπινης Παρουσίας χρησιμοποιώντας το κατώφλι περιβάλλουσας, για πέντε διαφορετικές τιμές της μεταβλητής a (3-7). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Επιδόσεις με κατώφλι περιβάλλουσας, συναρτήσει του συντελεστή a

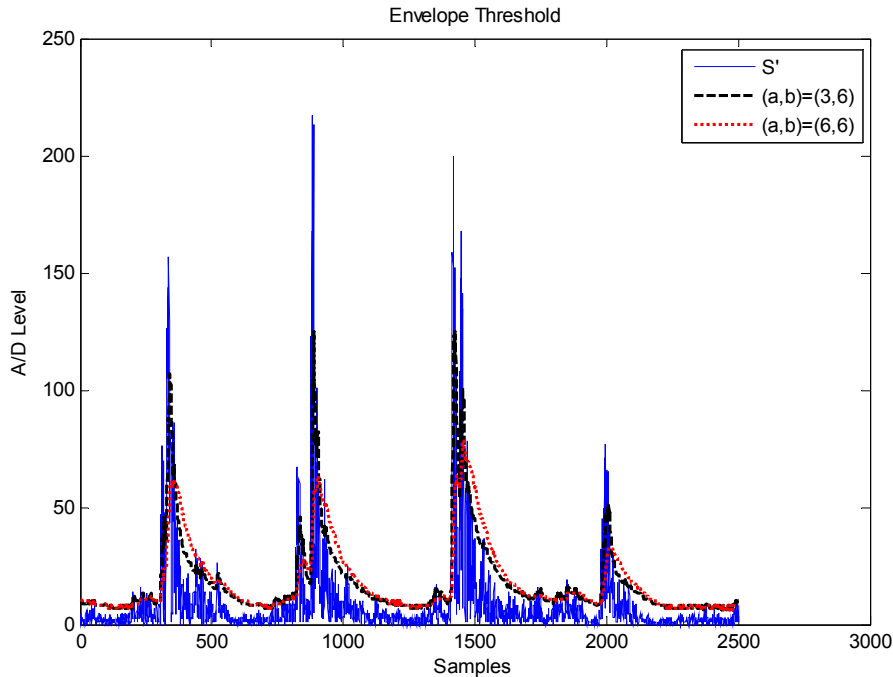
	Περιβάλλουσας (a,b)=(3,6)		Περιβάλλουσας (a,b)=(4,6)		Περιβάλλουσας (a,b)=(5,6)		Περιβάλλουσας (a,b)=(6,6)		Περιβάλλουσας (a,b)=(7,6)		Αριθμός Βημάτων
	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	
Σύνολο	618	33	546	15	561	21	591	21	582	30	897
Ποσοστό	68,90%	3,68%	60,87%	1,67%	62,54%	2,34%	65,89%	2,34%	64,88%	3,34%	

Από τις τιμές αυτές σχεδιάζεται η καμπύλη ROC, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Καμπύλη ROC κατωφλιου περιβάλλουσας

Απαιτώντας το ποσοστό των εσφαλμένων ανιχνεύσεων να είναι κάτω από 3%, από την καμπύλη ROC μπορούμε να επιλέξουμε το σημείο, που δίνει ποσοστό ορθών ανιχνεύσεων 65,89% και εσφαλμένων 2,34%. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε τιμή του κατωφλιού b, ίση με 6. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε και κατά την υλοποίηση του κατωφλιού στον Κόμβο Ανιχνευσης Προσωπικού. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.5. Το κατώφλι που δημιουργείται για (a,b) = (3,6) και (6,6) παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Μεταβλητό κατώφλι βάσει της περιβάλλουσας

Ο αλγόριθμος βασίζεται σε μέρος κώδικα, για τον υπολογισμό της ενέργειας ακουστικού σήματος, του πανεπιστημίου του Vanderbilt, ο οποίος είναι ελεύθερα διαθέσιμος στην έκδοση 1.15 της εγκατάστασης του TinyOS.

3.3.4.2. Μεταβλητό Κατώφλι βάσει Στατιστικής Επεξεργασίας του Σήματος

Ο δεύτερος αλγόριθμος στηρίζεται στην υπόθεση ότι ο θόρυβος είναι σχετικά σταθερός, χωρίς απότομες μεταβολές. Βασίζεται σε προηγούμενη υλοποίηση [56] αλλά έχει τροποποιηθεί, ώστε να υπολογίζεται από το S' και όχι από την ενέργεια του σήματος. Η λειτουργία του έχει ως εξής:

Στην αρχή, υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για ένα μικρό μέρος του σήματος (0.512 sec ή 512 σημεία), το οποίο περιέχει μόνο θόρυβο και βρίσκονται οι αρχικές τιμές $\mu_i(0)$ και $\sigma_i(0)$ του θορύβου. Στη συνέχεια, κάθε επόμενη τιμή $S_i(n)$ του σήματος συγκρίνεται με την τιμή ενός κατώφλιου $T_i(n)$. Υποθέτοντας ότι ο θόρυβος ακολουθεί την κατανομή Gauss, μπορεί να οριστεί το κατώφλι $T_i(n)$ ως $T_i(n) = \mu_i(n-1) + C\sigma_i(n-1)$, όπου C είναι μια σταθερά, που έχει κατάλληλη τιμή, ώστε το κατώφλι που θα υπολογιστεί, να εξασφαλίζει χαμηλό

ρυθμό λανθασμένων εντοπίσεων διαταραχής. Από τις αρχικές τιμές των $\mu_i(0)$ και $\sigma_i(0)$ υπολογίζεται η αρχική τιμή του $T_i(0)$. Οι υπόλοιπες τιμές υπολογίζονται ως εξής:

- Αν $S'(n) \geq T_i(n-1)$ τότε η τιμή του κατώφλιου παραμένει ίδια με την προηγούμενη:

$$T_i(n) = T_i(n-1),$$

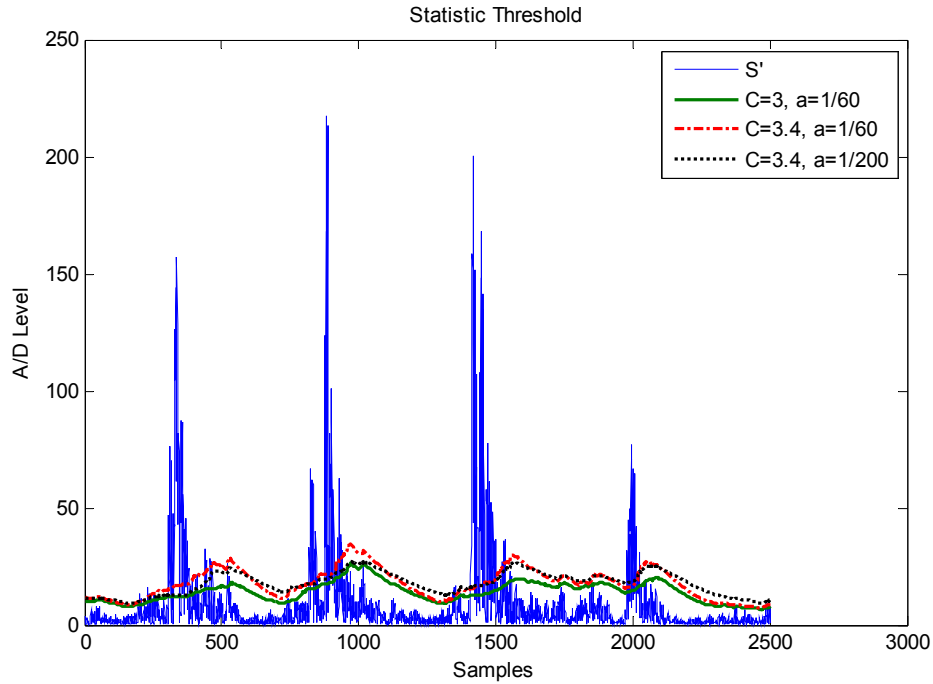
- Αν $S'(n) < T_i(n-1)$ τότε η τιμή του κατώφλιου θα ενημερωθεί από τις καινούριες τιμές που υπολογίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\mu_i(n) = (1-a)\mu_i(n-1) + aS'_i(n)$$

$$\sigma_i^2(n) = (1-a)\sigma_i^2(n-1) + a[S'_i(n) - \mu_i(n)]^2$$

$$T_i(n) = \mu_i(n-1) + C\sigma_i(n)$$

Πρακτικά, ο συντελεστής C καθορίζει, το πόσο θα μεταβληθεί το κατώφλι σε σχέση με την τυπική απόκλιση του σήματος ενώ ο συντελεστής a καθορίζει, το πόσο γρήγορα θα ακολουθεί το κατώφλι τις μεταβολές του σήματος. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσής του αλγορίθμου για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων C και a , παρουσιάζονται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Μεταβλητό κατώφλι βάσει στατιστικής επεξεργασίας του σήματος για διάφορες τιμές των συντελεστών C και a

3.3.5. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζεται αναλυτικά η απόδοση του αλγορίθμου ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας με χρήση των τριών διαφορετικών κατωφλίων και με διαφορετικές ρυθμίσεις για το κάθε κατώφλι. Στον τομέα των ορθών ανιχνεύσεων προηγείται ο αλγόριθμος με χρήση του κατωφλίου περιβάλλουσας και ρυθμίσεις $(a,b) = (3,6)$ με ποσοστό ορθών ανιχνεύσεων βημάτων 68,9% και λανθασμένων 5,07%. Ακολουθεί ο ίδιος αλγόριθμος με ρυθμίσεις $(a,b) = (6,6)$ και ποσοστά 65,89% και 3,43% αντίστοιχα. Η εκτέλεση του αλγορίθμου με χρήση του σταθερού κατωφλίου δίνει ποσοστό ορθών ανιχνεύσεων 62,54% και εσφαλμένων 6,03%, υψηλότερο από όλα τα υπόλοιπα κατώφλια. Με το στατιστικό κατώφλι και ρυθμίσεις $(C,a) = (3.4, 1/200)$ επιτυγχάνεται ποσοστά ορθών και εσφαλμένων ανιχνεύσεων 53,85% και 18,27% αντίστοιχα, ενώ οι επιδόσεις βελτιώνονται με αλλαγή της τιμής του a σε 1/60 και γίνονται 62,88% και 2,06%, που είναι και το χαμηλότερο ποσοστό εσφαλμένων ανιχνεύσεων.

Τελικά επιλέγεται η χρήση του κατωφλίου περιβάλλουσας με τη χρησιμοποίηση των ρυθμίσεων $(a,b) = (6,6)$ λόγω του καλύτερου ποσοστού ορθών ανιχνεύσεων, σε σχέση με τα άλλα δύο διαφορετικού τύπου κατώφλια και

του σχετικά καλού ποσοστού λανθασμένων ανιχνεύσεων, δεύτερου σε σχέση με το 2,06% του στατιστικού κατωφλίου. Επίσης η πολυπλοκότητά του είναι χαμηλή και είναι εύκολα υλοποιήσιμο σε μικροελεγκτή.

Πίνακας 8: Αναλυτικά Αποτελέσματα Αλγορίθμου Ανίχνευσης Προσωπικού

Άτομο - Τύπος Διαφοροποίηση Αιθιρίας		Σταθερό		Περιβάλλουσα (a,b)=(6,6)		Περιβάλλουσα (a,b)=(3,6)		Στατιστικό (a,C)=(3,4,1/60)		Στατιστικό (a,C)=(3,4,1/200)		Αριθμός Βημάτων	
		True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive	True Positive	False Positive		
Άτομο 1 - Περίπατημα	1	1	12	0	12	0	9	0	18	0	15	0	18
		2	18	0	18	0	15	0	15	0	15	0	26
		3	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	25
	2	1	18	0	18	0	18	0	15	0	21	0	27
		2	12	0	18	0	21	0	15	0	15	0	29
		3	12	0	15	0	18	0	12	0	9	0	23
	3	1	15	0	15	0	12	0	15	0	15	0	24
		2	15	0	15	0	18	0	12	0	12	0	24
		3	12	0	15	0	15	0	12	0	12	0	22
	4	1	12	0	15	0	9	0	12	0	15	0	20
		2	21	0	21	0	12	0	18	0	15	0	22
		3	12	0	15	0	15	0	15	0	9	0	20
Άτομο 1 - Τρέξιμο	5	1	15	0	15	0	15	0	15	0	12	0	23
		2	18	0	15	0	21	0	15	0	12	0	28
		3	15	0	15	0	12	0	12	0	9	0	16
	6	1	15	0	18	0	15	0	15	0	15	0	22
		2	15	3	12	6	12	0	18	0	15	9	22
		3	12	0	12	0	12	0	9	0	9	0	15
	7	1	18	3	12	0	18	0	12	0	12	9	16
		2	18	0	15	0	15	6	12	0	3	0	21
		3	12	0	15	0	15	0	15	0	12	0	15
	8	1	6	0	18	0	21	0	18	0	15	0	14
		2	9	6	15	0	12	0	15	0	9	18	18
		3	12	0	12	0	15	0	9	0	9	0	13
Άτομο 2 - Περίπατημα	9	1	6	0	6	0	6	0	6	0	6	0	14
		2	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	16
		3	6	0	9	0	12	0	12	0	6	0	21
	10	1	12	0	9	0	15	0	12	0	15	0	24
		2	6	0	6	0	15	0	9	0	6	0	17
		3	12	0	12	0	15	0	12	0	9	0	16
	11	1	9	0	9	0	15	0	12	0	6	0	14
		2	3	9	9	6	15	6	12	3	3	27	16
		3	12	3	12	0	3	15	3	0	9	9	5
	12	1	6	0	9	0	12	0	6	0	9	0	13
		2	9	3	9	3	9	3	9	3	9	9	15
		3	9	0	9	0	9	0	9	0	3	0	15
Άτομο 2 - Τρέξιμο	13	1	9	9	12	6	21	0	12	6	9	27	22
		2	18	0	15	0	15	0	12	0	12	0	16
		3	6	0	6	0	9	0	6	0	6	0	22
	14	1	9	0	9	0	6	0	12	0	9	0	24
		2	9	0	9	0	9	0	12	0	12	0	15
		3	12	0	15	0	9	0	9	0	12	0	15
	15	1	3	0	3	0	6	0	9	0	3	0	11
		2	9	0	3	0	3	0	6	0	6	0	14
		3	15	0	9	0	6	0	6	0	3	0	21
	16	1	9	0	9	0	15	0	9	0	9	0	19
		2	9	0	12	0	12	3	9	0	6	0	16
		3	9	0	9	0	6	0	6	0	0	0	13
Σύνολο		561	36	591	21	618	33	564	12	483	108	897	
Ποσοστό		62,54%	4,01%	65,89%	2,34%	68,90%	3,68%	62,88%	1,34%	53,85%	12,04%		

3.4. Ασύρματος Κόμβος Ανίχνευσης Προσωπικού

Στο μέρος αυτό θα δοθούν οι λεπτομέρειες μεταφοράς της μεθόδου ανίχνευσης προσωπικού στον Ασύρματο Κόμβο Mica2Dot. Ουσιαστικός στόχος είναι η μελέτη υλοποιησιμότητας της μεθόδου σε έναν Ασύρματο Κόμβο και η μεταφορά της σε αυτόν, η μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης, τόσο του αλγορίθμου ανίχνευσης όσο και των αλγορίθμων υπολογισμού κατωφλίων και η επιλογή του καταλληλότερου βάσει της απόδοσης/ενεργειακής κατανάλωσης.

3.4.1. Προδιαγραφές και Απαιτήσεις

Οι βασικές προδιαγραφές, που θα πρέπει να καλύπτει ένα σύστημα ανίχνευσης προσωπικού δίνονται παρακάτω, ξεχωριστά για τους Ασύρματους Κόμβους και ξεχωριστά για τον Σταθμό Βάσης.

3.4.1.1. Προδιαγραφές Ασύρματων Κόμβων

- Ικανότητα σεισμικής ανίχνευσης ενός στόχου σε μια ακτίνα τουλάχιστον 5 μέτρων - η ικανότητα αυτή συνδέεται άμεσα με τις επιδόσεις του αισθητήρα.
- Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας για μέγιστη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας
- Ασύρματη αποστολή μηνύματος κατά τον εντοπισμό ενός πιθανού στόχου στον σταθμό βάσης μέσω single-hop και άμεση μετάβαση σε multi-hop επικοινωνία στο μέλλον, για υποστήριξη επέκτασης του δικτύου
- Δυνατότητα μεταβολής των παραμέτρων των αλγορίθμων και αποστολής νέων ρυθμίσεων σε κάθε κόμβο ξεχωριστά ή και συνολικά στο Ασύρματο Δίκτυο, από τον Σταθμό Βάσης.
- Δυνατότητα αποστολής των ρυθμίσεων κάθε κόμβου
- Δυνατότητα ασύρματου επαναπρογραμματισμού των Ασύρματων Κόμβων, ενώ το Δίκτυο βρίσκεται σε κανονική λειτουργία

3.4.1.2. Προδιαγραφές Σταθμού Βάσης

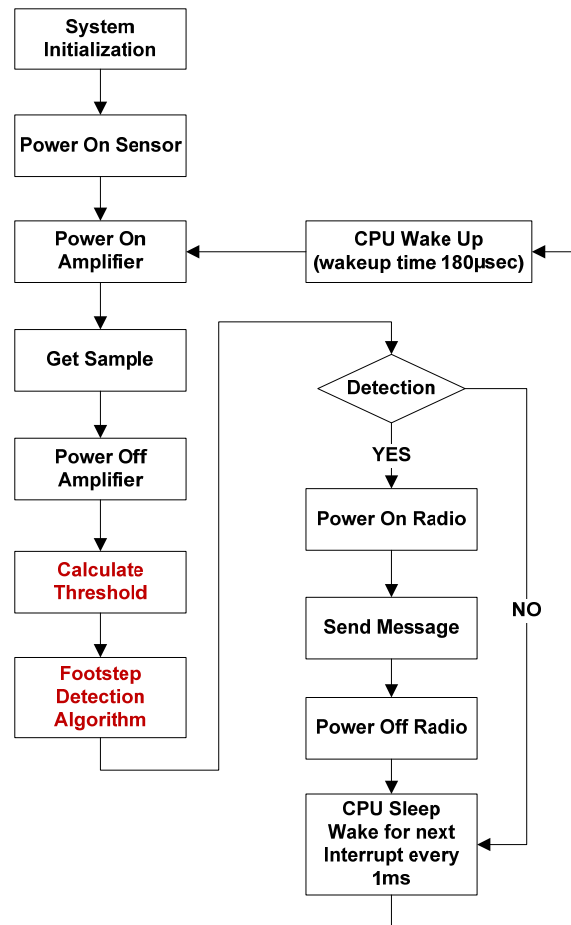
- Δυνατότητα αποστολής και λήψης μηνυμάτων, από και προς τους Ασύρματους Κόμβους και αποθήκευση των ληφθέντων πακέτων
- Καταγραφή της ακριβούς ώρας λήψης του κάθε πακέτου από κάθε κόμβο
- Λήψη και επεξεργασία των δεδομένων από το Matlab
- Δυνατότητα αποστολής και λήψης νέων ρυθμίσεων και παραμέτρων και ικανότητα ασύρματου επαναπρογραμματισμού των Κόμβων

3.4.2. Υλοποίηση

3.4.2.1. Γενική Περιγραφή

Κάθε 1000 μs (1000 Hz) ο μικροελεγκτής λαμβάνει ένα δείγμα από την έξοδο του αισθητήρα (S) και από την τιμή αυτή υπολογίζεται το σήμα S' , όπως ορίστηκε στην παράγραφο 3.3.4.1, ενώ στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος υπολογισμού του κατωφλίου ανίχνευσης. Η ακρίβεια της μετατροπής του A/D ρυθμίζεται στα 10-bit που δίνει μια διακριτική ικανότητα των $3300 \text{ mV}/2^{10} \text{ στάθμες} = 3.22 \text{ mV}/\text{στάθμη}$. Βάσει της τιμής του κατωφλίου και βάσει της τιμής του σήματος S' εκτελείται ο αλγόριθμος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας και το σύστημα μεταβαίνει στην ανάλογη κατάσταση. Μετά την ολοκλήρωση του κύκλου δειγματοληψίας - επεξεργασίας και δεδομένου ότι δεν έχει μεταβεί το σύστημα στην κατάσταση 4 (ορθής ανίχνευσης ατόμου) ο μικροελεγκτής, είτε μένει ανενεργός, είτε μεταβαίνει σε κάποια κατάσταση ύπνωσης (χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας). Μετά την πάροδο των 1000 μs ο μικροελεγκτής αφυπνίζεται μέσω μιας διακοπής του κυκλώματος χρονιστή (Timer) και επαναλαμβάνεται ο κύκλος. Μόλις ανιχνευθεί παρουσία ατόμου και μεταβεί το σύστημα στην κατάσταση 4 ενεργοποιείται ο ασύρματος πομποδέκτης, ο οποίος παραμένει απενεργοποιημένος όσο ο Ασύρματος Κόμβος δεν χρειάζεται να επικοινωνεί, αποστέλλοντας ένα μήνυμα προς τον Σταθμό Βάσης. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η λήψη νέων ρυθμίσεων από τον Σταθμό Βάσης ο πομποδέκτης θα πρέπει να τροφοδοτείται περιοδικά, ώστε να μπορεί ο

Ασύρματος Κόμβος, να λάβει κάποιο πακέτο. Τα παραπάνω παρουσιάζονται σχηματικά στο διάγραμμα ροής της λειτουργίας του κόμβου (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Διάγραμμα Ροής του προγράμματος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας

3.4.2.2.Modules - Components - Wiring

Η εφαρμογή αποτελείται από το configuration αρχείο Step_Detector.nc, το οποίο ορίζει τις συνδέσεις (wirings) μεταξύ των διάφορων στοιχείων και των διεπαφών τους. Ο κώδικας για το TinyOs 1.15 δίνεται στο παράρτημα. Τα στοιχεία, που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- *Main* - Το πρώτο και βασικό στοιχείο κάθε εφαρμογής σε TinyOS.
- *MicroTimerM* - Παρέχει έναν timer ο οποίος παράγει μια διακοπή με ακρίβεια µsec.

- *LedsC* - Παρέχει πρόσβαση στα Leds (χρησιμοποιούνται μόνο κατά την ανάπτυξη και απενεργοποιούνται κατά την κανονική λειτουργία δεδομένου ότι καταναλώνουν ~2.6 mA το καθένα).
- *Accel_PiezoC* - Ενεργοποιεί το κύκλωμα του επιταχυνσιόμετρου, ρυθμίζει τον A/D να δειγματοληπτεί το κανάλι του.
- *GenericComm* - Προσφέρει βασική ασύρματη επικοινωνία στον κόμβο
- *Step_DetectorM* - Το κύριο σώμα της εφαρμογής αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχήματος.
- *HPLPowerManagementM* - Επιτρέπει την αυτόματη μετάβαση του μικροελεγκτή σε κάποια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες του προγράμματος.

Το κύριο σώμα της εφαρμογής αποτελεί το στοιχείο *Step_DetectorM.nc*, το οποίο υλοποιεί την διεπαφή *StdControl* και χρησιμοποιεί τις διεπαφές *StdControl*, *MicroTimer*, *Leds*, *Connector_Pins*, *PowerManagement*, *ADC*, *SendMsg*, *ReceiveMsg*.

Το πρόγραμμα ξεκινάει αρχικοποιώντας τα χρησιμοποιούμενα υποσυστήματα (ασύρματες επικοινωνίες, μικρόφωνο, leds ...) με την εντολή *StdControl.init()* και ξεκινάει την κανονική του εκτέλεση με την εντολή *StdControl.start()*. Το στοιχείο *Microtimer* παράγει διακοπές σε χρόνο που ορίζεται από τον επιζητούμενο ρυθμό δειγματοληψίας, οι οποίες σηματοδοτούνται με το γεγονός *MicroTimer.fired* :

```

async event result_t MicroTimer.fired()
{
    TOSH_SET_INT1_PIN();
    return call Accel_PiezoADC.getData();
}

```

Σε κάθε διακοπή καλείται η συνάρτηση *Accel_PiezoADC.getData()* η οποία θα ξεκινήσει τις διαδικασίες λήψης ενός δείγματος. Η επιτυχής λήψη ενός δείγματος σηματοδοτείται από το γεγονός *Accel_PiezoADC.dataReady* :

```

async event result_t Accel_PiezoADC.dataReady(uint16_t data)
{
    Αλγόριθμος υπολογισμού κατώφλιου
    Αλγόριθμος ανίχνευσης προσωπικού
}

```

3.4.2.3. Ρυθμός Δειγματοληψίας

Το μεγαλύτερο πρόβλημα, που αντιμετωπίστηκε κατά τον προγραμματισμό της εφαρμογής στους ασύρματους κόμβους Mica2/Mica2Dot ήταν η επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού δειγματοληψίας, ο οποίος έπρεπε να είναι τουλάχιστον 1 kHz (5 kHz στην περίπτωση του Κόμβου Αναγνώρισης και Κατηγοριοποίησης Προσωπικού) για τη σωστή λήψη του σεισμικού (ηχητικού) σήματος. Ο συνηθισμένος timer, που χρησιμοποιούν οι περισσότερες εφαρμογές του TinyOS 1.x, ο TimerC, μπορεί να παράγει διακοπές μέσω λογισμικού μέχρι 4 ms, και με τροποποίηση του κώδικα μέχρι το πολύ 1 ms, δίδοντας έτσι μια οριακή συχνότητα δειγματοληψίας στα 1000 Hz. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο timer Microtimer που έχει υλοποιηθεί για την εφαρμογή HighFrequencySampling, που βρίσκεται στον κατάλογο `\tinyos-1.x\apps` μιας τυπικής εγκατάστασης του TinyOS 1.15, ο οποίος δίνει την δυνατότητα, να προσεγγιστεί απευθείας ο hardware timer του μικροελεγκτή και μπορεί να ρυθμιστεί να παράγει διακοπές με ελάχιστη περίοδο το 1 μsec.

Το δεύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η προϋπάρχουσα ρύθμιση της εσωτερικής συχνότητας λειτουργίας του ενσωματωμένου A/D μετατροπέα του μικροελεγκτή. Η ρύθμιση αυτή γίνεται στο αρχείο `\tinyos-1.x\tos\platform\mica2\HPLADCM.nc` κατά τη διάρκεια της εντολής `ADC.init()`. Με την προεπιλεγμένη τιμή που δίνεται στον καταχωρητή ADCSR ο A/D χρειάζεται 240 μsec για την ψηφιοποίηση ενός δείγματος. Αν συνυπολογιστούν τα περίπου 100 μsec, που απαιτούνται από τον αλγόριθμο υπολογισμού της ενέργειας, τον αλγόριθμο κωδικοποίησης και διάφορες άλλες καθυστερήσεις, προκύπτει ότι η ελάχιστη περίοδος δειγματοληψίας είναι τα 340 μsec ή η μέγιστη συχνότητα τα 2940 Hz. Η προεπιλεγμένη τιμή έπρεπε να αλλάξει και επιλέχθηκε να λάβει τιμή τέτοια ώστε να απαιτούνται θεωρητικώς 7.5 μsec για κάθε δείγμα, κάτι που στην πράξη ολοκληρώνεται σε περίπου 15 μsec. Έτσι η συχνότητα δειγματοληψίας μπορεί να ξεπεράσει τα 8000 Hz.

3.4.2.4. Ασύρματη Επικοινωνία

Για την εξοικονόμηση ενέργειας επιλέγεται ο ασύρματος πομποδέκτης να είναι απενεργοποιημένος και να τροφοδοτείται μόνο όταν χρειάζεται να σταλεί το μήνυμα ορθής ανίχνευσης. Τροφοδοτείται επίσης κάθε δευτερόλεπτο για 5 ms και ελέγχει το κανάλι για πιθανή αποστολή πακέτου. Αν ανιχνευθεί κάποιο προοίμιο τότε παραμένει ενεργοποιημένος μέχρι να ληφθεί το πακέτο. Η αποστολή πακέτων από τον σταθμό βάσης με προοίμιο ίσο με 1 sec εξασφαλίζει, ότι το πακέτο θα ληφθεί από τον κόμβο οποιαδήποτε στιγμή και αν ξεκινήσει η αποστολή του. Υποστηρίζονται δύο τύποι πακέτων από την εφαρμογή οι οποίοι καθορίζονται στο αρχείο Step.h (Παράρτημα):

- **Step_Send_Msg:** Μήνυμα αποστολής επιτυχούς ανίχνευσης προσωπικού προς τον Σταθμό Βάσης από τον Ασύρματο Κόμβο
- **Step_Receive_Msg:** Μήνυμα αποστολής νέων ρυθμίσεων προς τον Ασύρματο Κόμβο από τον Σταθμό Βάσης

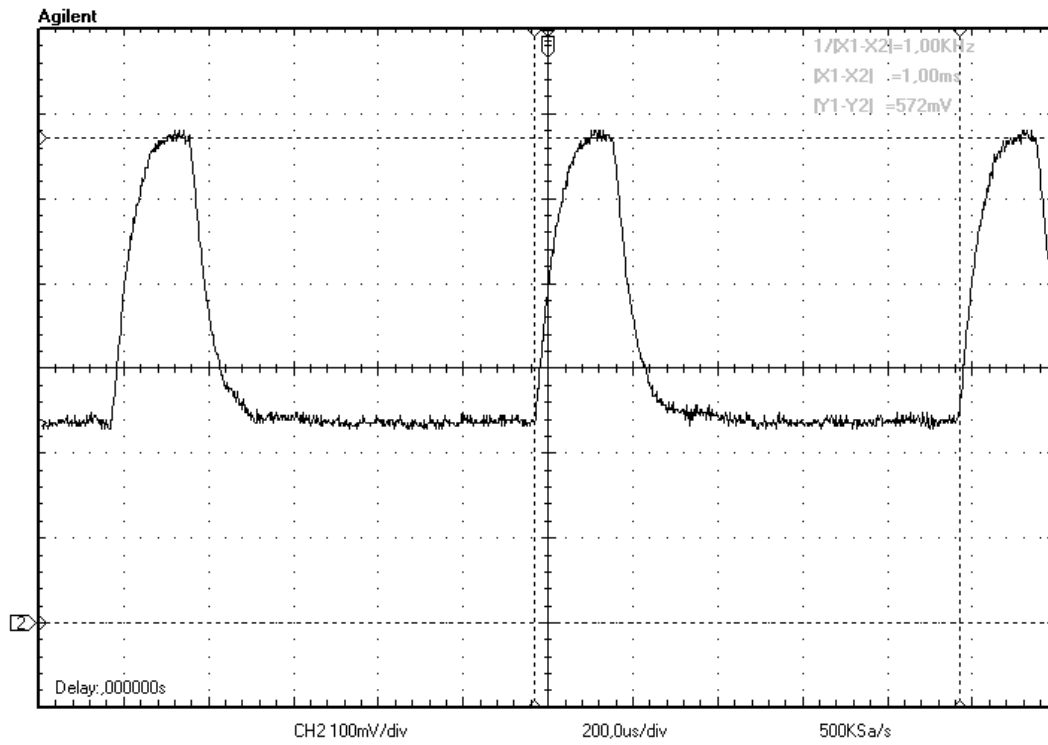
3.4.3. Κατανάλωση Ενέργειας

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5, η κατανάλωση ενέργειας του κόμβου Mica2Dot σε πλήρη λειτουργία είναι 117 mW ή $117 \text{ mW} / 3.3 \text{ V} = 35.5 \text{ mA}$. Αν σε αυτά προστεθούν τα 2,2 mA, που καταναλώνει ο πρωτότυπος σεισμικός αισθητήρας, χωρίς να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα για την ενεργειακή κατανάλωση κατά τον σχεδιασμό του υλικού, η συνολική κατανάλωση ανέρχεται στα 37.7 mA (124,4 mW), που ισοδυναμεί σε $2700 \text{ mAh} / 37,7 \text{ mA} = 71,6 \text{ ώρες} \approx 3 \text{ ημέρες}$ συνεχούς λειτουργίας του Ασύρματου Κόμβου με χρήση 2 τυπικών επαναφορτιζόμενων μπαταριών των 2700 mAh. Ο χρόνος αυτός είναι υπερβολικά μικρός για ένα σύστημα επιτήρησης χώρων και είναι επιτακτική η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

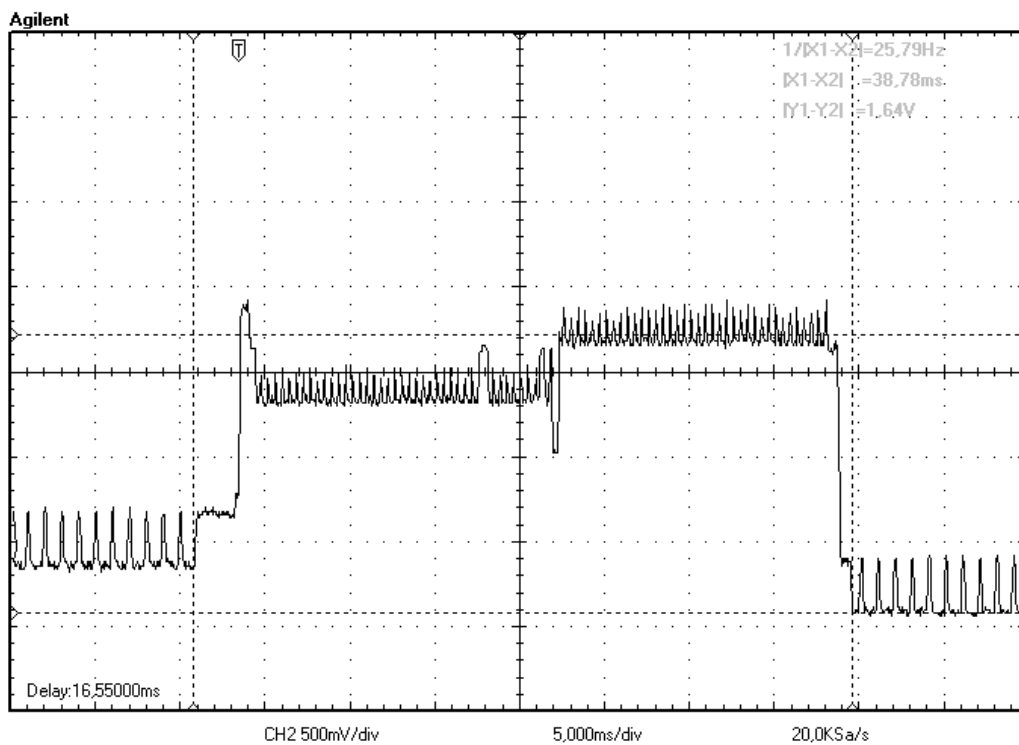
Με δεδομένο το υλικό του Ασύρματου Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού, μια ολοκληρωμένη ενεργειακή πολιτική μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της διάρκειας ζωής του έως και 1151%, φτάνοντας τις 37,53 ημέρες. Ενέργειες προς την κατεύθυνση αυτή αποτελούν:

- Η περιοδική τροφοδότηση μόνο των απαραίτητων υποσυστημάτων του κόμβου για όσο χρόνο απαιτείται. Στο σημείο αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ο χρόνος ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του υποσυστήματος πριν αυτό αρχίσει να λειτουργεί κανονικά.
- Η εκτέλεση της απαραίτητης επεξεργασίας από τον μικροελεγκτή στον μικρότερο δυνατό χρόνο και την μετάβαση σε κάποια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για όσο χρόνο απομένει μέχρι την επόμενη διακοπή.
- Η χρήση αλγορίθμων μικρής πολυπλοκότητας, προσαρμοσμένους για εκτέλεση σε 8-bit (ή 16-bit) μικροελεγκτές.
- Η απενεργοποίηση των αχρησιμοποίητων υποσυστημάτων του μικροελεγκτή.

Συγκεκριμένα, για τον κόμβο Mica2Dot μετρήθηκε η αναλυτική κατανάλωση ενέργειας ανά υποσύστημα και παρουσιάζεται στον Πίνακα 9. Οι μετρήσεις έγιναν συνδέοντας μια αντίσταση 1Ω σε σειρά, μεταξύ της γης της πηγής και του ασύρματου κόμβου και μετρώντας την τάση στα άκρα της με την βοήθεια ενός παλμογράφου. Η τάση που προκύπτει ισοδυναμεί με το ρεύμα που καταναλώνεται από τον κόμβο. Επειδή η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης είναι πολύ μικρή χρησιμοποιείται ένας instrumentation amplifier (AMP04) με κέρδος 100 για την ενίσχυση του σήματος. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται η τάση πάνω στην αντίσταση κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος (δειγματοληψία κάθε 1 ms) και στην Εικόνα 17 η τάση κατά την αποστολή ενός πακέτου.



Εικόνα 16: Κατανάλωση ρεύματος κατά την κανονική λειτουργία



Εικόνα 17: Κατανάλωση ρεύματος κατά την αποστολή μηνύματος

Από τις μετρήσεις παρατηρήθηκε, ότι η απενεργοποίηση του υποσυστήματος ασύρματης επικοινωνίας εξοικονομεί περίπου 14,8 mA και η απενεργοποίηση του ενισχυτή στον σεισμικό αισθητήρα 1,9 mA. Η μετάβαση του μικροελεγκτή στην κατάσταση ύπνου εξοικονομεί 5,4 mA. Το ενεργειακό όφελος θα είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο περισσότερη ώρα μπορούν να μείνουν απενεργοποιημένα τα υποσυστήματα και ο μικροελεγκτής στην κατάσταση ύπνου. Για την επιβεβαίωση των ισχυρισμών αυτών γίνονται αναλυτικές μετρήσεις της ενεργειακής κατανάλωσης του κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού χρησιμοποιώντας τους τρεις αλγόριθμους εύρεσης κατωφλίου και επιλέγεται ο αποδοτικότερος, με κριτήριο την ικανότητα ανίχνευσης/κατανάλωση ενέργειας. Στη συνέχεια αναλύεται η κατανάλωση με τέσσερα διαφορετικά ενεργειακά προφίλ. Για να υπολογιστεί η λεπτομερής ενεργειακή κατανάλωση απαιτούνται δύο στοιχεία: η κατανάλωση ρεύματος και ο χρόνος για τον οποίο καταναλώνεται το ρεύμα αυτό. Η κατανάλωση ρεύματος φαίνεται στον Πίνακα 9 και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας, είτε από τον μικροελεγκτή είτε από κάποιο υποσύστημα, στον Πίνακα 10.

Πίνακας 9: Αναλυτική κατανάλωση των υποσυστημάτων του Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού

Λειτουργία / Υποσύστημα	Κατανάλωση Ρεύματος (mA)	Κατανάλωση Ισχύος (mW)
CPU Idle	2,3	7,6
CPU Active	5,7	18,8
CPU Sleep	0,3	0,8
Led	2,6	8,6
Πιεζοηλεκτρικό Επιταχυνσιόμετρο - Ενεργός Ενισχυτής	2,2	7,3
Πιεζοηλεκτρικό Επιταχυνσιόμετρο - Ανενεργός Ενισχυτής	0,3	1,0
Αποστολή Πακέτου	17,1	56,3
Λήψη Πακέτου	16,8	55,3

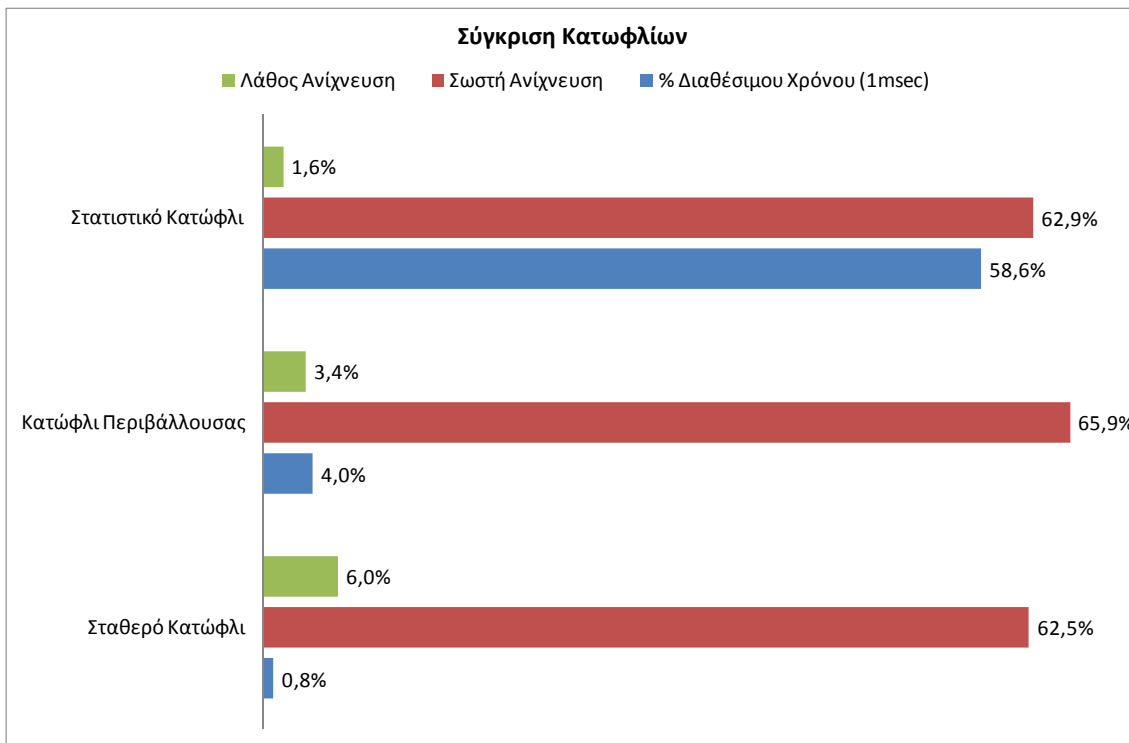
Πίνακας 10: Απαιτούμενος χρόνος για κάθε λειτουργία/υποσύστημα του Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού

Λειτουργία	Χρόνος (μsec)	% Διαθέσιμου (1000 μsec)
Χρόνος Αφύπνισης Μικροελεγκτή	180	0,18
Λήψη Δείγματος	86	8,6%
Σταθερό Κατώφλι	8	0,8%
Κατώφλι Περιβάλλουσας	40	4,0%
Στατιστικό Κατώφλι	586	58,6%
Αλγόριθμος Ανίχνευσης Ανθρώπινης Παρουσίας	26	2,6%
Έλεγχος Αποστολής Πακέτου	2	0,2%
Ετοιμασία Πακέτου	2.640	-
Αρχικοποίηση Ασύρματου Πομποδέκτη	18.730	-
Αποστολή Πακέτου	15.920	-
Ολοκλήρωση Αποστολής	1.410	-
Αποστολή Πακέτου Συνολικά	38.700	-
Έλεγχος Λήψης Πακέτου	5.000	-

Στον Πίνακα 11 και στην Εικόνα 18 γίνεται η σύγκριση των αλγορίθμων εύρεσης κατωφλίου βάσει του ποσοστού του διαθέσιμου χρόνου, που απαιτούν για τον υπολογισμό τους και βάσει των επιδόσεών τους. Επιλέγεται να υλοποιηθεί τελικά το κατώφλι περιβάλλουσας, λόγω της καλύτερης απόδοσής του και της μεγαλύτερης ευελιξίας στην ρύθμισή του, ανάλογα με τις συνθήκες του χώρου εγκατάστασης του συστήματος. Ταυτόχρονα, τα επιπλέον 32 μsec, που απαιτούνται για τον υπολογισμό του, δεν μειώνουν αισθητά τον χρόνο ζωής του Ασύρματου Κόμβου.

Πίνακας 11: Σύγκριση Αλγορίθμων Κατωφλίου

Αλγόριθμος Υπολογισμού Κατωφλίων	% Διαθέσιμου Χρόνου (1msec)	Σωστή Ανίχνευση	Λάθος Ανίχνευση
Σταθερό Κατώφλι	0,8%	62,5%	6,0%
Κατώφλι Περιβάλλουσας	4,0%	65,9%	3,4%
Στατιστικό Κατώφλι	58,6%	62,9%	1,6%



Εικόνα 18: Σύγκριση Κατωφλίων

Η κατανάλωση ενέργειας ανά λειτουργία/υποσύστημα προκύπτει ως το γινόμενο της κατανάλωσης ρεύματος επί τον χρόνο, για τον οποίο καταναλώνεται αυτό το ρεύμα. Υλοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές εκδόσεις του προγράμματος επιλέγοντας μια διαφορετική ενεργειακή πολιτική (προφίλ) κάθε φορά για να μελετηθεί πως επιδρούν οι διάφορες τεχνικές στην τελική διάρκεια ζωής του κόμβου. Οι επιλογές που έγιναν για κάθε προφίλ, συνοψίζονται παρακάτω:

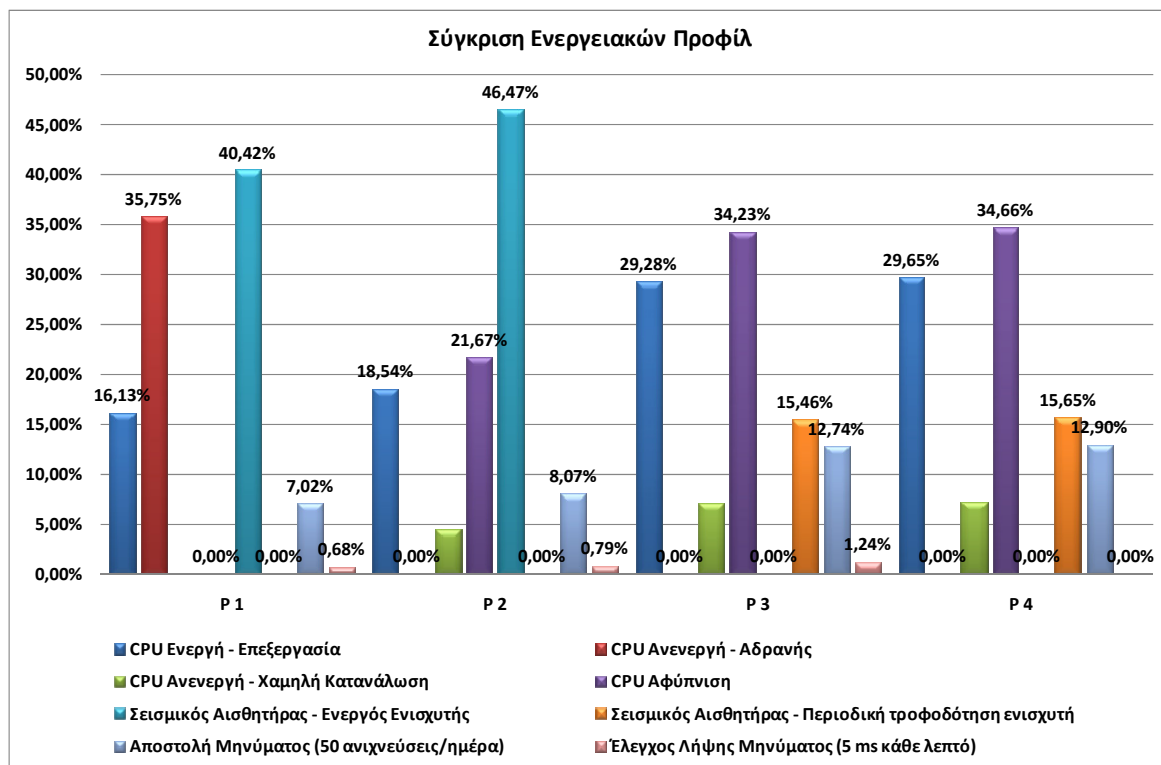
- **Προφίλ 1:** Ο ενισχυτής του αισθητήρα τροφοδοτείται διαρκώς, ο μικροελεγκτής δεν μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, ο ασύρματος πομποδέκτης τροφοδοτείται όταν απαιτείται.
- **Προφίλ 2:** Ο ενισχυτής του αισθητήρα τροφοδοτείται διαρκώς, ο μικροελεγκτής μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, ο ασύρματος πομποδέκτης τροφοδοτείται όταν απαιτείται.
- **Προφίλ 3:** Ο ενισχυτής του αισθητήρα τροφοδοτείται περιοδικά, ο μικροελεγκτής μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, ο ασύρματος πομποδέκτης τροφοδοτείται όταν απαιτείται.

- **Προφίλ 4:** Ο ενισχυτής του αισθητήρα τροφοδοτείται περιοδικά, ο μικροελεγκτής μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, ο ασύρματος πομποδέκτης τροφοδοτείται μόνο σε περίπτωση ορθής ανίχνευσης για την αποστολή του μηνύματος, δεν υποστηρίζεται λήψη μηνυμάτων.

Στον Πίνακα 12 παρουσιάζεται η αναλυτική κατανάλωση ενέργειας κάθε υποσυστήματος και λειτουργίας του κόμβου. Από την κατανάλωση αυτή προκύπτει η διάρκεια ζωής του ασύρματου κόμβου, ανάλογα με το ενεργειακό προφίλ με το οποίο λειτουργεί. Σημειώνονται επίσης τα ποσοστά με τα οποία συμμετέχει το κάθε υποσύστημα στη συνολική κατανάλωση. Στην Εικόνα 19 γίνεται η σύγκριση των πέντε ενεργειακών προφίλ, ως προς την κατανάλωση ανά υποσύστημα/λειτουργία.

Πίνακας 12: Αναλυτική Ενεργειακή Κατανάλωση ανά Προφίλ Λειτουργίας

Υποσύστημα / Λειτουργία	per Sample (μAs)	per sec (μAs)	per day (mAh)	P 1	P 2	P 3	P 4
CPU Ενεργή - Επεξεργασία	0,154ms x 5,7mA = 0,878μAs	878	21,07	16,13%	18,54%	29,28%	29,65%
CPU Ανενεργή - Αδρανής	(1-0,154)ms x 2,3mA = 1,946μAs	1946	46,70	35,75%	0,00%	0,00%	0,00%
CPU Ανενεργή - Χαμηλή Κατανάλωση	(1-0,154)ms x 0,3mA = 0,212μAs	212	5,08	0,00%	4,47%	7,06%	7,14%
CPU Αφύπνιση	0,18ms x 5,7mA = 1,026μAs	1026	24,62	0,00%	21,67%	34,23%	34,66%
Σεισμικός Αισθητήρας - Ενεργός Ενισχυτής	1ms x 2,2mA = 2,2μAs	2200	52,80	40,42%	46,47%	0,00%	0,00%
Σεισμικός Αισθητήρας - Περιοδική τροφοδότηση ενισχυτή	0,086ms x 2,2mA + (1-0,086)ms x 0,3mA = 0,463μAs	463	11,12	0,00%	0,00%	15,46%	15,65%
Αποστολή Μηνύματος (50 ανιχνεύσεις/ημέρα)	-	-	38,7 ms x 17,1 mA x 50 detections= 9,16 mAh	7,02%	8,07%	12,74%	12,90%
Έλεγχος Λήψης Μηνύματος (5 ms κάθε λεπτό)	-	-	86400 checks/day x 5ms x 16,8mA=0,89mAh	0,68%	0,79%	1,24%	0,00%
Σύνολο				100%	100%	100%	100%
Συνολική Κατανάλωση ανά Ημέρα (mAh)				130,62	113,62	71,95	71,05
Διαθέσιμη Ενέργεια (2xAA Μπαταρίες)				2700	2700	2700	2700
Χρόνος Ζωής (Ημέρες)				20,67	23,76	37,53	38,00
Μέση Κατανάλωση Ισχύος (mW)				17,96	15,62	9,89	9,77
% Βελτίωση				0%	15%	82%	84%

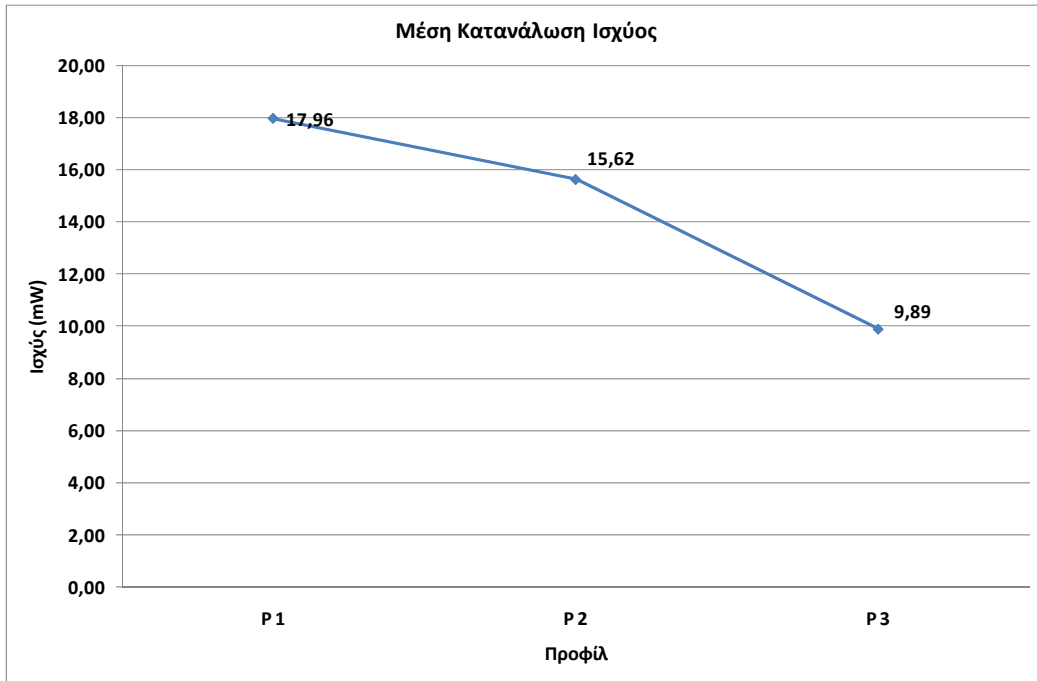


Εικόνα 19: Σύγκριση Ενεργειακών Προφίλ

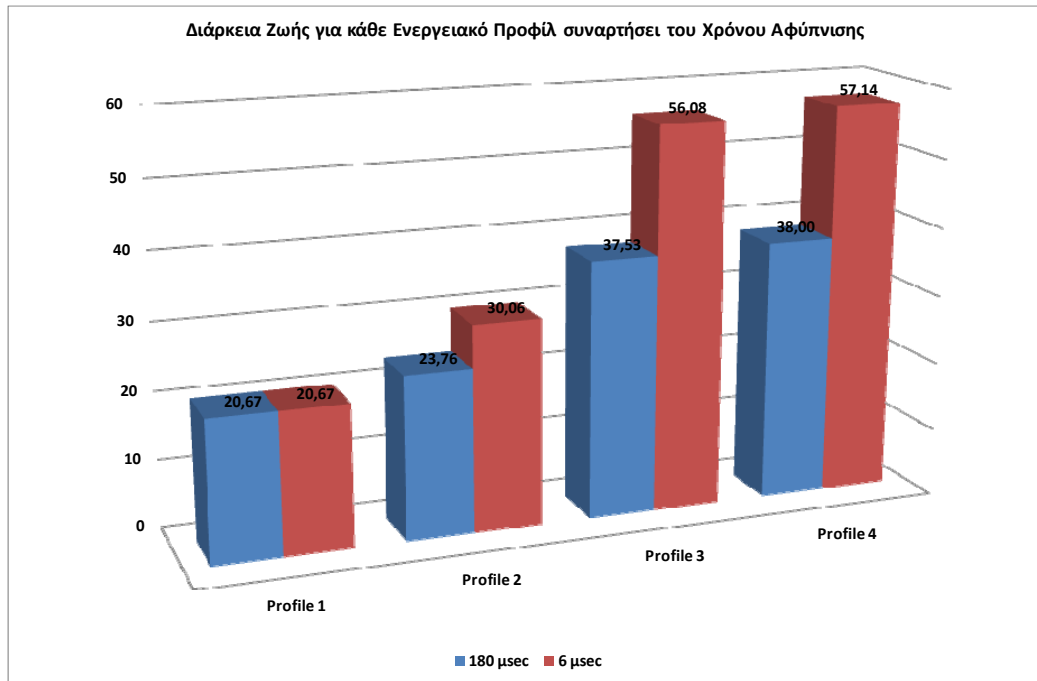
Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή, του κάθε υποσυστήματος στην κατανάλωση ενέργειας στα τέσσερα ενεργειακά προφίλ. Η αρχική διάρκεια ζωής του Ασύρματου Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού, με χρήση του προφίλ 1, είναι οι 20,67 ημέρες με τον αισθητήρα, να είναι ο κύριος καταναλωτής της ενέργειας με ποσοστό 40,42%. Παρατηρείται επίσης, ότι ο μικροελεγκτής, παραμένοντας ανενεργός καταναλώνει το 35,75% της διαθέσιμης ενέργειας. Είναι ανάγκη λοιπόν η μετάβαση του σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για όσο χρόνο παραμένει αδρανής. Με τη ρύθμιση αυτή στο προφίλ 2 η διάρκεια ζωής αυξάνεται στις 23,76 ημέρες. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας καταναλώνεται πάλι από τον αισθητήρα (46,47%), αλλά σημαντικό ποσοστό καταναλώνει τώρα και ο μικροελεγκτής κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων (18,54%), αλλά κυρίως κατά τη διάρκεια αφύπνισής του (21,67%) λόγω του μεγάλου χρόνου αφύπνισης (180 μ sec), που είναι μεγαλύτερος από τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων. Με την περιοδική τροφοδότηση του ενισχυτή του αισθητήρα κάθε φορά, που λαμβάνεται το δείγμα (προφίλ 3) επιτυγχάνεται περαιτέρω αύξηση του χρόνου ζωής στις 37,53 ημέρες. Το σημαντικότερο τμήμα της διαθέσιμης ενέργειας, καταναλώνεται τώρα

στον μικροελεγκτή κατά τη φάση αφύπνισης με ποσοστό 34,23% καθώς και κατά την επεξεργασία (29,28%). Μείωση τόσο του χρόνου αφύπνισης, όσο και του χρόνου επεξεργασίας επιφέρει μείωση στην κατανάλωση. Τέλος, παρατηρείται αύξηση στη διάρκεια ζωής κατά μισή ημέρα, 37,53 έναντι 38,00, με χρήση του προφίλ 4, δηλαδή χωρίς την υποστήριξη λήψης μηνυμάτων. Το όφελος στην διάρκεια ζωής σε σχέση με το όφελος από την εύκολη αποστολή νέων ρυθμίσεων δεν είναι σημαντικό και έτσι επιλέγεται το προφίλ 3 για την τελική υλοποίηση. Η συμπεριφορά και η απόδοση του συστήματος και στα τρία προφίλ (εκτός δηλαδή του προφίλ 4) παραμένει ίδια, παρατηρείται όμως μια σημαντική μείωση στην μέση κατανάλωση, με την χρήση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που αναφέρθηκαν. Σχηματικά αυτό φαίνεται στην Εικόνα 20. Τέλος σε όλη την ενεργειακή μελέτη θεωρήσαμε ένα μέσο αριθμό ανιχνεύσεων, που ανέρχεται σε 50 ανά ημέρα, ένα λογικό αριθμό για ένα σύστημα ασφαλείας που εγκαθίσταται σε σχετικά απομονωμένο χώρο. Μεγαλύτερος αριθμός σημαίνει και περισσότερη κατανάλωση ενέργειας για την αποστολή των επιπλέον μηνυμάτων. Για να μελετηθεί η σχέση του αριθμού των απεσταλμένων μηνυμάτων σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του Ασύρματου Κόμβου υπολογίζεται η θεωρητικά αναμενόμενη κατανάλωση του, για 5 έως 200 ανιχνεύσεις ημερησίως για κάθε ενεργειακό προφίλ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 23.

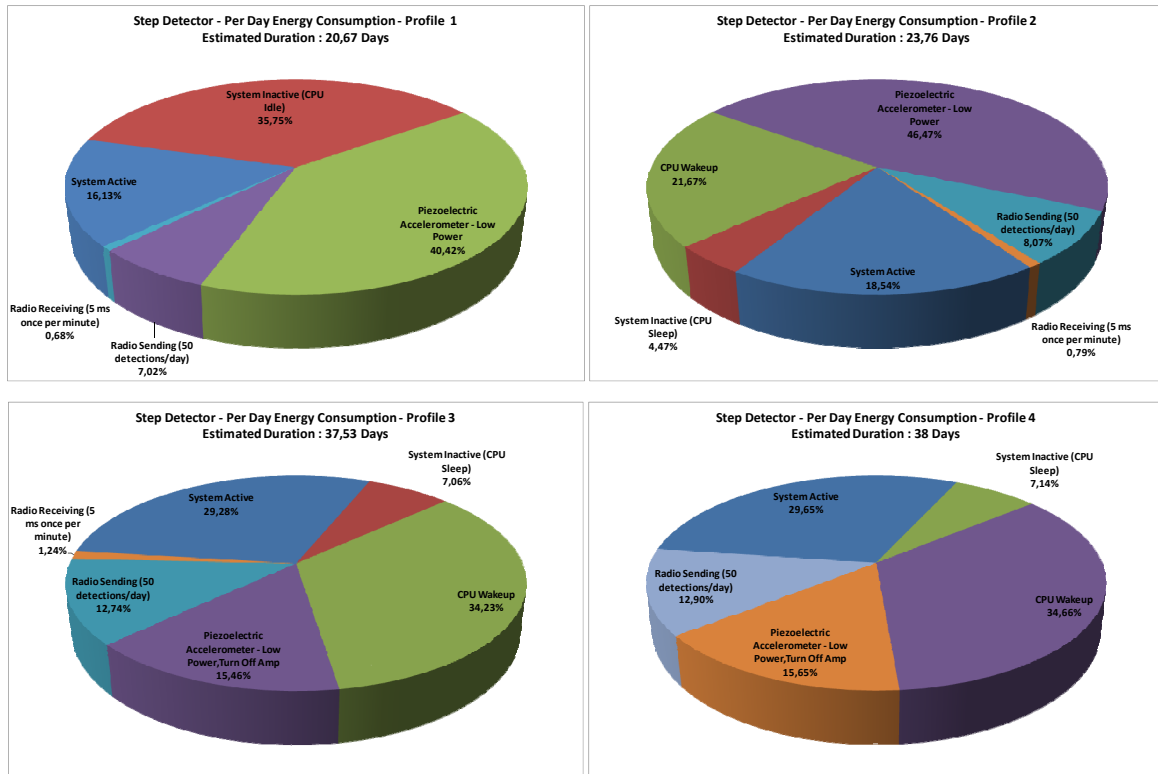
Η επίδραση του χρόνου αφύπνισης του μικροελεγκτή στη διάρκεια ζωής του φαίνεται στην Εικόνα 21, όπου παρουσιάζεται η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για χρόνους αφύπνισης 180 μ sec και 6 μ sec, όσος δηλαδή είναι και ο χρόνος αφύπνισης του μικροελεγκτή TI MSP430 των κόμβων Telos, συμβατών με των TMote Sky [131].



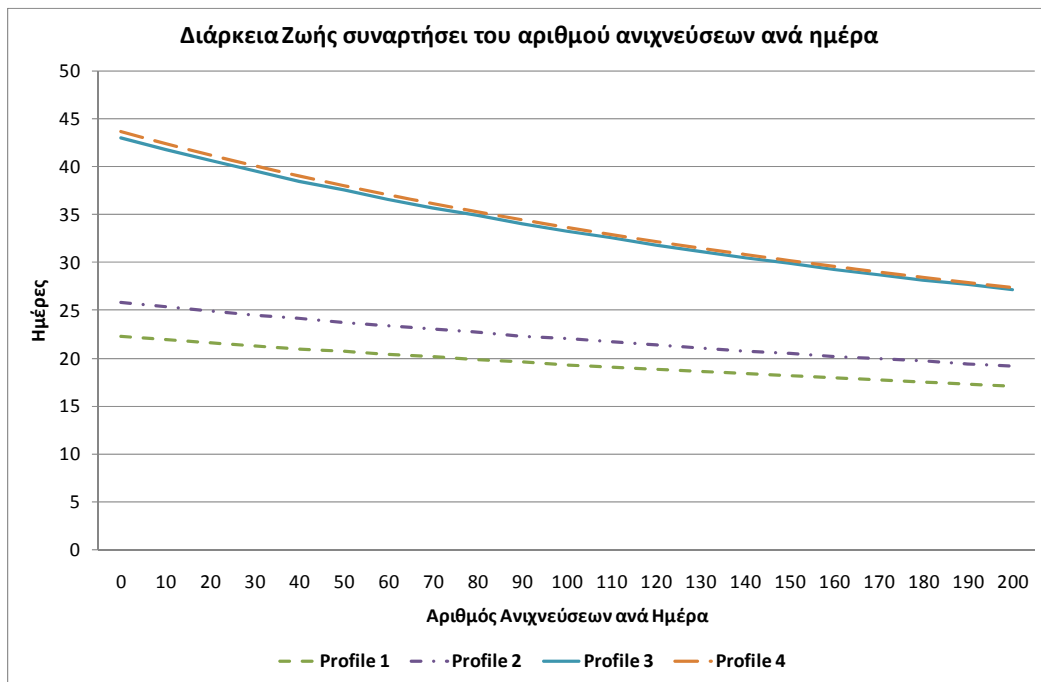
Εικόνα 20: Μέση κατανάλωση ισχύος των ενεργειακών προφίλ 1 έως 3



Εικόνα 21: Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Κόμβου συναρτήσει του Χρόνου Αφύπνισης



Εικόνα 22: Ποσοστιαία συμμετοχή του κάθε υποσυστήματος στην κατανάλωση ενέργειας στα τέσσερα ενεργειακά προφίλ



Εικόνα 23: Διάρκεια ζωής συναρτήσει του αριθμού ανιχνεύσεων ανά ημέρα

3.5. Σύγκριση και Σχόλια

Η εργασία των Pakhomov και Goldburt [82]-[84] παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις προταθείσες λύσεις και επιτρέπει την σύγκριση μεταξύ των δύο Κόμβων Ανίχνευσης Προσωπικού. Στα πλαίσια της εργασίας τους κατασκευάζονται τρεις γενεές ενός κόμβου ικανού να ανιχνεύει προσωπικό και οχήματα. Η πρώτη γενιά έχει αναπτυχθεί γύρω από τον μικροελεγκτή ATmega128 με μέση κατανάλωση τα 200 mW, η δεύτερη και η τρίτη γενιά γύρω από τον 32-bit μικροελεγκτή LPC2106 με καταναλώσεις 45 mW και 5-6 mW αντίστοιχα. Οι καταναλώσεις και για τα τρία συστήματα αφορούν στην κατανάλωση του κόμβου χωρίς την υποστήριξη ασύρματων επικοινωνιών. Ο Ασύρματος Κόμβος που περιγράφεται στην [74] εκτιμάται, ότι έχει μια μέση κατανάλωση γύρω στα 24,7 mW αν λειτουργήσει σύμφωνα με το προφίλ 2, τιμή αρκετά υψηλή, που όμως αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι ο κόμβος τροφοδοτείται μέσω φωτοβολταϊκού συστήματος που του παρέχει ισχύ 2,5 W, αλλά με σημαντική αύξηση των διαστάσεών του.

Ο Ασύρματος Κόμβος Ανίχνευσης Προσωπικού, που αναπτύχθηκε έχει μια μέση κατανάλωση 9,89 mW και υποστηρίζει την ασύρματη μετάδοση και λήψη πληροφοριών. Η κατανάλωση μειώνεται στα 9,77 mW, αν απενεργοποιηθεί η λήψη από το υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας, τιμή που είναι άμεσα συγκρίσιμη με την κατανάλωση στον κόμβο της [84] και 15 mW περίπου χαμηλότερη από το σύστημα, που χρησιμοποιεί τον DSP και επεξεργασία σήματος με FFT. Από πλευράς επιδόσεων της ικανότητας ανίχνευσης η σύγκριση είναι δυσκολότερη. Ο πιο εξελιγμένος κόμβος που περιγράφεται στην [84] (αλλά και όλοι οι παλαιότεροι) καθώς και ο κόμβος που περιγράφεται στην [74] χρησιμοποιούν γεωφώνο για τη λήψη του σήματος, γεγονός που δίνει στον κόμβο μεγαλύτερη εμβέλεια σε σχέση με το προταθέν πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο. Τα στοιχεία που παρέχονται από τους ερευνητές των προαναφερθέντων εργασιών δυστυχώς δεν επιτρέπουν την άμεση σύγκριση των επιδόσεων των τριών συστημάτων. Εκτιμάται όμως, ότι η καλύτερη ποιότητα του σεισμικού σήματος του γεωφώνου αυξάνει τα ποσοστά ορθών ανιχνεύσεων και μειώνει τα ποσοστά

των εσφαλμένων. Το υψηλότερο συνολικό κόστος των γεωφώνων, όμως αντισταθμίζει ίσως την μικρότερη εμβέλεια και αξιοπιστία του πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιομέτρου, που χρησιμοποιείται στον προταθέντα Ασύρματο Κόμβο.

4. Ακουστική και Σεισμική Αναγνώριση και Κατηγοριοποίηση Οχήματος

4.1. Ανασκόπηση

Η διαδικασία για την ταξινόμηση οχημάτων από τις ακουστικές και τις σεισμικές τους υπογραφές αποτελείται από τρία βασικά βήματα:

1. Τη δειγματοληψία και το φιλτράρισμα του σήματος. Συνήθως λαμβάνονται αρκετά σήματα από κάθε κλάση οχήματος και δημιουργείται μια βάση δεδομένων, με πολλές ανεξάρτητες καταγραφές για το κάθε όχημα.
2. Την επεξεργασία των σημάτων με κάποιο αλγόριθμο, με σκοπό την εξαγωγή των χαρακτηριστικών της κάθε κλάσης, που θα τη διαχωρίζουν από τις υπόλοιπες. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνήθως ομαδοποιούνται σε ένα πίνακα, που θα ονομάζεται στο εξής χαρακτηριστικό διάνυσμα. Βάσει αυτών δημιουργείται μια νέα βάση δεδομένων, που περιέχει, υπό μορφή χαρακτηριστικών διανυσμάτων, τα επεξεργασμένα σήματα. Ένα μέρος τους χρησιμοποιείται σαν υποσύνολο εκπαίδευσης και τα υπόλοιπα σήματα σαν υποσύνολο δοκιμής του συστήματος κατηγοριοποίησης.
3. Την ταξινόμηση των σημάτων, χρησιμοποιώντας κάποιον αλγόριθμο ταξινόμησης. Κάθε άγνωστο χαρακτηριστικό διάνυσμα συγκρίνεται με τα γνωστά χαρακτηριστικά διανύσματα κάθε κλάσης οχήματος, όπως αυτά έχουν διαμορφωθεί μετά την δημιουργία του εκπαιδευτικού υποσυνόλου και κατηγοριοποιείται στην πλησιέστερη κλάση.

4.1.1. Υφιστάμενες Μέθοδοι

4.1.1.1. Επεξεργασία Σήματος

Η απλούστερη προσέγγιση είναι η επεξεργασία του σήματος στο πεδίο του χρόνου εκμεταλλευόμενοι το πλάτος και την ενέργειά του, και ορίζοντας κάποια σταθερά ή μεταβλητά κατώφλια συνήθως στην περιβάλλουσα του. Υπέρβαση του

κατωφλίου σε έναν ή περισσότερους από τους αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση (μαγνητικούς, ακουστικούς, θερμικούς, οπτικούς, ραντάρ κ.α.), υποδηλώνει την ύπαρξη ενός πιθανού στόχου. Εξετάζοντας τη μορφή του σήματος μετά την υπέρβαση του κατωφλίου, ως προς το πλάτος ή/και την ενέργειά του, μπορεί να γίνει μια στοιχειώδης κατηγοριοποίηση του στόχου, αποφεύγοντας πολύπλοκη φασματική ανάλυση [52], [60]. Από τους ερευνητές της [52] επιλέγεται η χρήση της πλατφόρμας ExScal, που στηρίζεται στον Ασύρματο Κόμβο Mica2 και διαθέτει ακουστικό, μαγνητικό και τέσσερις υπέρυθρους αισθητήρες. Οι ερευνητές της [60] χρησιμοποιούν του παλαιότερους κόμβους Mica για τη λήψη των ακουστικών και σεισμικών υπογραφών, ενώ για την επεξεργασία των δεδομένων μελετούν τη χρήση ενός FPGA, τεχνική, που διευκολύνει πολύ τους απαραίτητους υπολογισμούς, αλλά αυξάνει την κατανάλωση του συστήματος. Μέθοδοι αυτού του τύπου αποδίδουν αρκετά καλά στον τομέα της ανίχνευσης ενός στόχου, έχουν όμως σοβαρές ελλείψεις στον τομέα της αναγνώρισης και της διάκρισης από κάποιον άλλο με παρόμοια χαρακτηριστικά. Παρόμοιοι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με πιο πολύπλοκους αλγόριθμους εξαγωγής χαρακτηριστικών, σαν κριτήριο ύπαρξης κάποιου ενδιαφέροντος συμβάντος, άξιου να αναλυθεί περισσότερο και να κατηγοριοποιηθεί.

Ο πιο διαδεδομένος, ίσως, τρόπος ανάλυσης ενός ακουστικού ή/και σεισμικού σήματος, για την εξαγωγή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, είναι στο πεδίο της συχνότητας με χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Το ψηφιοποιημένο σήμα χωρίζεται σε τμήματα, αλληλεπικαλυπτόμενα μεταξύ τους με κάποια μέθοδο windowing (συνήθως μικρότερα του 1 δευτερολέπτου) και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός FFT (Fast-Fourier Transform), για τον υπολογισμό της φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD - Power Spectral Density) του σήματος. Στο φάσμα αυτό περιέχεται το συχνотικό περιεχόμενο του σήματος, που είναι χαρακτηριστικό της πηγής, που το δημιούργησε και του μέσου μετάδοσης. Οι σημαντικότερες και οι πιο χαρακτηριστικές φασματικές συνιστώσες της κάθε κλάσης οχήματος, δεδομένης της επαναληψιμότητάς τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του χαρακτηριστικού διανύσματος της

κλάσης, που θα τη διαχωρίζει από τις υπόλοιπες [53]-[56], [61], [66], [76]. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται και στην [68] με τη διαφορά ότι το χαρακτηριστικό διάνυσμα αποτελείται από τα διωδιάστατα διαγράμματα του φάσματος – χρόνου. Οι επιδόσεις του συστήματος φτάνουν το 76% σε ένα σενάριο κατηγοριοποίησης 4 στόχων (πεζοναύτης, ομάδα πεζοναυτών, ελαφρύ όχημα, βαρύ φορτηγό) και θορύβου

Διαφορετική προσέγγιση αποτελεί και η χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων (DWT - Discrete Wavelet Transform), αλλά και του παρεμφερούς WPT - Wavelet Packet Transform. Κύριο πλεονέκτημα είναι ο εντοπισμός του, τόσο στο χρόνο, όσο και στη συχνότητα, σε αντίθεση με τον κλασσικό FFT, που είναι εντοπισμένος μόνο στη συχνότητα. Επίσης, ο DWT είναι υπολογιστικά απλούστερος απαιτώντας $O(N)$ χρόνο, με τον FFT να απαιτεί $O(N \log N)$, όπου N είναι το πλήθος των δεδομένων. Τα wavelets, ή κυματίδια, είναι κυματοειδής συναρτήσεις, που το γράφημά τους ταλαντώνει για μικρή απόσταση ή αποσβένει ταχέως. Η μέση τους τιμή σε όλο το πεδίο είναι μηδενική. Έχουν σαφή τοπικό χαρακτήρα στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χρόνου και για τον λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μη στάσιμων σημάτων, που ο μετασχηματισμός Fourier δεν επαρκεί [58], [59].

Ενδιαφέρουσα προσέγγιση αποτελεί η εργασία των Tian και Qi [67] στην οποία χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα τρεις μέθοδοι ανάλυσης του σεισμικού σήματος: φασματική ανάλυση, φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) και μετασχηματισμός κυματιδίων. Το φάσμα του σήματος αναλύεται στατιστικά, ως προς το πλάτος και το σχήμα και εξάγονται 8 χαρακτηριστικά. Από τη φασματική πυκνότητα ισχύος λαμβάνονται 3 χαρακτηριστικά, από τις 3 σημαντικότερες κορυφές, καθώς και άλλα 4 από τη στατιστική επεξεργασία του σχήματος της PSD. Τέλος άλλα 12 χαρακτηριστικά λαμβάνονται από την ανάλυση του σήματος με τη μέθοδο των κυματιδίων. Το χαρακτηριστικό διάνυσμα των $8+7+12=27$ στοιχείων χρησιμοποιείται για την τελική κατηγοριοποίηση των οχημάτων. Η απόδοση μπορεί να φτάσει και το 90% σε ένα σενάριο κατηγοριοποίησης 2 στόχων (AAV - ερπυστριοφόρο, DW - βαρύ φορτηγό) και θορύβου.

4.1.1.2. Αλγόριθμοι Κατηγοριοποίησης

Στο θέμα της κατηγοριοποίησης οχημάτων έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι, ο κάθε ένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων υπάρχουν δύο κυρίως προσεγγίσεις, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η κατηγοριοποίηση:

- Η κατηγοριοποίηση να εκτελείται στον Ασύρματο Κόμβο και να αποστέλλεται στον σταθμό βάσης μόνο το αποτέλεσμα, δηλαδή η κλάση στην οποία ανήκει ο στόχος - όχημα.
- Η κατηγοριοποίηση να εκτελείται στον σταθμό βάσης από το χαρακτηριστικό διάνυσμα, που θα αποστείλει ο Ασύρματος Κόμβος.

Το πλεονέκτημα της πρώτης περίπτωσης είναι, ότι μειώνεται το ποσό της πληροφορίας, που θα πρέπει να αποστείλει ο κόμβος και γίνεται οικονομία, τόσο σε ενέργεια όσο και σε εύρος ζώνης του δικτύου. Λόγω όμως των περιορισμένων δυνατοτήτων του κόμβου, η κατηγοριοποίηση θα πρέπει να βασίζεται σε χαμηλής πολυπλοκότητας αλγορίθμους. Αντίθετα, η αποστολή των πλήρων χαρακτηριστικών διανυσμάτων στον σταθμό βάσης, δίνει τη δυνατότητα για κατηγοριοποίηση με πιο εξειδικευμένους κατηγοριοποιητές, αυξάνοντας ταυτόχρονα το ποσό της μεταδιδόμενης πληροφορίας από τους Ασύρματους Κόμβους. Οι περισσότερες εργασίες στη βιβλιογραφία κινούνται προς τη δεύτερη κατεύθυνση. Οι ερευνητές της [55] συγκρίνουν τέσσερις διαφορετικές τεχνικές κατηγοριοποίησης που στηρίζονται στην Maximum Likelihood (ML) estimation, Support Vector Machines (SVM), k-Nearest Neighbor (k-NN) Linear Vector Quantization (LVQ). Οι καλύτερες επιδόσεις λαμβάνονται με χρήση του k-NN. Αντίστοιχη προσέγγιση υπάρχει και στην [56]. Ο k-NN χρησιμοποιείται και στην [67], στην οποία συγκρίνεται με έναν πολύ απλό κατηγοριοποιητή ελάχιστης απόστασης. Κατηγοριοποιητές, βασισμένοι στην ευκλείδεια απόσταση και στην συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών διανυσμάτων, έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην [58]. Μεγάλο ενδιαφέρον και πολύ καλές επιδόσεις παρουσιάζει η κατηγοριοποίηση με χρήση Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, όπως στις [53],[57],[61],[63],[68].

4.2.Προτεινόμενες Λύσεις

Το μεγάλο μειονέκτημα των παραπάνω μεθόδων είναι οι υψηλές απαιτήσεις τους σε υπολογιστική ισχύ και σε μνήμη. Γεγονός που καθιστά δύσκολη, έως αδύνατη την αναγνώριση οχήματος σε ένα Ασύρματο Κόμβο εξοπλισμένο με έναν απλό μικροελεγκτή των 8 ή 16-bit. Δημιουργείται έτσι η ανάγκη για απλούστερους αλγορίθμους εξαγωγής χαρακτηριστικών διανυσμάτων, οι οποίοι παρακάμπτουν την επεξεργασία του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, παρέχοντας ταυτόχρονα ικανοποιητικά και συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις φασματικές μεθόδους, τόσο στον τομέα της ανίχνευσης όσο και της κατηγοριοποίησης.

Προτείνεται η χρήση μιας μεθόδου, που κωδικοποιεί το σήμα στο πεδίο του χρόνου, δημιουργώντας το χαρακτηριστικό διάνυσμα δυναμικά από το ψηφιοποιημένο σήμα, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μέθοδο TESPAP (Time Encoded Signal Processing and Recognition) [97], που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την κατηγοριοποίηση σημάτων οριοθετημένης ζώνης (band-limited), όπως είναι η φωνή. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται επίσης οι πολύ καλές επιδόσεις, που έχει επιδείξει σε διάφορα σενάρια κατηγοριοποίησης και οι ιδιαίτερα χαμηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη, χαρακτηριστικά, τα οποία την καθιστούν ελκυστική για ενσωμάτωση σε έναν Ασύρματο Κόμβο [114], [115].

Για να διερευνηθεί η καταλληλότητά της και να προσαρμοστεί στις ανάγκες της κατηγοριοποίησης οχημάτων γίνεται μια εκτενής μελέτη της μεθόδου σε επίπεδο προσομοίωσης. Χρησιμοποιούνται ηχογραφημένα ακουστικά και σεισμικά σήματα από δύο τύπους οχημάτων, που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια ενός πραγματικού πειράματος, τα οποία και κωδικοποιούνται με τη μέθοδο TESPAP μέσω κατάλληλου αλφαβήτου. Από την κωδικοποίηση προκύπτουν πίνακες - χαρακτηριστικά διανύσματα - σταθερών διαστάσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση των οχημάτων σε κλάσεις. Δοκιμάζονται διαφορετικά αλφάβητα και διαφορετικοί αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης και επιλέγονται τα καταλληλότερα για την υλοποίηση στον

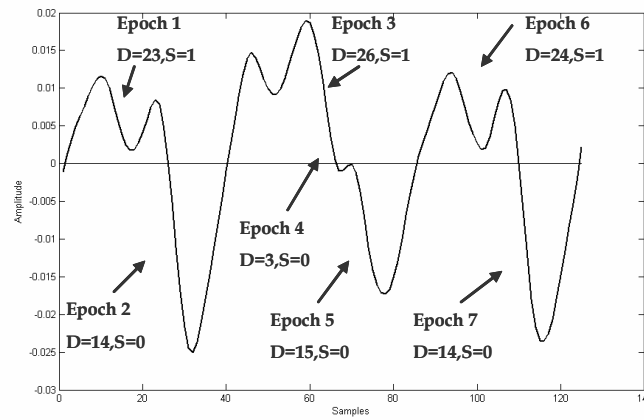
Ασύρματο Κόμβο. Στο επίπεδο αυτό της προσομοίωσης, η όλη επεξεργασία γίνεται στο περιβάλλον Matlab. Στη συνέχεια, ενσωματώνεται η μέθοδος στον Ασύρματο Κόμβο Αισθητήρων Mica2 για τον έλεγχο της υλοποιησιμότητας της μεθόδου και σε επίπεδο υλικού. Υλοποιείται ένας Ασύρματος Κόμβος Αναγνώρισης Οχημάτων, ο οποίος δοκιμάζεται σε πραγματικές συνθήκες σε ένα σενάριο κατηγοριοποίησης 3 οχημάτων (αυτοκινήτου, λεωφορείου, μοτοσυκλέτας). Μετράται αναλυτικά η κατανάλωση ενέργειας και υπολογίζεται η διάρκεια ζωής του.

4.3.Μέθοδος Αναγνώρισης Οχημάτων με Κωδικοποίηση Σήματος στο Πεδίο του Χρόνου

Η μέθοδος TESPAP είχε αρχικά προταθεί από τους King και Gosling για την κωδικοποίηση της φωνής με απώτερο σκοπό, τόσο τη συμπίεση του σήματος όσο και την αυτόματη αναγνώριση και ταυτοποίηση του ομιλητή [95]. Οι δυνατότητες κωδικοποίησης της μεθόδου δεν περιορίζονται μόνο σε σήματα φωνής, αλλά σε κάθε σήμα οριοθετημένης ζώνης. Η λειτουργία της μεθόδου μπορεί να συνοψιστεί σε μερικά απλά βήματα, που παραθέτονται παρακάτω (Εικόνα 24):

1. Διάρθρωση της κυματομορφής σε διαδοχικά τμήματα, που αντιστοιχούν στο μέρος του σήματος, το οποίο περικλείεται από δύο πραγματικούς μηδενισμούς.
2. Χαρακτηρισμός του κάθε τμήματος χρησιμοποιώντας δύο παραμέτρους, έστω D και S . Η παράμετρος D (Duration) σχετίζεται με τη χρονική διάρκεια του τμήματος και η παράμετρος S (Shape) με τη μορφή του.
3. Αντιστοίχιση του ζευγαριού (D, S), που περιγράφει το κάθε τμήμα, σε ένα χαρακτήρα ενός αλφαβήτου, που έχει δημιουργηθεί από πριν, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη σήματος.
4. Δημιουργία ενός πίνακα σταθερών διαστάσεων, ο οποίος περιέχει τη συχνότητα εμφάνισης κάθε χαρακτήρα του αλφαβήτου στο σύνολο της κωδικοποιημένης κυματομορφής. Ο πίνακας αυτός διατηρεί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αρχικού σήματος και περιέχει αρκετή πληροφορία, η

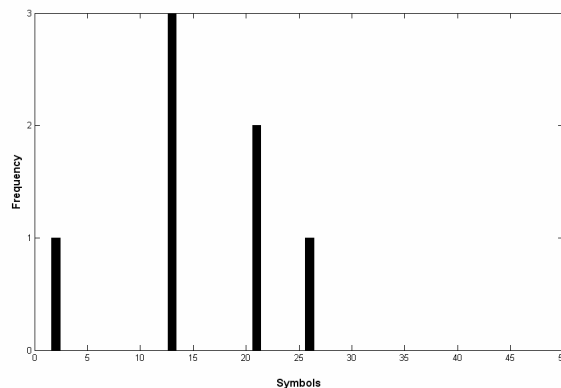
οποία καθιστά δυνατή την αναγνώριση και διάκριση ενός σήματος από άλλα.



(α)

	S=0	S=1	S=2	S=3	S=4	S=5
D=1	1	0	0	0	0	0
D=2	1	0	0	0	0	0
D=3	2	2	0	0	0	0
D=4	3	3	0	0	0	0
D=5	4	5	5	0	0	0
D=6	6	5	5	0	0	0
D=7	7	5	5	5	0	0
D=8	7	5	5	5	0	0
D=9	8	9	9	9	9	0
D=10	8	9	10	10	10	0
D=11	11	12	10	10	10	10
D=12	11	12	10	10	10	10
.
.
.
D=54	43	44	45	46	47	48

(β)



(γ)

Εικόνα 24: Η μέθοδος κωδικοποίησης TESPAP: α) Βήματα 1 και 2, β) Βήμα 3, γ) Βήμα 4

4.3.1. Σχετική Εργασία

Η μέθοδος TESPAP έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στον τομέα της αναγνώρισης φωνής και σε αυτόματα συστήματα ταυτοποίησης ομιλητή, κυρίως για εφαρμογές ασφάλειας. Τα αποτελέσματα, που έχει να επιδείξει στον τομέα αυτό είναι θεαματικά, επιτυγχάνοντας ποσοστά λανθασμένης απόρριψης (False Reject Rate) της τάξης του 0.023% σε 4360 επαναλήψεις και λανθασμένης αποδοχής (False Accept Rate) της τάξης του 0.153% σε 2616 επαναλήψεις [96]-[98]. Ο συνδυασμός της μεθόδου με τις δυνατότητες ταξινόμησης, που προσφέρουν τα

Νευρωνικά Δίκτυα (ANN - Artificial Neural Networks), οδήγησε στην επιλογή της TESPAN/ANN, για την υλοποίηση μιας έξυπνης κάρτας αποθήκευσης βιομετρικών χαρακτηριστικών, με σκοπό την ταυτοποίηση ενός χρήστη στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος CASCADE Esprit Smart Card. Η υλοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας έναν επεξεργαστή RISC στα 32-bit με μεγάλη επιτυχία [99].

Παρόμοιες εργασίες έχουν δημοσιευθεί από άλλους επιστήμονες, που ερεύνησαν θέματα, όπως την ταξινόμηση των κωδικοποιημένων σημάτων χρησιμοποιώντας τα νευρωνικά δίκτυα, την εξάρτηση των επιδόσεων ταξινόμησης από το αλφάβητο, αλλά και τη δημιουργία του αλφάβητου χρησιμοποιώντας μεθόδους, όπως Kohonen Self-Organizing Maps και Vector Quantization [101]-[107].

Η μέθοδος αποδίδει εξίσου καλά και σε άλλες περιπτώσεις ταξινόμησης και κατηγοριοποίησης σημάτων, εκτός της φωνής. Έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων στις μονώσεις των μετασχηματιστών [109], στην παρακολούθηση της κατάστασης μηχανικών κιβωτίων ταχυτήτων και στην έγκαιρη διάγνωση μιας επικείμενης βλάβης [110], επίσης στην αυτόματη αναγνώριση ζώων και εντόμων από τους παραγόμενους ήχους [111], [112] και τέλος στην αναγνώριση μουσικών οργάνων [113].

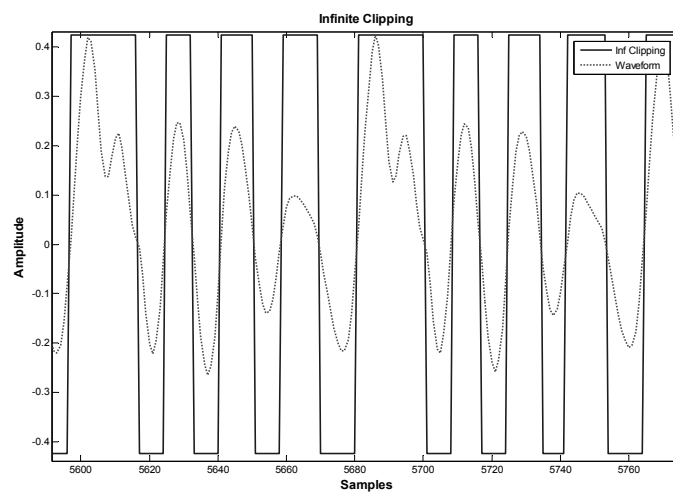
Ολοκληρωμένα συστήματα που υποστηρίζουν την κωδικοποίηση με τη μέθοδο TESPAN καθώς και δυνατότητες αυτόνομης ταξινόμησης με χρήση των ANN, έχουν υλοποιηθεί σε μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής 8051 καταλαμβάνοντας 2656 bytes μνήμης RAM κατά την κωδικοποίηση σήματος 1.5 δευτερολέπτων. Η δειγματοληψία γίνεται στα 20 kHz και η όλη διαδικασία της κωδικοποίησης ολοκληρώνεται σε πραγματικό χρόνο, καταναλώνοντας το 80% του χρόνου του επεξεργαστή [100]. Πιο σύγχρονο παράδειγμα αποτελεί η υλοποίηση στον μικροελεγκτή ATmega163L της Atmel με 8-bit αρχιτεκτονική και μόλις 1 Kb διαθέσιμη μνήμη RAM [107].

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις σε συνδυασμό με τις ελάχιστες απαιτήσεις της τόσο σε υπολογιστική ισχύ όσο και

σε μνήμη, ήταν οι λόγοι για τους οποίους υιοθετήθηκε για την κατηγοριοποίηση οχημάτων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.

4.3.2. Περιγραφή της Μεθόδου TESPAP

Η μέθοδος βασίζεται σε μια παλαιότερη μέθοδο, που είχε προταθεί από τους Licklider και Pollack, σύμφωνα με την οποία, η αφαίρεση της πληροφορίας του πλάτους από μια κυματομορφή ομιλίας και η διατήρηση μόνο των μεταβάσεων από το μηδέν, δεν επιφέρει σημαντική μείωση στην αναγνώριση και αντίληψη μιας λέξης από κάποιον ακροατή. Μάλιστα, επιτυγχάνεται απόδοση της τάξης του 97.9 % στη μέση καταληπτότητα των λέξεων [108]. Η μέθοδος, που ονομάστηκε Ατέρμων Ψαλιδισμός (Infinite Clipping), είναι μια άμεση απεικόνιση της διάρκειας μεταξύ των διαδοχικών μηδενισμών του σήματος, και άρα εξαρτάται από τη μορφή της κυματομορφής και όχι από τη συχνότητα δειγματοληψίας, αρκεί αυτή να ικανοποιεί τους περιορισμούς που τίθενται από το θεώρημα δειγματοληψίας των Shannon – Nyquist (Εικόνα 25).



Εικόνα 25: Η μέθοδος του Ατέρμονος Ψαλιδισμού του πλάτους

Οι παραπάνω παρατηρήσεις πάνω στη σπουδαιότητα των μηδενικών ενός σήματος και στην στενή σχέση τους με την καταληπτότητά του, οδήγησαν τους επιστήμονες στο να ερευνήσουν περισσότερο τις μεθόδους κωδικοποίησης και προσέγγισης βασισμένες στους πραγματικούς και φανταστικούς μηδενισμούς. Μάλιστα, οι έρευνες επεκτάθηκαν στο ρόλο που παίζουν και οι φανταστικοί

μηδενισμοί του σήματος, δηλαδή τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα. Αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν και η μέθοδος TESPAP.

Ας υποθέσουμε, ότι μια κυματομορφή έχει εύρος ζώνης W και χρονική διάρκεια T . Το σήμα περιέχει $2TW$ μηδενισμούς, αριθμός που τις περισσότερες φορές είναι αρκετές χιλιάδες. Παρόλο που οι πραγματικοί μηδενισμοί είναι εύκολο να προσδιοριστούν, δεν ισχύει το ίδιο και για τους φανταστικούς. Το πρόβλημα παρακάμπτεται, αν αντί για την ακριβή θέση των φανταστικών μηδενικών, προσδιοριστεί μια περιοχή του σήματος, μέσα στην οποία υπάρχει κάποιος φανταστικός μηδενισμός. Για τον λόγο αυτό, αρκεί να διαμεριστεί το σήμα σε διαδοχικά τμήματα, που ορίζονται μεταξύ δύο πραγματικών μηδενισμών και να αναλυθεί χωριστά το κάθε τμήμα για φανταστικούς μηδενισμούς, οι οποίοι εμφανίζονται σαν διακύμανση της κυματομορφής, δημιουργώντας τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα σήμα οριοθετημένης ζώνης μπορεί να προσεγγιστεί διαμερίζοντάς το σε διαδοχικά τμήματα με δύο παραμέτρους:

- **Διάρκεια ($D - Duration$)**, που είναι ο αριθμός των δειγμάτων μεταξύ δυο διαδοχικών πραγματικών μηδενικών, που παρέχει πληροφορία για τη θεμελιώδη συχνότητα της κυματομορφής:

$$f = f_s \times (2 \times D)^{-1}, f_s: \text{Συχνότητα Δειγματοληψίας}$$

- **Μορφή ($S - Shape$)**, που είναι ο αριθμός των τοπικών ελαχίστων (για ένα θετικό τμήμα) ή των τοπικών μεγίστων (για ένα αρνητικό τμήμα). Η μορφή ενός τμήματος παρέχει πληροφορία για τις αρμονικές του σήματος.

Η διαδικασία της κωδικοποίησης έχει σαν αποτέλεσμα την αντιστοίχιση κάθε τμήματος της κυματομορφής σε ένα διδιάστατο χώρο, με διαστάσεις $D_{\max} \times S_{\max}$, όπου D_{\max} και S_{\max} οι μέγιστες τιμές των παραμέτρων D και S . Ο χώρος αυτός μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες διαστάσεις ανάλογα με το εύρος ζώνης, την πολυπλοκότητα του σήματος και τη συχνότητα δειγματοληψίας του. Προκειμένου να μειωθεί το πλήθος των απαιτούμενων μεταβλητών για την περιγραφή του κάθε τμήματος, χρησιμοποιείται μια μέθοδος κβάντισης, με την

οποία παράγεται μια μονοδιάστατη συμβολοσειρά από το διοδιάστατο χώρο. Τα ζεύγη D-S αντιστοιχίζονται σε ένα σύμβολο - χαρακτήρα χρησιμοποιώντας ένα αλφάβητο για την προσέγγιση του χώρου D-S με λιγότερα στοιχεία [98].

Η κωδικοποίηση μιας κυματομορφής με την παραπάνω μέθοδο οδηγεί σε μια σειρά συμβόλων, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός μονοδιάστατου πίνακα M στοιχείων, που περιέχει τον αριθμό των εμφανίσεων κάθε συμβόλου στη συμβολοσειρά, όπου M είναι ο αριθμός των συμβόλων του αλφαβήτου. Ο πίνακας αυτός ονομάζεται πίνακας S και μπορεί να δημιουργηθεί με τον παρακάτω αλγόριθμο:

$$S(i) = \sum_{j=1}^N f(x(j)), 1 \leq i \leq M$$

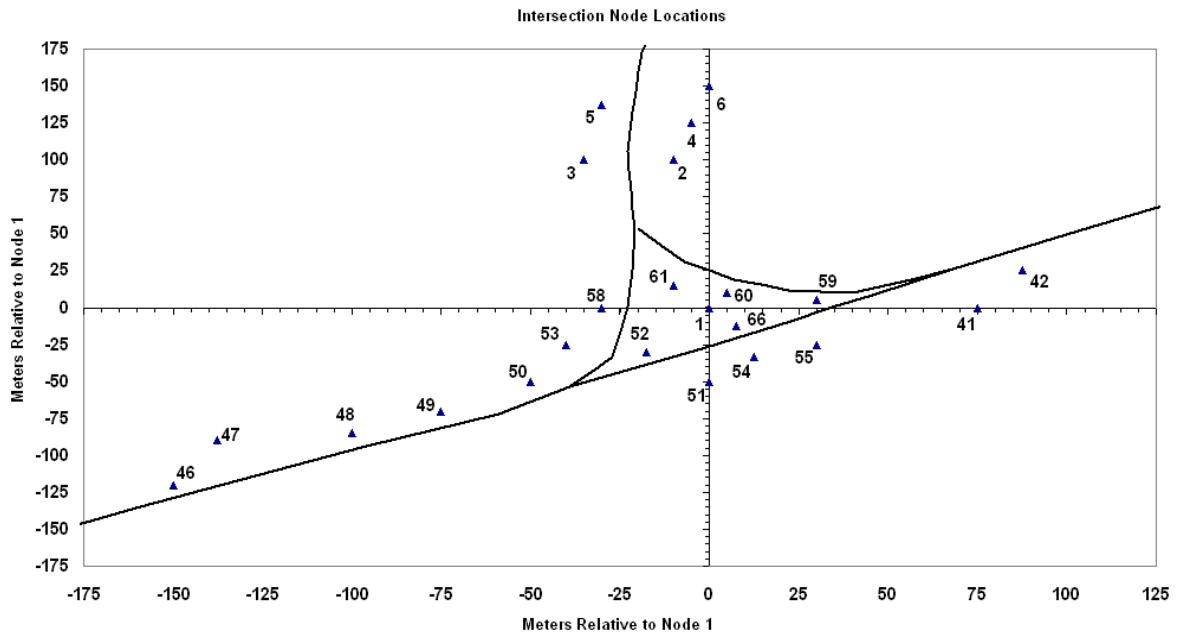
Όπου $S(i)$ = i οστό στοιχείο του S-Matrix, N = αριθμός των συνολικών τμημάτων της κυματομορφής, M = ο συνολικός αριθμός των συμβόλων του αλφαβήτου, $x(j)$: το σύμβολο που περιγράφει το j οστό τμήμα του σήματος, $f(x(j)) = 1$ αν $x(j) = i$ (0 διαφορετικά).

4.3.3. Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Διανυσμάτων από την Ακουστική και τη Σεισμική Υπογραφή Οχήματος

4.3.3.1. Σύνολο Δεδομένων Αξιολόγησης Αλγορίθμων

Το σύνολο των πειραματικών δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και την δοκιμή της μεθόδου αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχημάτων, περιλαμβάνει πραγματικά καταγεγραμμένα σήματα από ένα πείραμα, που διενεργήθηκε τον Νοέμβριο του 2001 στην περιοχή Twenty-nine Palms, CA, της Αμερικής με την ονομασία Sitex02 [56]. Αποτελείται από καταγεγραμμένα σήματα δύο διαφορετικών τύπων οχημάτων: 1) ενός ερπυστριοφόρου οχήματος μεταφοράς προσωπικού (Assault Amphibian Vehicle ή AAV) και 2) ενός βαρέως τύπου εξάτροχου φορτηγού (Dragon Wagon ή DW), από τρεις αισθητήρες: 1) Μικρόφωνο, 2) Γεώφωνο και 3) Αισθητήρα Υπέρουθρης Ακτινοβολίας. Η καταγραφή των δεδομένων έχει γίνει με τη βοήθεια ενός Δικτύου Αισθητήρων που αποτελείται από 23 κόμβους WINS NG 2.0 [39], το οποίο έχει εγκατασταθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να καλύπτει την περιοχή μιας διαστάρωσης τριών χωμάτων

δρόμων, στους οποίους κινούνται τα 2 οχήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26. Οι κόμβοι είναι διασυνδεδεμένοι ενσύρματα μέσω δικτύου Ethernet και όλα τα δεδομένα αποστέλλονται και συγκεντρώνονται σε ένα σύστημα καταγραφής. Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι τα 4960 Hz και η ακρίβεια του μετατροπέα A/D είναι 16 bits.



Εικόνα 26: Χωροταξικό Σχεδιάγραμμα των 23 Κόμβων [56]

Ο κάθε κόμβος καταγράφει διαρκώς τα δεδομένα από τους τρεις αισθητήρες ενώ τα δύο οχήματα εκτελούν τις προγραμματισμένες διαδρομές, 9 για την περίπτωση του AAV και 11 για την περίπτωση του DW.

Για να περιοριστεί ο όγκος των δεδομένων, με τα οποία θα δοκιμαστεί η μέθοδος, επιλέγονται τρεις από τις διαθέσιμες διαδρομές για κάθε όχημα. Έτσι, επιλέγονται οι διαδρομές 4 έως 6 και για τα δύο οχήματα (AAV4-AAV6 και DW4-DW6) καταλήγοντας σε 61 ανεξάρτητες καταγραφές για το AAV και 57 για το DW. Στην περίπτωση που το όχημα εισέλθει ή βρίσκεται εντός της εμβέλειας των αισθητήρων του κάθε κόμβου, ο κόμβος καταγράφει ικανοποιητικά το γεγονός. Σε διαφορετική περίπτωση, το σήμα είναι πολύ μικρής έντασης και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση του οχήματος. Σε κάθε διαδρομή ένας μέσος αριθμός 19 από τους 23 αισθητήρες καταγράφει σαφώς το γεγονός. Τα δεδομένα των κόμβων, που βρίσκονται στο κέντρο του σταυροδρομιού (κόμβοι 1,

52, 53, 56, 60, 61), χρησιμοποιούνται ως σύνολο εκπαίδευσης του συστήματος, για τη δημιουργία του χαρακτηριστικού διανύσματος της κάθε κλάσης οχήματος. Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα χρησιμοποιούνται ως σύνολο δοκιμής, για την δοκιμή του συστήματος και την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας της μεθόδου.

4.3.3.2. Προ-επεξεργασία Σήματος

Τα ακουστικά και τα σεισμικά σήματα φιλτράρονται πριν από τη διαδικασία κωδικοποίησης για τρεις κυρίως λόγους:

1. Για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των συμβόλων, που απαιτούνται για το αλφάβητο, διατηρώντας μόνο το απαραίτητο συχνοτικό φάσμα του σήματος. Στην ουσία, μειώνεται η μέγιστη πιθανή διάρκεια (D_{max}) του κάθε τμήματος του σήματος. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται και το μέγεθος του πίνακα S.
2. Για την εξάλειψη των υψηλών συχνοτήτων της κυματομορφής, κάτι που μπορεί να μεταφραστεί από τον κωδικοποιητή σαν τοπικά ελάχιστα ή μέγιστα, με αποτέλεσμα την εσφαλμένη αύξηση της παραμέτρου S (Shape).
3. Για τον περιορισμό του φαινομένου aliasing των υψηλών συχνοτήτων στις χαμηλότερες.

Χρησιμοποιείται ένα βαθυπερατό φίλτρο 5^{ης} τάξης, τύπου Butterworth με συχνότητα αποκοπής το 1 kHz για το ακουστικό σήμα και τα 500 Hz για το σεισμικό σήμα, που είναι και η περιοχή στην οποία κατανέμεται το σημαντικότερο ποσοστό της ενέργειας. Και στους δύο τύπους σημάτων αφαιρείται το DC μέρος τους και υποβιβάζεται η συχνότητα δειγματοληψίας του σεισμικού σήματος κατά ένα παράγοντα 4 και γίνεται 1240 Hz, ούτως ώστε να μειωθεί η διάρκεια του κάθε τμήματος της κυματομορφής, σε αριθμό δειγμάτων (πaráμετρος D).

Επιπλέον, οι συχνότητες κάτω των 40 Hz για το ακουστικό και κάτω των 10 Hz για το σεισμικό σήμα, κρίνονται μη σημαντικές και αγνοούνται, χωρίς ιδιαίτερη επίπτωση στις επιδόσεις. Ο περιορισμός αυτός μειώνει αισθητά την μέγιστη πιθανή τιμή της παραμέτρου D σε 62 για το ακουστικό και το σεισμικό σήμα (H

τιμή 62 προκύπτει για $f_{s \text{ acoustic}} = 4960 \text{ Hz}$ και $f_{s \text{ seismic}} = 1240 \text{ Hz}$). Ταυτόχρονα, περιορίζοντας και την μέγιστη τιμή της παραμέτρου S , αγνοώντας οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη από 5, προκύπτει ένα σύνολο από $62 \times 6 = 372$ πιθανά ζεύγη D/S , που περιγράφουν το κάθε τμήμα της κυματομορφής.

Τα πιθανά αυτά ζεύγη πρέπει να αντιστοιχιστούν σε ένα μικρότερο σύνολο συμβόλων, που θα αποτελεί και το αλφάβητο κωδικοποίησης των σημάτων, το οποίο όμως θα πρέπει να μπορεί να περιγράψει καλά το αρχικό σύνολο D/S , από το οποίο δημιουργήθηκε.

4.3.3.3. Αλφάβητο

Ο ρόλος του αλφαβήτου είναι καθοριστικός στην απόδοση της μεθόδου αλλά και στο μέγεθος του πίνακα S . Στις περισσότερες περιπτώσεις κατηγοριοποίησης σημάτων φωνής χρησιμοποιείται ένα τυπικό αλφάβητο 28 συμβόλων για την προσεγγιστική περιγραφή ενός σήματος φωνής στη ζώνη των 300 - 3000 Hz, που δειγματοληπτείται στα 22 kHz [96]. Για το σήμα αυτό, η μέγιστη τιμή της παραμέτρου D είναι 37, ενώ της παραμέτρου S περιορίζεται στο 5. Το τυπικό αλφάβητο, όμως, είναι βελτιστοποιημένο για την κωδικοποίηση ηχητικών σημάτων φωνής, και η απόδοσή του στην κωδικοποίηση και κατηγοριοποίηση των ηχητικών και σεισμικών υπογραφών των οχημάτων, πρέπει να μελετηθεί περισσότερο. Μέθοδοι που έχουν προταθεί για την δημιουργία ενός προσαρμοσμένου αλφαβήτου είναι η Διανυσματική Κβάντιση (Vector Quantization) και οι Αυτό-Διοργανωνόμενοι Χάρτες Kohonen (Kohonen Self-Organizing Maps - SOM) [104],[105].

Για την καλύτερη απόδοση της μεθόδου, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός αλφαβήτου, το οποίο να είναι προσαρμοσμένο στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ηχητικών και σεισμικών σημάτων, που δημιουργεί ένα όχημα. Για την εύρεση του βέλτιστου τρόπου δημιουργίας του, κατασκευάζονται και μελετώνται τέσσερα διαφορετικά αλφάβητα με χρήση του υποσυνόλου δοκιμής των σημάτων, όπως αυτό περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.3.1, τα οποία συγκρίνονται, τόσο μεταξύ τους όσο και με το τυπικό αλφάβητο. Τα δύο πρώτα αλφάβητα δημιουργούνται με έναν απλό αλγόριθμο, που χρησιμοποιεί τα σημαντικότερα D/S ζεύγη και τα

αντιστοιχίζει σε ένα προκαθορισμένο πλήθος συμβόλων, το τρίτο στηρίζεται στον ίδιο απλό αλγόριθμο, λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν και τα συχνοτικά χαρακτηριστικά του σήματος, και το τέταρτο δημιουργείται με την μέθοδο των Kohonen SOM. Το πλεονέκτημα ενός ειδικά κατασκευασμένου αλφαβήτου είναι η κωδικοποίηση του σήματος, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, διατηρώντας ταυτόχρονα τον ελάχιστο δυνατό αριθμό των απαιτούμενων συμβόλων.

4.3.3.3.1. Προσαρμοσμένο Αλφάβητο

Το πρώτο βήμα στη δημιουργία ενός προσαρμοσμένου αλφαβήτου είναι να προσδιοριστεί η κατανομή των D/S ζευγών των ημιπεριόδων του ακουστικού και του σεισμικού σήματος ξεχωριστά. Δεδομένου, ότι τα δύο σήματα διαφέρουν ως προς το συχνοτικό τους περιεχόμενο, για την καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου κατηγοριοποίησης θα πρέπει να δημιουργηθούν δύο διαφορετικά αλφάβητα, ένα για το ακουστικό σήμα και ένα για το σεισμικό. Το αλφάβητο θα πρέπει να παρέχει την αντιστοίχιση στα σημαντικότερα D/S ζεύγη των σημάτων. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάζεται αρχικά ένας διαδιάστατος πίνακας D/S για κάθε σήμα του συνόλου εκπαίδευσης και για κάθε όχημα σύμφωνα με τον παρακάτω αλγόριθμο:

$$K_{ij} = \sum_{n=1}^N x(D_n, S_n) \quad \text{με}$$

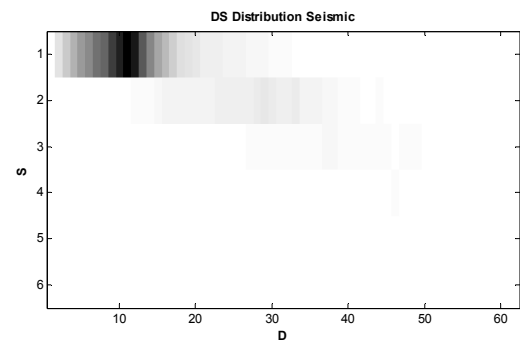
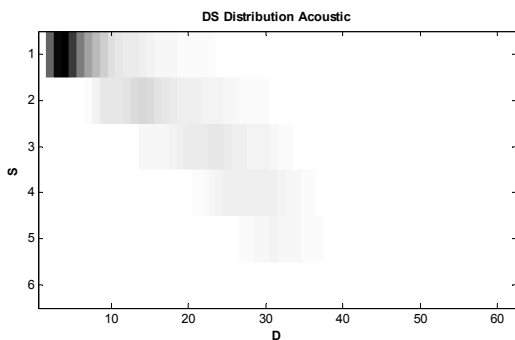
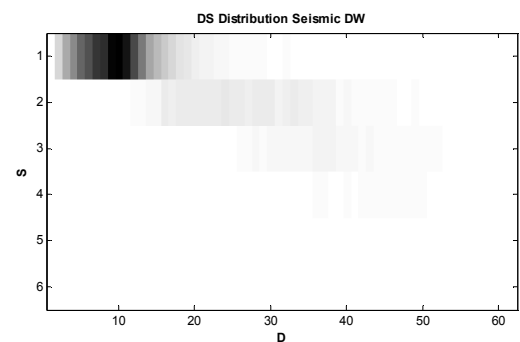
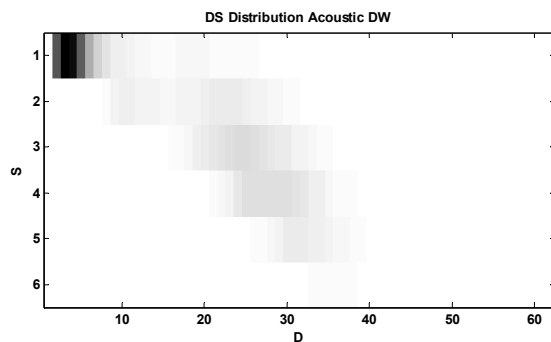
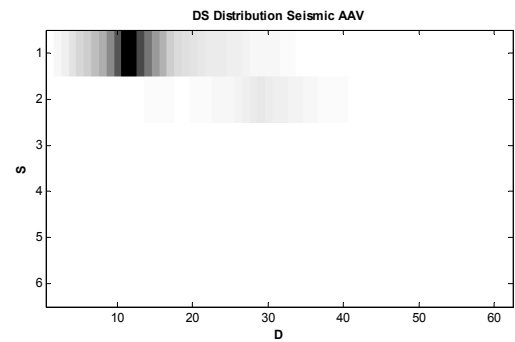
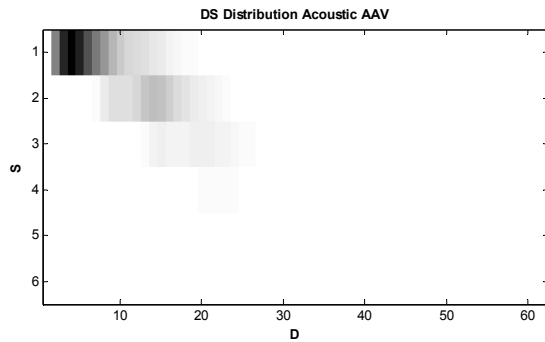
$$x(D_n, S_n) = 1 \text{ αν } i = D_n \text{ και } j = S_n$$

$$x(D_n, S_n) = 0 \text{ διαφορετικά}$$

όπου K_{ij} : το (i,j) στοιχείο του πίνακα D/S, N: ο συνολικός αριθμός τμημάτων του σήματος, n: η n^{στή} ημιπερίοδος του σήματος, D_n : η παράμετρος D της n^{στής} ημιπεριόδου, S_n : η παράμετρος S της n^{στής} ημιπεριόδου.

Οι πίνακες D/S ομαδοποιούνται ανά όχημα και ανά τύπο σήματος (ακουστικό ή σεισμικό). Οι πίνακες της κάθε ομάδας αθροίζονται μεταξύ τους και κανονικοποιούνται. Οι πίνακες που προκύπτουν περιέχουν ουσιαστικά τη συχνότητα εμφάνισης του κάθε ζευγαριού D/S κανονικοποιημένη σε έναν αριθμό από το 0 έως το 1. Το συχνότερα εμφανιζόμενο ζευγάρι D/S θα έχει την τιμή 1 και

αυτό που δεν έχει εμφανιστεί ποτέ θα έχει την τιμή 0. Η κατανομή των ζευγών D/S για κάθε τύπο σήματος και για κάθε όχημα, καθώς και οι συνδυασμένοι πίνακες ανά τύπο σήματος, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του προσαρμοσμένου αλφαβήτου, φαίνονται στην Εικόνα 27 και στην Εικόνα 28.



Εικόνα 27: Κατανομή των ζευγών D/S του ακουστικού σήματος για τα οχήματα AAV, DW και η συνδυασμένη τους κατανομή για την δημιουργία του ακουστικού αλφαβήτου

Εικόνα 28: Κατανομή των ζευγών D/S του σεισμικού σήματος για τα οχήματα AAV, DW και η συνδυασμένη τους κατανομή για την δημιουργία του ακουστικού αλφαβήτου

Το αλφάβητο δημιουργείται τελικά από τους συνδυασμένους πίνακες D/S για κάθε τύπο σήματος, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Επιλέγονται τα στοιχεία που έχουν τιμή μεγαλύτερη από ένα προεπιλεγμένο κατώφλι α . Η επιλογή του α έχει άμεση επίπτωση στο μέγεθος του αλφαβήτου που προκύπτει. Για την επίδειξη της σχέσης της παραμέτρου αυτής, τόσο με το μέγεθος του αλφαβήτου, όσο και με την

απόδοση της κατηγοριοποίησης των σημάτων, επιλέγονται δύο διαφορετικές τιμές του α , και δημιουργούνται δύο διαφορετικά αλφάβητα, ένα με $\alpha = 1\%$, που ονομάζεται C1 και ένα με $\alpha = 5\%$, που ονομάζεται C5.

2. Διαμερίζουμε την διάσταση D του πίνακα D/S σε τμήματα που σχηματίζουν μια αριθμητική πρόοδο με διαφορά 1, ξεκινώντας από την τιμή της παραμέτρου D , που έχει το πρώτο στοιχείο του πίνακα. Στα στοιχεία του πίνακα D/S με τιμή μεγαλύτερη κατωφλίου α , που βρίσκονται στο ίδιο τμήμα και έχουν ίδια τιμή της παραμέτρου S , δίδεται το ίδιο σύμβολο.
3. Τα στοιχεία του πίνακα D/S με τιμή μεγαλύτερη του κατωφλίου α , που έχουν την ίδια τιμή για το D , αλλά διαφορετική τιμή για το S , αντιστοιχίζονται σε διαφορετικό σύμβολο.
4. Συμπληρώνονται οι υπόλοιπες άδειες θέσεις του πίνακα του αλφαβήτου, χρησιμοποιώντας το κοντινότερο διαθέσιμο σύμβολο.

4.3.3.3.1.1. Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ (C1)

Θέτοντας σαν τιμή του $\alpha = 1\%$, προκύπτει ένα ακουστικό αλφάβητο με 25 σύμβολα και $D_{\max}=38$ και $S_{\max}=5$, ενώ το σεισμικό αλφάβητο απαιτεί 20 σύμβολα με $D_{\max}=55$ και $S_{\max}=3$. Το ακουστικό αλφάβητο επιτρέπει περισσότερα τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα (μεγαλύτερη τιμή για την παράμετρο S), που είναι ενδεικτικό των σημαντικότερων υψίσυχνων αρμονικών του ακουστικού σήματος, σε σχέση με το σεισμικό. Ταυτόχρονα αγνοούνται οι συχνότητες κάτω των $f_{\text{low}} = 65.3 \text{ Hz}$ ($D_{\max} = 38$ στα 4960 Hz). Το αντίθετο συμβαίνει στο σεισμικό αλφάβητο, όπου οι υψίσυχνες αρμονικές είναι λιγότερο σημαντικές, αλλά εδώ ενδιαφέρουν περισσότερο οι χαμηλές συχνότητες. Έτσι το αλφάβητο επιτρέπει $S_{\max} = 3$, αλλά το κάτω όριο των συχνοτήτων, που μπορούν να κωδικοποιηθούν, είναι τώρα $f_{\text{low}} = 11.3 \text{ Hz}$ ($D_{\max} = 55$ στα 1240 Hz). Το αλφάβητο παρουσιάζεται στον Πίνακα 14.

4.3.3.3.1.2. Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 5\%$ (C5)

Θέτοντας σαν τιμή του $\alpha = 5\%$ προκύπτει ένα ακουστικό αλφάβητο με 13 σύμβολα και $D_{\max}=32$ και $S_{\max}=3$, ενώ το σεισμικό αλφάβητο απαιτεί 11 σύμβολα με $D_{\max}=34$ και $S_{\max}=1$, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 15.

4.3.3.3.1.3. Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ και συχνοτικό διαμερισμό της διάστασης D (C1 - f)

Ο τρόπος διαμερισμού της διάστασης D των πινάκων D/S, που περιγράφηκε στο βήμα 2, οδηγεί στον ορισμό του ίδιου συμβόλου σε ένα τμήμα του σήματος για αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Για να γίνει το πρόβλημα πιο κατανοητό, παρουσιάζεται στον Πίνακα 13 η κατανομή των συχνοτήτων συναρτήσει της ομαδοποιημένης διάστασης D, για το αλφάβητο C1. Παρατηρείται ότι η διακριτική ικανότητα του αλφαβήτου είναι σχετικά μικρή και περιορίζεται από το γεγονός, ότι η διάσταση D ομαδοποιείται σαν αριθμητική πρόοδος. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα η διάσταση D διαμερίζεται σε μικρότερα τμήματα εύρους περίπου 40 Hz για το ακουστικό και 10 Hz για το σεισμικό σήμα, όπως φαίνεται στον ίδιο πίνακα. Το ακουστικό αλφάβητο που προκύπτει απαιτεί 33 σύμβολα, ενώ το σεισμικό αλφάβητο απαιτεί 26 σύμβολα (Πίνακας 16). Οι διαστάσεις D_{\max} και S_{\max} παραμένουν ίδιες με το αλφάβητο C1 δεδομένου ότι η τιμή του α παραμένει ίση με 1%.

Πίνακας 13: Κατανομή Συχνοτήτων στα αλφάβητα C1 και C1 - f

Κατανομή Συχνοτήτων συναρτήσει των παραμέτρων D και S - Ακουστικό (Hz)							Κατανομή Συχνοτήτων C1	Κατανομή Συχνοτήτων C1-f
D\ S →	0	1	2	3	4	5		
f = 4960 Hz							1653	1240
T = 202 μsec								
1	2480							413
2	1240							207
3	827						331	124
4	620							83
5	496						186	59
6	413							44
7	354							62
8	310	2480					103	41
9	276	2204						
10	248	1984						
11	225	1804						
12	207	1653	2480					
13	191	1526	2289				61	41
14	177	1417	2126					
15	165	1323	1984					
16	155	1240	1860	2480				
17	146	1167	1751	2334				41
18	138	1102	1653	2204				
19	131	1044	1566	2088			38	
20	124	992	1488	1984	2480			
21	118	945	1417	1890	2362			
22	113	902	1353	1804	2255			
23	108	863	1294	1725	2157			32
24	103	827	1240	1653	2067	2480		
25	99	794	1190	1587	1984	2381		
26	95	763	1145	1526	1908	2289	25	
27	92	735	1102	1470	1837	2204		
28	89	709	1063	1417	1771	2126		
29	86	684	1026	1368	1710	2052		17
30	83	661	992	1323	1653	1984		
31	80	640	960	1280	1600	1920		
32	78	620	930	1240	1550	1860		
33	75	601	902	1202	1503	1804		
34	73	584	875	1167	1459	1751	18	
35	71	567	850	1134	1417	1701		12
36	69	551	827	1102	1378	1653		
37	67	536	804	1072	1341	1609		
38	64	522	783	1044	1305	1566	2	

Κατανομή Συχνοτήτων συναρτήσει των παραμέτρων D και S - Σεισμικό (Hz)					Κατανομή Συχνοτήτων C1	Κατανομή Συχνοτήτων C1-f
D\ S →	0	1	2	3		
f = 1240 Hz					413	310
T = 806 μsec						
1	620					103
2	310					52
3	207				83	31
4	155	620				21
5	124	496			47	15
6	103	413	620			11
7	89	354	531			9
8	78	310	465	620		
9	69	276	413	551	26	13
10	62	248	372	496		
11	56	225	338	451		9
12	52	207	310	413		
13	48	191	286	382		11
14	44	177	266	354	15	
15	41	165	248	331		9
16	39	155	233	310		
17	36	146	219	292		
18	34	138	207	276		
19	33	131	196	261	10	
20	31	124	186	248		8
21	30	118	177	236		
22	28	113	169	225		
23	27	108	162	216		
24	26	103	155	207		
25	25	99	149	198		
26	24	95	143	191	6	
27	23	92	138	184		
28	22	89	133	177		7
29	21	86	128	171		
30	21	83	124	165		
31	20	80	120	160		
32	19	78	116	155		
33	19	75	113	150	4	
34	18	73	109	146		
35	18	71	106	142		
36	17	69	103	138		
37	17	67	101	134		
38	16	65	98	131		4
39	16	64	95	127		
40	16	62	93	124		
41	15	60	91	121		
42	15	59	89	118	3	
43	14	58	87	115		
44	14	56	85	113		
45	14	55	83	110		
46	13	54	81	108		
47	13	53	79	106		
48	13	52	78	103		
49	13	51	76	101		
50	12	50	74	99	2	
51	12	49	73	97		3
52	12	48	72	95		
53	12	47	70	94		
54	11	46	69	92		
55	11	45	68	90		

**Πίνακας 14: Προσαρμοσμένο Αλφάβητο
με $\alpha = 1\%$ (C1)**

Custom Alphabet $\alpha=1\%$ (C1)											
Acoustic Alphabet						Seismic Alphabet					
D↓ S→	0	1	2	3	4	5	D↓ S→	0	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1			
2	1	1	1	1	1	1	2	1			
3	2	2	2	2	2	2	3	2			
4	2	2	2	2	2	2	4	2			
5	3	3	3	3	3	3	5	3			
6	3	3	3	3	3	3	6	3			
7	3	4	4	4	4	4	7	3			
8	5	6	6	6	6	6	8	4			
9	5	6	6	6	6	6	9	4			
10	5	6	6	6	6	6	10	4			
11	5	6	6	6	6	6	11	4			
12	7	8	8	8	8	8	12	5	6		
13	7	8	9	9	9	9	13	5	6		
14	7	8	9	9	9	9	14	5	6		
15	7	8	9	9	9	9	15	5	6		
16	7	8	9	9	9	9	16	5	6		
17	10	11	12	12	12	12	17	7	8		
18	10	11	12	12	12	12	18	7	8		
19	10	11	12	12	12	12	19	7	8		
20	10	11	12	13	13	13	20	7	8		
21	10	11	12	13	13	13	21	7	8		
22	10	11	12	13	13	13	22	7	8		
23	14	15	16	17	17	17	23	9	10		
24	14	15	16	17	17	17	24	9	10		
25	14	15	16	17	17	17	25	9	10		
26	14	15	16	17	18	18	26	9	10		
27	14	15	16	17	18	18	27	9	10	11	
28	14	15	16	17	18	18	28	9	10	11	
29	14	15	16	17	18	18	29	9	10	11	
30	19	19	20	21	22	22	30	12	13	14	
31	19	19	20	21	22	22	31	12	13	14	
32	19	19	20	21	22	22	32	12	13	14	
33	19	19	20	21	22	23	33	12	13	14	
34	19	19	20	21	22	23	34	12	13	14	
35	19	19	20	21	22	23	35	12	13	14	
36	19	19	20	21	22	23	36	12	13	14	
37	19	19	20	21	22	23	37	12	13	14	
38	24	24	24	24	25	25	38	15	15	16	
							39	15	15	16	
							40	15	15	16	
							41	15	15	16	
							42	15	15	16	17
							43	15	15	16	17
							44	15	15	16	17
							45	15	15	16	17
							46	15	15	16	17
							47	18	18	18	19
							48	18	18	18	19
							49	18	18	18	19
							50	18	18	18	19
							51	18	18	18	19
							52	18	18	18	19
							53	18	18	18	19
							54	18	18	18	19
							55	20	20	20	20

**Πίνακας 15: Προσαρμοσμένο Αλφάβητο
με $\alpha = 5\%$ (C5)**

Custom Alphabet $\alpha=5\%$ (C5)							
Acoustic Alphabet					Seismic Alphabet		
D↓ S→	0	1	2	3	D↓ S→	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	1	1
3	2	2	2	2	3	2	2
4	2	2	2	2	4	2	2
5	3	3	3	3	5	3	3
6	3	3	3	3	6	3	3
7	3	3	3	3	7	3	3
8	4	5	5	5	8	4	4
9	4	5	5	5	9	4	4
10	4	5	5	5	10	4	4
11	4	5	5	5	11	4	4
12	6	7	7	7	12	5	6
13	6	7	7	7	13	5	6
14	6	7	7	7	14	5	6
15	6	7	7	7	15	5	6
16	6	7	7	7	16	5	6
17	8	8	8	8	17	7	8
18	8	8	9	9	18	7	8
19	8	8	9	9	19	7	8
20	8	8	9	9	20	7	8
21	8	8	9	9	21	7	8
22	8	8	9	9	22	7	8
23	10	10	11	11	23	9	10
24	10	10	11	12	24	9	10
25	10	10	11	12	25	9	10
26	10	10	11	12	26	9	10
27	10	10	11	12	27	9	10
28	10	10	11	12	28	9	10
29	10	10	11	12	29	9	10
30	13	13	13	13	30	11	11
31	13	13	13	13	31	11	11
32	13	13	13	13	32	11	11
					33	11	11
					34	11	11

Πίνακας 16: Προσαρμοσμένο Αλφάβητο με $\alpha = 1\%$ και συχνοτικό διαμερισμό της διάστασης D (C1 - f)

Custom Alphabet $\alpha=1\%$ Frequency (C1-f)											
Acoustic Alphabet						Seismic Alphabet					
D\ S→	0	1	2	3	4	5	D\ S→	0	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7
8	9	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8
9	9	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9
10	11	12	12	12	12	12	10	9	9	9	9
11	11	12	12	12	12	12	11	10	10	10	10
12	13	14	14	14	14	14	12	10	11	11	11
13	13	14	15	15	15	15	13	12	13	13	13
14	13	14	15	15	15	15	14	12	13	13	13
15	16	17	18	18	18	18	15	14	15	15	15
16	16	17	18	18	18	18	16	14	15	15	15
17	16	17	18	18	18	18	17	14	15	15	15
18	16	17	18	18	18	18	18	14	15	15	15
19	16	17	18	18	18	18	19	16	17	17	17
20	19	20	21	22	22	22	20	16	17	17	17
21	19	20	21	22	22	22	21	16	17	17	17
22	19	20	21	22	22	22	22	16	17	17	17
23	19	20	21	22	22	22	23	16	17	17	17
24	19	20	21	22	22	22	24	16	17	17	17
25	19	20	21	22	22	22	25	18	19	19	19
26	19	20	21	22	23	23	26	18	19	19	19
27	24	25	26	27	28	28	27	18	19	20	20
28	24	25	26	27	28	28	28	18	19	20	20
29	24	25	26	27	28	28	29	18	19	20	20
30	24	25	26	27	28	28	30	18	19	20	20
31	24	25	26	27	28	28	31	18	19	20	20
32	24	25	26	27	28	28	32	18	19	20	20
33	29	29	30	31	32	33	33	18	19	20	20
34	29	29	30	31	32	33	34	21	22	23	23
35	29	29	30	31	32	33	35	21	22	23	23
36	29	29	30	31	32	33	36	21	22	23	23
37	29	29	30	31	32	33	37	21	22	23	23
38	29	29	30	31	32	33	38	21	22	23	23
							39	21	22	23	23
							40	21	22	23	23
							41	21	22	23	23
							42	21	22	23	23
							43	24	24	25	26
							44	24	24	25	26
							45	24	24	25	26
							46	24	24	25	26
							47	24	24	25	26
							48	24	24	25	26
							49	24	24	25	26
							50	24	24	25	26
							51	24	24	25	26
							52	24	24	25	26
							53	24	24	25	26
							54	24	24	25	26
							55	24	24	25	26

4.3.3.3.2. Αλφάβητο Αυτοοργανούμενου Χάρτη (SOM)

Ο Αυτοοργανώμενος Χάρτης είναι ένα νευρωνικό δίκτυο, που στηριζόμενο στις αρχές της μη επιτηρούμενης μάθησης, χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση ενός αρχικού χώρου πολλών διαστάσεων (ή πολλών στοιχείων) σε ένα χώρο λιγότερων διαστάσεων (ή λιγότερων στοιχείων). Υλοποιείται με ένα νευρωνικό δίκτυο ενός επιπέδου, τροφοδοτούμενου από εμπρός, του οποίου οι νευρώνες εξόδου αποτελούν ένα πλέγμα δύο ή τριών διαστάσεων. Όλοι οι νευρώνες εξόδου είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους. Σε κάθε νευρώνα αντιστοιχίζεται και ένα διάνυσμα βαρύτητας, που έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτό του διανύσματος εισόδου. Το δίκτυο εκπαιδεύεται με τη ρύθμιση των διανυσμάτων βαρύτητας του κάθε νευρώνα, ανάλογα με την επιβαλλόμενη είσοδο στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ανταγωνιστικής μάθησης [116], [117].

Στη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζουμε, χρησιμοποιήθηκε μια υλοποίηση ενός SOM, που διατίθεται στο Neural Network Toolbox του Matlab. Το δίκτυο αποτελείται από 25 νευρώνες για το ακουστικό αλφάβητο και από 20 νευρώνες για το σεισμικό διατεταγμένους σε ένα δίκτυο 5x5 και 5x4 στοιχείων αντίστοιχα. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε αυτός ο αριθμός νευρώνων είναι για να δημιουργηθεί ένα αλφάβητο με τον ίδιο αριθμό συμβόλων, όπως το αλφάβητο C1. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η σύγκρισή τους. Η εκπαίδευση του δικτύου γίνεται από τα ζεύγη D/S του συνόλου εκπαίδευσης της διαδρομής 6 (σήματα των κόμβων 1, 52, 53, 56, 60, 61 των AAV6 και DW6) χρησιμοποιώντας τον αντίστοιχο τύπο σήματος (ακουστικό / σεισμικό), για την δημιουργία των αντίστοιχων αλφαβήτων. Στο εκπαιδευμένο δίκτυο εισάγονται όλα τα πιθανά ζεύγη D/S, τα οποία και αντιστοιχίζονται στον αντίστοιχο νευρώνα εξόδου, ο οποίος στην ουσία αποτελεί και ένα σύμβολο του αλφαβήτου. Το ακουστικό και το σεισμικό αλφάβητο, που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή, παρουσιάζεται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 17: Αλφάβητο Αυτοοργανούμενου Χάρτη

SOM 25 Neurons							
Acoustic Alphabet							
D↓ S→	0	1	2	3	4	5	
1	21	21	21	21	21	21	
2	21	21	21	21	21	21	
3	21	21	21	21	21	21	
4	16	16	16	16	22	22	
5	22	22	22	22	22	22	
6	22	22	22	22	22	22	
7	22	22	22	22	22	22	
8	22	22	22	22	22	22	
9	11	11	11	11	11	11	
10	11	11	11	11	11	11	
11	11	11	11	11	11	11	
12	11	11	11	11	11	17	
13	11	11	17	17	17	17	
14	17	17	17	17	17	17	
15	17	17	17	17	17	17	
16	12	12	12	12	17	17	
17	12	12	12	12	12	12	
18	6	6	6	6	23	23	
19	6	6	6	23	23	23	
20	6	23	23	23	23	23	
21	1	23	23	23	23	23	
22	2	2	23	23	23	23	
23	2	7	7	7	7	13	
24	7	7	7	13	13	13	
25	3	3	13	13	13	13	
26	3	8	13	13	13	13	
27	4	4	8	8	18	18	
28	5	4	18	18	18	18	
29	5	5	18	18	18	18	
30	9	9	14	24	24	24	
31	10	10	24	24	24	24	
32	10	10	24	24	24	24	
33	15	15	19	19	19	19	
34	15	15	15	19	19	25	
35	15	15	25	25	25	25	
36	15	20	20	20	20	20	
37	20	20	20	20	20	20	
...	
62	20	20	20	20	20	20	

SOM 20 Neurons							
Seismic Alphabet							
D↓ S→	0	1	2	3	4	5	
1	20	20	20	20	20	20	
...	
11	20	20	20	20	20	20	
12	10	10	10	10	10	10	
13	10	10	10	10	10	10	
14	10	10	10	10	10	10	
15	19	19	5	5	5	5	
16	5	5	5	9	9	9	
17	9	9	9	9	9	9	
18	9	9	9	9	9	9	
19	18	18	18	18	18	18	
20	18	18	18	18	4	4	
21	14	4	4	4	4	4	
22	4	4	4	4	4	4	
23	4	4	4	4	4	4	
24	13	8	8	8	8	8	
25	13	8	8	8	8	8	
26	17	17	17	17	17	17	
27	17	17	17	17	17	17	
28	17	17	17	17	17	17	
29	17	17	17	17	17	17	
30	17	17	17	17	3	3	
31	3	3	3	3	3	3	
32	3	3	3	3	3	3	
33	3	3	3	3	3	3	
34	7	7	7	7	7	7	
35	7	7	7	7	7	7	
36	2	2	2	2	2	2	
37	12	2	2	2	2	2	
38	6	6	6	2	2	2	
39	1	1	1	1	1	1	
40	1	1	1	1	1	1	
41	11	16	16	16	16	16	
42	11	11	11	11	11	11	
43	11	11	11	11	11	11	
44	11	11	11	11	11	11	
45	11	11	11	11	11	11	
...	
62	11	11	11	11	11	11	

4.3.3.3. Τυπικό

Για λόγους πληρότητας, στον Πίνακα 18 δίνεται το τυπικό αλφάβητο, που έχει χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες εφαρμογές, που περιγράφονται στην βιβλιογραφία.

Πίνακας 18: Τυπικό Αλφάβητο 28 Συμβόλων

Standard TESPAP Alphabet						
D↓ S→	0	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6
7	6	6	6	6	6	6
8	7	8	8	8	8	8
9	7	8	8	8	8	8
10	7	8	8	8	8	8
11	9	10	10	10	10	10
12	9	10	10	10	10	10
13	9	10	10	10	10	10
14	11	12	13	13	13	13
15	11	12	13	13	13	13
16	11	12	13	13	13	13
17	11	12	13	13	13	13
18	11	12	13	13	13	13
19	14	15	16	17	17	17
20	14	15	16	17	17	17
21	14	15	16	17	17	17
22	14	15	16	17	17	17
23	14	15	16	17	17	17
24	18	19	20	21	22	22
25	18	19	20	21	22	22
26	18	19	20	21	22	22
27	18	19	20	21	22	22
28	18	19	20	21	22	22
29	18	19	20	21	22	22
30	18	19	20	21	22	22
31	23	24	25	26	27	28
32	23	24	25	26	27	28
33	23	24	25	26	27	28
34	23	24	25	26	27	28
35	23	24	25	26	27	28
36	23	24	25	26	27	28
37	23	24	25	26	27	28

4.3.3.3.4. Σύγκριση Χαρακτηριστικών Αλφαβήτων

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των πέντε αλφαβήτων, που χρησιμοποιήθηκαν για την κωδικοποίηση των σημάτων.

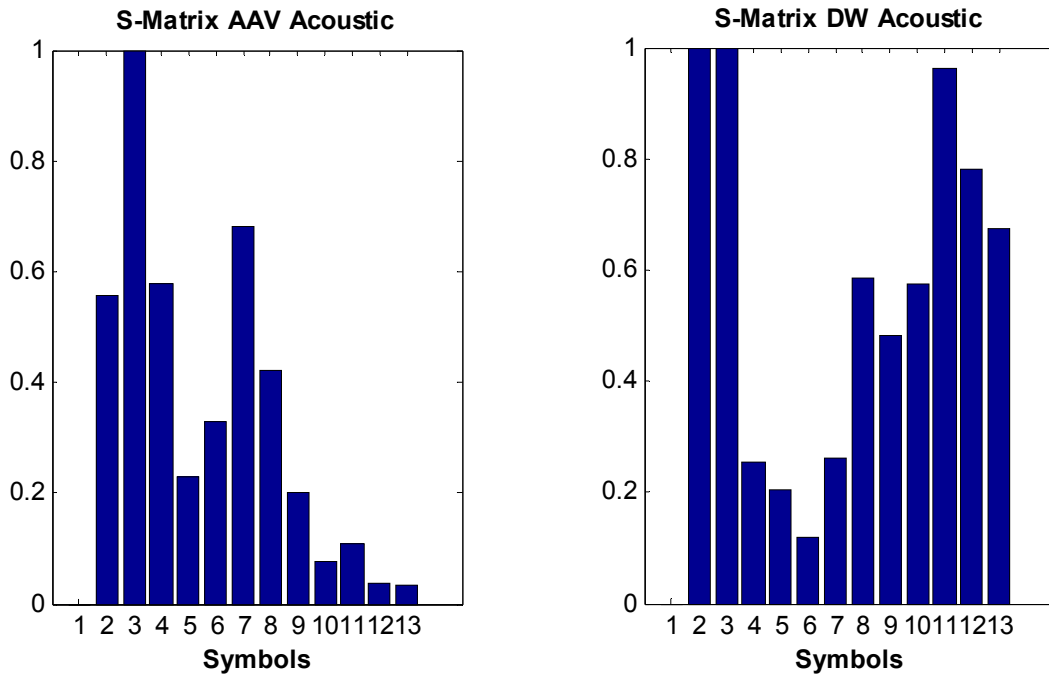
Πίνακας 19: Σύγκριση Αλφαβήτων

Σύγκριση Αλφαβήτων					
		Αριθμός Συμβόλων	D_{max}	S_{max}	f_{min} (Hz)
C1 ($\alpha=1\%$)	A	25	38	5	65,3
	S	20	55	3	11,3
C5 ($\alpha=5\%$)	A	13	32	3	77,5
	S	11	34	1	18,2
C1 - f	A	33	38	5	65,3
	S	26	55	3	11,3
SOM	A	25	62 (37)	5	40 (67)
	S	20	62 (42)	5	10 (14,8)
Τυπικό	A	28	37	5	67,0
	S	28	37	5	16,8

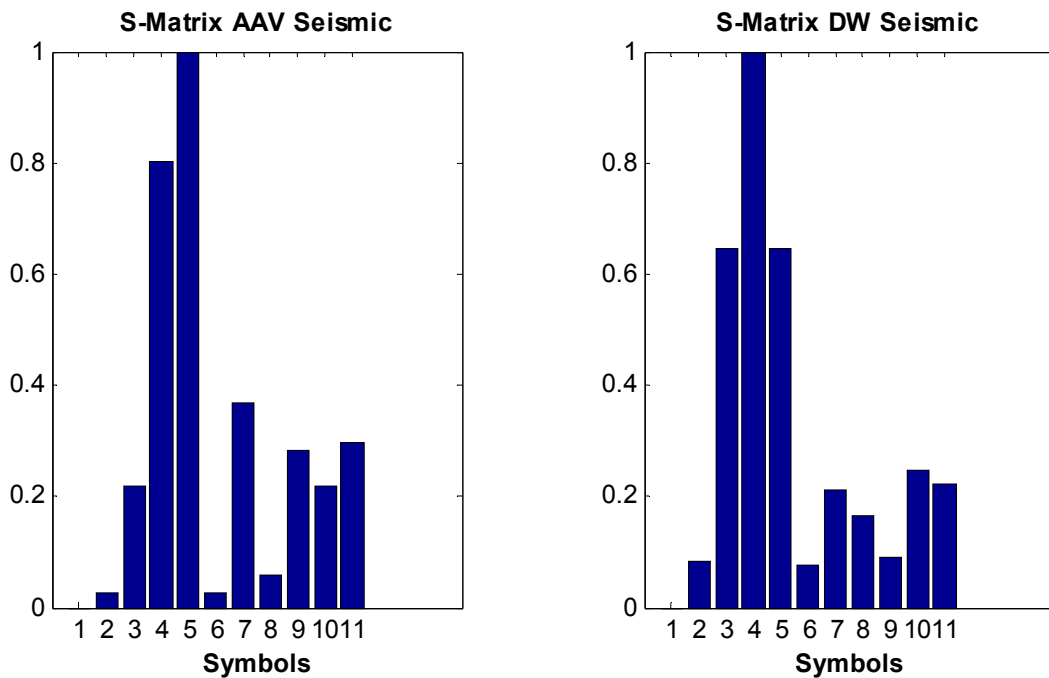
4.3.3.4. Δημιουργία Πίνακα S

Η διαδικασία της κωδικοποίησης και της δημιουργίας του πίνακα S, του χαρακτηριστικού διανύσματος του σήματος, ξεκινάει με την ανίχνευση αρκετά ισχυρού σήματος και σταματάει όταν η ισχύς του σήματος πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Για τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν, η διαδικασία αυτή έχει ήδη γίνει από τους δημιουργούς της βάσης δεδομένων Sitex02, με χρήση ενός αλγορίθμου CFAR (Constant False Alarm Rate), όπως περιγράφεται στις [54],[56].

Ο κάθε πίνακας S δημιουργείται χρησιμοποιώντας το ορισμένο αλφάβητο για κάθε τύπο σήματος (ακουστικό, σεισμικό), για κάθε όχημα (AAV, DW) και για κάθε κόμβο. Η διαδικασία καταλήγει σε ένα σύνολο πινάκων S. Όσοι πίνακες προέρχονται από τους κόμβους 1, 52, 53, 56, 60, 61, θα αποτελέσουν το υποσύνολο εκπαίδευσης για το στάδιο της κατηγοριοποίησης. Οι υπόλοιποι θα αποτελέσουν το υποσύνολο δοκιμής του συστήματος κατηγοριοποίησης. Στην Εικόνα 29 και στην Εικόνα 30 παρουσιάζονται ενδεικτικοί πίνακες S, που προέκυψαν από την κωδικοποίηση των σημάτων ενός κόμβου με χρήση του αλφαβήτου C5.



Εικόνα 29: Ακουστικοί κανονικοποιημένοι πίνακες S για τα οχήματα AAV και DW με χρήση του αλφαβήτου C5



Εικόνα 30: Σεισμικοί κανονικοποιημένοι πίνακες S για τα οχήματα AAV και DW με χρήση του αλφαβήτου C5

4.3.4. Αλγόριθμοι Κατηγοριοποίησης

Το επόμενο βήμα μετά από τη δημιουργία των πινάκων S είναι η κατηγοριοποίησή τους και η ταξινόμησή τους σε κλάσεις, ανάλογα με το όχημα από το οποίο προήλθαν. Η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος αυτόματης αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχημάτων περιλαμβάνει την εκπαίδευση του

συστήματος με ένα σύνολο δεδομένων, ούτως ώστε να μπορεί να αναγνωρίζει τις διαφορετικές κλάσεις οχημάτων. Το σύστημα στη συνέχεια δοκιμάζεται με άγνωστα σήματα, για τα οποία αποφασίζει σε ποιά από τις γνωστές του κλάσεις ανήκουν.

Δεδομένου, ότι το σύστημα προορίζεται να υλοποιηθεί σε έναν Ασύρματο Κόμβο Αισθητήρα, με τις ιδιαιτερότητες και τους περιορισμούς που έχουν ήδη αναφερθεί, ο ταξινομητής που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερος, παραμένοντας ταυτόχρονα αποτελεσματικός.

Η σταθερή διάσταση των πινάκων S διευκολύνει την ταξινόμησή τους με τη χρήση Νευρωνικών Δικτύων Τεχνητής Νοημοσύνης. Ο συνδυασμός της μεθόδου κωδικοποίησης TESPAP με ένα νευρωνικό ταξινομητή είναι μια προσέγγιση, που έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε προηγούμενες εργασίες. Το πρόβλημα με τις περισσότερες υλοποιήσεις νευρωνικού δικτύου είναι ότι απαιτούν αρκετά πολύπλοκες πράξεις αριθμών κινητής υποδιαστολής και αρκετή μνήμη, πόροι που είναι περιορισμένοι σε έναν Ασύρματο Κόμβο Αισθητήρων. Ταξινομητές, οι οποίοι κάνουν χρήση συναρτήσεων συσχέτισης, αρχετύπων (ή ελάχιστης απόστασης) και Hidden Markov Models έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία με μικρότερη όμως απόδοση [96],[98],[101]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ταξινομητής αρχετύπου, που χρησιμοποιεί την απόσταση Manhattan ή L1 μεταξύ ενός αρχετύπου και του διανύσματος δοκιμής, λόγω της απλότητάς του και των ελάχιστων υπολογιστικών απαιτήσεών του. Ο πολύ απλός L1 κατηγοριοποιητής χρησιμοποιείται από τους ερευνητές της [106] για την ταξινόμηση των πινάκων S με ικανοποιητικά αποτελέσματα και υλοποιείται σε μια πλατφόρμα, που χρησιμοποιεί έναν DSP (TMS320C541).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ζητούμενο ήταν η υιοθέτηση ενός ταξινομητή, που να αποδίδει αρκετά καλά και να έχει τη δυνατότητα να υλοποιηθεί, χωρίς πολλές αλλαγές, σε έναν Ασύρματο Κόμβο Αισθητήρα. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η υλοποίηση δύο ειδών ταξινομητή: 1) ενός σχετικά πολύπλοκου, που αποτελείται από μια ειδική υλοποίηση ενός νευρωνικού δικτύου, κατάλληλου για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα και 2) ενός πολύ απλού ταξινομητή αρχετύπου. Ειδικά για τον ταξινομητή αρχετύπου δοκιμάζεται, τόσο η

απόσταση L1, όσο και η Ευκλείδεια απόσταση ή απόσταση L2 και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Το νευρωνικό δίκτυο, που χρησιμοποιείται προέρχεται από μια τροποποιημένη έκδοση μιας έτοιμης βιβλιοθήκης στη γλώσσα προγραμματισμού C, που υλοποιεί ένα Γρήγορο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Fast Artificial Neural Network ή FANN), όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για χρήση σε επεξεργαστές χωρίς υποστήριξη αριθμών κινητής υποδιαστολής και έχει μικρές απαιτήσεις σε μνήμη [118].

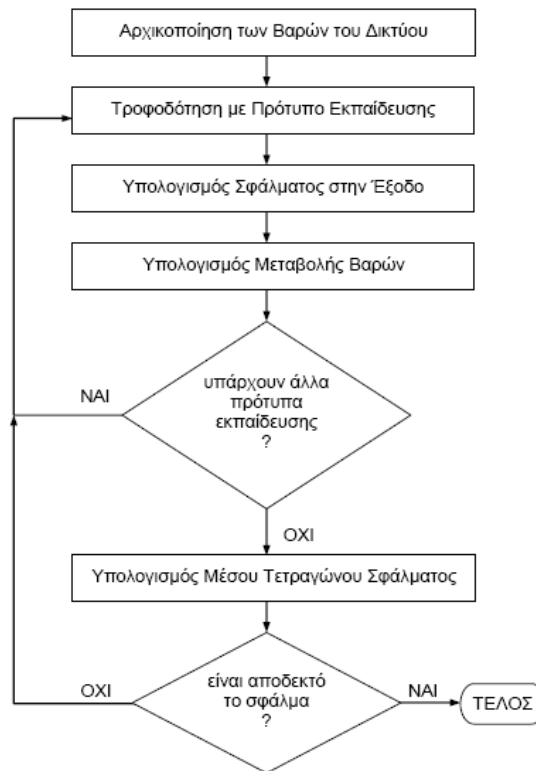
4.3.4.1. Κατηγοριοποίηση με χρήση Γρήγορου Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Η βιβλιοθήκη FANN (Fast Artificial Neural Network) υλοποιεί ένα πολυεπίπεδο δίκτυο, πλήρως συνδεδεμένο, πρόσθιας τροφοδότησης και διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο [119]. Με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης αυτής υλοποιούνται δύο προγράμματα στη C, ενός προγράμματος δημιουργίας και εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου με χρήση των δεδομένων του υποσυνόλου εκπαίδευσης, και ενός προγράμματος που χρησιμοποιεί το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για την δοκιμή των υπόλοιπων δεδομένων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της βιβλιοθήκης αυτής, έναντι των υπόλοιπων διαθέσιμων υλοποιήσεων, είναι οι γρηγορότεροι χρόνοι εκπαίδευσης και δοκιμής σε συστήματα που δεν διαθέτουν επεξεργαστή κινητής υποδιαστολής.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο σαν ταξινομητής, θα πρέπει να ολοκληρωθούν δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι το στάδιο εκπαίδευσης κατά τη διάρκεια του οποίου, το δίκτυο εκπαιδεύεται από την επιβαλλόμενη είσοδο και την επιθυμητή έξοδο. Όταν το στάδιο αυτό ολοκληρωθεί ακολουθεί το στάδιο της εκτέλεσης κατά τη διάρκεια του οποίου, δίδεται ως είσοδος στο δίκτυο ένα άγνωστο διάνυσμα εισόδου και προκύπτει μια έξοδος. Αν η έξοδος συμπίπτει με κάποια από τις γνωστές εξόδους του εκπαιδευμένου δικτύου, τότε το σήμα εισόδου κατηγοριοποιείται στην αντίστοιχη κλάση που δίδει την έξοδο αυτή.

Κατά το στάδιο εκπαίδευσης τροφοδοτούνται διαδοχικά στην είσοδο του δικτύου, όλα τα διανύσματα του υποσυνόλου εκπαίδευσης και για κάθε ένα

υπολογίζεται το σφάλμα της εξόδου και επαναυπολογίζονται τα βάρη, ώστε να μειωθεί το σφάλμα αυτό. Μόλις τελειώσει όλο το υποσύνολο εκπαίδευσης, υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και αν είναι μικρότερο ή ίσο του επιθυμητού, η διαδικασία σταματά, αν όχι η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το σφάλμα να πάρει την επιθυμητή τιμή ή μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων (εποχών) όπως φαίνεται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 31: Διαδικασία εκπαίδευσης Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου με τη μέθοδο της Ανάστροφης Μετάδοσης Λάθους [117]

4.3.4.1.1. Εκπαίδευση

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, όπως τον αριθμό των νευρώνων, τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων, τη συνάρτηση ενεργοποίησης καθώς και το ρυθμό μάθησης. Εξαιτίας της μη ντετερμινιστικής συμπεριφοράς του νευρωνικού δικτύου, το σύστημα ταξινόμησης αποτελείται από δύο παράλληλα νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας σαν συνάρτηση ενεργοποίησης την sigmoid-stepwise και το δεύτερο την stepwise. Η τελική έξοδος του συστήματος είναι ο μέσος όρος των δύο εξόδων των παράλληλων δικτύων.

Το κάθε δίκτυο αποτελείται από M νευρώνες για το επίπεδο εισόδου, καθώς και ένα νευρώνα πόλωσης, ένα κρυμμένο επίπεδο με K νευρώνες και ένα νευρώνα πόλωσης και ένα επίπεδο εξόδου με 2 νευρώνες, ένα για κάθε μια από τις δύο κλάσεις οχημάτων (AAV: έξοδος 1, DW: έξοδος 2). Το M είναι ο αριθμός των συμβόλων του αλφαβήτου, που στην ουσία είναι και το μέγεθος του πίνακα S , άρα και του διανύσματος εισόδου. Μετά από δοκιμές, επιλέχθηκε η τιμή του $K = 10$ για το κρυμμένο επίπεδο, εκτός από την περίπτωση των πινάκων S από το αλφάβητο C5 όπου επιλέχθηκε $K = 5$.

Κατά τη διάρκεια του σταδίου της εκπαίδευσης, το δίκτυο πρέπει να «μάθει» να ξεχωρίζει μεταξύ διαφορετικών κλάσεων οχημάτων βάσει του χαρακτηριστικού διανύσματος του κάθε οχήματος, που στην περίπτωση αυτή είναι ο πίνακας S . Για τον σκοπό αυτό, για κάθε τύπο σήματος (ακουστικό, σεισμικό) επιλέγεται ένα τμήμα του συνόλου των πινάκων S , σαν σύνολο εκπαίδευσης, και ένα σαν σύνολο δοκιμής. Η επιλογή αυτή μπορεί να είναι τυχαία ή να γίνει χειροκίνητα, επιλέγοντας για παράδειγμα τους πιο αντιπροσωπευτικούς πίνακες S κάθε κλάσης από τα καλύτερα καταγεγραμμένα σήματα. Σε μια πραγματική όμως υλοποίηση ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, οι χρήστες δεν θα έχουν την πολυτέλεια να εκπαιδεύσουν το σύστημα με τα καλύτερα δυνατά δεδομένα. Μια πιο πραγματική κατάσταση θα είναι να εκπαιδευτεί το σύστημα με τα δεδομένα, που θα ληφθούν από κάποιους Ασύρματους Κόμβους, από μια ή περισσότερες διελεύσεις των οχημάτων της κάθε κλάσης. Για την προσομοίωση του σεναρίου αυτού το σύστημα θα εκπαιδευτεί με τα δεδομένα των κόμβων 1, 52, 53, 56, 60 της επιλεγμένης διαδρομής (4, 5, ή 6). Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της θέσης τους, στο κέντρο του σταυροδρομιού. Για παράδειγμα, θα εκπαιδευτεί το σύστημα με ένα μέρος των δεδομένων της διαδρομής 4 και θα δοκιμαστεί με όλα τα υπόλοιπα δεδομένα των διαδρομών 4, 5 και 6. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται αν επιλεγούν οι διαδρομές 5 ή 6 σαν διαδρομές εκπαίδευσης. Κάτι τέτοιο έχει ενδιαφέρον για την εξέταση της απόδοσης του συστήματος όταν εκπαιδεύεται με τα δεδομένα μιας διαφορετικής διαδρομής, άρα και υπό διαφορετικές συνθήκες.

4.3.4.1.2. Δοκιμή

Δίνοντας σαν είσοδο στο εκπαιδευμένο σύστημα δικτύων ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα από το υποσύνολο δοκιμής, το σύστημα δίνει μια έξοδο στους νευρώνες εξόδου, που είναι ένας αριθμός μεταξύ του 0 και του 1 ανάλογα με τη βεβαιότητα με την οποία το δίκτυο κατηγοριοποιεί την είσοδο σε μια από τις δύο κλάσεις. Ο επόμενος απλός κανόνας χρησιμοποιείται για την τελική απόφαση της ταξινόμησης. Αν η έξοδος του νευρώνα 1 είναι μεγαλύτερη του 0,6 και η έξοδος του νευρώνα 2 είναι μικρότερη του 0,4 τότε το όχημα ανήκει στην κλάση 1 (AAV). Αν η έξοδος του νευρώνα 1 είναι μικρότερη του 0,4 και η έξοδος του νευρώνα 2 είναι μεγαλύτερη του 0,6 τότε το όχημα ανήκει στην κλάση 2 (DW).

Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για τη λήψη των μεμονωμένων αποτελεσμάτων για κάθε τύπο αισθητήρα που προέρχονται από κάθε Ασύρματο Κόμβο Αισθητήρων. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη βεβαιότητα στο αποτέλεσμα της ταξινόμησης μπορούν να συνδυαστούν τα αποτελέσματα και από τους δύο τύπους αισθητήρων, ακουστικών και σεισμικών. Η απόδοση του συστήματος μπορεί να μειωθεί, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία με την οποία αυτό ταξινομεί το κάθε όχημα, αφού τώρα χρησιμοποιούνται δύο ανεξάρτητα χαρακτηριστικά διανύσματα για κάθε όχημα. Τα συνδυασμένα αυτά αποτελέσματα λαμβάνονται μετά τον υπολογισμό του μέσου όρου των εξόδων του δικτύου, για τους ακουστικούς και τους σεισμικούς πίνακες S. Το τελικό αποτέλεσμα της συνδυασμένης ταξινόμησης λαμβάνεται από τις μέσες εξόδους, με χρήση του απλού κανόνα που περιγράφηκε προηγουμένως.

4.3.4.2. Κατηγοριοποίηση με χρήση ταξινομητή Αρχτύπου

Η μέθοδος της κατηγοριοποίησης βάσει αρχτύπου, αφορά στη σύγκριση του υπό εξέταση διανύσματος εισόδου, με το χαρακτηριστικό διάνυσμα, που αποτελεί το αρχέτυπο κάθε κλάσης. Το αρχέτυπο κάθε κλάσης δημιουργείται υπολογίζοντας τον μέσο όρο των χαρακτηριστικών διανυσμάτων του συνόλου εκπαίδευσης, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.4.1.1. Η σύγκριση γίνεται χρησιμοποιώντας την απόσταση L1 (Manhattan ή City Block) και την απόσταση L2 (Ευκλείδεια). Το

διάνυσμα εισόδου ταξινομείται στην κλάση, που δίνει την μικρότερη τιμή της απόστασης L1 ή L2, όπου:

$$L1 = \sum_{i=1}^M |T(i) - A(i)|$$

και

$$L2 = \sqrt{\sum_{i=1}^M (T(i) - A(i))^2}$$

με T(i): το i^{στο} στοιχείο του υπό δοκιμή S-Matrix, A(i): το i^{στο} στοιχείο του υπό δοκιμή αρχέτυπου S-Matrix, M: συνολικός αριθμός συμβόλων στο αλφάβητο.

4.3.5. Αποτελέσματα

Η προτεινόμενη μέθοδος αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχημάτων, με χρήση επεξεργασίας σήματος στο πεδίο του χρόνου, δοκιμάστηκε με τους πίνακες S, που προέκυψαν από την κωδικοποίηση των ακουστικών και σεισμικών σημάτων με τα 4 διαφορετικά αλφάβητα της παραγράφου 4.3.3.3.

Στον Πίνακα 20 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τον νευρωνικό ταξινομητή και στον Πίνακα 21 τον ταξινομητή αρχέτυπου. Οι στήλες των πινάκων, δείχνουν την απόδοση ταξινόμησης βάσει της διαδρομής, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση (με τα δεδομένα από τους επιλεγμένους κόμβους) για κάθε όχημα. Η τελευταία στήλη περιέχει την μέση απόδοση του συστήματος και για τις τρεις διαδρομές. Η απόδοση για τα διάφορα αλφάβητα φαίνονται στις σειρές των πινάκων. Στον Πίνακα 20 για κάθε αλφάβητο υπάρχουν τρεις υποσειρές, μία για κάθε τύπο σήματος και μία για τον συνδυασμό τους (A: Acoustic S: Seismic C: Combined).

Από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων γίνεται φανερό το γεγονός, ότι η μέθοδος αποδίδει ικανοποιητικά και οι δύο κλάσεις των οχημάτων ταξινομούνται σωστά από τους πίνακες S, που προκύπτουν. Το σύστημα είναι αρκετά σταθερό με την έννοια, ότι δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα η απόδοσή του από την αλλαγή του υποσυνόλου εκπαίδευσης. Το γεγονός αυτό, είναι μια

απόδειξη της ικανότητας των πινάκων S να διατηρήσουν τα ιδιαίτερα γνωρίσματα του σήματος από το οποίο προήλθαν.

Πίνακας 20: Αποτελέσματα ταξινόμησης Νευρωνικού Δικτύου (FANN)

FANN Classification Results										
		Run 4		Run 5		Run 6		Total		Average
		AAV	DW	AAV	DW	AAV	DW	AAV	DW	
C1 - f	A	85	90	67	100	98	94	84	95	89
	S	45	100	84	94	82	96	70	97	84
	C	67	100	82	96	87	98	79	98	88
C1	A	87	88	67	100	93	86	82	92	87
	S	38	100	84	84	84	94	68	93	81
	C	44	92	71	88	85	86	67	89	78
C5	A	85	86	60	100	95	90	80	92	86
	S	36	100	76	78	80	94	64	91	78
	C	42	90	60	84	84	86	62	87	74
SOM	A	85	88	69	98	95	96	83	94	89
	S	42	100	76	80	75	92	64	91	78
	C	45	94	75	90	84	96	68	93	81
Standard	A	85	86	55	100	56	100	65	95	80
	S	33	100	85	80	73	94	64	92	78
	C	45	90	69	88	62	96	59	92	75

Μια πιο προσεκτική ανάγνωση στον Πίνακα 20 αποκαλύπτει, ότι το αλφάβητο C1 - f δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα, με συνολικό ποσοστό 89% για το ακουστικό σήμα, 84% για το σεισμικό και 88% με χρήση και των δύο αισθητήρων. Είναι έως και 10% καλύτερο από το C1, με χρήση και των δύο αισθητήρων, και 5% καλύτερο από το SOM. Το αλφάβητο C1 έχει σχεδόν την ίδια απόδοση με το αλφάβητο SOM. Και τα δύο σε γενικές γραμμές αποδίδουν καλύτερα από το τυπικό αλφάβητο και το C5. Δεδομένου ότι η μέθοδος προορίζεται για έναν Ασύρματο Κόμβο, παράμετροι, όπως το μέγεθος και η ευκολία δημιουργίας λαμβάνουν αρκετά μεγάλη βαρύτητα. Έτσι λοιπόν μεταξύ του C1 και του SOM, δύο αλφάβητα με την ίδια σχεδόν απόδοση, επιλέγεται το πρώτο γιατί δημιουργείται πολύ γρηγορότερα. Απαιτήθηκε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο για να δημιουργηθεί στο Matlab, σε αντίθεση με το SOM, για το οποίο απαιτήθηκαν περίπου 200 sec για την εκπαίδευση του με το ακουστικό σήμα σε έναν υπολογιστή Pentium 4/3.2 GHz. Επιλέγοντας ανάμεσα στα αλφάβητα C5 και του τυπικού, προτιμάται το C5 χάρη στο πολύ μικρό του μέγεθος. Το ακουστικό αλφάβητο C5 έχει 48% λιγότερα σύμβολα από το C1 και το SOM και 54% λιγότερα σύμβολα από

το τυπικό. Το σεισμικό αλφάβητο C5 έχει 45% λιγότερα σύμβολα από τα C1 και SOM, και 62% λιγότερα από το τυπικό. Παρόλα αυτά η απόδοσή του δεν υπολείπεται σημαντικά από τα υπόλοιπα.

Πίνακας 21: Αποτελέσματα ταξινόμησης Αρχετύπου L1

Archetype Classification Results - L1 Distance										
		Run 4		Run 5		Run 6		Total		Average
		AAV	DW	AAV	DW	AAV	DW	AAV	DW	
C1 - f	A	96	86	100	71	100	84	99	80	90
	S	83	86	95	45	91	73	90	68	79
C1	A	100	78	100	78	100	75	100	77	88
	S	87	68	87	63	87	76	87	69	78
C5	A	100	64	100	80	100	76	100	74	87
	S	74	98	75	94	85	84	78	92	85
SOM	A	100	68	98	82	100	73	99	74	87
	S	31	100	20	96	67	98	40	98	69
Standard	A	100	74	100	67	100	76	100	72	86
	S	81	94	89	78	91	80	87	84	86

Πίνακας 22: Αποτελέσματα ταξινόμησης Αρχετύπου L2

Archetype Classification Results - L2 Distance										
		Run 4		Run 5		Run 6		Total		Average
		AAV	DW	AAV	DW	AAV	DW	AAV	DW	
C1 - f	A	91	88	98	82	100	84	96	85	91
	S	76	98	95	51	89	76	87	75	81
C1	A	100	76	95	84	100	73	98	78	88
	S	61	100	78	92	82	86	74	93	83
C5	A	100	68	91	84	100	75	97	76	86
	S	59	100	49	94	85	94	65	96	80
SOM	A	100	72	93	86	100	75	98	78	88
	S	35	100	25	94	73	98	44	97	71
Standard	A	100	78	100	75	100	76	100	76	88
	S	69	100	73	92	85	92	76	95	85

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν εξετάζοντας και τα αποτελέσματα της ταξινόμησης βάσει αρχετύπου. Παρόλα αυτά, η απάντηση στο ερώτημα, του ποιος ταξινομητής αποδίδει καλύτερα, δεν είναι άμεση. Ο ταξινομητής αρχετύπου δεν έχει την ακρίβεια του νευρωνικού δικτύου, αλλά λόγω της απλότητάς του αποτελεί μια καλή λύση για την περίπτωση, που απαιτείται άμεση κατηγοριοποίηση στο επίπεδο του κόμβου. Τέλος ο ταξινομητής L2 αποδίδει σχεδόν, όπως και ο L1 ο οποίος και τελικά θα επιλεγεί για την υλοποίηση στον ασύρματο κόμβο, λόγω της απλότητάς του.

4.4. Ασύρματος Κόμβος Αναγνώρισης και Κατηγοριοποίησης Οχημάτων

4.4.1. Προδιαγραφές και Απαιτήσεις

Στόχος είναι η δημιουργία ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, αποτελούμενο από τους ασύρματους κόμβους Mica2, με την ικανότητα να ανιχνεύει και να κατηγοριοποιεί τα διερχόμενα οχήματα, βάσει του ήχου που εκπέμπουν καθώς διέρχονται από την επιτηρούμενη περιοχή. Μελλοντικά θα πρέπει το σύστημα να μπορεί να ενσωματώσει και σεισμικούς αισθητήρες, για την ανίχνευση των οχημάτων από τις δονήσεις που προκαλούν. Οι βασικές προδιαγραφές, που θα πρέπει να επιτευχθούν για ένα τέτοιο σύστημα, δίνονται παρακάτω, ξεχωριστά για τους Ασύρματους Κόμβους και ξεχωριστά για τον Σταθμό Βάσης.

4.4.1.1. Προδιαγραφές Ασύρματων Κόμβων

- Ικανότητα ακουστικής ανίχνευσης οχήματος, σε μια ακτίνα τουλάχιστον 50 μέτρων.
- Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, για μέγιστη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας.
- Υποστήριξη δύο καταστάσεων λειτουργίας, για εξοικονόμηση ενέργειας:
 - *Αναμονής Συμβάντος* - Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας (200 Hz)
 - *Κανονικής Λειτουργίας* - Μέγιστη κατανάλωση ενέργειας για όσο χρόνο διαρκεί το συμβάν, υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (8 kHz), επιστροφή στην κατάσταση Αναμονής Συμβάντος, μετά το πέρας του συμβάντος.
- Δυνατότητα ασύρματης αποστολής του προς κατηγοριοποίηση χαρακτηριστικού διανύσματος (πίνακας S) στον σταθμό βάσης μέσω single-hop και άμεση μετάβαση σε multi-hop επικοινωνία στο μέλλον, σε περίπτωση επέκτασης του δικτύου.

- Δυνατότητα ανίχνευσης και κατηγοριοποίησης από τον Ασύρματο Κόμβο, με χρήση απλού ταξινομητή αρχετύπου και αποστολή μόνο του αποτελέσματος της κατηγοριοποίησης.
- Δυνατότητα άμεσης ασύρματης ενημέρωσης και επέκτασης του πίνακα των διαθέσιμων αρχέτυπων κλάσεων, από το Σταθμό Βάσης και αποθήκευσής τους στον Ασύρματο Κόμβο.
- Δυνατότητα αποστολής προς τον Σταθμό Βάσης του πλήρους πίνακα DS, για χρήση του στην δημιουργία νέου αλφάβητου.
- Δυνατότητα μεταβολής των παραμέτρων τόσο του λογισμικού όσο και του υλικού (κατώφλια, συντελεστές, κέρδος ενίσχυσης, ρυθμός δειγματοληψίας, κ.α.) και αποστολής νέων ρυθμίσεων σε κάθε κόμβο ξεχωριστά ή και συνολικά, στο Ασύρματο Δίκτυο από τον Σταθμό Βάσης.
- Δυνατότητα αποστολής των τρέχουσων ρυθμίσεων κάθε κόμβου.
- Δυνατότητα ασύρματου επαναπρογραμματισμού των Ασύρματων Κόμβων, ενώ το Δίκτυο βρίσκεται σε κανονική λειτουργία.

4.4.1.2.Προδιαγραφές Σταθμού Βάσης

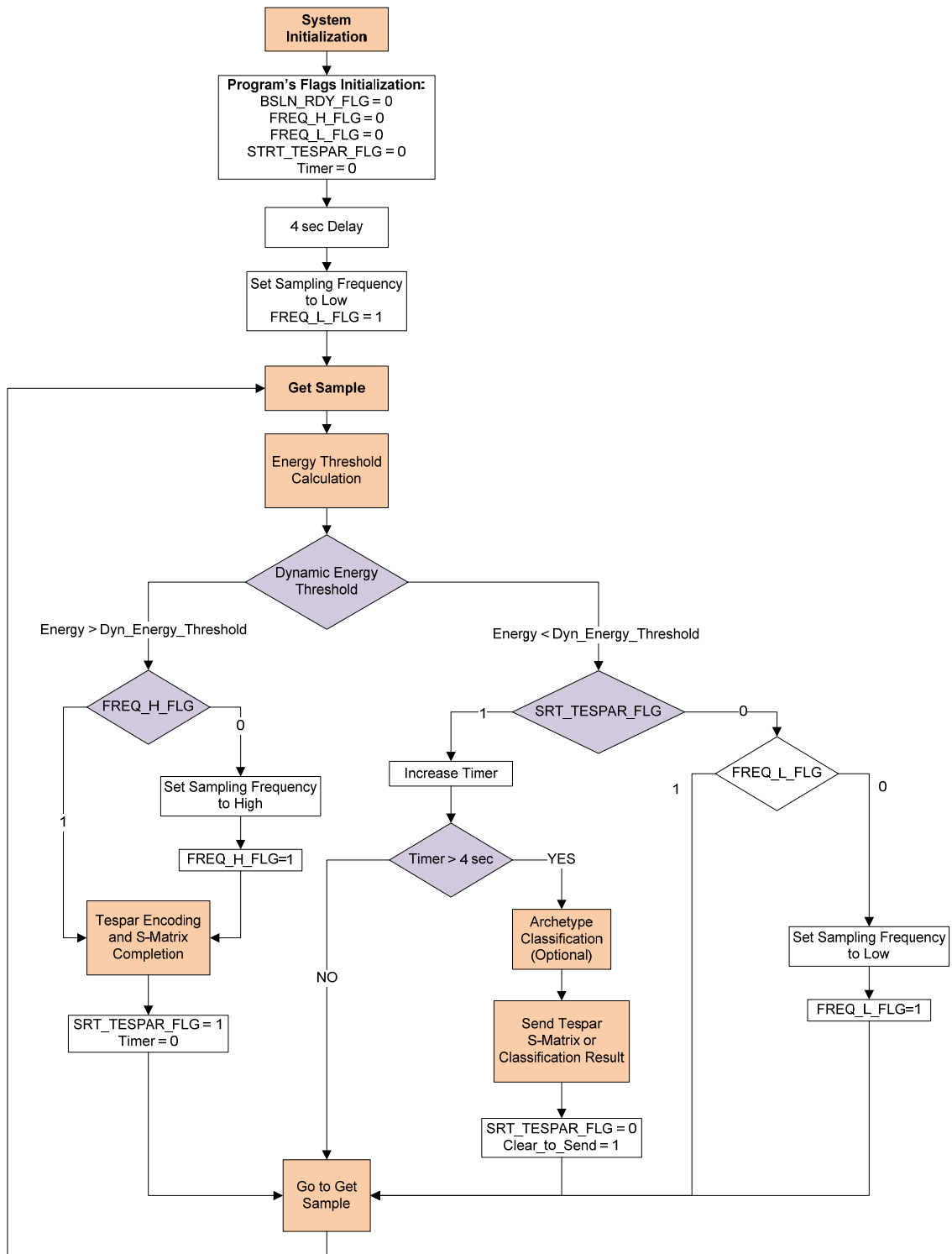
- Δυνατότητα αποστολής και λήψης μηνυμάτων, από και προς τους Ασύρματους Κόμβους, και αποθήκευση των ληφθέντων πακέτων.
- Καταγραφή της ακριβούς ώρας λήψης του κάθε πακέτου, από κάθε κόμβο.
- Λήψη και επεξεργασία των δεδομένων από το Matlab.
- Δυνατότητα άμεσης κατηγοριοποίησης του ληφθέντος χαρακτηριστικού διανύσματος βάσει προαποθηκευμένων αρχέτυπων κλάσεων, με χρήση καθορισμένου ταξινομητή.
- Δυνατότητα δημιουργίας νέων αρχετύπων κλάσεων, χρήση τους κατά την κατηγοριοποίηση, και ασύρματη αποστολή τους στους Κόμβους.
- Δυνατότητα λήψης, αποθήκευσης και επεξεργασίας πλήρων DS πινάκων και χρήση τους, για δημιουργία νέων αλφάβητων, προσαρμοσμένων στις εκάστοτε συνθήκες και κλάσεις οχημάτων.

- Εξαγωγή στατιστικών στοιχείων κατηγοριοποίησης ανά κλάση.
- Δυνατότητα αποστολής και λήψης νέων ρυθμίσεων και παραμέτρων και ικανότητα ασύρματου επαναπρογραμματισμού των Κόμβων.

4.4.2. Υλοποίηση

4.4.2.1.Γενική Περιγραφή

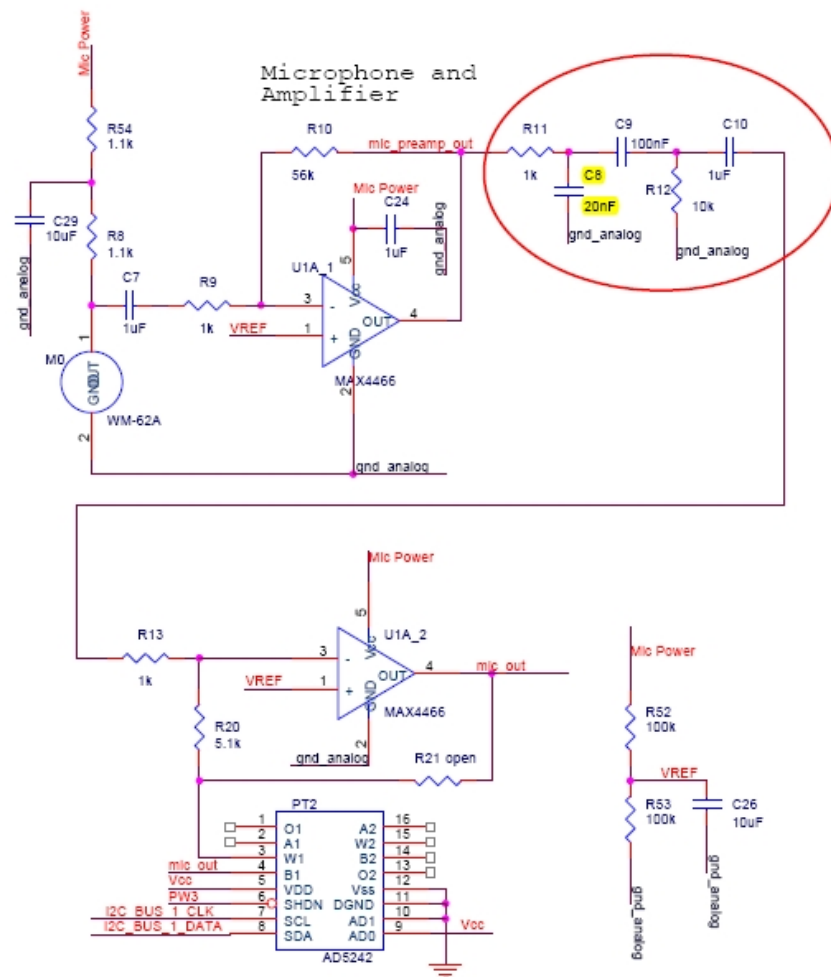
Η εφαρμογή αναπτύχθηκε βάσει των προδιαγραφών, που ορίστηκαν στην παράγραφο 4.4.1.1. Με την εκκίνηση εκτέλεσης του κώδικα, ο ασύρματος κόμβος τροφοδοτεί το υποσύστημα του μικροφώνου, περιμένει 2 sec μέχρι η τάση στην έξοδο του μικροφώνου να σταθεροποιηθεί, και ξεκινάει την δειγματοληψία του αισθητήρα με μια σχετικά αργή συχνότητα της τάξης των 200 Hz. Στη συνέχεια υπολογίζει την μέση τιμή των μετρήσεων για 4 sec. Η τιμή αυτή, η οποία αναμένεται να είναι γύρω στα 1.4 – 1.5 V θα αποτελέσει και την τάση αναφοράς της κυματομορφής εξόδου και θα χρησιμοποιηθεί στο στάδιο της κωδικοποίησης. Ταυτόχρονα ξεκινάει και ο υπολογισμός της ενέργειας του ακουστικού σήματος, η οποία ανανεώνεται με κάθε νέα μέτρηση που λαμβάνεται. Αν η ενέργεια του σήματος ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή, τότε ο Ασύρματος Κόμβος ξεκινάει την γρήγορη δειγματοληψία (8 kHz) και ταυτόχρονα ενεργοποιείται ο αλγόριθμος κωδικοποίησης και το σύστημα ξεκινάει την δημιουργία του πίνακα S. Η διαδικασία της κωδικοποίησης θα σταματήσει όταν ανιχνευθεί ένα διάστημα “ησυχίας”, στο οποίο η ενέργεια του σήματος είναι μικρότερη του ορισμένου κατωφλίου για ορισμένο χρόνο (4 sec). Μετά την επιτυχή κωδικοποίηση ενός ανιχνευμένου συμβάντος, ο πίνακας S που προέκυψε ταξινομείται βάσει των αρχέτυπων πινάκων και αποστέλλεται το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης στον Σταθμό Βάσης. Ταυτόχρονα ο Ασύρματος Κόμβος μπορεί να λάβει πακέτο δεδομένων με νέες ρυθμίσεις και νέους πίνακες αρχέτυπων. Εναλλακτικά ο κόμβος μπορεί να στείλει τον πίνακα S για κατηγοριοποίηση στον σταθμό βάσης. Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του πυρήνα της εφαρμογής.



Εικόνα 32: Διάγραμμα Ροής του προγράμματος Ανίχνευσης και Κατηγοριοποίησης Οχημάτων

4.4.2.2. Ακουστικός Αισθητήρας

Ως ακουστικός αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο μικρόφωνο WM-62A της Panasonic, που προσφέρει γραμμική απόκριση στην περιοχή των 20 Hz - 16 kHz, καταναλώνοντας 500 μ A. Το κύκλωμα προετοιμασίας σήματος του μικροφώνου αποτελείται από έναν προενισχυτή με σταθερό κέρδος 56, παθητικό ζωνοπερατό φίλτρο στα 159 Hz - 6.5 kHz και ένα τελικό στάδιο ενίσχυσης με ρυθμιζόμενο κέρδος από 5 μέχρι 56, μέσω του μικροελεγκτή (Εικόνα 33). Κρίθηκε απαραίτητη η αλλαγή του κάτω ορίου του ζωνοπερατού φίλτρου στα 50 Hz από τα 159 Hz. Για να επιτευχθεί αυτό, αντικαταστάθηκε ο πυκνωτής C9. Για την ακρίβεια, προστέθηκε ένας πυκνωτής 220 nF παράλληλα με τον αρχικό. Η νέα χωρητικότητα έγινε 320 nF και η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου κατέβηκε θεωρητικώς στα 49.74 Hz.



Εικόνα 33: Σχηματικό κυκλώματος μικροφώνου πλακέτας αισθητήρων MTS310. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται το υπερπαστό φίλτρο που αλλάχθηκε

4.4.2.3.Modules - Components - Wiring

Η εφαρμογή αποτελείται από το configuration αρχείο MicTesparr.nc, το οποίο ορίζει τις συνδέσεις (wirings) μεταξύ των διάφορων στοιχείων και των διεπαφών τους. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα:

- Main - Το πρώτο και βασικό στοιχείο κάθε εφαρμογής σε TinyOS.
- MicroTimerM - Παρέχει έναν timer ο οποίος παράγει μια διακοπή με ακρίβεια msec.
- LedsC - Παρέχει πρόσβαση στα Leds.
- MicC - Ενεργοποιεί το κύκλωμα του μικροφώνου, και ρυθμίζει τον A/D να δειγματοληπτεί το κανάλι του μικροφώνου.
- GenericComm - Προσφέρει βασική ασύρματη επικοινωνία στον κόμβο
- MicTesparrM - Το κύριο σώμα της εφαρμογής αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχήματος
- DelugeC - Επιτρέπει τον ασύρματο επαναπρογραμματισμό των ασύρματων κόμβων

Το κύριο σώμα της εφαρμογής αποτελεί το στοιχείο MicTesparrM.nc, το οποίο υλοποιεί την διεπαφή StdControl και χρησιμοποιεί τις διεπαφές StdControl, MicroTimer, Leds, Mic, ADC, SendMsg, ReceiveMsg.

Το πρόγραμμα ξεκινάει αρχικοποιώντας τα χρησιμοποιούμενα υποσυστήματα (ασύρματες επικοινωνίες, μικρόφωνο, leds ...) με την εντολή *StdControl.init()* και εκκινεί την κανονική του εκτέλεση με την εντολή *StdControl.start()*. Το στοιχείο Microtimer παράγει διακοπές σε χρόνο που ορίζεται από τον επιζητούμενο ρυθμό δειγματοληψίας, οι οποίες σηματοδοτούνται με το γεγονός *MicroTimer.fired*.

Σε κάθε διακοπή, καλείται η συνάρτηση *MicADC.getData()*, η οποία θα εκκινήσει τις διαδικασίες λήψης ενός δείγματος. Η επιτυχής λήψη ενός δείγματος σηματοδοτείται από το γεγονός *MicADC.dataReady*:

```
async event result_t MicADC.dataReady(uint16_t data)  
{
```

1. Υπολογισμός κατώφλιων
2. Υπολογισμός ενέργειας σήματος
3. Κώδικας κωδικοποίησης και δημιουργίας πίνακα S, αν η ενέργεια ξεπερνάει το κατώφλι.
4. Σηματοδοσία τέλους κωδικοποίησης (απουσία σήματος αρκετά μεγάλης ενέργειας για συγκεκριμένο χρόνο). Αποστολή πίνακα S ή έναρξη κατηγοριοποίησης στον κόμβο και αποστολής αποτελέσματος.

}

4.4.2.4. Ρυθμός Δειγματοληψίας

Για λόγους ενεργειακής κατανάλωσης το σύστημα υποστηρίζει μεταβλητό ρυθμό δειγματοληψίας, ενός χαμηλού και ενός υψηλού, η τιμή των οποίων μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη και να αλλάξει οποιαδήποτε στιγμή.

- *Χαμηλή Συχνότητα δειγματοληψίας (Προεπιλεγμένη τιμή τα 200 Hz)* - Το σύστημα υπολογίζει την ενέργεια του σήματος και προσπαθεί να ανιχνεύσει ένα γεγονός, που υποδηλώνεται από εντοπισμό ενέργειας πάνω από ένα ορισμένο κατώφλι. Ο αλγόριθμος κωδικοποίησης δεν εκτελείται.
- *Υψηλή Συχνότητα δειγματοληψίας (Προεπιλεγμένη τιμή τα 8 kHz)* - Το σύστημα δειγματοληφτεί το μικρόφωνο με υψηλή συχνότητα και ταυτόχρονα κωδικοποιεί το σήμα και δημιουργεί τον πίνακα S.

4.4.2.5. Αλφάβητο

Ο συνδυασμός Συχνότητα Δειγματοληψίας - Αλφάβητο κωδικοποίησης, διαπιστώθηκε, ότι αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους συντελεστές στην εξαγωγή πινάκων S με σαφή διάκριση μεταξύ των κλάσεων και στην απόδοση κατηγοριοποίησης. Μικρή συχνότητα δειγματοληψίας, οδηγεί σε λιγότερο λεπτομερή “χαρτογράφηση” των συχνοτήτων από το αλφάβητο. Αυτό γίνεται σαφές στον Πίνακα 23, όπου παρουσιάζεται η κατανομή των συχνοτήτων, συναρτήσει των παραμέτρων D και S του αλγόριθμου κωδικοποίησης, για δύο διαφορετικές συχνότητες δειγματοληψίας, τα 4960 Hz και τα 8000 Hz.

Η επιλογή της υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας των 8000 Hz κρίθηκε τελικά απαραίτητη για την αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου γιατί η ακουστική υπογραφή των οχημάτων, με τα οποία δοκιμάστηκε το σύστημα (επιβατικό

αυτοκίνητο, λεωφορείο) περιείχε συχνότητες από 100 - 1500 Hz, που αντιστοιχούν σε ένα εύρος της παραμέτρου D από 2 - 25 (23 τιμών) για τη συχνότητα των 4960 Hz και σε ένα εύρος από 3 - 40 (37 τιμών) για τη συχνότητα των 8000 Hz.

Το αλφάβητο που χρησιμοποιήθηκε, δημιουργήθηκε όπως το αλφάβητο C1 - f της παραγράφου 4.3.3.3.1.3 από τους πίνακες D/S αυτοκινήτων, λεωφορείων και μοτοσικλετών, που λήφθηκαν με χρήση της δυνατότητας αποστολής πλήρων D/S πινάκων από τους Ασύρματους Κόμβους. Προτιμήθηκε το αλφάβητο C1 - f λόγω της υψηλότερης επίδοσης, που είχε στην προσομοίωση. Περιέχει 36 χαρακτήρες επιτρέποντας μέγιστη τιμή για την παράμετρο D το 40, που αντιστοιχεί στη συχνότητα των 100 Hz και μέγιστη τιμή της παραμέτρου S το 5. Παρουσιάζεται στον Πίνακα 24.

Πίνακας 23: Κατανομή των συχνοτήτων συναρτήσεων των παραμέτρων D και S

Κατανομή Συχνοτήτων συναρτήσεων των παραμέτρων D και S						
f = 4960 Hz						
T = 202 μsec						
D\ S→	0	1	2	3	4	5
1	2480					
2	1240					
3	827					
4	620					
5	496					
6	413					
7	354					
8	310	2480				
9	276	2204				
10	248	1984				
11	225	1804				
12	207	1653	2480			
13	191	1526	2289			
14	177	1417	2126			
15	165	1323	1984			
16	155	1240	1860	2480		
17	146	1167	1751	2334		
18	138	1102	1653	2204		
19	131	1044	1566	2088		
20	124	992	1488	1984	2480	
21	118	945	1417	1890	2362	
22	113	902	1353	1804	2255	
23	108	863	1294	1725	2157	
24	103	827	1240	1653	2067	2480
25	99	794	1190	1587	1984	2381
26	95	763	1145	1526	1908	2289
27	92	735	1102	1470	1837	2204
28	89	709	1063	1417	1771	2126
29	86	684	1026	1368	1710	2052
30	83	661	992	1323	1653	1984
31	80	640	960	1280	1600	1920
32	78	620	930	1240	1550	1860
33	75	601	902	1202	1503	1804
34	73	584	875	1167	1459	1751
35	71	567	850	1134	1417	1701
36	69	551	827	1102	1378	1653
37	67	536	804	1072	1341	1609
38	64	522	783	1044	1305	1566
39	63	509	763	1017	1272	1526
40	61	496	744	992	1240	1488
41	60	484	726	968	1210	1452
42	58	472	709	945	1181	1417
43	57	461	692	923	1153	1384
44	56	451	676	902	1127	1353
45	55	441	661	882	1102	1323
46	53	431	647	863	1078	1294
47	52	422	633	844	1055	1266
48	51	413	620	827	1033	1240
49	50	405	607	810	1012	1215

Κατανομή Συχνοτήτων συναρτήσεων των παραμέτρων D και S						
f = 8000 Hz						
T = 125 μsec						
D\ S→	0	1	2	3	4	5
1	4000					
2	2000					
3	1333					
4	1000					
5	800					
6	667					
7	571					
8	500	4000				
9	444	3556				
10	400	3200				
11	364	2909				
12	333	2667	4000			
13	308	2462	3692			
14	286	2286	3429			
15	267	2133	3200			
16	250	2000	3000	4000		
17	235	1882	2824	3765		
18	222	1778	2667	3556		
19	211	1684	2526	3368		
20	200	1600	2400	3200	4000	
21	190	1524	2286	3048	3810	
22	182	1455	2182	2909	3636	
23	174	1391	2087	2783	3478	
24	167	1333	2000	2667	3333	4000
25	160	1280	1920	2560	3200	3840
26	154	1231	1846	2462	3077	3692
27	148	1185	1778	2370	2963	3556
28	143	1143	1714	2286	2857	3429
29	138	1103	1655	2207	2759	3310
30	133	1067	1600	2133	2667	3200
31	129	1032	1548	2065	2581	3097
32	125	1000	1500	2000	2500	3000
33	121	970	1455	1939	2424	2909
34	118	941	1412	1882	2353	2824
35	114	914	1371	1829	2286	2743
36	111	889	1333	1778	2222	2667
37	108	865	1297	1730	2162	2595
38	105	842	1263	1684	2105	2526
39	103	821	1231	1641	2051	2462
40	100	800	1200	1600	2000	2400
41	98	780	1171	1561	1951	2341
42	95	762	1143	1524	1905	2286
43	93	744	1116	1488	1860	2233
44	91	727	1091	1455	1818	2182
45	89	711	1067	1422	1778	2133
46	87	696	1043	1391	1739	2087
...
79	51	405	608	810	1013	1215
80	50	400	600	800	1000	1200

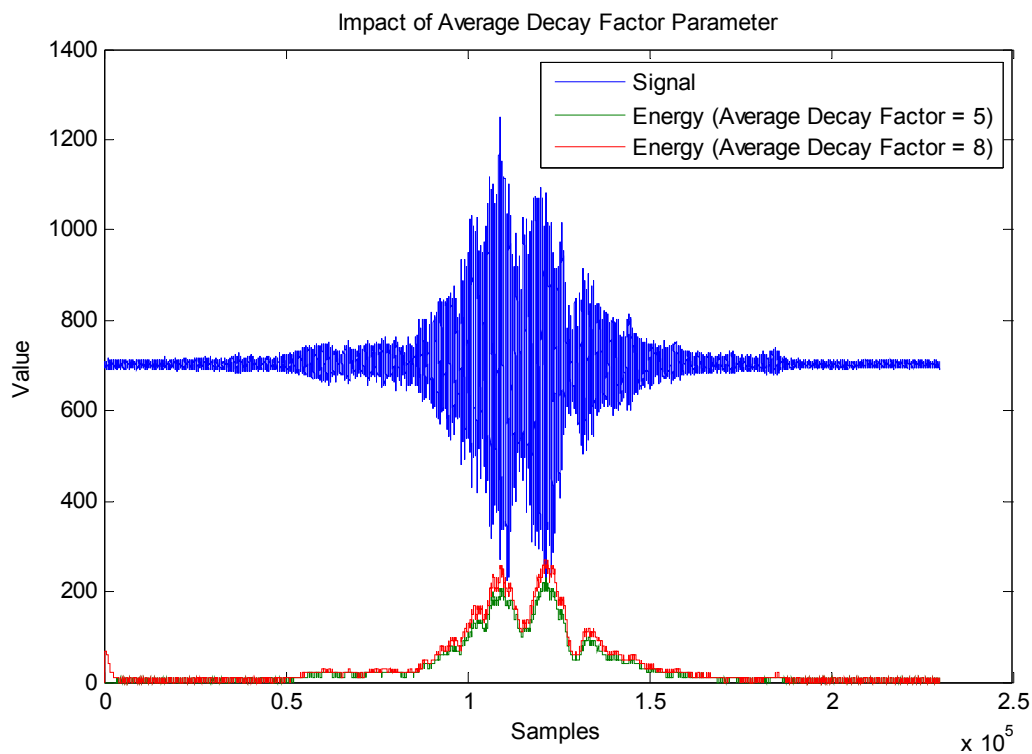
Πίνακας 24: Αλφάβητο που χρησιμοποιήθηκε στους Ασύρματους Κόμβους Αναγνώρισης Οχήματος

TinyOS TESPAP Alphabet						
D \ S →	0	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3
4	4	5	5	5	5	5
5	6	7	7	7	7	7
6	8	9	9	9	9	9
7	10	11	11	11	11	11
8	12	13	13	13	13	13
9	14	15	15	15	15	15
10	14	15	15	15	15	15
11	16	17	18	18	18	18
12	16	17	18	18	18	18
13	19	20	21	21	21	21
14	19	20	21	21	21	21
15	22	22	23	23	23	23
16	22	22	23	23	23	23
17	22	22	23	23	23	23
18	24	24	25	25	26	26
19	24	24	25	25	26	26
20	24	24	25	25	26	26
21	24	24	25	25	26	26
22	27	27	28	28	29	29
23	27	27	28	28	29	29
24	27	27	28	28	29	29
25	27	27	28	28	29	29
26	27	27	28	28	29	29
27	30	30	31	31	32	33
28	30	30	31	31	32	33
29	30	30	31	31	32	33
30	30	30	31	31	32	33
31	30	30	31	31	32	33
32	30	30	31	31	32	33
33	30	30	31	31	32	33
34	34	34	35	35	36	36
35	34	34	35	35	36	36
36	34	34	35	35	36	36
37	34	34	35	35	36	36
38	34	34	35	35	36	36
39	34	34	35	35	36	36
40	34	34	35	35	36	36

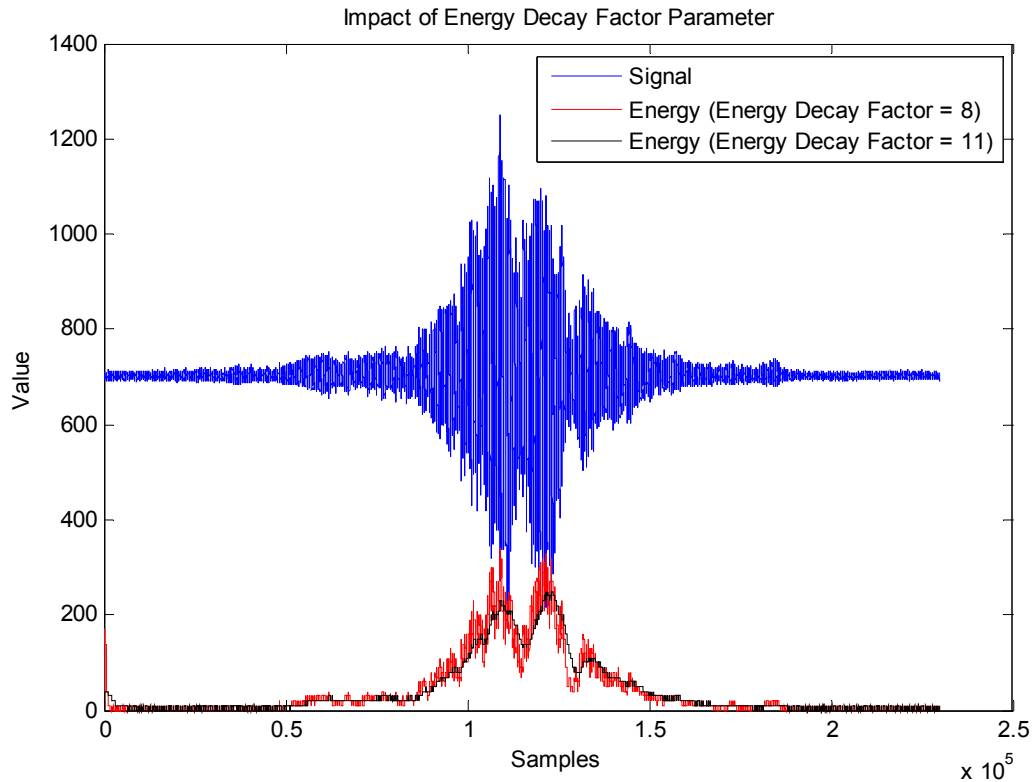
4.4.2.6. Αλγόριθμος Υπολογισμού Ενέργειας

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ενέργειας του ακουστικού σήματος, βασίζεται στον αλγόριθμο δημιουργίας του μεταβλητού κατωφλίου βάσει της περιβάλλουσας, που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3.4.2.

Οι τιμές των παραμέτρων Average Decay Factor (b) και Energy Decay Factor (a) έχουν άμεσο αντίκτυπο στην υπολογιζόμενη ενέργεια, η οποία εμφανίζεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 34, Εικόνα 35).



Εικόνα 34: Επίδραση του συντελεστή AVR_G_DECAY_FCTR στον υπολογισμό της ενέργειας του σήματος



Εικόνα 35: Επίδραση του συντελεστή ENRG_DECAY_FCTR στον υπολογισμό της ενέργειας του σήματος

4.4.2.7. Αλγόριθμος Κωδικοποίησης TESPAP

Ο αλγόριθμος κωδικοποίησης εκκινεί την στιγμή, που θα ανιχνευθεί ένας αρκετά δυνατός ήχος, όταν δηλαδή η ενέργεια του σήματος ξεπεράσει ένα ορισμένο κατώφλι και σταματά τέσσερα δευτερόλεπτα μετά την τελευταία ανίχνευση.

4.4.2.8. Αλγόριθμος Κατηγοριοποίησης

Η μέθοδος της κατηγοριοποίησης βάσει αρχέτυπου, αφορά στη σύγκριση του υπό εξέταση διανύσματος εισόδου, με το χαρακτηριστικό διάνυσμα, που αποτελεί το αρχέτυπο κάθε κλάσης. Ο αρχέτυπος πίνακας S κάθε κλάσης δημιουργείται στον Σταθμό Βάσης από τον μέσο όρο ενός αριθμού πινάκων S , κάθε κλάσης, οι οποίοι αποστέλλονται από τους Ασύρματους Κόμβους, κατά τη φάση εγκατάστασης του συστήματος. Η σύγκριση γίνεται χρησιμοποιώντας τις αποστάσεις $L1$ και $L2$, όπως και στην παράγραφο 4.3.4.2.

4.4.2.9. Ασύρματη Επικοινωνία

Για την εξοικονόμηση ενέργειας, επιλέγεται ο ασύρματος πομποδέκτης να είναι απενεργοποιημένος και να τροφοδοτείται, μόνο όταν χρειάζεται να σταλεί ο πίνακας S, σε περίπτωση που η ταξινόμηση γίνεται στον Σταθμό Βάσης, ή το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης, όταν αυτή γίνεται από τον Ασύρματο Κόμβο. Τροφοδοτείται επίσης, για 5 ms κάθε δευτερόλεπτο ώστε να ελέγχει το κανάλι για πιθανή αποστολή πακέτου. Αν ανιχνευθεί κάποιο “preamble”, τότε παραμένει ενεργοποιημένος, μέχρι να ληφθεί το πακέτο.

Το προοίμιο “preamble” αποτελεί μια συγκεκριμένη διάταξη από bit που αποστέλλονται πριν τη μετάδοση ενός πακέτου. Είναι γνωστό ότι ένα μήνυμα φτάνει στο στρώμα ραδιοζεύξης και ξεκινά η αποστολή του από τον πομπό σύμφωνα με τα bit του μηνύματος και τον τρόπο πρόσβασης στο μέσο (Media Access Control), που έχει καθοριστεί. Ένας ραδιοδέκτης ακούει σταθερά ένα κανάλι και προσπαθεί να ξεχωρίσει, αν το επίπεδο της ενέργειας είναι αρκετά υψηλό ή τα χαρακτηριστικά του σήματος είναι αρκετά ώστε να αποτελούν ένα μεταδιδόμενο bit. Εάν διαπιστώσει, ότι όντως έτσι είναι, ξεκινά να δειγματοληπτεί με τη συχνότητα, που έχει οριστεί από το πρότυπο ασύρματης μετάδοσης που χρησιμοποιεί. Οπότε εάν τα bit, που αποτελούν το preamble είναι σωστά, ο δέκτης είναι σίγουρος, ότι θα λάβει ένα πακέτο μηνύματος. Η διάρκεια, που ο δέκτης θα δειγματοληπτεί το κανάλι πριν σταματήσει, καθορίζεται από το πεδίο, που ορίζει το μήκος του πακέτου.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή υποστηρίζονται τρεις τύποι πακέτων, οι οποίοι καθορίζονται στο αρχείο *Tespar.h* (βλέπε Παράρτημα):

- *Tespar_Send_Msg*: Μήνυμα αποστολής πίνακα S και αποτελέσματος κατηγοριοποίησης προς τον Σταθμό Βάσης από τον Ασύρματο Κόμβο.
- *Tespar_Receive_Msg*: Μήνυμα αποστολής νέων ρυθμίσεων προς τον Ασύρματο Κόμβο από τον Σταθμό Βάσης.
- *Tespar_DS_Send_Msg*: Μήνυμα αποστολής πίνακα DS προς τον Σταθμό Βάσης από τον Ασύρματο Κόμβο.

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά οι δομές των τριών πακέτων της εφαρμογής (Πίνακας 25, Πίνακας 26, Πίνακας 27).

Πίνακας 25: Δομή Πακέτου Tespar_Send_Msg

Byte #	Πεδίο	Περιγραφή
0	sourceMotelID	Η ταυτότητα του κόμβου που στέλνει το μήνυμα
1	Msg_Type	Μπορεί να πάρει δύο δυνατές τιμές: - 0: Αν πρόκειται για κανονικό μήνυμα αποστολής πίνακα S - 1: Αν πρόκειται για μήνυμα απάντησης προς κάποια αίτηση του Σταθμού Βάσης
2	Class	Η κλάση στην οποία ανήκει το όχημα (Δεδομένου ότι ο κόμβος εκτελεί και την ρουτίνα ταξινόμησης του τρέχοντος πίνακα S του ανιχνευμένου οχήματος)
3...n	data[ALPHABET_SIZE] (S Matrix)	Ο πίνακας S με μέγεθος 2xΜήκος Αλφαβήτου Μέγεθος: 2xALPHABET_SIZE bytes

Πίνακας 26: Δομή Πακέτου Tespar_Receive_Msg

Byte #	Πεδίο	Περιγραφή
0	action	Η ταυτότητα του κόμβου που στέλνει το μήνυμα
1	N_MIC_GAIN	Το κέρδος ενίσχυσης του μικροφώνου
2,3	N_SAMPLING_INT_L	Χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας
4,5	N_SAMPLING_INT_H	Υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας
6,7	N_RESULT_DELAY	Καθυστέρηση αποστολής πίνακα S
8	N_ENERGY_THRESHOLD	Κατώφλι ανίχνευσης γεγονότος
9	N_ENRG_DECAY_FCTR	Παράμετρος αλγορίθμου υπολογισμού κατώφλιου ανίχνευσης
10	N_TESPAR_THRESHOLD	Παράμετρος αλγορίθμου κωδικοποίησης
11	Class_Position	Κλάση του αρχέτυπου πίνακα S που αποστέλλεται (για την περίπτωση που ο Κόμβος κατηγοριοποιεί αυτόματα τα οχήματα)
12...n	data[ALPHABET_SIZE] (Αρχέτυπος S Matrix)	Αρχέτυπος πίνακας S της κλάσης Class_Position Μέγεθος: 2xALPHABET_SIZE bytes

Πίνακας 27: Δομή Πακέτου Tespar_DS_Send_Msg

Byte #	Πεδίο	Περιγραφή
0	sourceMotelID	Η ταυτότητα του κόμβου που στέλνει το μήνυμα
1	DS_Packet_Number	Αύξων αριθμός πακέτου. Η αποστολή του πλήρους πίνακα DS απαιτεί την αποστολή πολλών πακέτων τα οποία και αριθμούνται για την ορθή λήψη τους από τον Σταθμό Βάσης
2	N_ENERGY_THRESHOLD	Κατώφλι ανίχνευσης γεγονότος
3...n	data[DS_PACKET_SIZE]	Το τμήμα του πίνακα DS, μεγέθους 2xDS_PACKET_SIZE bytes που αποστέλλεται με το συγκεκριμένο πακέτο

4.4.2.10. Σταθμός Βάσης

Ο Σταθμός Βάσης αποτελείται από ένα φορητό υπολογιστή και από την πλακέτα προγραμματισμού των ασύρματων κόμβων MIB510. Η αποστολή και λήψη των μηνυμάτων μεταξύ των Ασύρματων Κόμβων και του Σταθμού Βάσης γίνεται μέσω του προγράμματος Matlab, το οποίο έχει ρυθμιστεί, ώστε να επικοινωνεί με το πρόγραμμα SerialForwarder, που είναι γραμμένο σε java.

Μέσω του Matlab μπορούν να αποθηκευθούν οι πίνακες S, μαζί με τον ακριβή χρόνο λήψης του κάθε μηνύματος. Επίσης, από μερικούς επιλεγμένους πίνακες S, μπορούν να εξαχθούν οι αρχέτυποι πίνακες S κάθε κλάσης. Με τη σειρά τους, οι αρχέτυποι πίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απευθείας κατηγοριοποίηση κάθε νέου εισερχόμενου πακέτου από τον Σταθμό Βάσης, γεγονός, που απαλλάσσει τον Ασύρματο Κόμβο από αρκετούς υπολογισμούς. Είναι, όμως δυνατή η αποστολή των Αρχέτυπων πινάκων S κάθε κλάσης στον Ασύρματο Κόμβο, έτσι ώστε να κατηγοριοποιείται το όχημα απευθείας σε αυτόν και να στέλνεται στον Σταθμό Βάσης μόνο το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης. Τέλος είναι δυνατόν να αποσταλούν από τον Ασύρματο Κόμβο οι πλήρεις πίνακες DS για την εξαγωγή ενός προσαρμοσμένου αλφαβήτου, από τις κωδικοποιημένες ακουστικές υπογραφές, των προς κατηγοριοποίηση οχημάτων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με αυτή, που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.3.3. Σε περίπτωση όμως δημιουργίας νέου αλφαβήτου, οι κόμβοι θα πρέπει να

επαναπρογραμματιστούν ασύρματα, γιατί δεν προβλέπεται από την εφαρμογή η απευθείας ανανέωση του αλφαβήτου εν ώρα κανονικής λειτουργίας.

Ο ασύρματος επαναπρογραμματισμός γίνεται με χρήση του εργαλείου Deluge 2.0, το οποίο περιλαμβάνεται από την έκδοση TinyOS 1.1.14 και μετά. Κάθε ασύρματος κόμβος διαθέτει τρεις θέσεις στη μνήμη του, για την αποθήκευση αντίστοιχου αριθμού προγραμμάτων. Ο κώδικας κάθε προγράμματος, μπορεί να αποσταλεί ασύρματα σε όλους τους κόμβους της ίδιας ομάδας και με κατάλληλη εντολή, να επανεκκινήσουν όλοι οι κόμβοι φορτώνοντας το επιλεγμένο πρόγραμμα. Η πρώτη θέση μνήμης καταλαμβάνεται από ένα πρόγραμμα, που επιτρέπει στους κόμβους να επικοινωνήσουν ασύρματα με τους υπόλοιπους κόμβους της ίδιας ομάδας, να δουν τον κώδικα που τρέχουν και να ανανεώσουν αυτόματα τις υπόλοιπες δύο θέσεις, με τα πιο πρόσφατα προγράμματα. Ο προγραμματισμός της πρώτης θέσης (η επονομαζόμενη Golden Image), γίνεται μέσω της πλακέτας προγραμματισμού, με την οποία και προετοιμάζεται ο κόμβος, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το εργαλείο Deluge. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο του Deluge [128],[129].

Οι Ασύρματοι Κόμβοι του δικτύου, που εγκαταστάθηκε, είναι προγραμματισμένοι με τρία διαφορετικά προγράμματα:

Θέση	Πρόγραμμα
1 (Golden Image)	DelugeBasic: Βασική Εφαρμογή που επιτρέπει τον ασύρματο επαναπρογραμματισμό
2	Mic_Tespar: Κανονική Εφαρμογή Αναγνώρισης και Κατηγοριοποίησης Οχημάτων με ενεργοποιημένη τη δυνατότητα ασύρματου επαναπρογραμματισμού
3	Mic_Tespar_DS: Εφαρμογή αποστολής πλήρων πινάκων DS για δημιουργία προσαρμοσμένου αλφαβήτου με ενεργοποιημένη τη δυνατότητα ασύρματου επαναπρογραμματισμού

Η χρήση της εφαρμογής Deluge προϋποθέτει, ότι ο ασύρματος πομποδέκτης θα είναι μονίμως ενεργοποιημένος, γεγονός που καταναλώνει σημαντικό ποσό ενέργειας. Οι ενεργειακές μετρήσεις, που θα ακολουθήσουν, έγιναν με απενεργοποιημένη τη δυνατότητα του ασύρματου επαναπρογραμματισμού.

4.4.3. Επιδόσεις

4.4.3.1. Κατανάλωση Ενέργειας

Για την αναλυτική ενεργειακή κατανάλωση απαιτούνται δύο στοιχεία: η κατανάλωση ρεύματος και ο χρόνος για τον οποίο καταναλώνεται το ρεύμα αυτό [130]. Η κατανάλωση ρεύματος φαίνεται στον Πίνακα 28 και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας, στον Πίνακα 29.

Πίνακας 28: Αναλυτική κατανάλωση των υποσυστημάτων του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων

Λειτουργία / Υποσύστημα	Κατανάλωση Ρεύματος	Κατανάλωση Ισχύος
	(mA)	(mW)
CPU Idle	2,3	7,6
CPU Active	5,7	18,8
CPU Sleep	0,3	0,8
Led	2,6	8,6
Πλακέτα Αισθητήρων - Μικρόφωνο Ενεργό	0,8	2,7
Radio Sending Average	17,1	56,3
Radio Receiving Average	16,8	55,3

Πίνακας 29: Απαιτούμενος χρόνος για κάθε λειτουργία/υποσύστημα του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων

Λειτουργία	Χρόνος (μsec)
Λήψη Δείγματος	44
Χρόνος Αφύπνισης	180
Υπολογισμός Ενέργειας και σύγκριση με κατώφλι	23
Αλγόριθμος Κωδικοποίησης TESPAP	40
Συνολικά - Απουσία Οχήματος	245
Συνολικά - Παρουσία Οχήματος	107
Κατηγοριοποίηση - L1	972
Κατηγοριοποίηση - L2	1.782
Ετοιμασία Πακέτου 75 bytes	3.600
Ετοιμασία Πακέτου 3 bytes	2.640
Αρχειοποίηση Ασύρματου Πομποδέκτη	18.730
Αποστολή Πακέτου (85 bytes - 75 byte payload)	56.800
Αποστολή Πακέτου (13 bytes - 3 bytes payload)	15.904
Ολοκλήρωση Αποστολής	1.410
Αποστολή Πακέτου Συνολικά (85 bytes - 75 byte payload)	80.540
Αποστολή Πακέτου Συνολικά (13 bytes - 3 bytes payload)	38.684
Έλεγχος Λήψης Πακέτου	5.000

Ζητούμενο στην ενεργειακή μελέτη, που θα ακολουθήσει, είναι αρχικά να εκτιμηθεί η μέγιστη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας του κόμβου και στη συνέχεια να διερευνηθεί πως επηρεάζεται αυτή από δύο κυρίως παράγοντες. Ο πρώτος είναι ο αριθμός των οχημάτων, που ανιχνεύονται ημερησίως, γεγονός, που οδηγεί σε

αυξημένη λειτουργία του Ασύρματου Κόμβου για την κωδικοποίηση του σήματος και την αποστολή του χαρακτηριστικού διανύσματος στον σταθμό βάσης για την κατηγοριοποίηση. Ο δεύτερος είναι η ίδια η κατηγοριοποίηση, αν δηλαδή θα γίνεται στον σταθμό βάσης, από τον πίνακα S που θα στέλνει ο Ασύρματος Κόμβος ή αν θα γίνεται πάνω στον Κόμβο. Για την διερεύνηση των παραπάνω επιλέγονται δύο σενάρια λειτουργίας του Ασύρματου Κόμβου:

- **Κατηγοριοποίηση στον Σταθμό Βάσης** - Ο ασύρματος πομποδέκτης τροφοδοτείται μετά την ανίχνευση ενός οχήματος για την αποστολή του πίνακα S και για 5 ms κάθε δευτερόλεπτο (84400 φορές τη μέρα), για έλεγχο εισερχομένου μηνύματος. Το πακέτο που αποστέλλεται έχει μέγεθος 85 bytes.
- **Κατηγοριοποίηση στον Κόμβο (L1)** - Η κατηγοριοποίηση βάσει αρχετύπου και με χρήση της απόστασης L1 γίνεται στον κόμβο. Ο ασύρματος πομποδέκτης τροφοδοτείται για την αποστολή του αποτελέσματος και για 5 ms κάθε δευτερόλεπτο (84400 φορές τη μέρα), για έλεγχο εισερχομένου μηνύματος. Το πακέτο που αποστέλλεται έχει μέγεθος 13 bytes, δηλαδή 72 bytes λιγότερα από το πακέτο, που περιλαμβάνει και τον πίνακα S.

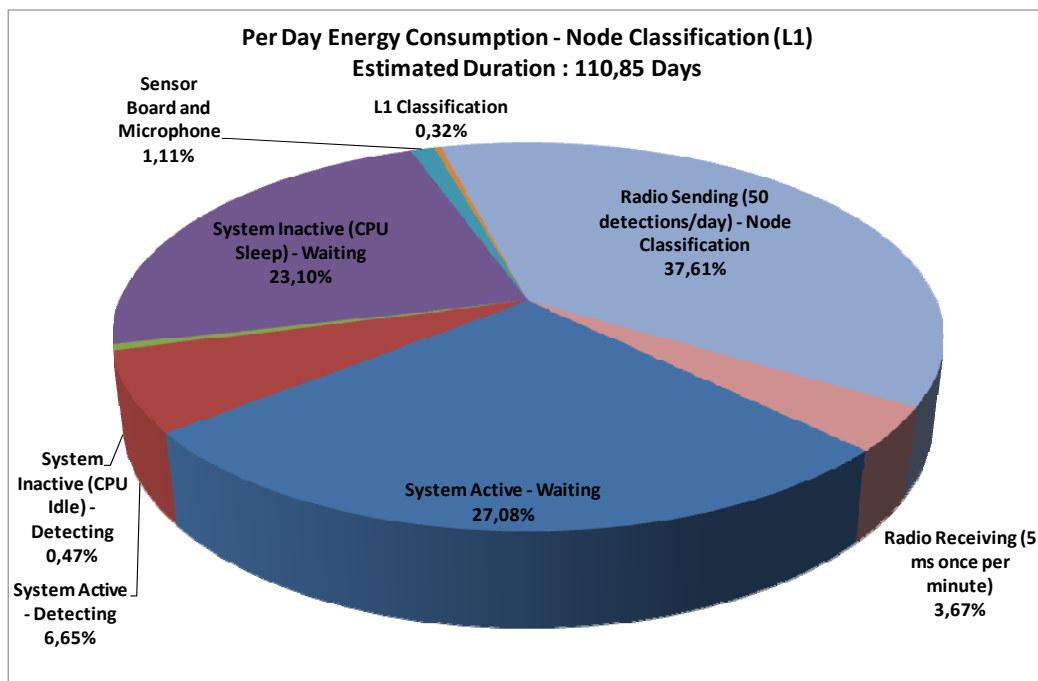
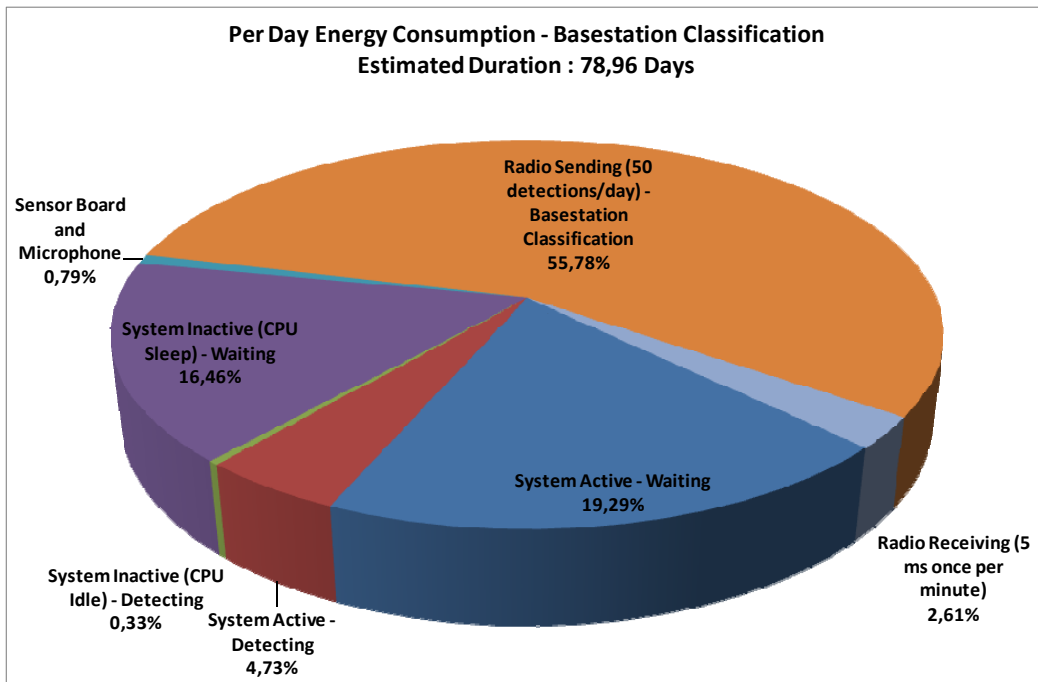
Στον Πίνακα 30 παρουσιάζεται η αναλυτική κατανάλωση ενέργειας κάθε υποσυστήματος και λειτουργίας του κόμβου. Από την κατανάλωση αυτή προκύπτει η διάρκεια ζωής του ασύρματου κόμβου, ανάλογα με το σενάριο με το οποίο λειτουργεί. Σημειώνονται επίσης, τα ποσοστά, με τα οποία συμμετέχει το κάθε υποσύστημα, στη συνολική κατανάλωση. Στην Εικόνα 36 γίνεται η σύγκριση των δύο σεναρίων λειτουργίας, ως προς την κατανάλωση ανά υποσύστημα/λειτουργία.

Πίνακας 30: Αναλυτική Ενεργειακή Κατανάλωση ανά σενάριο Λειτουργίας

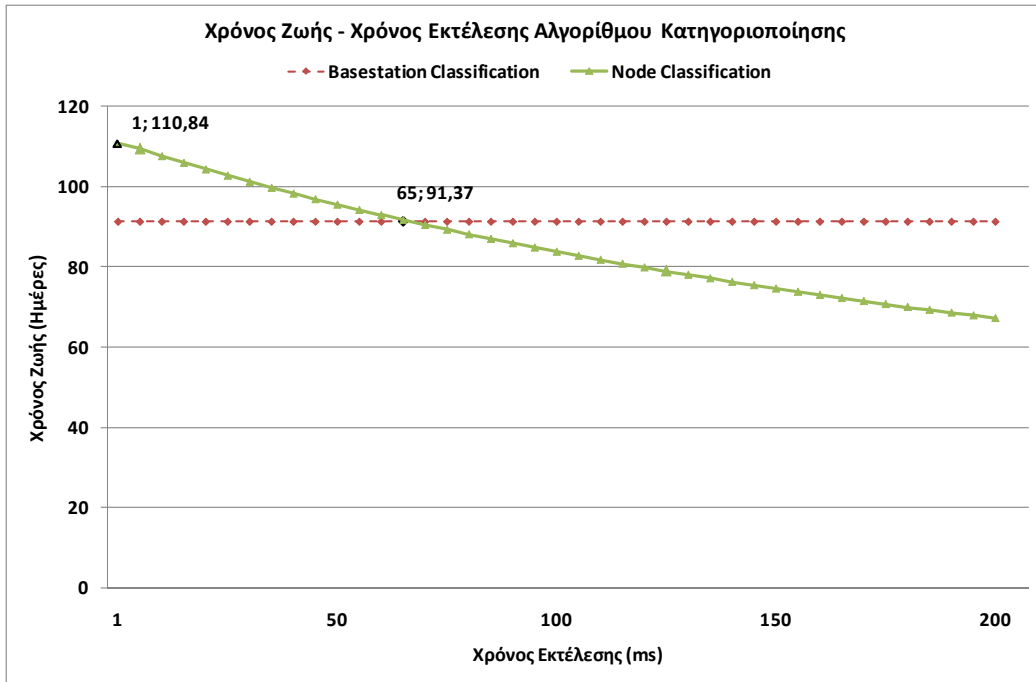
Υποσύστημα / Λειτουργία	per Sample (μAs)	per sec (μAs)	per day (mAh)	Base Station Classification	Node Classification (L1)
CPU Ενεργή - Παρουσία Οχήματος	0,107 ms x 5,7 mA = 0,607 μAs	0,607 μAs x 8000 sps = 4856,4 μAs	6,60	19,29%	27,08%
CPU Αδρανής (idle)- Παρουσία Οχήματος	(0,125-0,107) ms x 2,3 mA = 0,043μAs	0,043 μAs x 8000 sps = 340,4 μAs	1,62	4,73%	6,65%
CPU Ενεργή - Απουσία Οχήματος	0,245 ms x 5,7 mA = 1,394 μAs	1,394 μAs x 200 sps = 278,73 μAs	0,11	0,33%	0,47%
CPU Χαμηλή Κατανάλωση Ενέργειας (sleep)- Απουσία Οχήματος	(5-0,245) ms x 0,3 mA = 1,189 μAs	1,189 μAs x 200 sps = 237,775 μAs	5,63	16,46%	23,10%
Πλακέτα Αισθητήρων - Μικρόφωνο Ενεργό	-	1000 ms x 0,813 mA = 813 μAs	0,27	0,79%	1,11%
Αλγόριθμος Κατηγοριοποίησης L1 (50 ανιχνεύσεις/ημέρα)	-	-	0,08		0,32%
Αποστολή Μηνύματος - Κατηγοριοποίηση στον Σταθμό Βάσης (50 ανιχνεύσεις/ημέρα)	-	-	80,54 ms x 17,1 mA x 50 detections= 19,07 mAh	55,78%	
Αποστολή Μηνύματος - Κατηγοριοποίηση στον Ασύρματο Κόμβο (50 ανιχνεύσεις/ημέρα)	-	-	38,68 ms x 17,1 mA x 50 detections= 9,16 mAh		37,61%
Έλεγχος Λήψης Μηνύματος (5 ms κάθε λεπτό)	-	-	86400 checks/day x 5ms x 16,8mA=0,89mAh	2,61%	3,67%
Σύνολο				100%	100%
Συνολική Κατανάλωση ανά Ημέρα (mAh)				34,19	24,36
Διαθέσιμη Ενέργεια (2xAA Μπαταρίες)				2700	2700
Χρόνος Ζωής (Ημέρες)				78,96	110,85
Μέση Κατανάλωση Ισχύος (mW)				4,70	3,35
% Βελτίωση				0%	40%

Για τη διερεύνηση του πόσο επηρεάζει ο αλγόριθμος κωδικοποίησης την διάρκεια ζωής του κόμβου, εκτιμάται η κατανάλωσή του, όταν αυτός εκτελεί έναν υποθετικό αλγόριθμο, ο οποίος απαιτεί από 1 – 200 ms για την εκτέλεσή του. Με δεδομένο, ότι ανιχνεύονται 50 οχήματα την ημέρα, στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται ο χρόνος ζωής του κόμβου με την εκτέλεση του υποθετικού αλγόριθμου κατηγοριοποίησης. Η ευθεία γραμμή, είναι ο χρόνος ζωής του κόμβου, χωρίς την εκτέλεση της κατηγοριοποίησης. Παρατηρείται, ότι για χρόνους εκτέλεσης μικρότερους των 125 ms, πρέπει να προτιμηθεί η κατηγοριοποίηση στον ασύρματο κόμβο, ενώ αν ο αλγόριθμος κατηγοριοποίησης είναι πιο απαιτητικός σε υπολογισμούς, θα πρέπει να προτιμηθεί η αποστολή του πλήρους πίνακα S στον Σταθμό Βάσης. Να σημειωθεί εδώ, ότι οι υπολογισμοί έχουν γίνει για αποστολή πίνακα 36 χαρακτήρων των 2 byte ο καθένας, δηλαδή για ένα πακέτο μήκους 85 byte.

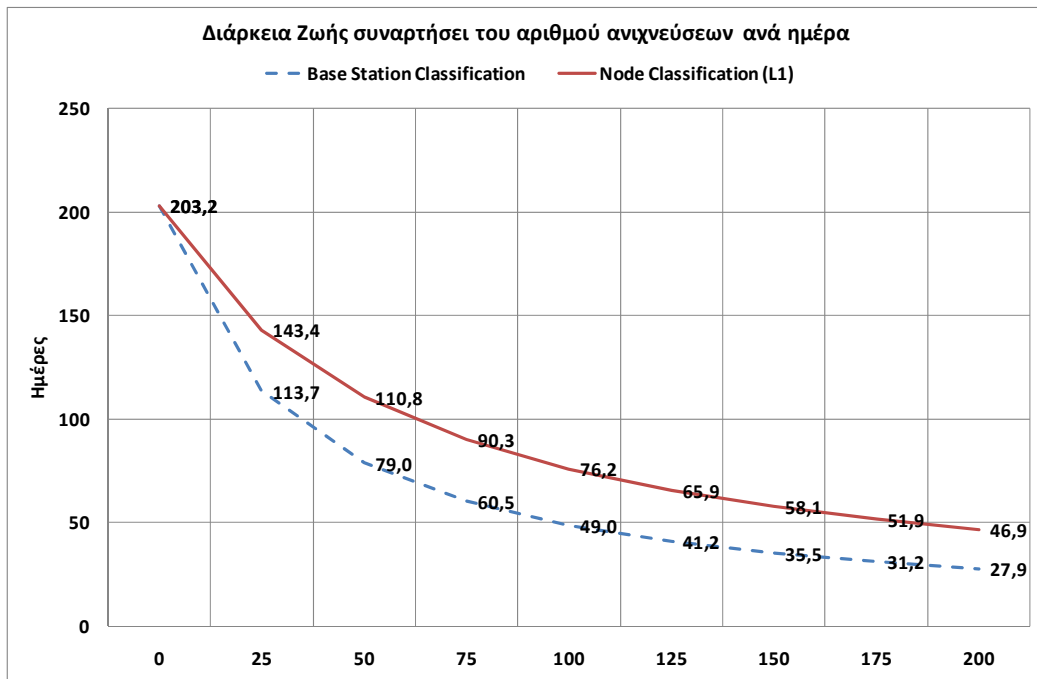
Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής του κόμβου συναρτήσει του αριθμού των ανιχνευμένων οχημάτων ανά ημέρα.



Εικόνα 36: Ποσοστιαία συμμετοχή του κάθε υποσυστήματος στην κατανάλωση ενέργειας στα δύο σενάρια λειτουργίας



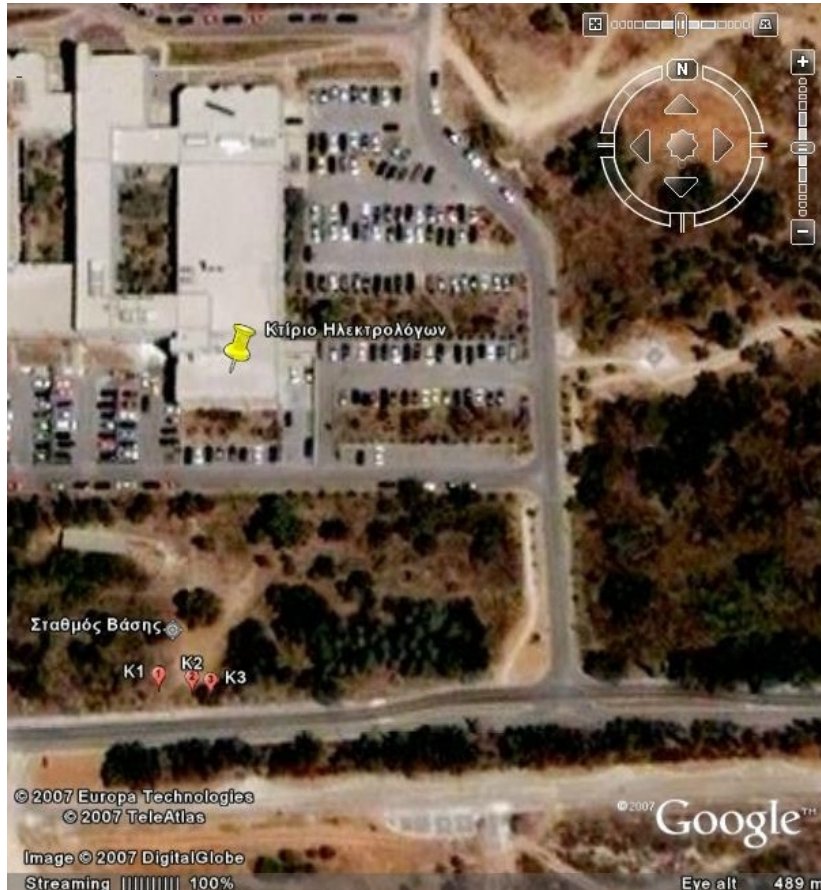
Εικόνα 37: Χρόνος Ζωής συναρτήσει του Χρόνου Εκτέλεσης Αλγορίθμου Κατηγοριοποίησης



Εικόνα 38: Διάρκεια Ζωής συναρτήσει του αριθμού ανιχνεύσεων ανά ημέρα

4.4.3.2. Πειραματική Δοκιμή του Κόμβου Αναγνώρισης Οχημάτων

Το Ασύρματο Δίκτυο, που εγκαταστάθηκε, αποτελείται από τρεις Ασύρματους Κόμβους (Κ1, Κ2, Κ3) και από τον Σταθμό Βάσης. Εγκαταστάθηκε πίσω από το κτίριο της Σχολής των Ηλ. Μηχ. και Μηχ. Η/Υ του ΕΜΠ, κοντά στο δρόμο. Η απόσταση μεταξύ του Σταθμού Βάσης και των Κόμβων, είναι περίπου 13 μέτρα. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 39 και σε λεπτομέρεια στην Εικόνα 40.



Εικόνα 39: Τοποθεσία εγκατάστασης Ασύρματου Δικτύου



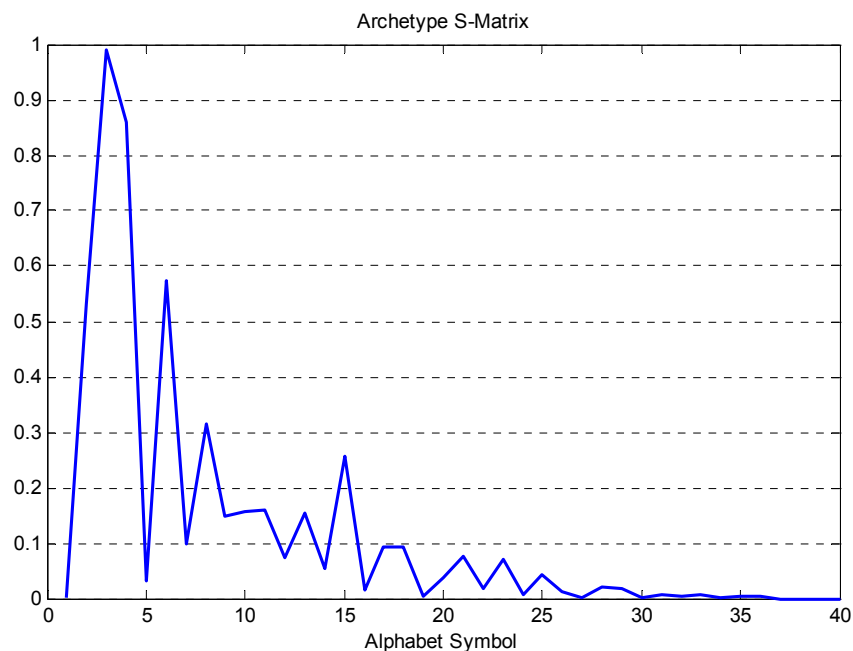
Εικόνα 40: Λεπτομέρεια τοποθεσίας εγκατάστασης Ασύρματου Δικτύου

Ο κάθε Ασύρματος Κόμβος Αναγνώρισης Οχήματος, ανιχνεύει τα διερχόμενα οχήματα και στέλνει ένα μήνυμα με τον πίνακα S προς το Σταθμό Βάσης. Για τις ανάγκες του πειράματος κρίθηκε σκοπιμότερο, οι ασύρματοι κόμβου να στέλνουν τους πίνακες προς τον σταθμό βάσης και να μην κατηγοριοποιούν το όχημα. Η κατηγοριοποίηση γίνεται στον σταθμό βάσης με χρήση της απόστασης L1 και το αποτέλεσμα είναι ακριβώς ίδιο με αυτό, που θα έδινε και ο ασύρματος κόμβος.

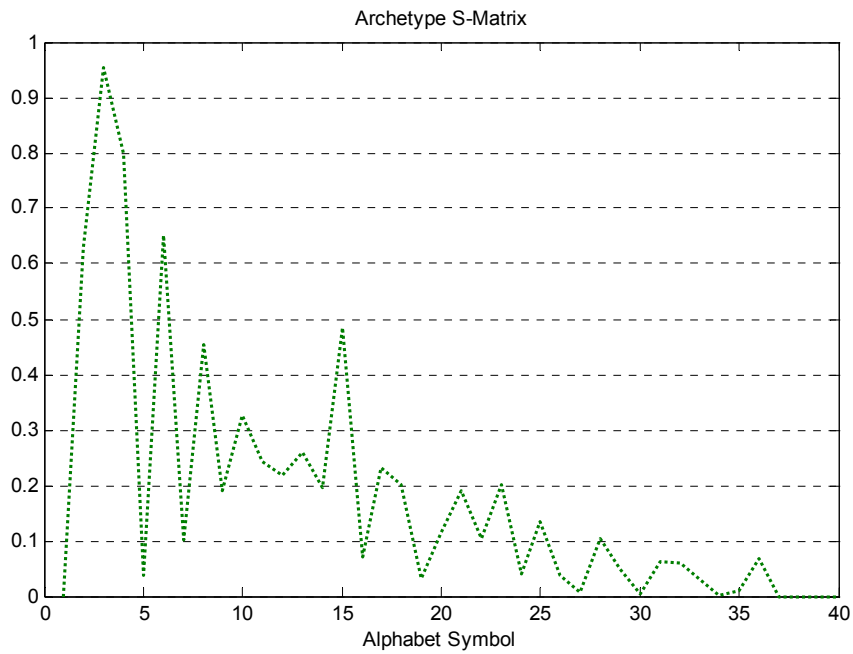
Τα οχήματα που ανιχνεύονται ανήκουν σε τρεις κλάσεις:

- Επιβατικό αυτοκίνητο
- Λεωφορείο (θερμικό και φυσικού αερίου)
- Μοτοσικλέτα

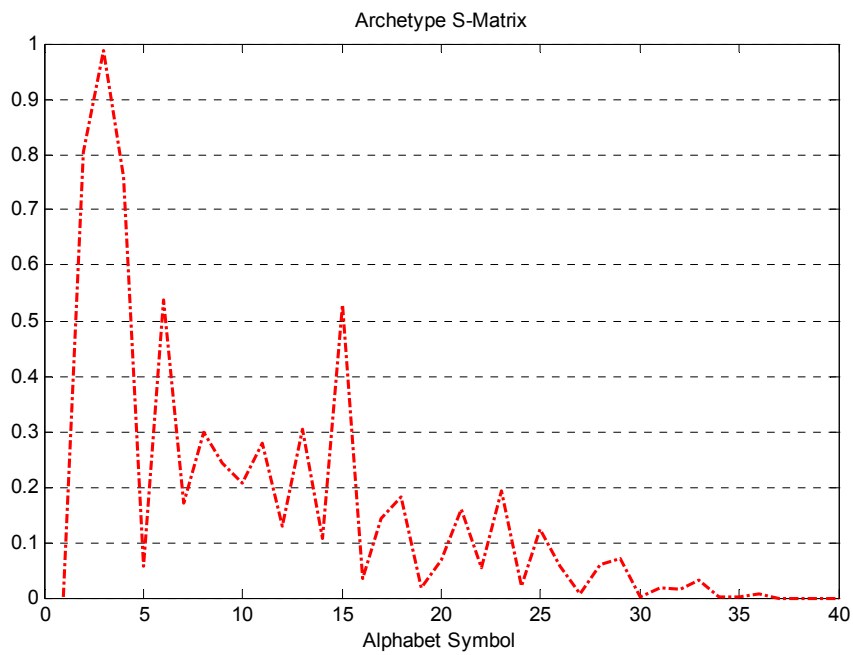
Λήφθηκαν συνολικά και από τους τρεις κόμβους 77 υπογραφές από αυτοκίνητο, 21 υπογραφές από λεωφορείο και 17 υπογραφές από μοτοσικλέτα. Από αυτές χρησιμοποιήθηκαν 4 για την δημιουργία του αρχέτυπου πίνακα S κάθε κλάσης από τον μέσο όρο τους. Τα αρχέτυπα χαρακτηριστικά διανύσματα κάθε κλάσης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 41 έως Εικόνα 44).



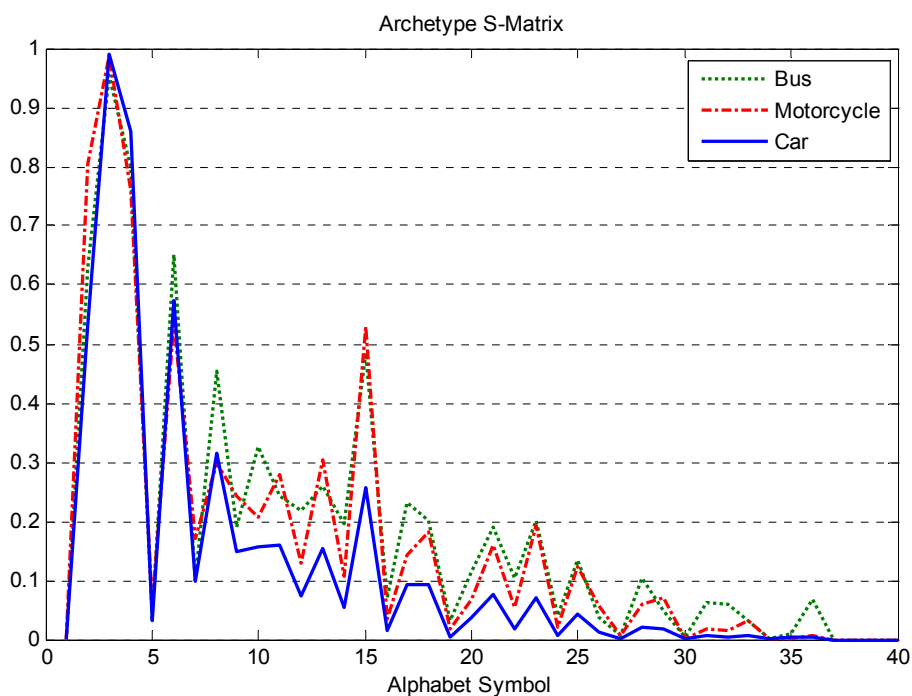
Εικόνα 41: Αρχέτυπος Πίνακας S Αυτοκινήτου



Εικόνα 42: Αρχέτοπος Πίνακας S Λεωφορείου



Εικόνα 43: Αρχέτοπος Πίνακας S Μοτοσυκλέτας



Εικόνα 44: Αρχέτυποι Πίνακες των τριών κλάσεων

Παρατηρούμε, ότι οι τρεις κλάσεις έχουν αρκετά καλό διαχωρισμό μεταξύ τους. Οι πιο έντονες διαφορές εντοπίζονται μεταξύ αυτοκινήτου - λεωφορείου και αυτοκινήτου - μοτοσικλέτας, ενώ η διαφορά μεταξύ των κλάσεων λεωφορείου - μοτοσικλέτας είναι μικρότερη (Πίνακας 31).

Πίνακας 31: L1 Απόσταση μεταξύ των κλάσεων

Οχήματα	Απόσταση L1
Αυτοκίνητο - Λεωφορείο	0.2890
Αυτοκίνητο - Μοτοσικλέτα	0.2687
Λεωφορείο - Μοτοσικλέτα	0.1404

Στον Πίνακα 32 παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της απόδοσης του συστήματος. Κατά την κατηγοριοποίηση και των τριών κλάσεων των οχημάτων, η απόδοση φτάνει το 84% για το αυτοκίνητο, το 62% για το λεωφορείο και το 76% για την μοτοσικλέτα. Αν διατηρηθούν μόνο οι δύο κλάσεις, τότε τα ποσοστά ανίχνευσης φτάνουν το 90% για το αυτοκίνητο και το 76% για το λεωφορείο. Αυτό συμβαίνει γιατί αρκετές από τις υπογραφές του λεωφορείου κατηγοριοποιούνται, ως μοτοσικλέτα και το αντίστροφο.

Πίνακας 32: Αποτελέσματα κατηγοριοποίησης Ασύρματου Δικτύου Αναγνώρισης Οχημάτων - 3 κλάσεις

Αποτελέσματα Κατηγοριοποίησης για 3 κλάσεις					
	Αυτοκίνητο	Λεωφορείο	Μοτοσικλέτα	Σύνολο	Ποσοστό
Αυτοκίνητο	65	7	5	77	84%
Λεωφορείο	4	13	4	21	62%
Μοτοσικλέτα	1	3	13	17	76%

Πίνακας 33: Αποτελέσματα κατηγοριοποίησης Ασύρματου Δικτύου Αναγνώρισης Οχημάτων - 2 κλάσεις

Αποτελέσματα Κατηγοριοποίησης για 2 κλάσεις				
	Αυτοκίνητο	Λεωφορείο	Σύνολο	Ποσοστό
Αυτοκίνητο	69	8	77	90%
Λεωφορείο	5	16	21	76%

4.5.Σχόλια

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης οχημάτων, εφαρμόσιμη στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, η οποία βασίζεται στην μέθοδο TESPAP, που έχει προηγουμένως χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην αναγνώριση φωνής. Με τη προταθείσα μέθοδο επιτυγχάνονται επιδόσεις, που μπορούν να φτάσουν το 89,5% για το ακουστικό σήμα και το 83,5% για το σεισμικό, σε επίπεδο προσομοίωσης με πραγματικά σήματα, ενώ παραμένουν σταθερά πάνω από 62% σε σενάρια κατηγοριοποίησης δύο και τριών οχημάτων στον Ασύρματο Κόμβο Αναγνώρισης Οχημάτων. Το χαρακτηριστικό διάγραμμα, που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του κάθε οχήματος είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας 36 το πολύ στοιχείων, όσα δηλαδή και τα σύμβολα του χρησιμοποιούμενου αλφαβήτου. Στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε, αναδείχθηκε η ιδιαίτερη σημασία, που έχει η επιλογή του αλφαβήτου στην απόδοση της κωδικοποίησης του σήματος και στην αναγνώριση των οχημάτων.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι συγκρίσιμα με τη βιβλιογραφία και ειδικά με τις εργασίες [56] και [67], στις οποίες χρησιμοποιείται το ίδιο σύνολο δεδομένων αλλά με διαφορετική επεξεργασία σήματος. Στην [56] χρησιμοποιείται η φασματική ανάλυση, μέσω του μετασχηματισμού Fourier και η απόδοση φτάνει το 69,48% για το ακουστικό και 63,79% για το σεισμικό σήμα ενώ στην [67] χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα φασματική ανάλυση, φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) και μετασχηματισμός κυματιδίων, με απόδοση που μπορεί να φτάσει το 90% για το σεισμικό σήμα.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των προταθέντων λύσεων είναι, το ότι γίνονται άμεσα υλοποιήσιμοι σε έναν Ασύρματο Κόμβο, εφοδιασμένο με έναν απλό μικροελεγκτή. Η μέση κατανάλωση του κόμβου δεν ξεπερνά τα 4,7 mW, στην περίπτωση, που η κατηγοριοποίηση γίνεται από τον σταθμό βάσης, ενώ μειώνεται στα 3,35 mW, όταν την κατηγοριοποίηση αναλαμβάνει ο ίδιος ο κόμβος. Αυτές οι τιμές επιτρέπουν μέγιστη διάρκεια ζωής τις 78,96 και 110,85 ημέρες αντίστοιχα, με ένα ζευγάρι μπαταριών AA των 2700 mAh, δεδομένου ότι ο αριθμός των ανιχνεύσεων ανά ημέρα δεν ξεπερνάει τις 50.

5. Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Η έρευνα πάνω στο θέμα της ακουστικής και σεισμικής ανίχνευσης προσωπικού και οχημάτων με χρήση αυτοματοποιημένων, μη-επιτηρούμενων ηλεκτρονικών συστημάτων, είναι εκτεταμένη και υπάρχουν ήδη αρκετές προτεινόμενες λύσεις. Η παράλληλη όμως ανάπτυξη των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, άνοιξε νέους δρόμους στα συστήματα αυτά, δίνοντάς τους τώρα, τη δυνατότητα να γίνουν μικρά, αυτόνομα και να υποστηρίζουν ασύρματη επικοινωνία. Οι υπάρχουσες όμως τεχνικές, στο μεγαλύτερο ποσοστό, είναι ιδιαίτερα απαιτητικές σε υπολογιστική ισχύ, γεγονός που δεν αποτελεί πρόβλημα, αν υπάρχει συνεχής τροφοδοσία του συστήματος, αλλά που είναι απαγορευτικό για ένα ασύρματο και αυτόνομο σύστημα, που ζητούμενο είναι η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας.

Η παρούσα εργασία αποδεικνύει, ότι τόσο η ανίχνευση προσωπικού, όσο και η αναγνώριση και κατηγοριοποίηση οχήματος μπορεί να γίνουν αξιόπιστα από έναν ασύρματο κόμβο εξοπλισμένο με έναν 8-bit μικροελεγκτή, με χρήση κατάλληλης επεξεργασίας του σήματος στο πεδίο του χρόνου. Ειδικά για την περίπτωση της σεισμικής ανίχνευσης προσωπικού, η καταγραφή του σεισμικού σήματος από ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο, που λειτουργεί στον συντονισμό, αποτελεί μια καλή εναλλακτική λύση, έναντι των γεωφώνων και των πολύ ακριβότερων αισθητήρων MEMS. Οι μειωμένη εμβέλειά του μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω και το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρει, είναι οι μικρές διαστάσεις του και το πολύ χαμηλό επίπεδο θορύβου. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας, που προτάθηκε, λειτουργεί αξιόπιστα και έχει μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις, γεγονός, που δίνει μεγάλη διάρκεια ζωής στον Ασύρματο Κόμβο Ανίχνευσης Οχήματος.

Όσον αφορά στην αναγνώριση οχήματος γίνεται φανερή η ικανότητα της μεθόδου επεξεργασίας και κωδικοποίησης του σήματος στο πεδίου του χρόνου, να κατηγοριοποιεί σωστά τις ηχητικές και σεισμικές υπογραφές των οχημάτων.

Ουσιαστικό ρόλο προς αυτή την κατεύθυνση παίζει το αλφάβητο κωδικοποίησης, το οποίο θα πρέπει να δημιουργείται κατά την φάση εγκατάστασης του συστήματος, με χρήση δοκιμαστικών ακουστικών και σεισμικών σημάτων, για βέλτιστες επιδόσεις. Η μέθοδος, είναι υπολογιστικά απλή και εύκολα υλοποιήσιμη σε εμπορικά διαθέσιμους Ασύρματους Κόμβους, όπως ο Mica2. Επιπλέον, έγινε σαφές ότι είναι ενεργειακά αποδοτικότερο, να κατηγοριοποιούνται τα χαρακτηριστικά διανύσματα από τον ίδιο τον κόμβο, έναντι της ασύρματης αποστολής τους στον σταθμό βάσης, δεδομένου ότι ο χρόνος επεξεργασίας δεν ξεπερνάει ένα όριο. Υπάρχει βέβαια ένα σημείο πέρα από το οποίο, η αποστολή γίνεται πιο συμφέρουσα από την επεξεργασία. Το σημείο αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το χρησιμοποιούμενο υλικό, το μήκος του πακέτου που πρόκειται να αποσταλεί και τον αριθμό των αναμενόμενων ανιχνεύσεων, ανά ημέρα. Κατά τον σχεδιασμό ενός παρόμοιου συστήματος, το όριο αυτό θα πρέπει να υπολογίζεται ώστε να εκτιμάται η λύση, η οποία εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια.

Ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει επίσης να δοθεί, στην ενεργειακά αποδοτική διαχείριση του διαθέσιμου υλικού από το λογισμικό, πρακτική που μπορεί να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής του ασύρματου κόμβου έως και 1800%, αν η διαχείριση αφορά και τον ασύρματο πομποδέκτη.

Φυσική συνέχεια της εργασίας, αποτελεί η βελτίωση του πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιομέτρου και του αλγορίθμου ανίχνευσης ανθρώπινης παρουσίας. Επίσης, ο Ασύρματος Κόμβος Ανίχνευσης Προσωπικού μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα με τον Ασύρματο Κόμβο Αναγνώρισης Οχήματος και να ενσωματωθούν στο ίδιο Ασύρματο Δίκτυο, επεκτείνοντας τις δυνατότητες του συστήματος, ώστε να εντοπίζονται ταυτόχρονα άτομα και οχήματα, που εισέρχονται εντός της περιοχής επιτήρησης. Επιπλέον, μπορούν να ενσωματωθούν και σεισμικοί αισθητήρες, στους ασύρματους κόμβους ανίχνευσης προσωπικού ή η δημιουργία ομάδων Ασύρματων Κόμβων, σε κάθε μια από τις οποίες, θα υπάρχει και ένας κόμβος, που διαθέτει σεισμικό αισθητήρα. Η ενσωμάτωση και των δύο αισθητήρων στον ίδιο κόμβο, θα επιβάρυνε πολύ τον μικροελεγκτή και εκτιμάται

ότι δεν θα ήταν δυνατόν να ανταπεξέλθει στον απαιτούμενο ρυθμό δειγματοληψίας και επεξεργασίας του σήματος και των δύο αισθητήρων.

Επίσης, ανεβαίνοντας ένα επίπεδο παραπάνω, ανοιχτό πεδίο έρευνας παραμένει η επεξεργασία και η διαχείριση των ανεξάρτητων εκτιμήσεων του κάθε κόμβου, για την ανίχνευση και την κλάση ενός οχήματος και ο τρόπος, με το οποίο μπορούν να συγκριθούν με τις εκτιμήσεις των υπολοίπων κόμβων, που πιθανόν καταγράφουν το ίδιο γεγονός. Μέθοδοι σύντηξης δεδομένων (data fusion) και συνεργατικής επεξεργασίας (collaborative processing) απασχολούν έντονα την ερευνητική κοινότητα και μπορούν να βελτιώσουν αισθητά τις επιδόσεις ενός συστήματος φυσικής ασφάλειας χώρων.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Mark Weiser, *"The Computer for the Twenty-First Century"*, Scientific American, pp. 94-10, September 1991.
- [2] W. Manges, G. Allgood, and S. Smith, *"It's time for sensors to go wireless. part 1: Technological underpinnings"*, Sensors Magazine, April 1999.
- [3] W. Manges, G. Allgood, and S. Smith, *"It's time for sensors to go wireless. part 2: Take a good technology and make it an economic success"*, Sensors Magazine, May 1999.
- [4] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, *"Wireless sensor networks for habitat monitoring"*, ACM WSNA'02, 88-97, Atlanta, September, 2002.
- [5] K. Martinez, R. Ong, J. Hart, *"Glacsweb: a sensor network for hostile environments"*, First Annual IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE SECON 2004.
- [6] D. Culler, D. Estrin, M. Srivastava, *"Overview of Sensor Networks"*, IEEE Computer, vol. 37, no. 8 , pp. 41-49, 2004.
- [7] D. Cook, S. Das, *"Smart Environments: Technology, Protocols and Applications"*, Wiley-Interscience, 2004.
- [8] *"Επιχειρησιακό Σύστημα Σχεδιασμού και Λήψης Αποφάσεων για Διαχείριση Δασικών Πυρκαγιών"*, Περιληπτική Τεχνική Ενημέρωση, www.firementor.gr, 2006.
- [9] V. I. Kyriatzis, H. Takruri-Rizk, N. S. Samaras, S. Tzortzios, *"Wireless Sensor Network-Based Decision Support System for Precision Agriculture"*, the 3rd International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture. Beijing, China. Oct. 14-16, 2005.
- [10] I. A. Thanasopoulos, G. P. Mazarakis, P. K. Kikiras, J. N. Avaritsiotis, *"A Sensor Node for Non-Invasive Cardio-Respiratory Monitoring of Infants"*,

2nd International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, London, England, 12 -13 April, 2005.

- [11] Yang, Guang-Zhong, *Body Sensor Networks*, Springer, 2006.
- [12] W. S. Conner, J. Heidemann, L. Krishnamurthy, X. Wang, M. Yarvis, "*Workplace Applications of Sensor Networks*", USC/ISI Technical Report ISI-TR-2004-591, 2004.
- [13] A. Bonivento, L.P. Carloni, A.L. Sangiovanni-Vincentelli, "*Platform Based Design of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications*", Proceedings of Design Automation and Test in Europe (DATE), Munich, March, 2006.
- [14] E. S. Leland, E. M. Lai, P.K Wright, "*A Self-Powered Wireless Sensor for Indoor Environmental Monitoring*", 2004 Wireless Networking Symposium, October 20 - 22, 2004.
- [15] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, Deborah Estrin. "*A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring*", Proc. of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys04), November 2004.
- [16] W. Weber, J. M. Rabaey, E. Aarts, *Ambient Intelligence*, Springer, 2005.
- [17] F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "*Wireless Sensor Networks: A Survey*", Elsevier, Computer Networks, no. 38, pp. 393-422, 2002.
- [18] P. Kikiras and J. Avaritsiotis, "*Unattended Ground Sensor Network for Force Protection*", Journal of Battlefield Technology, vol. 7, no.3, Nov. 2004.
- [19] T. Burns, R. O'Connell, J. Wells, M. Dapper, "*Unattended Ground Sensor (UGS) Systems for Homeland Defense*", Proc. SPIE, vol. 5071, p. 280, 2003.
- [20] H.O. Marcy, J. R. Agre, C. Chien, L. P. Clare, N. Romanov, and A. Twarowski, "*Wireless sensor networks for area monitoring and integrated vehicle health management applications*", Proc. AIAA Guidance,

- [21] A. Arora et al., "*ExScal: Elements of an Extreme Scale Wireless Sensor Network*", Proc. of the 11th IEEE Int. Conf. on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, pp. 102 - 108, 17-19 Aug, 2005.
- [22] A. Arora et al., "*A line in the sand: A wireless sensor network for target detection, classification, and tracking*", Computer Networks Journal, vol. 46, no. 5, pp. 605-634, 2004.
- [23] M. Caruso, L. Withanawasam, "*Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors*", Honeywell, SSEC, 12001 State Highway 55, Plymouth, MN USA 55441 <http://www.ssec.honeywell.com>
- [24] The Vehicle Detector Clearinghouse, Southwest Technology Development Institute (SWTDI), "*A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*", 2000.
- [25] F. Pianegiani, A. Boni, M. Hu, D. Petri, "*Energy-Aware Signals Classification in Ad-hoc Wireless Sensor Networks*", Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC, Ottawa, Canada, May 17-19, 2005.
- [26] F. Zhao, L. Guibas, *Wireless Sensor Networks, First Edition: An Information Processing Approach*, Morgan Kaufmann, 2004.
- [27] G. Pottie, L. Clareb, "**Wireless integrated network sensors: toward low-cost and robust self-organizing security networks**", Proc. SPIE, Sensors, C3I, Vol. 3577, p. 86-95, 1999.
- [28] D. Estrin, D. Culler, K. Pister, and G. Sukhatme, "*Connecting the Physical World with Pervasive Networks*", IEEE Pervasive Computing, pp. 59-69, January-March 2002.
- [29] Z. Hu, B. Li, "*On the Fundamental Capacity and Lifetime Limits of Energy-Constrained Wireless Sensor Networks*", Proceedings of the 10th IEEE Real-

Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp.2-9, 25-28 May, Toronto, Canada, 2004.

- [30] A. Hac, *Wireless Sensor Network Designs*, Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [31] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, "*Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust"*", In International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM '99), August 1999.
- [32] J. Hill, http://www.jhlabs.com/jhill_cs/
- [33] Crossbow Technology Inc., www.xbow.com
- [34] MoteIV, <http://www.moteiv.com/>
- [35] H. Abrach, S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, J. Deng, R. Han, "*MANTIS: System Support For Multimodal Networks of In-situ Sensors*", *2nd ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pp. 50-59, 2003.
- [36] Intel Corporation, <http://www.intel.com/research/exploratory/motes.htm>
- [37] J.R. Agre, L.P. Clare, G.J. Pottie, and N.P. Romanov, "*Development platform for self-organizing wireless sensor networks*", Proc. SPIE, Unattended Ground Sensor Technol. Applications, 3713, April 1999.
- [38] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, "*Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks*", Proceedings of ACM MobiCom'01 pp. 272-286, Rome, Italy, July 2001.
- [39] W. Merrill, K. Sohrabi, L. Girod, J. Elson, F. Newberg, and W. Kaiser, "*Open standard development platforms for distributed sensor networks*", Proc. SPIE, Unattended Ground Sensor Technol. Applications IV, Orlando, FL, April 2002.
- [40] J. Elson, S. Bien, N. Busek, V. Bychkovskiy, A. Cerpa, D. Ganesan, L. Girod, B. Greenstein, T. Schoellhammer, T. Stathopoulos, and D. Estrin, "*EmStar: an*

environment for developing wireless embedded systems software", CENS technical report 0009, March 24, 2003.

- [41] I. Mohammad and I. Mahgoub, *Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems*, CRC Press, 2005.
- [42] J. Hill, "*System Architecture for Wireless Sensor Networks*", University of California, Berkeley, Ph.D. Thesis, 2003.
- [43] L. Zhou, J. Kahn, K. Pister, "*Corner-Cube Retroreflectors Based on Structure-Assisted Assembly for Free-Space Optical Communication*", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 12, No. 3, June 2003.
- [44] Sung Park, Ivo Locher, Mani Srivastava, "*Design of a Wearable Sensor Badge for Smart Kindergarten*", 6th Int. Symposium on Wearable Computers (ISWC2002), Seattle, WA, October 7-10, 2002.
- [45] Pai H. Chou and Chulsung Park, "*Energy Efficient Platform Designs for Real-World Wireless Sensing Applications*", in Proc. International Conference on Computer Aided Design (ICCAD 2005), November 2005.
- [46] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. K. Wright, J. M. Rabaey, "*Power sources for wireless sensor networks*", in Proceedings of EWSN 2004, Berlin, Germany, Jan. 2004.
- [47] P. Kikiras, "*Sensor Networks for Pervasive Computing*", PhD Thesis, National Technical University of Athens, 2005.
- [48] M.A.M. Vieira, D.C. da Silva Jr., C.N. Coelho Jr., and J.M. da Mata, "*Survey on Wireless Sensor Network Devices*", Emerging Technologies and Factory Automation(ETFA03), September 2003.
- [49] J. Beutel, "*Metrics for Sensor Network Platforms*", Proc. ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN 06), June, 2006.
- [50] G. Prado et al., "*Acoustic sniper localization system*", Proceedings of the SPIE, vol. 2938, p. 318, 1997.

- [51] J. Chen, K. Yao, R. Hudson, *"Source Localization and Beamforming"*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No.2, pp. 30-39, 2002.
- [52] L. Gu et al., *"Lightweight Detection and classification for Wireless Sensor Networks in Realistic Environments"*, Proc. of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'05), 2005.
- [53] G. Succi, T. Pedersen, R. Gampert, G. Prado, *"Acoustic Target Tracking and Target Identification - Recent Results"*, Proceedings of the SPIE, vol. 3713, p. 10, 1999.
- [54] X. Sheng, Yu-Hen Hu, *"Sub-band Energy Based Collaborative Target Localization in Wireless Sensor Network System"*, <http://www.ece.wisc.edu/~sensit/>, 2003.
- [55] D. Li, K. Wong, Y. Hu, A. Sayeed, *"Detection, classification and tracking of targets"*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No.2, pp. 17-29, 2002.
- [56] M. Duarte and Y. Hu, *"Vehicle Classification in Distributed Sensor Networks"*, Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 64 No. 7, pp. 826-838, 2004.
- [57] M. Wellman, N. Srour, D. Hillis, *"Feature Extractiion and Fusion of Acoustic and Seismic Sensors for Target Identification"*, Proceedings of the SPIE, vol. 3081, p. 139, 1997.
- [58] J. Scholl, J. Agre, L. Clare, *"Wavelet Packet Based Target Classification Schemes"*, Proceedings of the 1998 Meeting of the IRIS Specialty Group on Acoustic and Seismic Sensing, APL/Johns Hopkins University, Laurel MD, 29-30 September and 1 October 1998.
- [59] I. Thanasopoulos, G. Mazarakis, J. Avaritsiotis, *"Methods for Vehicle Classification"*, 1st Int. Conference on Safety and Security in Europe, Potsdam, Germany, 30 November - 1 December 2006.
- [60] J. Ding, *"Vehicle detection by sensor network nodes"*, MS thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, CA, 2003.

- [61] G. Prado et al., "*A multi-mission unattended ground sensor for law enforcement applications*", Proceedings of the SPIE, vol. 4708, p. 259, 2002.
- [62] G. Prado, "*Affordable unattended ground sensors: technologies and challenges*", Proceedings of the SPIE, vol. 5796, p. 435, 2005.
- [63] G. Prado, "*New classification results using temporal and spatial fusion*", Proceedings of the SPIE, vol. 6231, 2006.
- [64] G. Prado, "*Acoustic-seismic sensors: past experiences and future prospects*", Proceedings of the SPIE, vol. 5611, p. 117, 2004.
- [65] G. Succi, G. Prado, R. Gampert, T. Pedersen, H. Dhaliwal, "*Problems in Seismic Detection and Tracking*", Proc. SPIE, vol. 4040, pp. 165, 2000.
- [66] A. Mayoral, I. McCool, R. Gramann, "*Detection and Classification of Time-Critical Targets Using Seismic Sensors*", Proceedings of the SPIE, vol. 4743, p. 80, 2002.
- [67] Y. Tian, H. Qi, "*Target detection and classification using seismic signal processing in unattended ground sensor systems*", International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), vol. 4, p. 4172, Orlando, FL, May, 2002.
- [68] V. Porto, L. Fogel, D. Fogel, "*Using Evolutionary Computation for Seismic Signal Detection: A Homeland Security Application*", IEEE Int. Conf. on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety, Venice, Italy, July 2004.
- [69] X. Li, R. Logan, R. Pastore, "*Perception of acoustic source characteristics: Walking sounds*", Journal of the Acoustical Society of America, v. 90, no. 6, pp. 3036-3049, December 1991.
- [70] Bruel&Kjaer : Introduction to shock and vibration
- [71] A. Ekimov, J. Sabatier, "*Vibration and Sound Signatures of Human Footsteps in Buildings*", Journal of the Acoustical Society of America, v. 120, no. 2, pp. 762 - 768, August 2006.

- [72] G. Succi, D. Clapp, R. Gampert, G. Prado, *"Footstep Detection and Tracking"*, Proc. SPIE, vol. 4393, p. 22, 2001.
- [73] J. Scholl, J. Agre, L. Clare, M. Gill, *"A Low Power Impulse Signal Classifier using the Haar Wavelet Transform"*, Proc. SPIE, vol. 3577, pp. 136, 1999.
- [74] E. Ranger, *"Demonstration System for a low-Power Seismic Detector and Classifier"*, Master thesis, MIT, June 2003.
- [75] K. Houston, D. McGaffigan, *"Spectrum Analysis Techniques for Personnel Detection Using Seismic Sensors"*, Proc. SPIE, vol. 5090, p. 162, 2003.
- [76] J. Lan, T. Lan, and S. Nahavandi, *"A Novel Application of a Microaccelerometer for Target Classification"*, IEEE Sensors Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 519-524, August 2004.
- [77] J. Lacombe, L. Peck, T. Anderson, D. Fisk, *"Seismic Detection Algorithm and Sensor Deployment Recommendations for Perimeter Security"*, Proc. SPIE, vol. 6231, 2006.
- [78] M. Munich, *"Bayesian Subspace Methods for Acoustic Signature Recognition of Vehicles"*, Proc. of the 12th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2004, Vienna, Austria, 6-10 September, 2004.
- [79] R. Gramann, M. Bennett, T. O'Brien, *"Vehicle and personnel detection using seismic sensors"*, Proc. SPIE, vol. 3577, 1998.
- [80] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, E. Tim Goldburt, *"Single and Three Axis Geophone: Footstep Detection with Bearing Estimation, Localization and Tracking"*, Proc. SPIE, vol. 5090, pp. 155, 2003.
- [81] A. Pakhomov, T. Goldburt, *"Seismic Systems for Unconventional Target Detection and Identification"*, Proc. SPIE, vol. 6201, 2006.
- [82] A. Pakhomov, T. Goldburt, *"New Seismic Unattended Small Size Module for Foot-Step Detection"*, Proc. SPIE, vol. 6231, 2006.
- [83] A. Pakhomov, T. Goldburt, *"Field Testing of New Unattended Small Size Seismic Module for Various Target Detection"*, Proc. SPIE, vol. 6394, 2006.

- [84] A. Pakhomov, T. Goldburt, *"New Seismic Unattended Small Size Module for Footstep and Light and Heavy Vehicles Detection and Identification"*, Proc. SPIE, vol. 6562, 2007.
- [85] <http://www.analog.com/>
- [86] J. Lan, Saeid Nahavandi, T. Lan, *"Application of Micro-Accelerometer in Target Recognition"*, Proceedings of the SPIE, vol. 5344, p. 175, 2004.
- [87] *"Design Through to Production of a MEMS Digital Accelerometer for Seismic Acquisition"*, First Break, Vol. 19, 3 March 2001.
- [88] K. E. Speller, D. Yu, *"A low-noise MEMS accelerometer for Unattended Ground Sensor applications"*, Proc. SPIE, vol. 5417, p. 63, 2004.
- [89] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, T. Goldburt, *"Current Seismic Sensor Issues for Defence and Security Applications"*, Proc. SPIE, vol. 5403, pp. 576 - 581, 2004.
- [90] A. Kollias, *"Application of Piezoelectric Films for the Design of Sensors and Microsystems"*, Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens, July 2004.
- [91] A. Kollias, J. Avaritsiotis, *"A study on the Performance of Bending Mode Piezoelectric Accelerometers"*, Sensors and Actuators Journal - A: Physical, Elsevier, vol. 121, no. 2, pp. 434-442, 2003.
- [92] G. P. Mazarakis, J. N. Avaritsiotis, *"A Prototype Sensor Node for Footstep Detection"*, 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks, Istanbul, Turkey, January 31 – February 2, 2005.
- [93] S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Deng, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, C. Gruenwald, A. Torgerson, R. Han, *"MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms"*, ACM/Kluwer Mobile Networks & Applications (MONET), Special Issue on Wireless Sensor Networks, vol. 10, no. 4, pp. 563-579, August 2005.

- [94] H. Wang, D. Estrin, L. Girod, "*Preprocessing in a Tiered Sensor Network for Habitat Monitoring*", EURASIP JASP special issue of sensor networks, Vol. 2003, No. 4, pp. 392-401, March 15, 2003.
- [95] R. King, W. Gosling, "*Time Encoded Speech*", Electronics Letters, vol. 14, no. 15, pp. 456-457, 1978.
- [96] J. Holbeche, R. Hughes, R. King, "*Time Encoded Speech (TES) Descriptors As A Symbol Feature Set For Voice Recognition Systems*", IEE International Conference On Speech Input/Output; Techniques And Applications, pp. 310-315, London, March 1986
- [97] R. King, "*TESPAR/FANN: An effective new capability for voice verification in the defense environment*", Royal Aeronautical Society Conf. on the Role of Intelligent Systems in Defense, pp. 5.1-5.8, London, March 1995.
- [98] R. King, T. Phipps, "*Shannon, TESPAP and Approximation Strategies*", ICSPAT 98, Vol. 2, pp. 1204-1212. Toronto, Canada, September 1998.
- [99] CASCADE Esprit Project EP8670 Data Sheet, 1995.
- [100] T. Phipps, R. King, "*A Low-power, Low-complexity, Low-cost, TESPAP-based Architecture for the Real-Time Classification of Speech and other Band-limited Signals*", Proc. of the International Conference on Signal Processing Applications and Technology, Dallas, USA, 16 - 19 October 2000.
- [101] L. Joubert et al., "*Speech recognition using TES symbols*", Proc. of the South African Symposium on Communications and Signal Processing, pp. 116-119, 1991.
- [102] T. Clarkson et al., "*Speaker identification for security systems using reinforcement-trained pRAM neural network architectures*", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; PART C: Applications & Reviews, Vol. 31, no. 1, pp. 65-76, Febr. 2001.
- [103] Whee Kian Lee, "*Speech Recognition using TESPAP and Neural Networks*", Thesis, May 2003.

- [104] E. Lupu et al., *"On the speaker verification using the TESPAP coding method"*, IEEE Proceedings of International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Iassy, Romania, 10-11 July 2003, pp.173-176.
- [105] P. Pop et al., *"TESPAR Alphabet Generation Using Standard VQ and Kohonen NN"*, Acta Tehnica Napocensis - Electronics and Telecommunications, Vol. 44, no. 1, pp. 39-42, 2003.
- [106] E. Lupu et al., *"Low Complexity Speaker Recognition System Developed on the DSP TMS320C541 Board"*, SPECOM'2004: 9th Conference "Speech and Computer", Saint-Petersburg, Russia, September 20-22, 2004 ed. by SPIIRAS, ISCA Archive
- [107] E. Lupu et al., *"Low-complexity System for Speaker Recognition"*, Acta Tehnica Napocensis - Electronics and Telecommunications, Vol. 45, no. 1, pp.43-50, 2004.
- [108] J. Licklider, I. Pollack, *"Effects of Differentiation, Integration, and Infinite Peak Clipping Upon the Intelligibility of Speech"*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 20, no. 1, pp. 42-51, Jan. 1948.
- [109] J. Fuhr, M. Haessig, P. Boss, D. Tschudi, R. King, *"Detection and Location of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers"*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, no. 6, pp. 1057-1067, December 1993.
- [110] W. Lucking, M. Darnell, E. Chesmore, *"Acoustical condition monitoring of a mechanical gearbox using artificial neural networks"*, IEEE Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, 1994.
- [111] E. Chesmore, *"Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals"*, Journal of Applied Acoustics, 62, pp. 1359-1374, 2001.
- [112] E. Chesmore, E. Ohya, *"Automated identification of field-recorded songs of four British grasshoppers using bioacoustic signal recognition"*, Bulletin of Entomological Research, 94(4), pp. 319-330, 2004.

- [113] G. Mazarakis, P. Tzevelekos, G. Kouroupetroglou, *“Musical Instrument Recognition and Classification Using Time Encoded Signal Processing and Fast Artificial Neural Networks”*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3955, pp. 246 - 255, Apr 2006.
- [114] G. P. Mazarakis, J. N. Avaritsiotis, *“Vehicle Classification in Sensor Networks Using Time-Domain Signal Processing and Neural Networks”*, Journal of Microprocessors and Microsystems, Special Issue on Sensor Systems, vol. 31, no. 6, pp 381-392, 1 September 2007.
- [115] G. Mazarakis, J. Avaritsiotis, *“Lightweight Time Encoded Signal Processing for Vehicle Recognition in Sensor Networks”*, 2nd Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, PRIME 2006, Otranto, Italy, June 12-15, 2006.
- [116] C. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press, 2000.
- [117] Ι. Βλαχάβας, Π. Κεφαλάς, Ν. Βασιλειάδης, Φ. Κόκκορας, Η. Σακελλαρίου *“Τεχνητή Νοημοσύνη”* - Γ' Έκδοση, ISBN: 960-387-431-0, Εκδόσεις Β.Γκιούρδας Εκδοτική, 2006.
- [118] S. Nissen, *“Implementation of a Fast Artificial Neural Network Library (FANN)”*, Report, Department of Computer Science University of Copenhagen (DIKU), 31 Oct. 2003.
- [119] Fast Artificial Neural Network Library (fann): <http://sourceforge.net/projects/fann/>
- [120] Official TinyOS Project Web Page: www.tinyos.net
- [121] D. Culler, *“TinyOS: Operating System Design for Wireless Sensor Networks”*, Sensors Weekly, www.sensorsmag.com, May 1, 2006.
- [122] D. Gay et al., *“The NesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems”*, Proceedings of the ACM SIGPLAN 2003 Conference on Programming Language Design and implementation, 2003.

- [123] J.L. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, K. Pister, "*System architecture directions for networked sensors*", In Proc. 9th Int'l Conf. Architectural Support Programming Languages and Operating Systems (ASPLOSIX), pages 93–104. ACM Press, New York, November 2000.
- [124] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler, "*Ambient Intelligence, chapter TinyOS: An Operating System for Sensor Networks*", pages 115–148. Springer, Berlin, 2005.
- [125] J. Thorn, "*Deciphering TinyOS Serial Packets*", Octave Tech Brief #5-01, 2005.
- [126] J. Bautel, "*Design and Deployment of Wireless Networked Embedded Systems*", Ph.D Thesis, ETH Zurich, 2005.
- [127] Victor Shnayder, Mark Hempstead, Bor-rong Chen, Geoff Werner Allen, Matt Welsh, "*Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications*", Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, Baltimore, MD, USA, November 03-05, 2004.
- [128] J. Hui, "*Deluge 2.0 - TinyOS Network Programming*", 2005.
- [129] Deluge Web Site:
<http://www.cs.berkeley.edu/~jwhui/research/deluge/index.html>
- [130] D. Hunter, R. Miller, "*Power Management for Mica2 Motes*", SASPLAS 2005, Workshop on Programming Languages and systems, East Tennessee State University, 22 October 2005.
- [131] J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, "*Telos: Enabling ultra-low power wireless research*", Proc. of the 4th Int. Symposium on Information Processing in Sensor networks, IPSN 2005, pp. 364 – 369, 15 April 2005.

7. Παράρτημα

7.1. Λογισμικό Ασύρματου Κόμβου Ανίχνευσης Προσωπικού

Makefile

```
COMPONENT=Step_Detector
PFLAGS=-I../Step_Detector
include ../Makerules
SENSORBOARD = mts510
```

Step.h

```
enum {
    DELAY_SAMPLES=4000,    //Delay Sampling for DELAY_SAMPLES*1/SAMPLING_INT_L seconds (4
in this case)
    BASECOUNT_SAMPLES=DELAY_SAMPLES+4096,
    BASECOUNT_SAMPLES_DEVIDER=12,
    ENERGY_THRESHOLD = 20,
    Load_Settings = 1,
    Load_Class = 2,
    Load_All = 3,
    Return_Class = 4,
    Start_Sampling = 5,
    Stop_Sampling = 6,
    NORMAL = 1,
    REPLY = 2,
    AM_STEP_SEND_MSG = 16,
    AM_STEP_RECEIVE_MSG = 36
};

struct Step_Send_Msg
{
    uint8_t    sourceMoteID;
    uint8_t    Msg_Type;
    uint16_t  N_SAMPLING_INT;
    uint16_t  N_STEP_THRESHOLD;
    uint8_t    N_STEP_THRESHOLD_ADJUST;
    uint8_t    N_ENRG_DECAY_FCTR;
    uint8_t    N_ENRG_MULT_FCTR;
    uint8_t    N_AVRG_DECAY_FCTR;
    uint16_t  N_FALL_TIME;
    uint16_t  N_MIN_STEP_PERIOD;
    uint16_t  N_MAX_STEP_PERIOD;
    uint8_t    N_Step_Det_Result;
};

struct Step_Receive_Msg
{
    uint8_t    action;
    uint16_t  N_SAMPLING_INT;
    uint8_t    N_STEP_THRESHOLD_ADJUST;
    uint8_t    N_ENRG_DECAY_FCTR;
    uint8_t    N_ENRG_MULT_FCTR;
    uint8_t    N_AVRG_DECAY_FCTR;
    uint16_t  N_FALL_TIME;
    uint16_t  N_MIN_STEP_PERIOD;
    uint16_t  N_MAX_STEP_PERIOD;
};
```

Step_Detector.nc

```
includes Step;

configuration Step_Detector { }

implementation
{
  components Main, Step_DetectorM
    , MicroTimerM
    , LedsC
    , Connector_PinsC
    , Accel_PiezoC
    , GenericComm as Comm
    , HPLPowerManagementM
  // , DelugeC
  ;

  Main.StdControl -> Step_DetectorM;
  // Main.StdControl -> DelugeC;
  Step_DetectorM.MicroTimer -> MicroTimerM;
  Step_DetectorM.Leds -> LedsC;
  Step_DetectorM.PowerManagement -> HPLPowerManagementM;
  Step_DetectorM.Connector_Pins -> Connector_PinsC;
  Step_DetectorM.Accel_PiezoControl -> Accel_PiezoC;
  Step_DetectorM.Accel_PiezoADC -> Accel_PiezoC;
  Step_DetectorM.CommControl -> Comm;
  Step_DetectorM.ReceiveCmdMsg -> Comm.ReceiveMsg[AM_STEP_RECEIVE_MSG];
  Step_DetectorM.DataMsg -> Comm.SendMsg[AM_STEP_SEND_MSG];
}

```

Step_DetectorM.nc

```
includes sensorboard;
includes Step;

/**
 *
 */

module Step_DetectorM
{
  provides
  {
    interface StdControl;
  }

  uses {
    interface MicroTimer;
    interface Leds;
    interface Connector_Pins;
    interface PowerManagement;

    // Piezoelectric Accelerometer
    interface StdControl as Accel_PiezoControl;
    interface ADC as Accel_PiezoADC;

    interface StdControl as CommControl;
    interface SendMsg as DataMsg;
    interface ReceiveMsg as ReceiveCmdMsg;
  }
}

implementation
{
  // uint8_t packetReadingNumber;
  // uint16_t readingNumber;
  // uint16_t PacketNumber_counter;
  TOS_Msg msg[2];
  uint8_t currentMsg,Msg_Type_tmp,action_tmp;

  //Reprogrammable Variables via Radio
  uint16_t SAMPLING_INT,MAX_STEP_PERIOD,FALL_TIME,MIN_STEP_PERIOD;
  uint8_t ENRG_DECAY_FCTR,ENRG_MULT_FCTR,AVRG_DECAY_FCTR;
  uint8_t STEP_THRESHOLD_ADJUST;
}

```

```

// Envelope threshold variables

uint16_t    decayingAverage; // the higher byte contains the average
uint16_t    decayingEnergy;  // the same decay, 255/256
uint16_t    Step_Threshold;

// Sapmling Frequency regulation variables
uint8_t     Freq_H_flag, Freq_L_flag;

//Step_Detection Variables
uint8_t     cont_count, trig_state, Step_Det_Result;
uint16_t    count;

/**
 * Used to initialize this component.
 */
command result_t StdControl.init() {
    call Leds.init();
    call Connector_Pins.init(); // Used to make some mcontroller pins as outputs

    call Accel_PiezoControl.init();

    call CommControl.init();

    atomic {
        currentMsg = 0;
    }

//Variables initialization

    atomic {

//Reprogrammable Variables Initialization
        SAMPLING_INT = 1000; //sampling at 1000 Hz
        STEP_THRESHOLD_ADJUST = 6;
        ENRG_DECAY_FCTR = 6;
        ENRG_DECAY_FCTR = 6;
        ENRG_MULT_FCTR = 6;
        AVRG_DECAY_FCTR = 6;
        FALL_TIME = 300;
        MIN_STEP_PERIOD = 334;
        MAX_STEP_PERIOD = 1000;
    }

//Everything initialized, Turn off Leds and start application
    call Leds.yellowOff(); call Leds.redOff(); call Leds.greenOff();

    dbg(DBG_BOOT, "Application initialized\n");
    return SUCCESS;
}

/**
 * Starts the SensorControl and CommControl components.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
command result_t StdControl.start() {

    call Accel_PiezoControl.start();
//    call CommControl.start();
    call PowerManagement.enable();
    call MicroTimer.start(SAMPLING_INT); //    Give time in microseconds for High
Frequency sampling

    return SUCCESS;
}

/**
 * Stops the SensorControl and CommControl components.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
command result_t StdControl.stop() {
    call Accel_PiezoControl.stop();
    call MicroTimer.stop();
    call CommControl.stop();
}

```

```

    return SUCCESS;
}

task void dataTask() {
    struct Step_Send_Msg *pack;
    atomic {
        pack = (struct Step_Send_Msg *)msg[currentMsg].data;
    }

    /* Try to send the packet. Note that this will return
     * failure immediately if the packet could not be queued for
     * transmission.
     */
    if (call DataMsg.send(TOS_BCAST_ADDR, sizeof(struct Step_Send_Msg),
        &msg[currentMsg]))
    {
        atomic {
            currentMsg ^= 0x1;
        }
        // ++PacketNumber_counter;
    }
    call Leds.yellowToggle();
    dbg(DBG_USR1, "Packet_Sent\n");
}

void Send_Step_packet()
{
    struct Step_Send_Msg *pack;
    pack = (struct Step_Send_Msg *)msg[currentMsg].data;

    atomic
    {
        pack->sourceMoteID = TOS_LOCAL_ADDRESS;
        pack->Msg_Type = Msg_Type_tmp;
        pack->N_SAMPLING_INT = SAMPLING_INT;
        pack->N_STEP_THRESHOLD = Step_Threshold;
        pack->N_STEP_THRESHOLD_ADJUST = STEP_THRESHOLD_ADJUST;
        pack->N_ENRG_DECAY_FCTR = ENRG_DECAY_FCTR;
        pack->N_ENRG_MULT_FCTR = ENRG_MULT_FCTR;
        pack->N_AVRG_DECAY_FCTR = AVRG_DECAY_FCTR;
        pack->N_FALL_TIME = FALL_TIME;
        pack->N_MIN_STEP_PERIOD = MIN_STEP_PERIOD;
        pack->N_MAX_STEP_PERIOD = MAX_STEP_PERIOD;
        pack->N_Step_Det_Result = Step_Det_Result;

        if (Msg_Type_tmp == REPLY)
        {
        }
    }

    dbg(DBG_USR1, "Preparing_to_send\n");

    post dataTask();

    Step_Det_Result = 0;
}

/**
 * Signalled when data is ready from the ADC. Stuffs the sensor
 * reading into the current packet, and sends off the packet when
 * BUFFER_SIZE readings have been taken.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
async event result_t Accel_PiezoADC.dataReady(uint16_t data)
{
    uint16_t    sample, average, energy, sign;

    //TOSH_SET_INT1_PIN();

    //2. Envelope threshold using 10 bit accuracy of the AD Value
    atomic

```



```

{
    sample = data;

    // calculate the decayed average
    average = decayingAverage >> AVRГ_DECAY_FCTR; // very fast: 0 or 1 CPU cycle
    decayingAverage -= average;
    decayingAverage += sample;

    // the new sign
    sign = sample >= average;

    // compute the amplitude
    if( sign )
        sample -= average;
    else
        sample = average - sample;

    // calculate the decayed energy
    energy = decayingEnergy >> ENRG_DECAY_FCTR; // very fast: 0 or 1 CPU cycle
    decayingEnergy -= energy;
    decayingEnergy += sample;

    Step_Threshold = (energy*ENRG_MULT_FCTR) + average + STEP_THRESHOLD_ADJUST;
}
//End of Envelope threshold

//3. Detection algorithm!

atomic
{
    //first detection, trigger state becomes 1
    if (trig_state == 0 && data >= Step_Threshold)
    {
        if (count == 0 )
        {
            trig_state = 1;
            count = 0;
            cont_count = 1;
            call Leds.redOn();
        }
    }

    if (trig_state == 0 && count > MAX_STEP_PERIOD)
    {
        trig_state = 0;
        cont_count = 0;
        count = 0;
        call Leds.redOff();
    }

    //second detection, trigger state becomes 2
    if (trig_state == 1 && count>=MIN_STEP_PERIOD && count<=MAX_STEP_PERIOD)
    {
        if (data >= Step_Threshold)
        {
            trig_state = 2;
            count = 0;
            cont_count = 1;
            call Leds.redOn();
        }
    }

    if (trig_state == 1 && count > MAX_STEP_PERIOD)
    {
        trig_state = 0;
        cont_count = 0;
        count = 0;
        call Leds.redOff();
    }

    if (trig_state == 1 && (count>FALL_TIME && count<MIN_STEP_PERIOD) && (data >=
Step_Threshold))
    {
        trig_state = 0;
        cont_count = 0;
    }
}

```

```

        count = 0;
        call Leds.redOff();
    }

    //third detection, trigger state becomes 3
    if (trig_state == 2 && count>=MIN_STEP_PERIOD && count<=MAX_STEP_PERIOD)
    {
        if (data >= Step_Threshold)
        {
            trig_state = 3;
            count = 0;
            cont_count = 1;
            call Leds.redOn();
            call CommControl.start();
        }
    }

    if (trig_state == 2 && count > MAX_STEP_PERIOD)
    {
        trig_state = 0;
        cont_count = 0;
        count = 0;
        call Leds.redOff();
    }

    if (trig_state == 2 && (count>FALL_TIME && count<MIN_STEP_PERIOD) && (data >=
Step_Threshold))
    {
        trig_state = 0;
        cont_count = 0;
        count = 0;
        call Leds.redOff();
    }

    // reset counter if it nothing happens for MAX_STEP_PERIOD samples
    if (count > MAX_STEP_PERIOD)
    {
        count = 0;
        cont_count = 0;
    }

    // after 3 detections, perhaps we have a man walking...so turn on a led. Code on the
main program

    if (cont_count == 1)
        count = count+1;
    else
        count = 0;
    // End of Step_Detection
}

//4. Result Sender
// Sends the packet only after RESULT_DELAY samples of non activity have passed
// During non activity time, sampling should be done with SAMPLING_INT_H and after
packet is sent sampling
// is restarted with SAMPLING_INT_L

//NOTE: Perhaps RESULT_DELAY is not required or the value should be low is the energy
threshold decays slowly

atomic
{
    if (trig_state == 3)
    {
        call MicroTimer.stop();
        trig_state = 0;

        call Leds.redOff();

        Step_Det_Result = 1;
        Msg_Type_tmp = NORMAL;
    }
}

```

```

        Send_Step_packet(); // Send Step Message every time you return from a high
Threshold
    }
}
//End of Result Sender

TOSH_CLR_INT1_PIN();

return SUCCESS;
}

/**
 * Signalled when the previous packet has been sent.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
event result_t DataMsg.sendDone(TOS_MsgPtr sent, result_t success)
{
    call CommControl.stop();
    call MicroTimer.start(SAMPLING_INT);
    return SUCCESS;
}

/**
 * Signalled when the clock ticks.
 * @return The result of calling ADC.getData().
 */
async event result_t MicroTimer.fired() {

TOSH_SET_INT1_PIN();
return call Accel_PiezoADC.getData();

}

/**
 * Called upon message reception and invokes the ProcessCmd.execute()
 * command.
 * @return Returns a pointer to a TOS_Msg buffer
 */
event TOS_MsgPtr ReceiveCmdMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg) {
struct Step_Receive_Msg * cmd = (struct Step_Receive_Msg *) pmsg->data;

call MicroTimer.stop();

call Leds.greenToggle();
call Leds.yellowToggle();
call Leds.redToggle();

//Save the command
action_tmp = cmd->action;

// Execute the command
switch (cmd->action)
{
    case Load_Settings:
        atomic
        {
            SAMPLING_INT          = cmd->N_SAMPLING_INT;
            STEP_THRESHOLD_ADJUST = cmd->N_STEP_THRESHOLD_ADJUST;
            ENRG_DECAY_FCTR       = cmd->N_ENRG_DECAY_FCTR;
            ENRG_MULT_FCTR        = cmd->N_ENRG_MULT_FCTR;
            AVRG_DECAY_FCTR       = cmd->N_AVRG_DECAY_FCTR;
            FALL_TIME             = cmd->N_FALL_TIME;
            MIN_STEP_PERIOD       = cmd->N_MIN_STEP_PERIOD;
            MAX_STEP_PERIOD       = cmd->N_MAX_STEP_PERIOD;

            call Leds.greenToggle();
            call Leds.yellowToggle();
        }
        break;

    case Load_Class:

        break;

    case Load_All:

```

```

        break;

        case Return_Class:
            break;

        case Start_Sampling:
            break;

        case Stop_Sampling:
            break;
    }

    // Send Reply packet with the new data received
    atomic
    {
        Msg_Type_tmp = REPLY;
        Send_Step_packet();
    }

    return pmsg;
}
}

```

HPLADCM.nc

Παρέχεται μόνο το σημείο του κώδικα που αλλάχθηκε:

```

async command result_t ADC.init() {
    init_portmap();

    // Enable ADC Interupts,
    // Set Prescaler division factor to 64
    atomic {
        outp((1 << ADIE) | (1 << ADPS0),ADCSR);

        outp(0,ADMUX);
    }
    return SUCCESS;
}

/**
 * Sets the sampling rate of the ADC.
 * These are the lower three bits in the ADCSR register of the
 * microprocessor.
 *
 * The <code>rate</code> parameter may use the following macros or
 * its own value from the description below.
 * <p>
 * <pre>
 * TOS_ADCSample3750ns = 0
 * TOS_ADCSample7500ns = 1
 * TOS_ADCSample15us = 2
 * TOS_ADCSample30us = 3
 * TOS_ADCSample60us = 4
 * TOS_ADCSample120us = 5
 * TOS_ADCSample240us = 6
 * TOS_ADCSample480us = 7
 * </pre>
 *
 * @param rate 2^rate is the prescaler factor to the ADC.
 * The rate of the ADC is the crystal frequency times the prescaler,
 * or XTAL * 2^rate = 32kHz * 2^rate.
 *
 * @return SUCCESS if successful
 */

```

Accel PiezoC.nc

```
includes sensorboard;
configuration Accel_PiezoC
{
  provides interface ADC as Accel_Piezo;
  provides interface StdControl;
}
implementation
{
  components Accel_PiezoM, ADCC;

  StdControl = Accel_PiezoM;
  Accel_Piezo = ADCC.ADC[TOSH_ADC_PIEZO_ACCEL_PORT];
  Accel_PiezoM.ADCCControl -> ADCC;
}
```

Accel PiezoM.nc

```
includes sensorboard;
module Accel_PiezoM
{
  provides interface StdControl;
  uses
  {
    interface ADCCControl;
  }
}
implementation
{
  command result_t StdControl.init()
  {
    call ADCCControl.bindPort(TOSH_ADC_PIEZO_ACCEL_PORT, TOSH_ACTUAL_PIEZO_ACCEL_PORT);
    dbg(DBG_BOOT, "PIEZO ACCEL initialized.\n");
    return call ADCCControl.init();
  }
  command result_t StdControl.start()
  {
    // TOSH_SET_ACCEL_CTL_PIN();
    return SUCCESS;
  }

  command result_t StdControl.stop()
  {
    // TOSH_CLR_ACCEL_CTL_PIN();
    return SUCCESS;
  }
}
```

Access Connector Pins.h

```
//Make PB4, PB5, PB6 outputs
// LED assignments
TOSH_ASSIGN_PIN(OUTPUT1, B, 4);
TOSH_ASSIGN_PIN(OUTPUT2, B, 5);
TOSH_ASSIGN_PIN(OUTPUT3, B, 6);
```

Connector Pins.nc

```
interface Connector_Pins
{
  async command result_t init();
  async command result_t Output1On();
  async command result_t Output1Off();
  async command result_t Output2On();
  async command result_t Output2Off();
  async command result_t Output3On();
  async command result_t Output3Off();
}
```

Connector PinsC.nc

//Useful code to make pins 23(PB4), 24(PB5), 49(PB6) of connector as output and toggle them as needed

```
//  
//
```

```
includes Access_Connector_Pins;
```

```
module Connector_PinsC {  
  provides interface Connector_Pins;  
}  
implementation  
{  
  
  async command result_t Connector_Pins.init() {  
    atomic {  
      dbg(DBG_BOOT, "Output Connector Pins: initialized.\n");  
      TOSH_MAKE_OUTPUT1_OUTPUT();  
      TOSH_MAKE_OUTPUT2_OUTPUT();  
      TOSH_MAKE_OUTPUT3_OUTPUT();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
  
  async command result_t Connector_Pins.Output1On() {  
    dbg(DBG_CON_OUTPUT, "OUTPUT: Output 1 on.\n");  
    atomic {  
      TOSH_SET_OUTPUT1_PIN();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
  
  async command result_t Connector_Pins.Output1Off() {  
    dbg(DBG_CON_OUTPUT, "OUTPUT: Output 1 off.\n");  
    atomic {  
      TOSH_CLR_OUTPUT1_PIN();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
  
  async command result_t Connector_Pins.Output2On() {  
    dbg(DBG_CON_OUTPUT, "OUTPUT: Output 2 on.\n");  
    atomic {  
      TOSH_SET_OUTPUT2_PIN();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
  
  async command result_t Connector_Pins.Output2Off() {  
    dbg(DBG_CON_OUTPUT, "OUTPUT: Output 2 off.\n");  
    atomic {  
      TOSH_CLR_OUTPUT2_PIN();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
  
  async command result_t Connector_Pins.Output3On() {  
    dbg(DBG_CON_OUTPUT, "OUTPUT: Output 3 on.\n");  
    atomic {  
      TOSH_SET_OUTPUT3_PIN();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
  
  async command result_t Connector_Pins.Output3Off() {  
    dbg(DBG_CON_OUTPUT, "OUTPUT: Output 3 off.\n");  
    atomic {  
      TOSH_CLR_OUTPUT3_PIN();  
    }  
    return SUCCESS;  
  }  
}
```

7.2. Λογισμικό Ασύρματου Κόμβου Αναγνώρισης Οχήματος

Makefile

```
COMPONENT=MicTespAr
PFLAGS=-I../MicTespAr
include ../Makerules
#Change default DTOSH_DATA_LENGTH
CFLAGS += -DTOSH_DATA_LENGTH=100
```

TespAr.h

```
//#include "TespAr_Al_99_alphabet.h"
#include "TespAr_Custom_alphabet.h"

enum {
    CLASS_SIZE = 4,
    DELAY_SAMPLES=4000,    //Delay Sampling for DELAY_SAMPLES*1/SAMPLING_INT_L seconds (4
in this case)
    BASECOUNT_SAMPLES=DELAY_SAMPLES+4096,
    BASECOUNT_SAMPLES_DEVIDER=12,
    //TESPAR_THRESHOLD = 7,

//Envelope Threshold Variables
    AVRG_DECAY_FCTR = 8,
    Load_Settings = 1,
    Load_Class = 2,
    Load_All = 3,
    Return_Class = 4,
    Start_Sampling = 5,
    Stop_Sampling = 6,
    NORMAL = 1,
    REPLY = 2,
    AM_TESPAR_SEND_MSG = 15,
    AM_TESPAR_RECEIVE_MSG = 35
};

//Define Class Matrix to store the corresponding S Matrix from each class
uint16_t Class_Matrix[CLASS_SIZE][ALPHABET_SIZE];

struct Tespar_Send_Msg
{
    uint8_t    sourceMoteID;
    uint8_t    Msg_Type;
    uint8_t    Class;
    uint16_t   data[ALPHABET_SIZE];
};

struct Tespar_Receive_Msg
{
    uint8_t    action;
    uint8_t    N_MIC_GAIN;
    uint16_t   N_SAMPLING_INT_L;
    uint16_t   N_SAMPLING_INT_H;
    uint16_t   N_RESULT_DELAY;
    uint8_t    N_ENERGY_THRESHOLD;
    uint8_t    N_ENRG_DECAY_FCTR;
    uint8_t    N_TESPAR_THRESHOLD;
    uint8_t    Class_Position;
    uint16_t   data[ALPHABET_SIZE];
};
```

Tespar Custom alphabet.h

```
//Standard Tespar Alphabet -----  
  
enum {  
    ALPHABET_SIZE = 40,  
    MAX_D=40,  
    MAX_S=6,  
};  
  
uint8_t alphabet[MAX_D][MAX_S]=  
{  
    {1,1,1,1,1,1},  
    {2,2,2,2,2,2},  
    {3,3,3,3,3,3},  
    {4,5,5,5,5,5},  
    {6,7,7,7,7,7},  
    {8,9,9,9,9,9},  
    {10,11,11,11,11,11},  
    {12,13,13,13,13,13},  
    {14,15,15,15,15,15},  
    {14,15,15,15,15,15},  
    {16,17,18,18,18,18},  
    {16,17,18,18,18,18},  
    {19,20,21,21,21,21},  
    {19,20,21,21,21,21},  
    {22,22,23,23,23,23},  
    {22,22,23,23,23,23},  
    {22,22,23,23,23,23},  
    {24,24,25,25,26,26},  
    {24,24,25,25,26,26},  
    {24,24,25,25,26,26},  
    {24,24,25,25,26,26},  
    {27,27,28,28,29,29},  
    {27,27,28,28,29,29},  
    {27,27,28,28,29,29},  
    {27,27,28,28,29,29},  
    {27,27,28,28,29,29},  
    {27,27,28,28,29,29},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {30,30,31,31,32,33},  
    {34,34,35,35,36,36},  
    {34,34,35,35,36,36},  
    {34,34,35,35,36,36},  
    {34,34,35,35,36,36},  
    {34,34,35,35,36,36},  
    {34,34,35,35,36,36},  
    {34,34,35,35,36,36}  
};
```


Mic Tespar.nc

```
includes Tespar;

configuration MicTespar { }

implementation
{
  components Main, MicTesparM
    , MicroTimerM
    , LedsC
    , Connector_PinsC
    , MicC
    , GenericComm as Comm
    , DelugeC;

  Main.StdControl -> MicTesparM;
  Main.StdControl -> DelugeC;

  MicTesparM.MicroTimer -> MicroTimerM;
  MicTesparM.Leds -> LedsC;

  MicTesparM.Connector_Pins -> Connector_PinsC;

  //Configure MicTespar to use Microphone as sensor
  MicTesparM.MicControl -> MicC;
  MicTesparM.Mic -> MicC;
  MicTesparM.MicADC ->MicC;

  MicTesparM.CommControl -> Comm;
  MicTesparM.ReceiveCmdMsg -> Comm.ReceiveMsg[AM_TESPAR_RECEIVE_MSG];
  MicTesparM.DataMsg -> Comm.SendMsg[AM_TESPAR_SEND_MSG];
}
```

Mic TesparM.nc

```
includes sensorboard;
includes Tespar;

/**
 *
 *
 */

module MicTesparM
{
    provides
    {
        interface StdControl;
    }

    uses {
        interface MicroTimer;
        interface Leds;
        interface Connector_Pins;
    }

    // Mic
    interface StdControl as MicControl;
    interface Mic;
    interface ADC as MicADC;

    interface StdControl as CommControl;
    interface SendMsg as DataMsg;
    interface ReceiveMsg as ReceiveCmdMsg;
}

implementation
{
    // uint8_t    packetReadingNumber;
    // uint16_t   readingNumber;
    // uint16_t   PacketNumber_counter;
    TOS_Msg     msg[2];
    uint8_t     currentMsg,Msg_Type_tmp,Class_Position_tmp,action_tmp;

    //Tespar Variables -----
    uint8_t
Result_D,Result_S,Symb,Epoch,BSLN_RDY_FLG,STRT_TESPAR_FLG,temp_u8,Clear_to_Send;
    uint16_t    Temp1[]={1,2};
    uint16_t
baseline,P_Threshold,N_Threshold,Amp,BaseCount,D_Count,S_Count,T_Msg_Count,Res_Delay;
    uint32_t    Sum;
    int16_t    dn1,s1;
    uint8_t     nn=1;
    uint8_t     pp=1;
    uint8_t     Max_D=MAX_D;        //Provide Maximum D and Maximum S according to alphabet
    uint8_t     Max_S=MAX_S;
    uint16_t    S[ALPHABET_SIZE]; //S Matrix has the size of the alphabet

    //Reprogrammable Variables via Radio
    uint16_t    SAMPLING_INT_H,SAMPLING_INT_L,RESULT_DELAY;
    uint8_t     MIC_GAIN,ENERGY_THRESHOLD,ENRG_DECAY_FCTR,TESPAR_THRESHOLD;

    // Envelope Threshold variables

    uint16_t    decayingAverage; // the higher byte contains the average
    uint16_t    decayingEnergy;  // the same decay, 255/256

    // Sapmling Frequency regulation variables
    uint8_t     Freq_H_flag,Freq_L_flag;

    /**
     * Used to initialize this component.
     */
    command result_t StdControl.init() {
        call Leds.init();
        call Connector_Pins.init(); // Used to make some mcontroller pins as outputs
    }

    //Configure Microphone gain and channel
}
```

```

call MicControl.init();
call Mic.muxSel(1); // Set the mux so that raw microhpone output is selected
call Mic.gainAdjust(MIC_GAIN); // Set the gain of the microphone.

call CommControl.init();

atomic {
    currentMsg = 0;
    packetReadingNumber = 0;
    // readingNumber = 0;
    // PacketNumber_counter = 0;
}

//Variables initialization

atomic {
    BSLN_RDY_FLG = 0;
    STRT_TESPAR_FLG = 0;
    BaseCount = 0;
    Sum = 0;
}

//Reprogrammable Variables Initialization
MIC_GAIN = 110;
SAMPLING_INT_L = 1000; //initial low sampling at 1000 Hz
SAMPLING_INT_H = 125; //initial sampling at 8kHz
ENERGY_THRESHOLD = 5;
ENRG_DECAY_FCTR = 6;
TESPAR_THRESHOLD = 4;

if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 1)
    RESULT_DELAY = 22000;
if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 2)
    RESULT_DELAY = 24000;
if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 3)
    RESULT_DELAY = 26000;
}

//Everything initialized, Turn off Leds and start application
call Leds.yellowOff(); call Leds.redOff(); call Leds.greenOff();

dbg(DBG_BOOT, "Application initialized\n");
return SUCCESS;
}

/**
 * Starts the SensorControl and CommControl components.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
command result_t StdControl.start() {

    call MicControl.start();
    call CommControl.start();
    call MicroTimer.start(SAMPLING_INT_L); // Give time in microseconds for High
Frequency sampling

    return SUCCESS;
}

/**
 * Stops the SensorControl and CommControl components.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
command result_t StdControl.stop() {
    call MicControl.stop();
    call MicroTimer.stop();
    call CommControl.stop();
    return SUCCESS;
}

// This task initializes all Tespar Variables

void Tespar_init()
{
    atomic

```

```

    {
        D_Count=0;
        S_Count=0;
        Res_Delay=0;
        Clear_to_Send=0;
        Result_D=0;
        Result_S=0;
        Symb=0;

        for (temp_u8=0; temp_u8 <= ALPHABET_SIZE-1; temp_u8++)
        {
            S[temp_u8]=0;
        }
    }
}

task void dataTask() {
    struct Tespar_Send_Msg *pack;
    atomic {
        pack = (struct Tespar_Send_Msg *)msg[currentMsg].data;
    }

    /* Try to send the packet. Note that this will return
     * failure immediately if the packet could not be queued for
     * transmission.
     */
    if (call DataMsg.send(TOS_BCAST_ADDR, sizeof(struct Tespar_Send_Msg),
        &msg[currentMsg]))
    {
        atomic {
            currentMsg ^= 0x1;
        }
        // ++PacketNumber_counter;
    }
    call Leds.yellowToggle();
    dbg(DBG_USR1, "Packet_Sent\n");
}

void Send_Tespar_packet()
{
    struct Tespar_Send_Msg *pack;
    pack = (struct Tespar_Send_Msg *)msg[currentMsg].data;

    call Connector_Pins.Output2On();

    atomic
    {
        pack->sourceMoteID = TOS_LOCAL_ADDRESS;
        pack->Msg_Type = Msg_Type_tmp;
        pack->Class = Class_Position_tmp;

        /*
        pack->PacketNumber = PacketNumber_counter;
        pack->Bslime = baseline;
        pack->N_MIC_GAIN = MIC_GAIN;
        pack->N_SAMPLING_INT_L = SAMPLING_INT_L;
        pack->N_SAMPLING_INT_H = SAMPLING_INT_H;
        pack->N_RESULT_DELAY = RESULT_DELAY;
        pack->N_ENERGY_THRESHOLD = ENERGY_THRESHOLD;
        pack->N_ENRG_DECAY_FCTR = ENRG_DECAY_FCTR;
        pack->N_TESPAR_THRESHOLD = TESPAR_THRESHOLD;
        */

        for (temp_u8=0; temp_u8 <= ALPHABET_SIZE-1; temp_u8++)
        {
            pack->data[temp_u8] = S[temp_u8];
            S[temp_u8]=0;
        }

        if (Msg_Type_tmp == REPLY)
        {
            pack->data[1] = baseline;
            pack->data[2] = MIC_GAIN;
            pack->data[3] = SAMPLING_INT_L;

```

```

pack->data[4] = SAMPLING_INT_H;
pack->data[5] = RESULT_DELAY;
pack->data[6] = ENERGY_THRESHOLD;
pack->data[7] = ENRG_DECAY_FCTR;
pack->data[8] = TESPAN_THRESHOLD;
}

}

dbg(DBG_USR1, "Preparing_to_send\n");

call Connector_Pins.Output3On();
post dataTask();
}

/**
 * Signalled when data is ready from the ADC. Stuffs the sensor
 * reading into the current packet, and sends off the packet when
 * BUFFER_SIZE readings have been taken.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
async event result_t MicADC.dataReady(uint16_t data)
{
uint8_t sample, average, energy, sign;

call Connector_Pins.Output1Off();

//1. Get Baseline from the first BASECOUNT_SAMPLES measurements and configure thresholds

atomic
{
    if (BSLN_RDY_FLG == 0)
    {
        ++BaseCount;

        //Delay Baseline Sampling for < 4sec (DELAY_SAMPLES*1/SAMPLING_INT_H) to initialize
        microphone

        if ((BaseCount >= DELAY_SAMPLES) && (BaseCount < BASECOUNT_SAMPLES))
        {
            Sum = Sum + data;

            //Turn on Red Led while getting baseline
            call Leds.redOn();

            dbg(DBG_USR1, "Taking baseline %i\n",BaseCount);
        }

        if (BaseCount == BASECOUNT_SAMPLES)
        {
            baseline = Sum>>BASECOUNT_SAMPLES_DEVIDER;

            P_Threshold=baseline+TESPAR_THRESHOLD;
            N_Threshold=baseline-TESPAR_THRESHOLD;
            Amp=baseline;
            ++BaseCount;

            BSLN_RDY_FLG=1;
            BaseCount = 0;
            Sum = 0;

            //          call MicroTimer.stop();
            //          call MicroTimer.start(SAMPLING_INT_L); //    50/1024 s Sampling Rate

            //Turn off Red Led when baseline is ready
            call Leds.redOff();

            dbg(DBG_USR1, "Baseline Ready %i\n",BaseCount);
        }
    }
}

```

```

    }
}
//End of Baseline Calculation

//call Connector_Pins.Output2On();
//call Leds.greenOff();
//2. Envelope Threshold
atomic
{
    sample = data >> 2;

    // calculate the decayed average
    average = decayingAverage >> AVRG_DECAY_FCTR; // very fast: 0 or 1 CPU cycle
    decayingAverage -= average;
    decayingAverage += sample;

    // the new sign
    sign = sample >= average;

    // compute the amplitude
    if( sign )
        sample -= average;
    else
        sample = average - sample;

    // calculate the decayed energy
    energy = decayingEnergy >> ENRG_DECAY_FCTR; // very fast: 0 or 1 CPU cycle
    decayingEnergy -= energy;
    decayingEnergy += sample;

    if (energy >= ENERGY_THRESHOLD)
    {
        call Leds.redOn();

        STRT_TESPAR_FLG = 1;

        Freq_L_flag = 0;

        // High frequency sampling if baseline is ready and energy above threshold

        if (Freq_H_flag == 0 && BSLN_RDY_FLG==1)
        {
            call MicroTimer.stop();
            call MicroTimer.start(SAMPLING_INT_H); // 50/1024 s Sampling Rate
            Freq_H_flag = 1;
        }

        // if (energy >= (ENERGY_THRESHOLD>>1))
        // {
        //     call Leds.redOn();
        //     STRT_TESPAR_FLG = 1;
        // }
        else
        {
            call Leds.redOff();
            call Leds.yellowOff();

            STRT_TESPAR_FLG = 0;

            Freq_H_flag = 0;

            //Note 1: Sampling Frequency will be changed to Low only after succesful packet sending

            if (Freq_L_flag == 0 && Clear_to_Send == 0)
            {
                call MicroTimer.stop();
                call MicroTimer.start(SAMPLING_INT_L); // 50/1024 s Sampling Rate
                Freq_L_flag = 1;
            }
        }
    }
}
//End of Vanderbilt Dyn Threshold
//call Leds.greenOn();
//call Connector_Pins.Output2Off();

```

```

//call Connector_Pins.Output3On();
//3. Tespar Coder

    atomic
    {
        if (BSLN_RDY_FLG==1 && STRT_TESPAR_FLG==1)
        {

            //Tespar Encoder, S-Matrix Creation -----
            ...
            ...
            ...
            ...
        }
    }
//End of Tespar Coder
//call Connector_Pins.Output3Off();

//4. Result Sender
// Sends the packet only after RESULT_DELAY samples of non activity have passed
// During non activity time, sampling should be done with SAMPLING_INT_H and after
packet is sent sampling
// is restarted with SAMPLING_INT_L

//NOTE: Perhaps RESULT_DELAY is not required or the value should be low is the energy
threshold decays slowly

    atomic
    {
        if (Clear_to_Send==1)
        {
            ++Res_Delay;
        }

        if (Res_Delay > RESULT_DELAY)
        {
            call MicroTimer.stop();
            Res_Delay=0;
            Clear_to_Send=0;
            Msg_Type_tmp = NORMAL;

            Class_Position_tmp = 100; //Change this in normal operation

            Send_Tespar_packet(); // Send Tespar Message every time you return from a high
Threshold
        }
    }
//End of Result Sender

//call Leds.greenOff();

return SUCCESS;
}

/**
 * Signalled when the previous packet has been sent.
 * @return Always returns SUCCESS.
 */
event result_t DataMsg.sendDone(TOS_MsgPtr sent, result_t success) {

call Connector_Pins.Output3Off();
call Connector_Pins.Output2Off();
call MicroTimer.start(SAMPLING_INT_L);
return SUCCESS;
}

/**
 * Signalled when the clock ticks.
 * @return The result of calling ADC.getData().
 */
async event result_t MicroTimer.fired() {

//call Leds.greenToggle();

```

```

call Connector_Pins.Output1On();
return call MicADC.getData();

}

/**
 * Called upon message reception and invokes the ProcessCmd.execute()
 * command.
 * @return Returns a pointer to a TOS_Msg buffer
 */
event TOS_MsgPtr ReceiveCmdMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg){
struct Tespar_Receive_Msg * cmd = (struct Tespar_Receive_Msg *) pmsg->data;

call MicroTimer.stop();

call Leds.greenToggle();
call Leds.yellowToggle();
call Leds.redToggle();

//Save the command
action_tmp = cmd->action;

// Execute the command
switch (cmd->action)
{
case Load_Settings:
atomic
{
MIC_GAIN = cmd->N_MIC_GAIN;
SAMPLING_INT_L = cmd->N_SAMPLING_INT_L;
SAMPLING_INT_H = cmd->N_SAMPLING_INT_H;
ENERGY_THRESHOLD = cmd->N_ENERGY_THRESHOLD;
ENRG_DECAY_FCTR = cmd->N_ENRG_DECAY_FCTR;
TESPAR_THRESHOLD = cmd->N_TESPAR_THRESHOLD;

//Reset Microphone Gain and get Baseline
call Mic.gainAdjust(MIC_GAIN); // Set the gain of the microphone.
BSLN_RDY_FLG = 0;

if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 1)
RESULT_DELAY = cmd->N_RESULT_DELAY+2000;
if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 2)
RESULT_DELAY = cmd->N_RESULT_DELAY+4000;
if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 3)
RESULT_DELAY = cmd->N_RESULT_DELAY+6000;

call Leds.greenToggle();
call Leds.yellowToggle();
}
break;

case Load_Class:
atomic
{
for (temp_u8=0; temp_u8 <= ALPHABET_SIZE-1; temp_u8++)
{
Class_Matrix[cmd->Class_Position][temp_u8] = cmd->data[temp_u8];
}
call Leds.yellowToggle();
call Leds.redToggle();
}
break;

case Load_All:
atomic
{
MIC_GAIN = cmd->N_MIC_GAIN;
SAMPLING_INT_L = cmd->N_SAMPLING_INT_L;
SAMPLING_INT_H = cmd->N_SAMPLING_INT_H;
ENERGY_THRESHOLD = cmd->N_ENERGY_THRESHOLD;
ENRG_DECAY_FCTR = cmd->N_ENRG_DECAY_FCTR;
TESPAR_THRESHOLD = cmd->N_TESPAR_THRESHOLD;

//Reset Microphone Gain and get Baseline
call Mic.gainAdjust(MIC_GAIN); // Set the gain of the microphone.

```



```

        BSLN_RDY_FLG = 0;

    if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 1)
        RESULT_DELAY = cmd->N_RESULT_DELAY+2000;
    if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 2)
        RESULT_DELAY = cmd->N_RESULT_DELAY+4000;
    if (TOS_LOCAL_ADDRESS == 3)
        RESULT_DELAY = cmd->N_RESULT_DELAY+6000;

    for (temp_u8=0; temp_u8 <= ALPHABET_SIZE-1; temp_u8++)
    {
        Class_Matrix[cmd->Class_Position][temp_u8] = cmd->data[temp_u8];
    }
    call Leds.redToggle();
    call Leds.greenToggle();
}
break;

case Return_Class:
atomic
{
    Class_Position_tmp = cmd->Class_Position;

    for (temp_u8=0; temp_u8 <= ALPHABET_SIZE-1; temp_u8++)
    {
        S[temp_u8] = Class_Matrix[Class_Position_tmp][temp_u8];
    }

}

break;

case Start_Sampling:

break;

case Stop_Sampling:

break;
}

// Send Reply packet with the new data received
atomic
{
    Msg_Type_tmp = REPLY;
    Send_Tespar_packet();
    Tespar_init();
}

return pmsg;
}
}

```