



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων για επιτήρηση και
παρακολούθηση συνόρων.
Προοπτικές υλοποίησης στα ελληνικά σύνορα.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Κρομμύδα Γεώργιου

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωπτής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων για επιτήρηση και
παρακολούθηση συνόρων.
Προοπτικές υλοποίησης στα ελληνικά σύνορα.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Κρομμύδα Γεώργιου

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωπτής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Π Κωπτής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. Φικιώρης
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

(Υπογραφή)

.....

ΚΡΟΜΜΥΔΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

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

Copyright © Κρομμύδας Β. Γεώργιος, 2014–

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.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επισκόπηση των μοντέλων ανάπτυξης WSN για επιτήρηση συνόρων και των τεχνολογιών που υποστηρίζουν την λειτουργία τους. Αρχικά γίνεται μια σφαιρική προσέγγιση των χαρακτηριστικών που συνθέτουν τα WSN σε επίπεδο υλικού και λογισμικού. Παρατίθενται ακροθιγώς οι σημαντικότερες εφαρμογές των WSN στον πολιτικό τομέα και αναλυτικά τα μοντέλα και οι εφαρμογές στον τομέα της ασφάλειας και επιτήρησης.

Εξετάζονται τα πρωτόκολλα που υιοθετούνται για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ενός WSN, με σκοπό την κατάδειξη των στοιχείων εκείνων που ευνοούν τη χρήση τους σε WSN επιτήρησης. Παράλληλα δίνεται έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ δικτύων βασισμένα σε διαφορετικά πρωτόκολλα.

Τέλος, επιχειρείται μία εκτίμηση εφαρμογής των υφιστάμενων μεθόδων ανάπτυξης WSN επιτήρησης στην συνοριογραμμή του Ν.Έβρου μεταξύ Ελλάδας - Τουρκίας και στη συνέχεια των λοιπών χερσαίων συνόρων της Ελλάδας, αλλά και των θαλάσσιων. Στα πλαίσιο των θαλάσσιων συνόρων εξετάζεται και η ασφάλεια και επιτήρηση της ηπειρωτικής και νησιωτικής ακτογραμμής. Βαρύτητα δίνεται στην ανάπτυξη WSN μέσω k-barrier κάλυψης, με βάση την οποία γίνονται και οι σχετικές αριθμητικές εκτιμήσεις.

Λέξεις Κλειδιά: <<WSN, mote, sensor, sensor board, zigbee, IEEE 802.15.4, border surveillance, συνδεσιμότητα, barrier coverage>>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The scope of this thesis is to overview the WSN deployment models for border surveillance and the technologies embedded. An overall approach is attempted concerning the WSN's characteristics in hardware and software. The most important WSN civilian applications are briefly presented, along with an analytical approach of the existing WSN models and applications in the field of security and surveillance.

The adopted protocols for wireless communication between the nodes of a WSN are examined, in order to demonstrate those elements that favor their use in surveillance applications. Alongside emphasis is given on the interaction between networks based on different protocols.

Finally, attempts an assessment of the existing methods of surveillance implementing WSN in the Evros river district between Greece and Turkey and the other land and maritime borders of Greece. In the context of maritime borders, the security and supervision of mainland and island coastline is examined. Developing WSN through k-barrier coverage is suggested, according to which are made the relevant numerical estimations..

Keywords: <<WSN, mote, sensor, sensor board, zigbee, IEEE 802.15.4, border surveillance, connectivity, barrier coverage>>

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή και επιβλέποντα της συγκεκριμένης εργασίας κ. Παναγιώτη Κωπτή για την πολύτιμη βοήθεια του και την άριστη συνεργασία μας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κους Αξιωματικούς του Λιμενικού Σώματος - Ελληνικής Ακτοφυλακής Δεδούση, Χριστοφίλη και Στρατογιάννη για την άμεση ανταπόκριση και άριστη συνεργασία μας. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες που μου παρείχαν διέτελεσαν σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση επιχειρησιακής εικόνας στο θέμα της παράνομης μετανάστευσης. Ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω και στον κ. James O'Looney, εκπρόσωπο της εταιρείας Trident Systems, για την διάθεση οικονομικών δεδομένων που αφορούν στο σύστημα UGSN. Τα δεδομένα αυτά συνέβαλαν στην διατύπωση ρεαλιστικών οικονομικών εκτιμήσεων για χερσαία WSN.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή

1	Πρόλογος	1
2	Σκοπός	2
3	Δομή διπλωματικής	2

Κεφάλαιο 1ο: Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων - WSN

1.1	Γενικά περί ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων	1
1.1.1	Βασικά δομικά στοιχεία ενός δικτύου WSN	1
1.1.2	Εξέλιξη των δικτύων αισθητήρων	3
1.2	Βασικές τοπολογίες δικτύων	4
1.3	Έλεγχος και διαχείριση δικτύων WSN – Υπηρεσίες Δικτύου (Network services)	6
1.3.1	Προσδιορισμός θέσης	6
1.3.2	Συγχρονισμός	7
1.3.3	Κάλυψη	8
1.3.4	Συνάθροιση - Συμπύεση δεδομένων	8
1.3.5	Ασφάλεια	8
1.3.6	Ανοχή σφαλμάτων	9
1.3.7	Δυνατότητα κλιμάκωσης - επεκτασιμότητα (Scalability)	9
1.3.8	Ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of service – QoS)	10
1.4	Δομή υλικού και λογισμικού κόμβου	10
1.4.1	Microsensors-Smart Sensors	11
1.4.2	Πλατφόρμες υλικού (H/W) - Υλοποιήσεις	13
1.4.3	Λειτουργικό σύστημα (OS-Middleware)	14
1.4.4	Επικοινωνίες	15
1.5	Αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN)	17

Κεφάλαιο 2ο: Εφαρμογές WSN στην παρακολούθηση - επιτήρηση περιοχής

2.1	Γενικά για τις εφαρμογές των WSN	1
2.2	Εφαρμογές επιτήρησης περιοχής	2
2.2.1	Σύστημα παρακολούθησης χαμηλής κατανάλωσης με WSN	3
2.2.2	Σύστημα VigilNet	5
2.2.3	Μοντέλο “A Line in the Sand”	6
2.2.4	Μοντέλο FleGSens	9
2.2.5	Εφαρμογή Bordersense	10
2.2.6	Εφαρμογές θαλάσσιας επιτήρησης	12
2.2.6.1	Εφαρμογή FRONT	13
2.2.6.2	Μοντέλο 3D target tracking UWSS	14
2.2.6.3	Εφαρμογή Ship Detection with WSN	15
2.2.6.4	Σύστημα AUSSNET και AMASS	16

Κεφάλαιο 3: Αρχιτεκτονική δικτύου και πρωτόκολλα WSN επιτήρησης συνόρων

3.1	Δικτυακή Δομή των WSN	1
3.1.1	Η δόμηση επίγειων WSN με Low Rate WPAN και WLAN	1
3.1.2	Η δομή των επιφανειακών και υποθαλάσσιων WSN	2
3.2	Η διάδραση μεταξύ δικτύων στα επίγεια WSN	3
3.2.1	Ενσωμάτωση των κόμβων gateways σε δίκτυα WSN.	4
3.2.1.1	Διάδραση σε ομογενή WSN	5
3.2.1.2	Διάδραση σε ετερογενή WSN	6
3.3	Πρότυπο IEEE 802.15.4 και τεχνολογία ZigBee	7
3.3.1	Δομή δικτύων βασισμένων στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και την τεχνολογία zigbee.	9
3.3.2	Υποστηριζόμενες τοπολογίες δικτύου	10

Κεφάλαιο 4ο: Το πρόβλημα της κάλυψης και της συνδεσιμότητας σε ένα WSN επιτήρησης. Η μέθοδος κάλυψης φράγματος.

4.1	Σημασία της κάλυψης και συνδεσιμότητας σε ένα WSN	1
4.2	Η κάλυψη φράγματος σε WSN	2
4.2.1	Barrier coverage για τυχαία ανάπτυξη WSN σε belt region	2
4.2.1.1	Barrier coverage για τυχαία ανάπτυξη WSN σε belt region	4
4.2.1.2	Barrier coverage για προκαθορισμένη ανάπτυξη WSN σε belt region	6
4.2.1.3	διατήρηση της ποιότητας κάλυψης φράγματος	6
4.2.2	Η συνθήκη συνδεσιμότητας σε ένα WSN	7
4.2.3	Η διατήρηση της ποιότητας κάλυψης φράγματος	8
4.3	Η κάλυψη στα θαλάσσια WSN	9
4.3.1	Κάλυψη για 2D και 3D deployment	9
4.3.2	Η συνθήκη συνδεσιμότητας στα θαλάσσια WSN	12

Κεφάλαιο 5ο: Ανάπτυξη WSN για επιτήρηση των ελληνικών χερσαίων συνόρων.

5.1	Προσδιορισμός του προβλήματος	1
5.2	Κάλυψη χερσαίων συνόρων νομού Έβρου	1
5.2.1	Υφιστάμενη κατάσταση	1
5.2.2	Σύστημα WSN για την επιτήρηση του ανατολικού N. Έβρου	5
5.2.2.1	Η επιλογή του κατάλληλου τύπου WSN για το 1ο επίπεδο.	6
5.2.2.2	Υλοποίηση 2ου και 3ου επιπέδου.	8
5.2.2.3	Μέθοδος ανάπτυξης του WSN	10
5.3	Επιτήρηση χερσαίων συνόρων με λοιπά κράτη της Βαλκανικής	13
5.3.1	Υφιστάμενη κατάσταση	13
5.3.2	Η επιλογή του κατάλληλου τύπου WSN	14
5.3.3	Μέθοδος ανάπτυξης του WSN	15
5.4	Η επιτήρηση των θαλάσσιων συνόρων και των ακτών των παραμεθόριων νήσων	17
5.4.1	Υφιστάμενη κατάσταση	17

5.4.2	Η επιλογή του κατάλληλου τύπου WSN	19
5.4.2.1	WSN για επιτήρηση των θαλασσίων συνόρων.	19
5.4.2.2	Μέθοδος ανάπτυξης του WSN για επιτήρηση θαλάσσιων συνόρων.	20
5.4.2.3	WSN για την επιτήρηση ακτών	24
Κεφάλαιο 6ο: Επίλογος - Συμπεράσματα		1

Εισαγωγή

1. Πρόλογος

Την τελευταία εικοσαετία οι τεχνολογικές εξελίξεις της ασύρματης δικτύωσης και στις εφαρμογών της μικρο- και νάνοηλεκτρονικής ώθησαν την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη ενός νέου ερευνητικού πεδίου, αυτού των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks). Η ενσωμάτωση μικροαισθητήρων σε αυτόνομες πλατφόρμες με δυνατότητες τοπικής επεξεργασίας των συλλεγόμενων δεδομένων και ασύρματης δικτύωσης, άνοιξαν τον δρόμο για τη μελέτη χρήσης τους σε πλήθος καθημερινών εφαρμογών.

Η έρευνα υλοποίησης ad hoc δικτύων για επιτήρηση και παρακολούθηση σε εφαρμογές στρατιωτικές και εθνικής ασφαλείας γενικότερα, αποτέλεσε το ερευνητικό υπόβαθρο ανάπτυξης τέτοιων δικτύων. Τα δύο σημεία κλειδιά που έκαναν εφικτά τα δίκτυα τέτοιου τύπου σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και χαμηλού κόστους ήταν:

α. Η δυνατότητα χρήσης CMOS τεχνολογίας και η ολοκλήρωση σε μεγάλη κλίμακα.

β. Η χρήση ήδη υφιστάμενων προτύπων ασύρματης επικοινωνίας και δικτύωσης και άρα η συμβατότητα και το μικρό ρίσκο ανάπτυξης.

Οι περιορισμοί που εισάγει το υλικό των κόμβων ενός δικτύου WSN απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό και προσαρμογή στις απαιτήσεις τις εκάστοτε εφαρμογής. Οι εφαρμογές επιτήρησης περιοχής και παρακολούθησης συνόρων, πεδίο που εστιάζει η εργασία αυτή, αποτελεί μία ιδιαίτερο εφαρμογή των δικτύων WSN. Οι ερευνητικές ομάδες που έχουν ασχοληθεί με WSN σε εφαρμογές ασφάλειας και επιτήρησης, βρέθηκαν αντιμέτωπες με πληθώρα σχεδιαστικών προκλήσεων που απορρέουν από το χαρακτήρα τέτοιων εφαρμογών. Αυτές οδήγησαν σε παρεμβάσεις τόσο σε επίπεδο λογισμικού και υλικού όσο και σε επίπεδο δικτύωσης. Τα περισσότερα από τα προγράμματα αυτά βρίσκονται στη φάση της δοκιμής και της αξιολόγησης.

2. Σκοπός

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των WSN και των στοιχείων που τα συνθέτουν (υλικό - λογισμικό), ώστε να γίνουν σαφείς στον αναγνώστη οι σχεδιαστικοί περιορισμοί που σχετίζονται με την ενσωμάτωση τους σε απαιτητικές εφαρμογές, όπως αυτές της επιτήρησης, καθώς και οι προοπτικές χρήσης τους.

Σε δεύτερο επίπεδο, επιδιώκεται η διαμόρφωση μιας πρότασης υλοποίησης δικτύου WSN επιτήρησης συνόρων προσαρμοσμένης στα δεδομένα και τις ανάγκες της ελληνικής πραγματικότητας που είναι:

α. Ανάγκη για μείωση του κόστους επιτήρησης και ασφαλείας εκτεταμένων συνόρων (βέλτιστη διαχείριση πόρων και ανθρώπινου δυναμικού).

β. Ανάγκη για μέγιστη αποτελεσματικότητα (μεγάλες γεωγραφικές περιοχές εκτεθειμένες σε εκτεταμένη παράνομη μετανάστευση και εξωτερικούς εχθρικούς παράγοντες)

3. Δομή διπλωματικής εργασίας

Στο **1ο κεφάλαιο** γίνεται μια γενική παρουσίαση των στοιχείων και χαρακτηριστικών που συνθέτουν ένα WSN και συγκεκριμένα:

α. Τα βασικά δομικά στοιχεία (κόμβοι, σταθμοί βάσης, τερματικό χειριστή στο κέντρο ελέγχου του συστήματος)

β. Η αρχιτεκτονική υλικού και λογισμικού

γ. Το μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου και τα σχετικά πρωτόκολλα.

Στο **2ο κεφάλαιο** επιχειρείται μια σύντομη αλλά περιεκτική αναφορά στις σημαντικότερες προτάσεις εφαρμογών WSN στην επιτήρηση συνόρων οι οποίες έχουν διατυπωθεί μέχρι σήμερα, καθώς και στα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές.

Στο **3ο κεφάλαιο** γίνεται επισκόπηση της τεχνολογίας Zigbee και των πρωτοκόλλων IEEE 802.15.4. Εξετάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ του IEEE 802.15.4 και του WiFi και η συνύπαρξη τους σε ένα υβριδικό WSN. Πραγματοποιείται σύντομη αναφορά στη διάρθρωση των δορυφορικών δικτύων, τα οποία αξιοποιούνται σε θαλάσσια δίκτυα επιτήρησης.

Στο **4ο κεφάλαιο** παρατίθεται η μέθοδος ανάπτυξης WSN για υλοποίηση k-barrier κάλυψης, με ταυτόχρονη εξασφάλιση της συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων. Παρουσιάζονται επίσης μέθοδοι για την ποιοτική εκτίμηση της κάλυψης και την αξιολόγησης της.

Στο **5ο κεφάλαιο** αξιοποιούνται τα συμπεράσματα των κεφαλαίων που προηγήθηκαν για τη διατύπωση μίας πρότασης για WSN επιτήρησης για τα ελληνικά χερσαία και θαλάσσια σύνορα.

Στο **6ο κεφάλαιο** διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 1ο

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks)

1. Γενικά περί Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Ένα δίκτυο WSN είναι μια δικτυακή υποδομή αποτελούμενη από μονάδες ικανές να δέχονται εξωτερικά ερεθίσματα, να επεξεργάζονται τα δεδομένα που συλλέγουν και να επικοινωνούν μεταξύ τους και με το διαχειριστή του δικτύου. Ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα να παρατηρεί και να επιδρά στο δίκτυο σύμφωνα με τις απαιτήσεις του. Τα WSN μπορούν να ερμηνευθούν και σαν μια ιδιαίτερη μορφή ad hoc δικτύων.

Ένα δίκτυο WSN σχεδιάζεται, ώστε να απαιτείται η ελάχιστη ή μηδενική υποδομή για την ανάπτυξή του. Υπάρχουν δύο τύποι WSN:

α. Δομημένα (structured), όπου το δίκτυο των κόμβων αναπτύσσεται σε προεπιλεγμένες θέσεις

β. Μη δομημένα (unstructured) ή τυχαία, όπου οι κόμβοι αναπτύσσονται κατά τυχαίο (ad hoc) τρόπο μη προσχεδιασμένο.

Ενώ η υλοποίηση μη δομημένων (unstructured) δικτύων WSN προσδίδει μεγαλύτερη ευελιξία, εμφανίζει δυσχέρειες στην συντήρηση και διαχείριση τους σε σχέση με τα δομημένα (structured). Παράλληλα, η ανάπτυξη με τυχαίο τρόπο δεν εγγυάται την επαρκή κάλυψη των περιοχών ενδιαφέροντος. Τα δίκτυα WSN διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με το περιβάλλον ανάπτυξης σε υπέργεια (ή επιφανειακά), υπόγεια, υποθαλάσσια, κινητά και πολυμέσων. Η διάκριση αυτή γίνεται λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων που προκύπτουν από κάθε εφαρμογή σε υλικό, λογισμικό και πρωτόκολλα επικοινωνίας.

1.1 Βασικά δομικά στοιχεία ενός δικτύου WSN

Τρία βασικά δομικά στοιχεία συγκροτούν ένα δίκτυο WSN:

α. Ένας αριθμός συσκευών με τις δυνατότητες που περιγράφηκαν οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί στο επιθυμητό περιβάλλον παρατήρησης. Ο κόμβος

διαχωρίζεται στο sensor board και το mote, όπου η έννοια του mote περιλαμβάνει όλες τις μικροηλεκτρονικές διατάξεις εκτός των μορφομετατροπέων εισόδου.

Στην πλατφόρμα των motes μπορούν να ενσωματωθούν περισσότερες της μίας διατάξεις ανίχνευσης, ικανές να αντιλαμβάνονται ποικίλες παραμέτρους του περιβάλλοντος ανάπτυξης. Με κριτήριο το μετρούμενο μέγεθος διακρίνονται σε αισθητήρες:

- ηλεκτρικών σημάτων (τάση, ένταση ρεύματος, φορτίο)
- μαγνητικών σημάτων (ένταση μαγνητικού πεδίου, μαγνητική ροή, μαγνήτιση)
- θερμικών σημάτων (θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας,
- μηχανικών σημάτων (δύναμη, κίνηση, πίεση, ταχύτητα, επιτάχυνση)
- χημικών σημάτων (συγκεντρώσεις υλικών, σύνθεση, ρυθμός αντίδρασης).

Οι κόμβοι διακρίνονται σε γενικού σκοπού (generic- multi purpose), σε κόμβους πύλες (gateway) και σε κόμβους αναμετάδοσης (relay). Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στις υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες που τους διακρίνουν.

β. Ένα δίκτυο εντός του οποίου λειτουργούν και διασυνδέονται. Τα δίκτυα αισθητήρων διαφέρουν κατά κάποιο τρόπο από τις υπόλοιπες μορφές δικτύων, καθώς οι κόμβοι ενδέχεται να σταματήσουν να λειτουργούν, λόγω διαφόρων αιτιών (περιβαλλοντική φθορά, αστοχία ή καταστροφή κατά την ανάπτυξη του δικτύου), αλλά κυρίως λόγω των ενεργειακών περιορισμών που επιβάλλει η τροφοδοσία τους. Η απώλεια κόμβων ενός WSN προκαλεί συχνές αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου.

Κατά συνέπεια, απαιτείται η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης (self organizing) για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των περιορισμένων πόρων του WSN. Για να ικανοποιηθούν οι ανωτέρω απαιτήσεις αναπτύχθηκαν τα πρότυπα επικοινωνίας IEEE 802.15.4 και η τεχνολογία ZigBee, καθώς και πλήθος άλλων εξειδικευμένων πρωτοκόλλων.

γ. Ένα κεντρικό σημείο συγκέντρωσης των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί. Η επικοινωνία των κόμβων που ανήκουν σε ένα WSN με τον σταθμό βάσης (Base Station - ΣΒ) πραγματοποιείται ανάλογα με τη διάταξη τους στο πεδίο, μέσω άλλων κόμβων ή απευθείας. Πριν την αποστολή των δεδομένων στο ΣΒ τα δεδομένα υφίστανται επεξεργασία τοπικά.

1.2 Εξέλιξη των δικτύων αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων σε πρώιμη μορφή έκαναν την εμφάνισή τους κατά την περίοδο του ψυχρού πολέμου, οπότε και υλοποιήθηκε από τις ΗΠΑ ένα δίκτυο ακουστικών υποθαλάσσιων αισθητήρων για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση υποβρυχίων, το οποίο αξιοποιείται ακόμα από την αμερικανική ωκεανογραφική υπηρεσία (NOAA) για την παρακολούθηση υποθαλάσσιας σεισμικής δραστηριότητας. Επίσης, το δίκτυο RADAR αεράμυνας που υλοποιήθηκε στις ΗΠΑ και που αξιοποιούσε εναέρια μέσα (AWACS) ως αισθητήρια μέσα αποτελεί μια σημαντική πρώιμη μορφή δικτύου αισθητήρων.

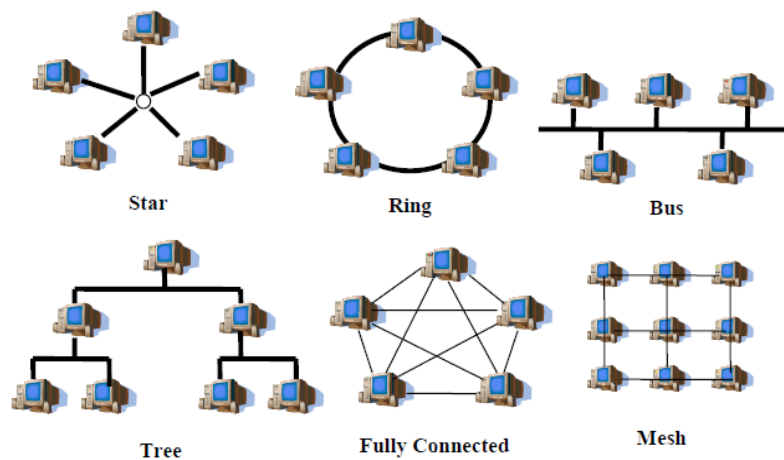
Στη δεκαετία του 1980, πάλι με επίκεντρο τις ΗΠΑ και τις έρευνες που διεξήγαγε η DARPA (υπηρεσία προχωρημένων ερευνών για την άμυνα), εξετάστηκαν οι δυνατότητες της αξιοποίησης του ARPA NET (πρόγονος του INTERNET) και του πρόσφατα, τότε, αναπτυσθέντος TCP IP πρωτοκόλλου στο πεδίο της μάχης υπό τη μορφή δικτύου αισθητήρων. Αυτή αποτέλεσε μια πρώτη προσέγγιση ενός καταναμημένου δικτύου αισθητήρων (DSN), το οποίο απαρτιζόνταν από χαμηλού κόστους συνεργαζόμενες συσκευές με σκοπό την επιτήρηση και παρακολούθηση.

Κατάλληλοι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν και με οδηγό το πρόγραμμα DSN στην δεκαετία του 1990, επιχειρήθηκε η υλοποίηση DSN δικτύων αποτελούμενα από εξελιγμένους αισθητήρες αλλά με επιδίωξη να χρησιμοποιηθεί τεχνολογία και πρότυπα δικτύωσης ήδη διαθέσιμα στην αγορά. Σκοπός ήταν να μειωθεί το κόστος και ο χρόνος ανάπτυξης. Το αποτέλεσμα ήταν η πλήρης ενσωμάτωση των δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της μάχης και η δημιουργία ενός Δίκτυο-Κεντρικού Θεάτρου Επιχειρήσεων (Network Centric Warfare).

Με την πρόοδο στις επικοινωνίες και τα υπολογιστικά συστήματα προέκυψε κατά την τρέχουσα δεκαετία μια νέα γενιά τεχνολογιών Δικτύων Αισθητήρων. Η ενσωμάτωση ηλεκτρονικών συστημάτων κλίμακας Μικρομέτρου (και πρόσφατα Νανομέτρου) στα motes και η χρήση ευρέως διαδεδομένων προτύπων ασύρματης δικτύωσης (οικογένεια προτύπων IEEE 802, τεχνολογία ZigBee, WiMax), μείωσαν το κόστος και έκαναν εφικτή την ευρεία χρήση των δικτύων WSN.

1.3 Βασικές τοπολογίες δικτύων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους, οι οποίοι μπορεί να επιτελούν λειτουργίες ελέγχου, αποστολής και λήψης μηνυμάτων μέσω του ασύρματου διαύλου. Οι κόμβοι αυτοί συνθέτουν την τοπολογία του δικτύου. Οι βασικές τοπολογίες, που απεικονίζονται στο Σχήμα 1.2 είναι:



Σχήμα 1.2. Βασικές Τοπολογίες Δικτύου

- Τοπολογία αστέρα (Star): Κάθε κόμβος δεν μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με άλλους, αλλά δρομολογεί δεδομένα μέσω ενός κεντρικού κόμβου. Οι κόμβοι (αισθητήρες) συλλέγουν την πληροφορία και τη διοχετεύουν στο κεντρικό κόμβο, δηλαδή δεν υποστηρίζουν λειτουργία λήψης δεδομένων. Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η απώλεια κάποιου κόμβου πλην του κεντρικού δεν θέτει το δίκτυο WSN εκτός λειτουργίας.

- Σημείο προς σημείο (Point to Point): Στη τοπολογία P-P κάθε κόμβος ανταλλάσσει με τους γειτονικούς του δεδομένα με αμφίδρομη λειτουργία (αποστολή και λήψη δεδομένων) δίχως να μεσολαβεί κεντρικός κόμβος. Αν και απλούστερη σε υλοποίηση σε σχέση με τη τοπολογία αστέρα, ενδεχόμενη απώλεια ενός κόμβου θέτει εκτός λειτουργίας ένα μεγαλύτερο τμήμα του δικτύου, γεγονός μειώνει την αξιοπιστία του.

- Δακτύλιος (Ring). Δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος και όλοι οι κόμβοι επιτελούν την ίδια λειτουργία. Τα δεδομένα μεταδίδονται προς μία μόνο κατεύθυνση δηλαδή οι κόμβοι δεν λειτουργούν αμφίδρομα. Το γεγονός ότι οι κόμβοι συνδέονται αλυσιδωτά υπό μορφή δακτυλίου καθιστά το δίκτυο προβληματικό στη περίπτωση που ένας κόμβος καταρρεύσει.

- Bus. Στη σχεδίαση Bus, τα δεδομένα μεταδίδονται σε όλους τους κόμβους. Κάθε κόμβος ελέγχει την επικεφαλίδα του πλαισίου δεδομένων και εντοπίζει και επεξεργάζεται τα δεδομένα που απευθύνονται σε αυτόν.

- Δένδρο (Tree): Η τοπολογία δέντρου διαθέτει έναν κύριο κόμβο (Root Node), που λειτουργεί ως κύριος δρομολογητής δεδομένων. Ο κύριος κόμβος συνδέεται με αριθμό κεντρικών κόμβων οι οποίοι υλοποιούν ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα, όπου συνδέονται οι εξαρτημένοι από αυτούς κόμβοι.

- Fully Connected. Στη συγκεκριμένη τοπολογία η πληροφορία από τον αισθητήριο κόμβο προς το σταθμό βάσης δρομολογείται προς όλους τους κόμβους του δικτύου. Πρόκειται για την πολύπλοκότερη τοπολογία και με μεγάλο κόστος ανάπτυξης.

- Τοπολογία πλέγματος (Mesh). Πρόκειται για δίκτυα που επιτρέπουν την επικοινωνία γειτονικών κόμβων. Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα σε σύγκριση με ένα δίκτυο πλήρως διασυνδεδεμένο είναι μικρότερη.

1.4 Έλεγχος και διαχείριση δικτύων WSN – Υπηρεσίες δικτύου (Network services)

Η βέλτιστη διαχείριση των πόρων και της λειτουργίας ενός WSN συναντάται στην βιβλιογραφία υπό τον όρο "υπηρεσίες δικτύου ή network services". Πρόκειται για υπηρεσίες που συντονίζουν και ελέγχουν την

λειτουργία των κόμβων, αντιμετωπίζοντας και επιλύοντας ζητήματα κρίσιμης σημασίας για την λειτουργία των WSN, όπως:

- Εντοπισμός των κόμβων (Localization).
- Συγχρονισμός των κόμβων του δικτύου (Synchronization)
- Κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος (Coverage)
- Ασφάλεια δεδομένων και επικοινωνιών του δικτύου (Security)
- Συνάθροιση των δεδομένων (Data Aggregation)
- Ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance)
- Κλιμακωσιμότητα - Επεκτασιμότητα (Scalability)
- Ποιότητα της Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS)

Τα ζητήματα αυτά επιβάλλουν τη βέλτιστη διαχείριση μιας σειράς περιοριστικών παραγόντων (constraints). Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα βασικά στοιχεία για τις υπηρεσίες αυτές.

1.4.1 Προσδιορισμός θέσης

Στα δίκτυα WSN, οι κόμβοι που αναπτύσσονται στο πεδίο με τυχαίο τρόπο (Ad Hoc) δεν έχουν εκ των προτέρων γνώση της θέσης τους. Οι υπάρχουσες μέθοδοι προσδιορισμού της θέσης περιλαμβάνουν χρήση GPS, χρήση κόμβων φάρων (beacon) ή άγκυρες (anchors) και εντοπισμό θέσης με βάση την εγγύτητα προς άλλους κόμβους γνωστής θέσης.

Σε επίπεδο λογισμικού αξιοποιούνται αλγόριθμοι για τον εντοπισμό της θέσης των κόμβων. Στο [2] οι αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης παρουσιάζονται ως η πιο ενδεδειγμένη από πλευράς κόστους τεχνική και ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τους συγκεντρωτικούς (centralized) και τους κατανεμημένους (distributed). Σημαντικότεροι από τους αλγόριθμους που αναφέρονται στο [2] είναι ο αλγόριθμος του Moore, ο RIPS και ο Spotlight.

1.4.2 Συγχρονισμός

Ο συγχρονισμός (Synchronization) σε ένα δίκτυο WSN είναι σημαντικός για την επιτυχή δικτύωση και την εξοικονόμηση ενέργειας. Ο συγχρονισμός επιτρέπει στους κόμβους να συνεργάζονται και να μεταδίδουν

δεδομένα σύμφωνα με ένα χρονικό προγραμματισμό. Η εξοικονόμηση της ενέργειας επιτυγχάνεται με τη διαλλειπτική λειτουργία των πομποδεκτών (sleep/wake up scheme).

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι συγχρονισμού των ρολογιών του δικτύου. Στο [10] τα πρωτόκολλα συγχρονισμού κατηγοριοποιούνται βάση ζητημάτων συγχρονισμού και βάση των χαρακτηριστικών που απορρέουν από την εφαρμογή. Η αξιολόγηση των πρωτοκόλλων συγχρονισμού πραγματοποιείται με κριτήρια όπως η ακρίβεια, η κατανάλωση ενέργειας, η πολυπλοκότητα, η επεκτασιμότητα και τα περιθώρια λάθους.

1.4.3 Κάλυψη

Η ανάπτυξη των αισθητήρων και η παρεχόμενη κάλυψη εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Συγκεκριμένα, από το αν το υπό ανάπτυξη δίκτυο είναι στατικό (σταθεροί, μόνιμα τοποθετημένοι κόμβοι) ή κινητό (δυνατότητα κίνησης των κόμβων σε ένα δυναμικό περιβάλλον από πλευράς κάλυψης). Η πολυπλοκότητα που εισάγει σε ένα WSN η κινητικότητα των κόμβων είναι μεγάλη, τόσο σε φυσικό επίπεδο (δυνατότητες κίνησης-εποχούμενοι κόμβοι), όσο και σε επίπεδο αλγορίθμων. Η ρευστή τοπολογία του δικτύου επηρεάζει την κάλυψη, την συνδεσιμότητα, την διανομή και την προώθηση των δεδομένων. Το θέμα της κάλυψης σε ένα WSN αναλύεται σε ξεχωριστή ενότητα της παρούσας εργασίας.

1.4.4 Συνάθροιση/Συμπίεση δεδομένων (data aggregation /compression)

Οι τεχνικές συνάθροισης και συμπίεσης δεδομένων (Data Aggregation/Compression) αποσκοπούν στη μείωση του κόστους επικοινωνίας, στη βελτίωση της αξιοπιστίας της παρεχόμενης υπηρεσίας και στην εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο. Με τον όρο *συνάθροιση δεδομένων* εννοούμε το συνδυασμό δεδομένων προερχόμενων από πολλαπλούς αισθητήριους κόμβους, σε ένα κόμβο του δικτύου WSN. Η τεχνική συνάθροισης δεδομένων χρησιμοποιείται σε πρωτόκολλα δρομολόγησης με συχνότερη εφαρμογή σε πρωτόκολλα που βασίζονται στην ομαδοποίηση

κόμβων (cluster-based). Η τεχνική συμπίεσης δεδομένων, περιλαμβάνει τη διαδικασία συμπίεσης του μεγέθους των δεδομένων στον αισθητήριο κόμβο και εν συνεχεία αποσυμπίεσης, η οποία λαμβάνει χώρα στο σταθμό βάσης.

1.4.5 Ασφάλεια

Η ασφάλεια αποτελεί κρίσιμο αντικείμενο στη σχεδίαση ενός δικτύου WSN, καθώς σε πολλές εφαρμογές θεωρείται σημαντική η αντιμετώπιση καταστάσεων όπως το ρίσκο ακεραιότητας δεδομένων, οι υποκλοπές και παρεμβολές μεταδιδόμενης πληροφορίας, η είσοδος στο σύστημα μετάδοσης ψεύτικων μηνυμάτων πληροφορίας και η απώλεια πόρων του δικτύου. Τα ζητήματα ασφαλείας θα είχαν μικρότερη κρισιμότητα εάν δεν υπήρχαν οι περιοριστικοί παράγοντες του δικτύου, οι οποίοι αφορούν σε δυνατότητες επικοινωνίας, υπολογισμών, επεξεργασίας, αποθήκευσης δεδομένων και ενέργειας.

Η εξασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας του δικτύου και η αντιμετώπιση πιθανών επιθέσεων υλοποιείται με την ανάπτυξη αλγορίθμων αυθεντικοποίησης και κρυπτογράφησης, οι οποίοι όμως επιβαρύνουν το δίκτυο ως προς τη κατανάλωση ενέργειας και το διαθέσιμο εύρος ζώνης της υπηρεσίας.

1.4.6 Ανοχή Σφαλμάτων (Fault Tolerance)

Σε ένα δίκτυο WSN με μεγάλο αριθμό κόμβων είναι πιθανό κάποιοι κόμβοι να οδηγηθούν σε σφάλματα (απώλεια ή αλλοίωση πακέτων δεδομένων). Παράγοντες που οδηγούν σε σφάλματα είναι η έλλειψη ενέργειας, η φυσική καταστροφή κόμβων, παρεμβολές από γειτονικούς κόμβους και δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος. Η αξιοπιστία του δικτύου πρέπει να διασφαλίζεται με την ανοχή τέτοιου είδους σφαλμάτων (fault tolerance), δηλαδή η λειτουργία του δικτύου θα πρέπει να παραμένει ανεπηρέαστη από σφάλματα. Εάν αυτά εμφανιστούν σε κάποιο κρίσιμο αριθμό κόμβων είναι αναγκαία η μέριμνα των πρωτοκόλλων MAC και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, ώστε να καθορίσουν νέες ζεύξεις και διαδρομές δρομολόγησης για τη μετάδοση και προώθηση των δεδομένων στο σταθμό

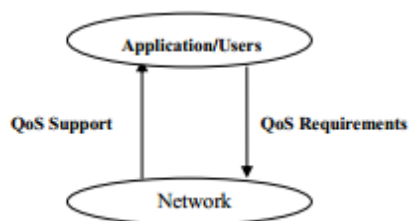
βάσης. Το κατά πόσο μια σχεδίαση οφείλει να είναι ανεκτική σε σφάλματα είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το είδος της εφαρμογής και το επιθυμητό επίπεδο παρεχόμενης αξιοπιστίας.

1.4.7 Κλιμακωσιμότητα - Επεκτασιμότητα (Scalability)

Χαρακτηριστικό των δικτύων WSN είναι το μεγάλο πλήθος κόμβων, οι οποίοι μπορεί να είναι εκατοντάδες, χιλιάδες ή και περισσότεροι. Τα εφαρμοζόμενα πρωτόκολλα σε κάθε εφαρμογή οφείλουν να είναι σε θέση να διαχειρίζονται τόσο το μεγάλο πλήθος κόμβων όσο και τη μεγάλη χωρική πυκνότητα που ενδεχομένως μπορεί να εμφανίζουν.

1.4.8 Ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS)

Ο όρος QoS αποτελεί ένα μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται από το δίκτυο WSN στον τελικό χρήστη. Ο τελικός χρήστης καθορίζει κάποιες σχεδιαστικές απαιτήσεις ποιότητας του δικτύου και το δίκτυο παρέχει τα χαρακτηριστικά ποιότητας που έχει τις δυνατότητες να προσφέρει. Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζονται οι ροές απαιτήσεων QoS και παροχής QoS μεταξύ εφαρμογής και τελικού χρήστη και δικτύου.

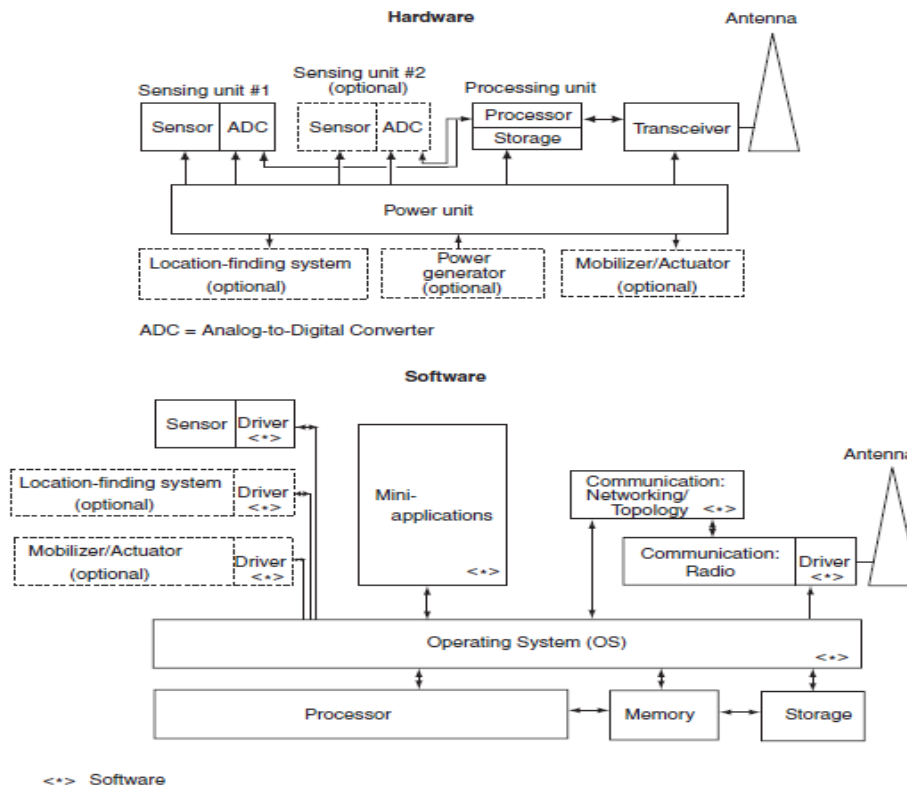


Σχήμα 1.4 Γενικό μοντέλο ποιότητας υπηρεσίας

Γίνεται αντιληπτό ότι τα δομικά στοιχεία ενός δικτύου πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις ποιότητας, κάτι που αποτελεί μέριμνα του σχεδιαστή ενός δικτύου. Ειδικότερα σε δίκτυα WSN, οι απαιτήσεις ποιότητας μπορούν να επικεντρώνονται σε θέματα ακρίβειας δεδομένων, καθυστέρησης μετάδοσης, συνάθροισης δεδομένων, ανοχής σφαλμάτων και κατανάλωσης ενέργειας.

1.5 Δομή Υλικού και Λογισμικού Κόμβου

Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται το block διάγραμμα της τυπικής δομής υλικού και λογισμικού ενός κόμβου WSN αισθητήρων και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα δομικά του στοιχεία.



Σχήμα 1.5. Block Διάγραμμα τυπικής δομής υλικού (Hardware) και λογισμικού (Software) κόμβου

1.5.1 Microsensors-Smart Sensors

Έξυπνος αισθητήρας (Smart Sensor) είναι η αισθητήρια διάταξη, η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- εκτέλεση λογικής λειτουργίας (ενσωμάτωση επεξεργαστή - μικροελεγκτή)
- επικοινωνία με μία ή περισσότερες άλλες συσκευές
- λήψη απόφασης με τη χρήση σαφών (crisp) ή ασαφών (fuzzy) δεδομένων, τα οποία είτε τα συλλέγει ο ίδιος ο αισθητήρας, είτε παρέχονται από άλλον.

Ένα τυπικό σύστημα έξυπνου αισθητήρα είναι ένας ολοκληρωμένος (integrated) αισθητήρας, ο οποίος συγκροτείται από επιμέρους τμήματα. Πρώτο τμήμα είναι ο μορφομετατροπέας (transducer) εισόδου, ο οποίος είναι η διάταξη που μετατρέπει μια μη ηλεκτρική φυσική ή χημική ποσότητα σε ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια, μικροηλεκτρονικές διατάξεις επεξεργάζονται το σήμα που παράγεται (ενίσχυση, μετατροπή AD), και το τροφοδοτούν σε ένα μικροεπεξεργαστή. Στον επεξεργαστή πραγματοποιείται ο χειρισμός των δεδομένων και η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος. Ο μικροεπεξεργαστής ελέγχει μια σειρά άλλων κυκλωμάτων, τα οποία τροφοδοτούν τον μορφομετατροπέα εξόδου ή ενεργοποιητή (actuator). Ο ρόλος του ενεργοποιητή είναι η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε μια μορφή αντιληπτή από τις ανθρώπινες αισθήσεις ή η ενεργοποίηση κάποιας δράσης (άνοιγμα-κλείσιμο κάποιου άλλου συστήματος, μεταβολή θέσης κ.τ.λ.). Το κύκλωμα συμπληρώνεται από διατάξεις αμφίδρομης ασύρματης επικοινωνίας, δηλαδή έναν πομποδέκτη RF και μία κεραία.

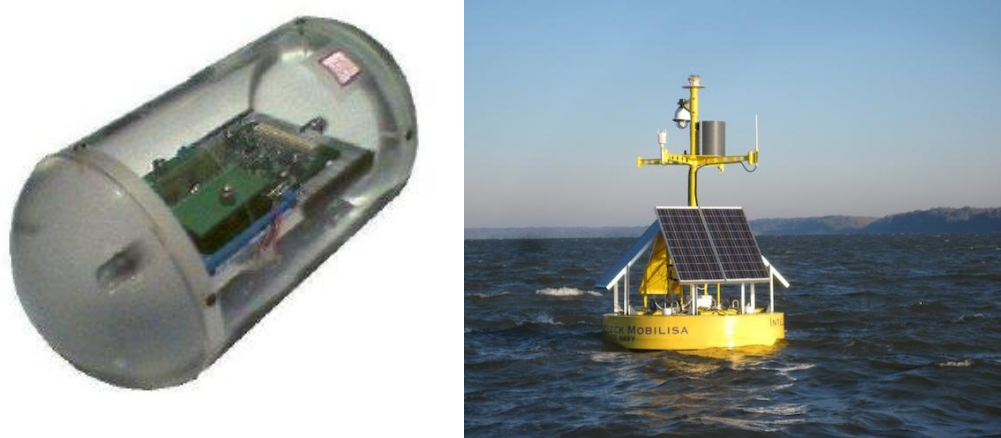
Οι Έξυπνοι αισθητήρες αποτελούν μαζί με την τροφοδοσία τους κόμβους ενός WSN. Τα *σχεδιαστικά ζητήματα* τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή των κόμβων (σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις της εφαρμογής WSN), είναι τα εξής:

1) *Η εμβέλεια ασύρματης επικοινωνίας*, η οποία για τις περισσότερες υλοποιήσεις κυμαίνεται από 3 ως 61 μέτρα. Η εμβέλεια είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της συνδεσιμότητας του δικτύου και την συλλογή δεδομένων, καθώς το περιβάλλον εντός του οποίου υλοποιείται το WSN συνήθως δεν έχει υποδομή.

2) *Ο τύπος της μνήμης*. Ο τύπος μνήμης που χρησιμοποιείται είναι τύπου flash. Πρόκειται για μνήμη χαμηλού κόστους, ενώ δεν χρειάζεται τροφοδοσία για τη διατήρηση των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα (non volatile).

3) *Η κατανάλωση ενέργειας*. Πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Το ζήτημα αυτό έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού. Σε επίπεδο υλικού εξετάζεται ο τύπος της τροφοδοσίας. Αυτή αποτελείται από ξηρά στοιχεία (π.χ δύο μπαταρίες εμπορίου τύπου AA), ενώ η επιδίωξη είναι να ενσωματωθούν τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών, όπως

φωτοβολταϊκά κύτταρα ή πάνελ (PV Cells), ανεμογεννήτριες, μικρογεννήτριες για παραγωγή ρεύματος από τη κυμμάτωση της θάλασσας.



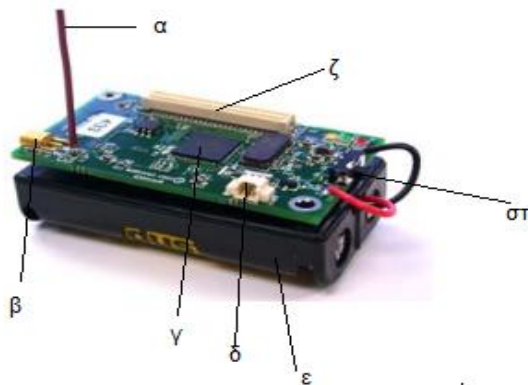
Σχήμα 1.7 Mote packaging με ενσωμάτωση pv cell (αριστερά) και smart buoy με pv panels (δεξιά)

δ. *Το κόστος.* Η υλοποίηση ενός WSN απαιτεί την διασύνδεση δεκάδων ή ακόμα και εκατοντάδων κόμβων. Εφαρμογές WSN με μεγάλο πλήθος κόμβων είναι συμφέρουσες οικονομικά, αν οι κόμβοι είναι σχετικά φθηνοί. Η μαζική παραγωγή των εξαρτημάτων που συνθέτουν τους κόμβους, καθώς και η επιδίωξη χρήσης δοκιμασμένων τεχνολογιών, έχουν συντελέσει στο σχετικά χαμηλό κόστος των mote. Αντίθετα, το κόστος ανά κόμβο αυξάνεται κατά πολύ στα θαλάσσια WSN.

1.5.2 Πλατφόρμες υλικού (H/W) - Υλοποιήσεις

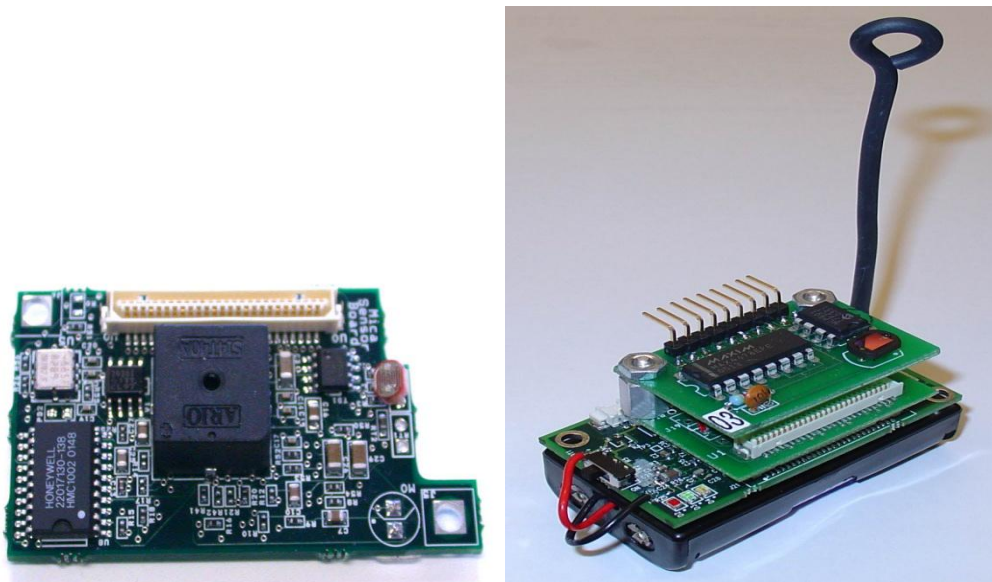
Τα mote που έχουν αναπτυχθεί ταξινομούνται σε mote γενικού σκοπού, υψηλού εύρους ζώνης (για εφαρμογές WSN πολυμέσων), πύλες και ειδικού σκοπού (υποθαλάσσια, υπόγεια WSN κ.α.). Οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση θερμοκρασίας και πίεσης, αποτελούν παράδειγμα γενικών κόμβων (π.χ. οι Rene, Mica2, MicaZ και Telos, που έχουν αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο Berkeley και είναι διαθέσιμοι εμπορικά από την MEMSIC Technologies)[7]. Κόμβοι ακουστικοί, βίντεο και χημικοί ταξινομούνται στους κόμβους μεγάλου εύρους ζώνης και απαιτούν την ενσωμάτωση μεγαλύτερων υπολογιστικών δυνατοτήτων και

κατάλληλων επικοινωνιακών διατάξεων (π.χ. κόμβοι smart buoys [12]). Οι κόμβοι πύλες παρέχουν ένα περιβάλλον διασύνδεσης του WSN με άλλα δίκτυα.



Σχήμα 1.8 Διάρθρωση MICA2 mote: (α) κεραία (β) Επέκταση για σύνδεση εξωτερικής κεραίας (γ) CPU (δ) Επέκταση για σύνδεση με εξωτερική τροφοδοσία (ε) Τροφοδοσία (στ) Διακόπτης On/Off (ζ) Θύρα PCI επέκτασης

Οι μικροαισθητήρες συνδέονται στη συνέχεια με τη μορφή modules (Σχήμα 1.9) πάνω στα motes. Επιλέγονται ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο θα αναπτυχθούν οι κόμβοι και τις φυσικές ποσότητες που ανιχνεύουν.



Σχήμα 1.9 sensor board για mote της οικογένειας mica και ολοκληρωμένη σύνθεση (mote +sensor +actuator).

1.5.3 Λειτουργικό σύστημα (OS-Middleware)

Τα motes ενσωματώνουν λειτουργικά συστήματα, (operating systems - OS) τα οποία είναι ειδικά αναπτυγμένα για τις πλατφόρμες αυτές. Ο σχεδιασμός των λειτουργικών συστημάτων (ΛΣ) για κόμβους έγινε με κύριους άξονες την διαχείριση και απόκριση σε πραγματικό χρόνο λειτουργιών, όπως η λήψη των ερεθισμάτων από τους αισθητήρες, η επεξεργασία και η δρομολόγηση των δεδομένων. Επιπλέον, πέρα από τη απαραίτητη εξοικονόμηση ενέργειας που πρέπει να εξασφαλίζει, απαίτηση από το ΛΣ είναι να μην εξαρτάται από το υλικό και να δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επέμβει με ευκολία στις παραμέτρους λειτουργίας και να τις μεταβάλλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Το πιο δημοφιλές στη χρήση λειτουργικό σύστημα είναι το TinyOS και ενσωματώνεται στις περισσότερες εμπορικές υλοποιήσεις mote [15]. Το TinyOS αποτελείται από αυτόνομα τμήματα κώδικα (components), τα οποία είναι γραμμένα σε NesC γλώσσα, μία επέκταση της C.

Τα τελευταία χρόνια, οι περισσότερες πλατφόρμες mote προσφέρονται από τις εταιρείες ανάπτυξης με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης, είτε του TinyOS, είτε του OS Contiki. Το Contiki [14] παρέχει δυνατότητα επικοινωνιών σε συστήματα χαμηλής ισχύος με τη χρήση των πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας, όπως τα 6LoWPAN, RPL και CoAP.

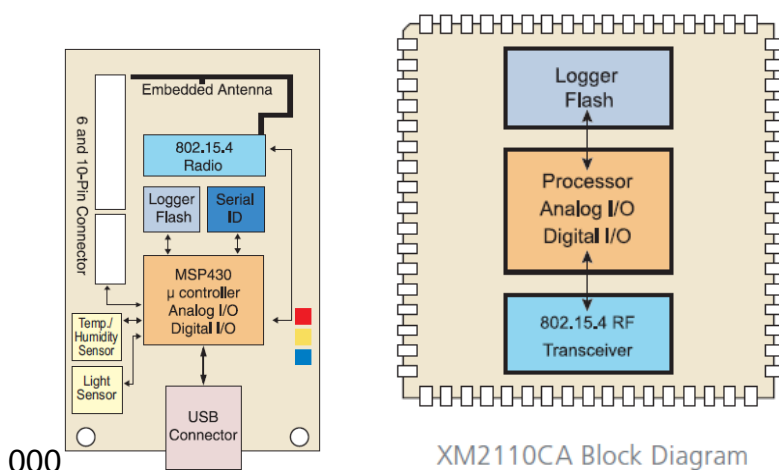
Άλλα ΛΣ είναι το MANTIS και το Nano Q-plus. Και τα δύο βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο, ενώ γίνονται προσπάθειες ενσωμάτωσης των δυνατοτήτων τους στο TinyOS [16, 13].

1.4.4 Επικοινωνίες

Η ανάπτυξη των WSN σε περιβάλλοντα χωρίς υποδομή (μεταβλητά περιβάλλοντα ή περιβάλλοντα ιδιαίτερης μορφολογίας) οδήγησε στην ενσωμάτωση της δυνατότητας ασύρματης επικοινωνίας και δικτύωσης.

Στα επίγεια δίκτυα ενσωματώθηκαν ώριμες τεχνολογίες, όπως το Bluetooth /Personal Area Network (PAN) και IEEE802.15.4/ZigBee. Η τακτική αυτή συνέβαλε στον περιορισμό του ρίσκου, στη συμβατότητα και τη χωρίς

κόστος εξάπλωση των εφαρμογών WSN. Από πλευράς υλικού, οι επικοινωνίες υλοποιούνται από ολοκληρωμένα κυκλώματα RF τεχνολογίας CMOS, είτε ανεξάρτητα πάνω στο board (όπως στα micaz, telos από τη MEMSIC) είτε ενσωματωμένα στο μικροελεγκτή της πλατφόρμας. (π.χ IRIS). Η επικρατούσα τάση είναι η δημιουργία SoC (System on Chip), η ολοκλήρωση δηλαδή όλων των διατάξεων σε ένα Chip, το οποίο εκτελεί όλες τις λειτουργίες του mote, ενώ περιορίζει τις καταναλώσεις (λιγότερες απώλειες). Η κεραία των πομποδεκτών τείνει επίσης να είναι ενσωματωμένη (τυπωμένη) στην πλακέτα του συστήματος, ενώ δίνεται η δυνατότητα για εξωτερική επέκταση. Τα κυκλώματα αυτά περιλαμβάνουν και τις διατάξεις διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης του σήματος. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις θα παρατεθούν στην ανάλυση των προτύπων επικοινωνίας σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 1.10 Block διαγράμματα των TelosB (αριστερά) και IRIS (δεξιά-SoC)

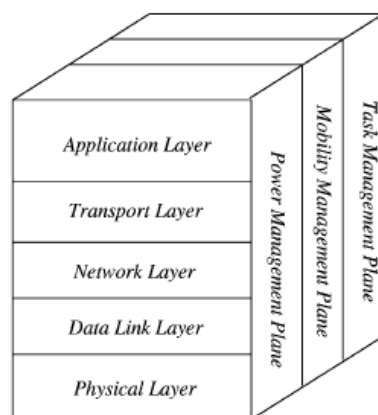
Για τα υποθαλάσσια δίκτυα, όπου αλλάζει το φυσικό μέσο, απαιτείται η ενσωμάτωση πολυπλοκότερων τεχνολογικών υλοποιήσεων. Σε υποθαλασσια περιβάλλοντα οι τυπικές επικοινωνίες είναι οι ακουστικές. Οι συσκευές που αξιοποιούνται είναι τα ακουστικά modems, που μετατρέπουν τα ηχητικά σήματα σε ηλεκτρικά και αντίστροφα. Ενσωματώνουν μορφομετατροπείς βασισμένους στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (πιεζοηλεκτρικούς κυλίνδρους). Περισσότερα σχετικά με τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι υποθαλάσσιες ακουστικές επικοινωνίες σε σχέση με τις επιφανειακές, τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό, αναφέρονται στο [43].

Επιλέον, η αραιή ανάπτυξη των κόμβων λόγω κόστους και άλλων περιορισμών (πλοϊμότητα πλοίων, εύκολος εντοπισμός των κόμβων) δεν συνάδει με την υιοθέτηση πρωτοκόλλων όπως το IEEE 802.15.4. Οι μεγάλες αποστάσεις (δεκάδων χιλιομέτρων) συνηγορούν στην υιοθέτηση δορυφορικών επικοινωνιών.

1.5 Αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN) - μοντέλο WSN

Η αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων βασίζεται στο μοντέλο αναφοράς OSI (μοντέλο αναφοράς ανοικτής διασύνδεσης συστημάτων – Open Systems Interconnection), γνωστό και ως μοντέλο επτά επιπέδων (φυσικό, ζεύξης και μετάδοσης δεδομένων, δικτύου, μεταφοράς, συνδιάλεξης, παρουσίασης και εφαρμογής) [18]. Το μοντέλο OSI αναπτύχθηκε μετά από πρόταση του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (International Standards Organization – ISO) με στόχο τη διεθνή τυποποίηση των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται στα επίπεδα σχεδίασης των δικτύων.

Τα επίπεδα του μοντέλου OSI υλοποιούν τη κατακόρυφη στήλη επιπέδων, τα οποία γειτνιάζουν και είναι αλληλοεξαρτώμενα. Κάθε επίπεδο αξιοποιεί τις λειτουργίες του κατώτερου του και ταυτόχρονα παρέχει λειτουργικότητα στο αμέσως ανώτερο του.



Σχήμα 1.12. Το μοντέλο αρχιτεκτονικής WSN

Σε ένα δίκτυο WSN δεν υλοποιούνται τα επίπεδα παρουσίασης και συνδιάλεξης και το μοντέλο που εφαρμόζεται περιλαμβάνει τα υπόλοιπα πέντε επίπεδα σχεδίασης καθώς και τρία διασταυρούμενα επίπεδα (cross layers/planes), όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 1.12.

Η ύπαρξη των διασταυρούμενων επιπέδων (cross layers) αποσκοπεί στη διαχείριση του δικτύου, ώστε οι αισθητήριοι κόμβοι να συνεργάζονται με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας και του χρόνου λειτουργίας του δικτύου. Όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.12 τα διασταυρούμενα επίπεδα είναι το επίπεδο διαχείρισης ενέργειας (power management plane), το επίπεδο διαχείρισης φορητότητας (mobility management plane) και το επίπεδο διαχείρισης λειτουργιών (task management plane).

Η λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων καθορίζεται από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που εφαρμόζονται σε καθένα από τα 5 επίπεδα του μοντέλου WSN και αποτελούν τη στοίβα πρωτοκόλλων (protocol stack) του δικτύου. Η εφαρμοζόμενη στοίβα πρωτοκόλλων επικοινωνίας πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτική και να υποστηρίζει τη συνεργασία μεγάλου πλήθους κόμβων.

Αναφορές 1ου Κεφαλαίου

- [1] Sohraby, K. , Minoli D. and Znati T. "*Wireless Sensor Networks Technology , Protocols and Applications*" Wiley 2007 , ISBN 978-0-471- 74300-2
- [2] Yick, J. , Biswanath M. and Dipak G. "Wireless Sensor Network Survey" Computer Networks Journal (Elsevier) 52 (2008) 2292-2330
- [3] Kumar S., "Wireless Sensor And Ad Hoc Networks Under Diversified Network Scenarios" , Artech House, 2012 ISBN: 978-1-60807-468-6
- [4] Shimon Y. Nof and Wootae J. "Handbook Of Automation, Automation Design: Theory Elements and Methods", Chapter 20, Springer 2009 ISBN 978-3-540- 78831-7
- [5] Gardner W. J., "Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές" , Τζιόλας 2000, ISBN 960-7219-93-7
- [6] Αβαριτσιώτης Ι. Ν. , "*Τεχνολογία Αισθητήρων και Μικροσυστημάτων*", Εκδόσεις ΕΜΠ 2011
- [7] <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/>
- [8] <http://www.ti.com>
- [9] Misra S., Woungang I. and Misra Sub., "*Guide to Wireless Sensor Networks*" Springer 2011 ISBN 978-1-84882-217-7
- [10] "*Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey*" Ad Hoc Networks (Elsevier) Volume 3, Issue 3, May 2005, Pages 281–323
- [11] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou "*Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks*", Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, Vol. 1, March 3 2005, pp. 89–124
- [12] Neira et al. "*Autonomous and remote controlled multi-parametric buoy for multi depth water sampling monitoring, data collection, transmission, and analysis*" Application Publication Pub. No.: US 2011/0009019 Pub. Date: Jan. 13, 2011
- [13] www.contiki-os.org
- [14] nescs.sourceforge.net/
- [15] www.TinyOS.net

- [16] Se. Park Jin, W. Kim , K.Y. Shin and D. Kim "A Nano Operating System for Wireless Sensor Networks" Advanced Communication Technology, 2006. ICACT 2006. The 8th International Conference (Volume:1)
- [17] James F. Kurose – Keith W. Ross, *Δικτύωση Υπολογιστών, Εκδόσεις Γκιούρδας*
- [18] Andrew S. Tanenbaum, *Δίκτυα Υπολογιστών, Εκδόσεις Κλειδάριθμος*
- [19] Ahmad Abed Alhameed Alkhatib, Gurvinder Singh Baicher, *Wireless Sensor Network Architecture, University of Wales Newport, City Campus, Usk Way, NP20 2BP, Newport, UK.*
- [20] F.L. Lewis, *Wireless Sensor Networks, University of Texas at Arlington.*
- [21] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, *Wireless Sensor Networks: a Survey, Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.*
- [22] Khushboo Pawar, Y. Kelkar, *A Survey of Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Network, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Volume 1, Issue 5, May 2012.*
- [23] Changshun Chen, *Design and Implementation of the Application Layer Communication Protocol Based on Wireless Sensor Network. College of Information Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou, China.*
- [24] Yogesh G. Iyer, Shashidhar Gandham, S. Venkatesan, *STCP: A Generic Transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks, Telecommunications Engineering Program, Dept. of Computer Science University of Texas at Dallas.*
- [25] Yangfan Zhou and Michael R. Lyu, Jiangchuan Liu, Hui Wang, *PORT: A Price-Oriented Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks, Department of Computer Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China.*
- [26] Chieh-Yih Wan, Andrew T. Campbell, Lakshman Krishnamurthy, *PSFQ: A Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks, Dept. of Electrical Engineering, Columbia University, New York.*

- [27] Seung-Jong Park, Ramanuja Vedantham, Raghupathy Sivakumar, Ian F. Akyildiz, *GARUDA: Achieving Effective Reliability for Downstream Communication in Wireless Sensor Networks*, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 7, No2, Feb 2008.
- [28] Vehbi C. Gungor, Ozgur B. Akan, *DST: Delay Sensitive Transport in Wireless Sensor Networks*, *School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, Department of Electrical and Electronics Engineering Middle East Technical University, Ankara, Turkey*.
- [29] Yogesh Sankarasubramaniam Özgür B. Akan Ian F. Akyildiz, *ESRT: Event-to- Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks*, *Broadband & Wireless Networking Laboratory, School of Electrical & Computer Engineering, Georgia Institute of Technology*.
- [30] Chieh-Yih Wan, Shane B. Eisenman, Andrew T. Campbell, *CODA: Congestion Detection and Avoidance in Sensor Networks*, *Dept. of Electrical Engineering Columbia University, New York*.
- [31] Al-Sakib Khan Pathan, Hyung-Woo Lee, *Security in Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges Choong Seon Hong*, *Department of Computer Engg. Kyung Hee University, Korea*.
- [32] Jamal N. Al-Karaki Ahmed E. Kamal, *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*, *Dept. of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa*.
- [33] Rajashree.V.Biradar, V.C.Patil, Dr. S. R. Sawant, Dr. R. R. Mudholkar, *Classification and Comparison of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks*, *Department of Information Science and Engineering, Ballari Institute of Technology and Management*.
- [34] Ahmad Abed Alhameed Alkhatib, Gurvinder Singh Baicher, *MAC Layer Overview for Wireless Sensor Networks University of Wales Newport, City Campus, Usk Way, Newport, U.K*
- [35] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagöz, *MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey*
- [36] Lizhi Charlie Zhong, Jan Rabaey, Chunlong Guo, Rahul Shah, *Data Link Layer Design for Wireless Sensor Networks, Berkeley Wireless*

Research Center, Department of EECS, University of California at Berkeley

- [37] Jaein Jeong, Cheng-Tien Ee, *Forward Error Correction in Sensor Networks, EECS Department, University of California, Berkeley, California, USA*
- [38] Bhaskar Bhuyan, Hiren Kumar Deva Sarma, Nityananda Sarma, Avijit Kar, Rajib Mall "Quality of Service (QoS) Provisions in Wireless Sensor Networks and Related Challenges"
- [39] <http://mantisos.org/index/tiki-index.php.html>
- [43] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili and Tommaso Melodia "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges" Elsevier Ad Hoc Networks 3 (2005) 257–279

Κεφάλαιο 2ο

Εφαρμογές WSN στην παρακολούθηση - επιτήρηση περιοχής

2.1 Γενικά για τις εφαρμογές των WSN

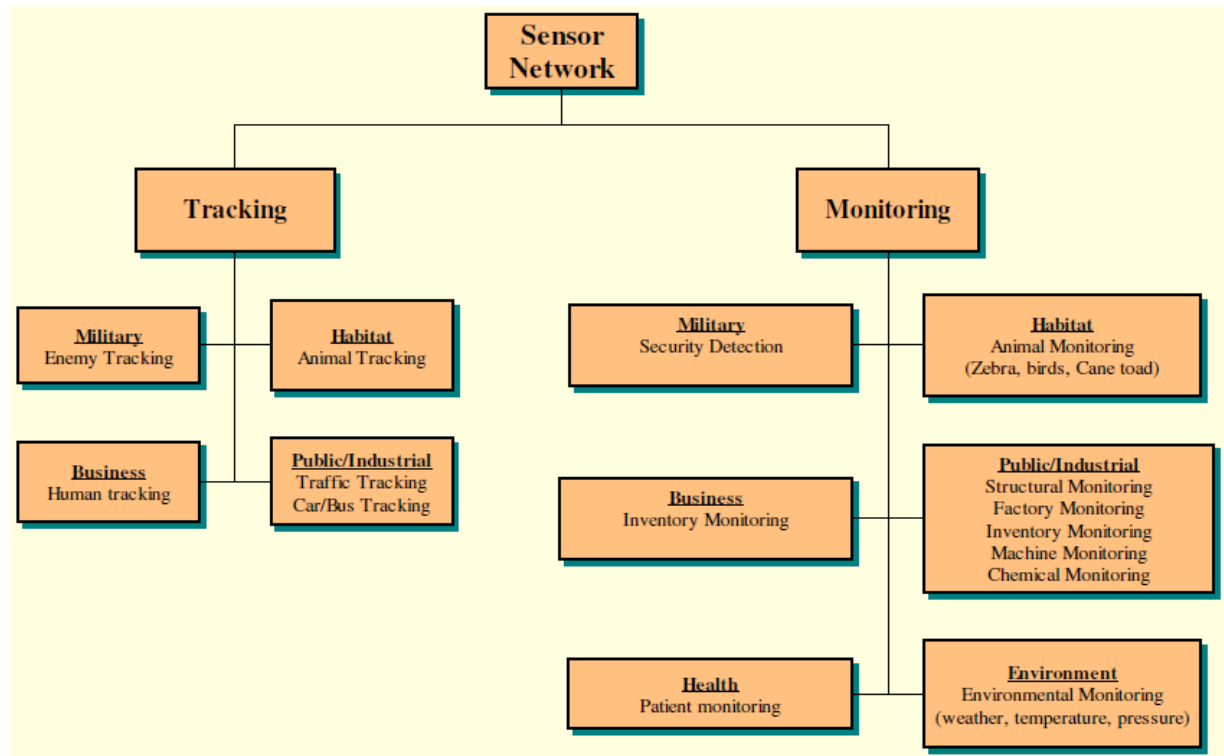
Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των WSN είναι η γεφύρωση του χάσματος ανάμεσα στον φυσικό και τον ψηφιακό κόσμο, με το να συλλέγουν χρήσιμες πληροφορίες και να τις προωθούν σε πιο ισχυρές υπολογιστικά συσκευές που μπορούν τις επεξεργαστούν. Τα WSN σταδιακά είναι δυνατό να εξαλείψουν την ανάγκη για ανθρώπινη παρουσία και παρέμβαση σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η συλλογή πληροφοριών σε περιβάλλοντα εξαιρετικά δυσμενή ή απρόσιτα για τον άνθρωπο.

Οι εφαρμογές των WSN στην καθημερινότητα είναι ποικίλες. Από την μελέτη και καταγραφή παραμέτρων του περιβάλλοντος [1], την ανίχνευση και την παρακολούθηση οντοτήτων [2] ή αντικειμένων, την υγεία (παρακολούθηση βιομετρικών στοιχείων και έγκαιρη προειδοποίηση) [3,7], την χρήση για εφαρμογή εστιασμένων μεθόδων στη γεωργία [8], μέχρι την καταγραφή και παρακολούθηση αποθεμάτων και γενικότερα οικονομικών μεγεθών [4]. Επίσης έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στην αξιοποίηση των WSN για πρόληψη φυσικών καταστροφών [5], αλλά και διαχείριση των συνεπειών τους (εύρεση επιζώντων, διαχείριση πληροφοριών και ανθρώπινου δυναμικού), όπως το DistressNet που προτείνεται στο [6]. Σημαντικό τμήμα του συνόλου των εφαρμογών αντιπροσωπεύουν οι εφαρμογές για την εθνική ασφάλεια. Οι εφαρμογές αυτές επικεντρώνονται στην διαχείριση πληροφοριών, πόρων και ανθρωπίνου δυναμικού στο θέατρο των στρατιωτικών επιχειρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Το πλήθος των εφαρμογών WSN μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με το [9] σε δύο μεγάλες ομάδες εφαρμογών:

- Εφαρμογές ανίχνευσης (tracking)
- Εφαρμογές παρακολούθησης - καταγραφής (monitoring)

Στον πίνακα 2.1 παρατίθεται ένα διάγραμμα στο οποίο αναγράφονται οι διάφορες εφαρμογές WSN, ακολουθώντας τη κατηγοριοποίηση που αναφέρθηκε προηγουμένως.



Πίνακας 2.1 Κατηγορίες εφαρμογών WSN

2.2 Εφαρμογές επιτήρησης περιοχής

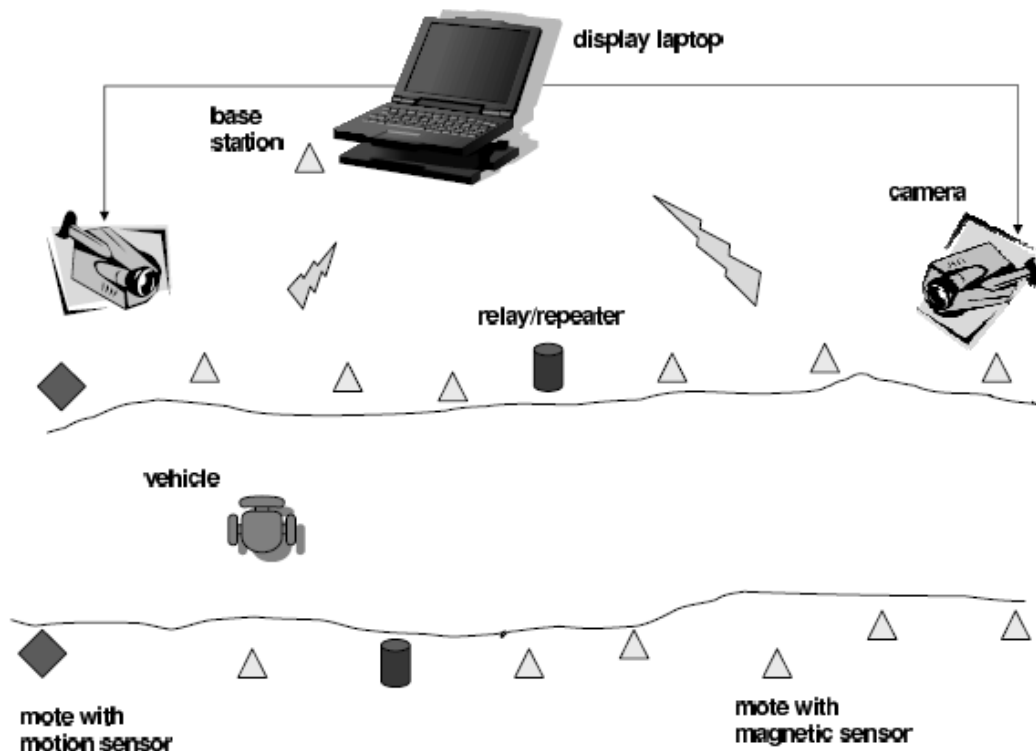
Με την εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής και την παραγωγή σε ευρεία κλίμακα και με μικρό κόστος ολοκληρωμένων συστημάτων κόμβων (mote + μικροαισθητήρες) υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον για χρήση των WSN για στρατιωτικές εφαρμογές (εθνικής ασφάλειας) και ιδιαίτερα στην προστασία των συνόρων. Στις εφαρμογές που έχουν προταθεί από ερευνητικές ομάδες γίνεται χρήση αισθητήρων δόνησης (σεισμικοί), υπερύθρων (IR), συσκευών καταγραφής video (θερμικές ή μη), ανιχνευτών κίνησης και ακουστικών για τη συλλογή πληροφοριών. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται η παράθεση των πιο σημαντικών από τις εφαρμογές επιτήρησης συνόρων και των κύριων παραμέτρων τους.

2.2.1 Σύστημα παρακολούθησης χαμηλής κατανάλωσης με WSN.

Στην περίπτωση που αναφέρεται στο [10], γίνεται χρήση motes τύπου MICA2, τα οποία διατάσσονται κατά μήκος μιας στενωπού ή περάσματος, όπου γίνεται χρήση αισθητήρων μαγνητικών, ακουστικών, φωτός και σε δεύτερο επίπεδο καμερών. Σκοπός είναι η ανίχνευση οχημάτων διερχόμενων από το πέρασμα και η αποστολή έγκαιρης προειδοποίησης σε ένα σταθμό διοίκησης και ελέγχου. Σημαντική παράμετρος είναι η απαίτηση για αποφυγή εντοπισμού των αισθητήρων από εχθρικά στοιχεία. Από φυσικής πλευράς επιτυγχάνεται εύκολα η απόκρυψη των motes λόγω του μικροσκοπικού τους μεγέθους. Για αποφυγή εντοπισμού των κόμβων μέσω των ραδιοεκπομπών τους, ρυθμίζονται για εκπομπή σε χαμηλά επίπεδα ισχύος (255 διαφορετικές διαβαθμίσεις) μέσω των δυνατοτήτων που παρέχονται από τα ολοκληρωμένα των ραδιοπομπών που φέρουν τα MICA2. Άλλη σχεδιαστική απαίτηση είναι η αυξημένη διάρκεια ζωής, καθώς το WSN μπορεί να μην είναι προσεγγίσιμο μετά την ανάπτυξη του για ανανέωση της τροφοδοσίας των κόμβων. Επίσης έμφαση δίνεται στη ρυθμιζόμενη ευαισθησία των αισθητήρων για αποφυγή ψευδών συναγερμών και στην επίτευξη ακρίβειας και άμεσης ανταπόκρισης.

Για επικοινωνία του WSN με τον σταθμό διοίκησης, οποίος σε πραγματικές συνθήκες βρίσκεται μακριά από τη περιοχή ανάπτυξης, χρησιμοποιούνται κόμβοι αναμεταδότες (relay nodes). Σαν σταθμός βάσης χρησιμοποιείται ένα από τα motes, το οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα φορητό υπολογιστή, μέσω του οποίου σε δεύτερο χρόνο γίνεται χειρισμός των καμερών για παροχή ποιοτικών πληροφοριών (φίλιο ή εχθρικό όχημα κ.τ.λ.). Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται αποκλειστικά στα motes είναι ο μαγνητικός, ο οποίος ανιχνεύει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τα κινούμενα οχήματα και τα μαγνητικά υλικά (όπλα, μεταλλικά αντικείμενα κ.τ.λ.).

Στο σχήμα 2.2 , στην αρχή της στενωπού υπάρχουν και motes με ανιχνευτές κίνησης. Τοποθετούνται ως κόμβοι φύλακες (sentry nodes) που θα αφυπνίσουν το δίκτυο σε περίπτωση ανίχνευσης κίνησης.



Σχήμα 2.1. Απεικόνιση βασικών στοιχείων του συστήματος της 2.2.1

Τα καινοτόμα χαρακτηριστικά που εισάγει το σύστημα είναι οι σχεδιαστικές παρεμβάσεις που έγιναν σε λογισμικό αλλά και σε υλικό ώστε να έχει:

- ελάχιστη κατανάλωση της ενέργειας
- ικανοποιητική αποτελεσματικότητα ανίχνευσης

ενώ τα εργαστηριακά δεδομένα που προέκυψαν δοκιμάστηκαν και στο πεδίο.

Ο στόχος της ενεργειακής αποδοτικότητας υλοποιήθηκε με την ενσωμάτωση της μεθόδου με sentry motes (sentry component στο σύστημα). Τα sentry motes επιλέγονται σύμφωνα με έναν αλγόριθμο από το ίδιο το σύστημα (υπάρχοντα motes του WSN) στη φάση αρχικοποίησης και αυτό-οργάνωσης του. Τα sentry motes είναι λίγες συσκευές που παραμένουν ενεργοποιημένες και αναλαμβάνουν να ενεργοποιήσουν τις σε ύπνωση γειτονικές συσκευές λειτουργώντας ως "φάροι αφύπνισης" (awake beacons) σε περίπτωση συμβάντος.

Η αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης επιτυγχάνεται με τον σχηματισμό ομάδων (groups) από κόμβους. Κάθε κόμβος που αισθάνεται ένα

συμβάν επικοινωνεί με τους διπλανούς κόμβους στους οποίους έγινε επίσης αντιληπτό και σχηματίζουν μία ομάδα. Η ομάδα επιλέγει έναν κόμβο επικεφαλής, ο οποίος συγκεντρώνει αναφορές (reports) από τα motes της ομάδας. Αν σε ένα χρονικό διάστημα t_r , το οποίο στο [10] αναφέρεται ως "κατώφλι πεποίθησης", δεν έχει συγκεντρωθεί συγκεκριμένος αριθμός αναφορών από τα motes της ομάδας (δεν έχει ανιχνευτεί από αρκετά motes το συμβάν) απορρίπτεται το συμβάν ως ψευδής συναγερμός. Το κατώφλι t_r είναι το εργαλείο ρύθμισης της ευαισθησίας του συστήματος.

Πέρα από τη σχεδιαστική φιλοσοφία για ανίχνευση και εξοικονόμηση ενέργειας που είναι ενδεικτική της φιλοσοφίας που πρέπει να υιοθετούν συστήματα παρόμοιου σκοπού, πολλά από τα λοιπά χαρακτηριστικά του συστήματος "χτίστηκαν" γύρω από το περιορισμένα χαρακτηριστικά του hardware του MICA2 mote (μη ενσωματωμένη κεραία, περιορισμένος ρυθμός μετάδοσης πακέτων και μνήμη συστήματος). Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν ξεπεραστεί από τα σύγχρονα motes.

2.2.2 Σύστημα VigilNet

Στο VigilNet [11] χρησιμοποιούνται τα συμπεράσματα και οι τεχνικές που προέκυψαν από το σύστημα της παραγράφου 2.2.1 και δίνεται έμφαση σε δύο σημεία:

- Την εφαρμογή σε μεγαλύτερη κλίμακα (μέχρι και 10.000 κόμβους για περιοχές της τάξης των km^2).
- Την διασφάλιση της ανίχνευσης και του εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο.

Όπως αναφέρθηκε, οι τεχνικές ενεργειακής διαχείρισης με τα sentry motes και εντοπισμού με την μέθοδο των ομάδων (group) motes του συστήματος στην 2.2.1. υιοθετούνται και στο σύστημα VigilNet. Η απαίτηση για ανίχνευση, κατηγοριοποίηση και ανάλυση των εισερχόμενων στο πεδίο στόχων σε πραγματικό χρόνο γίνεται με τη χρήση της μεθόδου "deadline partition". Με τη μέθοδο αυτή η καθυστέρηση που προκύπτει από την αρχή της ανίχνευσης ενός στόχου μέχρι την επεξεργασία του από τον σταθμό βάσης κατανέμεται σε κάθε φάση λειτουργίας του δικτύου. Μέσω της μελέτης

κάθε φάσης προσδιορίζονται εκείνες οι παράμετροι που ελαχιστοποιούν την επιμέρους καθυστέρηση. Τέτοιες παράμετροι είναι ο κύκλος λειτουργίας των sentry motes (SDC), η πυκνότητα των κόμβων (D) και ο βαθμός συγκέντρωσης αναφορών (DOA) που σχετίζεται με το "κατώφλι πεποίθησης" t_r , που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1. Οι παράμετροι αυτοί ρυθμίζονται από τον χρήστη για επίτευξη λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τους περιορισμούς που θέτει η εφαρμογή.

Στην εφαρμογή αυτή πραγματοποιείται δοκιμή στο πεδίο με χρήση 200 XSM (Extreme Scale Motes) [11,12]. Τα XSM είναι πλατφόρμες τα οποία έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές παρακολούθησης-ανίχνευσης και περιλαμβάνουν mote (όμοιο με το MICA2) και πακέτο αισθητήρων, μέσα σε



στεγανό περίβλημα για χρήση σε περιβάλλοντα με αντίξοες καιρικές συνθήκες. Τα XSM φέρουν αισθητήρα Μαγνητικό, Ακουστικό και Υπερύθρων, ώστε να καλύψουν ανάγκες εφαρμογών για ανίχνευση προσωπικού και οχημάτων. Πρόκειται για ιδιαίτερα στιβαρές κατασκευές με ικανοποιητική εμβέλεια και ικανότητες ανίχνευσης.

Σχήμα 2.2 XSM

2.2.3 Μοντέλο "A Line in the Sand"

Η ανίχνευση, ταξινόμηση και παρακολούθηση στόχων αποτελεί κυρίαρχη στρατιωτική εφαρμογή, στην οποία επικεντρώνεται το μοντέλο "A line in the sand" [20]. Συγκεκριμένα, το μοντέλο ασχολείται με τη ταυτοποίηση παραβιάσεων μιας κρίσιμης περιοχής είτε από οχήματα είτε από ένοπλα ή άοπλα άτομα. Το σύστημα που περιγράφεται στο μοντέλο, αποτελείται από μεγάλο αριθμό αισθητήριων κόμβων, με σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους περιορισμούς σε ενέργεια, επεξεργαστικές δυνατότητες και μνήμη. Η εμβέλεια των κόμβων είναι περιορισμένη, γεγονός που δεν επιτρέπει την επικοινωνία κόμβων και σταθμού βάσης με ένα άλμα. Το μοντέλο δεν εξετάζει θέματα

κάλυψης της περιοχής, θεωρώντας ότι η πυκνότητα των κόμβων είναι τέτοια ώστε να την καλύπτει με αξιόπιστο τρόπο.

Οι απαιτήσεις του μοντέλου σε συγκεκριασμό με τους περιοριστικούς παράγοντες του μοντέλου (σε θέματα αξιοπιστίας, κατανάλωση ενέργειας, πολυπλοκότητας) αφορούν στην ανίχνευση, ταξινόμηση και παρακολούθηση πιθανών στόχων, όπως περιγράφεται παρακάτω:

(α) *Ανίχνευση*: Κρίσιμο κριτήριο επίτευξης της απαίτησης ανίχνευσης στόχων είναι ο επιτυχής διαχωρισμός των καταστάσεων ύπαρξης ή μη στόχου. Ο διαχωρισμός αυτός είναι συνυφασμένος με το καθορισμό κατάλληλων πιθανοτήτων ανίχνευσης (P_D) και εσφαλμένου συναγερμού (P_{FA}), καθώς και της χρονικής καθυστέρησης (T_D) μεταξύ της εμφάνισης του στόχου και της ενδεχόμενης ανίχνευσης του. Η ιδανική σχεδίαση καθοδηγεί τους κόμβους του δικτύου στην ανίχνευση πραγματικών στόχων σε πραγματικό χρόνο και στην απόρριψη εσφαλμένων συναγερμών. Σύμφωνα με το μοντέλο απαιτείται πιθανότητα ανίχνευσης μεγαλύτερη από 95%, πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού μικρότερη από 10% και μέγιστη καθυστέρηση ανίχνευσης 15 sec.

Η ανίχνευση της πιθανής παραβίασης της περιοχής είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επιλογή χρησιμοποιούμενου αισθητήρα. Το μοντέλο “A Line in the Sand” χρησιμοποιεί συνδυασμό μαγνητικών αισθητήρων και αισθητήρων ραντάρ. Ο μαγνητικός αισθητήρας είναι μια διάταξη παθητικής λειτουργίας (ο αισθητήρας δεν εκπέμπει σήμα), δεν απαιτεί line-of-sight (LOS) σύνδεση, παρέχει διάκριση μεταλλικών αντικειμένων, και εμφανίζει το μειονέκτημα της μικρής εμβέλειας λειτουργίας. Ο αισθητήρας ραντάρ είναι διάταξη ενεργητικής λειτουργίας (ο αισθητήρας εκπέμπει σήμα), δεν απαιτεί line-of-sight (LOS) σύνδεση, παρέχει υπολογισμό ταχύτητας, και εμφανίζει το μειονέκτημα των παρεμβολών μεταξύ των αισθητήρων. Η λειτουργία των δύο τύπων αισθητήριων οργάνων είναι συμπληρωματική. Το μαγνητικό αισθητήριο όργανο δεν θα ανιχνεύσει άτομα που δεν φέρουν μεταλλικό εξοπλισμό, τα οποία θα ανιχνευθούν από το αισθητήρα ραντάρ. Με τον τρόπο αυτό γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των ατόμων που φέρουν μεταλλικό εξοπλισμό (και πιθανώς οπλισμό) και των ατόμων που δεν φέρουν. Επίσης ο διαχωρισμός οχημάτων από προσωπικό γίνεται με τη διαστασιολόγηση των

επιπτώσεων που έχει η παρουσία του στους αισθητήρες (μεγαλύτερο εύρος εντοπισμού οχήματος και πιθανώς μη ρεαλιστική ταχύτητα για πεζοπόρο προσωπικό). Τέλος, η χρήση αισθητήρων ραντάρ καλύπτει την αδυναμία μικρής εμβέλειας των μαγνητικών αισθητήρων.

(β) *Ταξινόμηση*: Η ταξινόμηση βασίζεται στο καθορισμό ετικετών ενδεχόμενων στόχων (P:άοπλος ή S:ένοπλος πεζός, V:όχημα). Οι ετικέτες καθορίζονται με βάση χαρακτηριστικά που εντοπίζονται στο λαμβανόμενο από το στόχο σήμα, τα οποία είναι το πλάτος, η φάση, η διάρκεια, η φασματική πυκνότητα ισχύος κ.α. Η επιτυχής ταξινόμηση ενός στόχου καθορίζεται από το κατά πόσο ταυτίζεται η ετικέτα που του παρέχεται από το δίκτυο με το είδος στόχου, στο οποίο ανήκει στην πραγματικότητα. Η απαίτηση ταξινόμησης είναι συνδεδεμένη με δύο πιθανότητες: τη πιθανότητα σωστής ταξινόμησης ($P_{c,i,j/i=j}$), και τη πιθανότητα εσφαλμένης ταξινόμησης ($P_{c,i,j/i \neq j}$). Ο δείκτης i δείχνει την ετικέτα που παρέχεται στο στόχο, ενώ ο δείκτης j την ετικέτα στην οποία πραγματικά ανήκει ο στόχος. Στο Πίνακα 2.2 απεικονίζονται οι απαιτήσεις ταξινόμησης.

	Person	Soldier	Vehicle
Person	$P_{C_{P,P}} > 90\%$	$P_{C_{P,S}} < 9\%$	$P_{C_{P,V}} < 1\%$
Soldier	$P_{C_{S,P}} < 1\%$	$P_{C_{S,S}} > 95\%$	$P_{C_{S,V}} < 4\%$
Vehicle	$P_{C_{V,P}} = 0\%$	$P_{C_{V,S}} < 1\%$	$P_{C_{V,V}} > 99\%$

Πίνακας 2.2. Απαιτήσεις ταξινόμησης

(γ) *Παρακολούθηση*: Η παρακολούθηση αφορά στη συνεχή πληροφόρηση της θέσης του στόχου, καθώς αυτή εξελίσσεται χρονικά λόγω πιθανών μετακινήσεων του. Κλειδί για την επίτευξη παρακολούθησης του στόχου είναι σε πρώτη φάση ο επιτυχής υπολογισμός της αρχικής θέσης, και στη συνέχεια ο συνεχής υπολογισμός των θέσεων σε επόμενες χρονικές στιγμές με ακρίβεια και σε χρόνο εντός των ορίων που καθορίζει ο χρόνος καθυστέρησης ανίχνευσης T_D (target localization). Η ακρίβεια που προσφέρει το μοντέλο αφορά σε μέγιστη απόσταση σημείου ανίχνευσης και πραγματικής απόστασης στόχου, καλούμενο ως μέγιστο σφάλμα υπολογισμού, το οποίο στο οριζόντιο επίπεδο είναι $\pm 2.5m$. Επιπλέον απαιτήσεις που έχουν να κάνουν με τη παρακολούθηση ενός πιθανού στόχου έχουν να κάνουν με τα

αναμενόμενα μεγέθη κινητικότητας ανά ταξινόμηση εισβολέων (ταχύτητα, επιτάχυνση, περιστροφή), τα οποία ακολουθούν στατιστικές κατανομές όπως απεικονίζεται στο Πίνακα 2.3 (μοντέλα κινητικότητας στόχων). Τα μεγέθη V_{max} και V_{min} καταδεικνύουν την απαραίτητη ταχύτητα για τον υπολογισμό επιταχύνσεων, και την απαραίτητη ταχύτητα για τη παρακολούθηση συνεχούς τροχιάς αντίστοιχα.

Constraint	Value	Description
V_{max}	25	Maximum Velocity (kmph)
V_{min}	1	Minimum Velocity (kmph)
V_P	$\sim \mathcal{N}(5, 1)$	Person Speed (kmph)
A_P	$\sim \mathcal{U}[-1, 1]$	Person Acceleration (m/s^2)
θ_P	$\sim \mathcal{N}(0, 1)$	Person Bearing (rad)
V_S	$\sim \mathcal{U}[1, 20]$	Soldier Speed (kmph)
A_S	$\sim \mathcal{U}[-3, 3]$	Soldier Acceleration (m/s^2)
θ_S	$\sim \mathcal{N}(0, 2)$	Soldier Bearing (rad)
V_V	$\sim \mathcal{U}[1, 25]$	Vehicle Speed (kmph)
A_V	$\sim \mathcal{U}[-5, 5]$	Vehicle Acceleration (m/s^2)
θ_V	$\sim \mathcal{N}(0, 0.25)$	Vehicle Bearing (rad)

Πίνακας 2.3. Μοντέλα κινητικότητας στόχων

Στο [20] υλοποιείται το μοντέλο “A line in the sand” σε ορθογώνια έκταση 60x25 πόδια με χρήση 78 μαγνητικών αισθητήρων τύπου Mica2 και 12 αισθητήρων ραντάρ τύπου TWR-ISM-002.

2.2.4 Μοντέλο FleGSens

Το μοντέλο FleGSens αποσκοπεί στην ανίχνευση παραβιάσεων μιας εδαφικής έκτασης με χρήση δικτύου WSN, οι οποίες είναι πιθανό να συνοδεύονται από κακόβουλες παρεμβάσεις. Εξαιτίας των περιορισμών του δικτύου WSN σε θέματα ενέργειας, επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων, το δίκτυο είναι επιρρεπές σε επιθέσεις και είναι επιτακτική η εξέταση ζητημάτων ασφαλείας. Οι επιθέσεις αυτές στοχεύουν σε (α) αποτροπή ή καθυστέρηση έναρξης συναγερμού από τους αισθητήριους κόμβους, (β) έλεγχο διακινούμενων στο δίκτυο μηνυμάτων και (δ) απόκρυψη σφαλμάτων των αισθητήριων κόμβων.

Προς τη κατεύθυνση εξασφάλισης ασφάλειας επικοινωνίας, το μοντέλο περιλαμβάνει σχετικούς μηχανισμούς. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί αποσκοπούν στην εξασφάλιση ακεραιότητας και γνησιότητας των παραγόμενων από τους αισθητήριους κόμβους συναγερμών. Επιπλέον, το μοντέλο είναι ανεκτικό σε επιθέσεις καθώς παρέχει υπηρεσία επιτήρησης της περιοχής ακόμα και με παρουσία κακόβουλων παρεμβάσεων.

Για την επίτευξη των στόχων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το μοντέλο FleGSens χρησιμοποιεί πρωτόκολλα σχεδιασμένα για αντιμετώπιση ισχυρής παρουσίας κακόβουλων παρεμβάσεων σε έναν αριθμό κόμβων, αξιοποιώντας λειτουργίες κρυπτογράφησης και κώδικες μηνυμάτων πιστοποίησης (MACs). Συγκεκριμένα το μοντέλο χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα ανίχνευσης παραβίασης και ανίχνευσης σφάλματος κόμβου, όπως αυτά αναλύονται στο [21].

Στο [21] παρουσιάζεται η προσομοίωση των παραπάνω πρωτοκόλλων με χρήση του προσομοιωτή δικτύου Shawn [22], και παρουσιάζεται πειραματική εφαρμογή, η οποία περιλαμβάνει 200 κόμβους για την επιτήρηση εδαφικής λωρίδας μήκους 500 m.

2.2.5 Εφαρμογή Bordersense

Η εφαρμογή Bordesense [13] που προτείνεται από την ομάδα του καθηγητή Akyildiz, αποτελεί μια εστιασμένη και ώριμη προσέγγιση πάνω στο θέμα της προστασίας και επιτήρησης των συνόρων. Στην εφαρμογή προτείνεται ο συνδυασμός διαφορετικών ειδών αισθητήριων μέσων (κινητά, προτοποθετημένα) με την εξής ιεράρχηση αποστολών για κάθε επίπεδο αισθητήρων:

- Αρχικός εντοπισμός
- Εξακρίβωση απειλής
- Παρακολούθηση και περιορισμός του στόχου

Η Bordersense προτείνει ένα σύστημα δομημένο σε τρία επίπεδα ως εξής:

α. Ένα δίκτυο σεισμικών ασύρματων αισθητήρων είτε υπέργειων (WSN) είτε υπόγειων (UWSN) με σαφή μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα στη κάθε περίπτωση:

1/ Στα UWSN υφίσταται διαφορετικός τρόπος διάδοσης λόγω του εδάφους όπως επισημαίνεται στα [14,15,17]. Η διάδοση δεν γίνεται πλέον στον αέρα, αλλά σε μέσο το οποίο αποτελείται από γαιώδες ή βραχώδες έδαφος και νερό. Κατά συνέπεια τα μοντέλα διάδοσης και απωλειών μεταβάλλονται, επηρεάζοντας την εκτίμηση για την κάλυψη [16]. Επίσης η υπόγεια τοποθέτηση των αισθητήρων δυσχεραίνει την φόρτιση, συντήρηση ή αντικατάσταση των motes του δικτύου από τη στιγμή που λειτουργούν με περιορισμένη τροφοδοσία και κάτω από δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Η εταιρεία Trident προσφέρει ένα ολοκληρωμένο προϊόν UWSN με δυνατότητες προσομοίωσης και οπτικής απεικόνισης [18] μέσω software που παρέχεται μαζί με τους αισθητήρες.

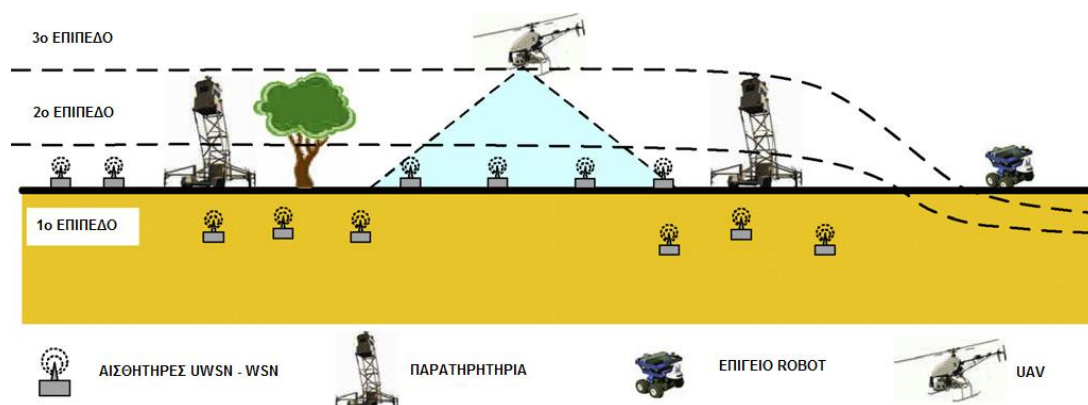
2/ Στα υπέργεια WSN, αίρονται αυτές οι δυσκολίες αλλά για τον ίδιο τύπο αισθητήρα (σεισμικό) μειώνεται η εμβέλεια και η ευαισθησία ανίχνευσης.

Τελικά επιλέγεται για την εφαρμογή η χρήση των υπόγειων αισθητήρων, οι οποίοι παρέχουν δυνατότητα ανίχνευσης δονήσεων και μαγνητικών ανωμαλιών (που αντιστοιχούν σε ανθρώπους και οχήματα που διασχίζουν την περιοχή ενδιαφέροντος) με μέγιστη εμβέλεια 50m και 500m αντίστοιχα. Παρά την αποτελεσματικότητα του UWSN στην ανίχνευση, δεν προσφέρει κατηγοριοποίηση της απειλής, η οποία πραγματοποιείται στο επόμενο επίπεδο.

β. Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων Πολυμέσων (WMSN) [18,19], το οποίο αποτελείται από κόμβους πολυμέσων τοποθετημένους μόνιμα σε παρατηρητήρια (όμοια με αυτά που επανδρώνονται από τα ελληνικά φυλάκια στην συνοριακή γραμμή), οι οποίοι χρησιμοποιούν κάμερες σαν κύριο μέσο παρακολούθησης. Οι κόμβοι αυτοί έχουν μεγάλη εμβέλεια και επιτελούν ρόλο επικεφαλής ομάδων κόμβων (cluster heads) καθώς έχουν μεγαλύτερες επεξεργαστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες. Η ανίχνευση ενός πιθανού εισβολέα από το πρώτο επίπεδο αισθητήρων (UWSN) αφυπνίζει το WMSN, το οποίο εστιάζει στη περιοχή που σημειώθηκε η παραβίαση. Η ταυτοποίηση μπορεί να γίνει είτε από προσωπικό τοπικά είτε

μέσω ειδικών αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας τοπικά στους WMSN κόμβους ή σε κάποιο απομακρυσμένο server. Με το τέλος της κατηγοριοποίησης δίνεται εντολή στο τρίτο επίπεδο για παρακολούθηση και περιορισμό του στόχου.

γ. Ένα δίκτυο κινητών motes (με τη μορφή drones ή UAV ή ground-robots) με δυνατότητες παρακολούθησης του στόχου ακόμα και όταν βγει από την στενή λωρίδα εδάφους που παρακολουθείται. Τα στοιχεία που προκύπτουν από τα πρώτα επίπεδα θα μπορούσαν να διαβιβαστούν σε οποιοδήποτε φορητό ή σταθερό σύστημα το οποίο θα αποτελούσε εργαλείο εντοπισμού του στόχου στη διάθεση μιας π.χ. εποχούμενης περιπόλου.



Σχήμα 2.3. Επίπεδα συστήματος Bordersense

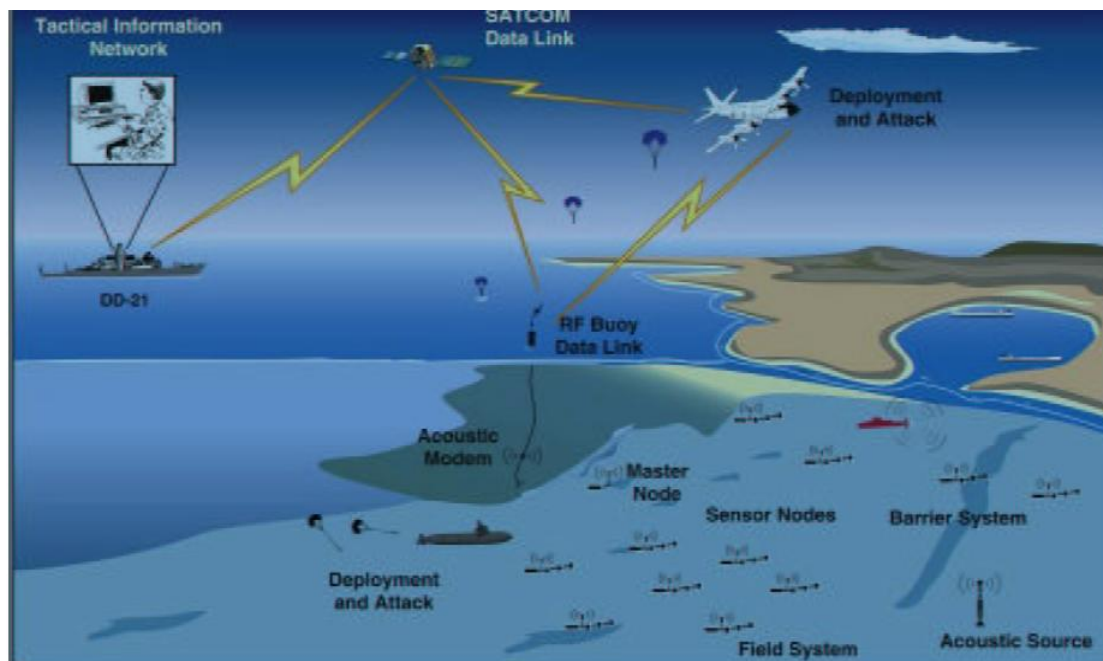
Επισημαίνεται για το σύστημα ότι η αξιοπιστία και το χαμηλό ποσοστό ψευδών συναγερμών προκύπτει από τον συνδυασμό και την επικάλυψη των υπηρεσιών που προσφέρει κάθε επίπεδο κι όχι μεμονωμένα.

2.2.6 Εφαρμογες θαλάσσιας επιτήρησης.

2.2.6.1 Εφαρμογή FRONT.

Η εφαρμογή FRONT [23] αφορά σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε από το πολεμικό ναυτικό των ΗΠΑ για τη παρακολούθηση θαλάσσιων περιοχών (επιφάνεια, βυθό και ενδιάμεσο υδάτινο όγκο). Η παρακολούθηση επιτυγχάνεται μέσω του δικτύου seaweb. Το δίκτυο seaweb (σχήμα 2.4) αφορά WSN μεγάλης κλίμακας (κάλυψη εκτάσεων 100-

10000km²), κάνοντας χρήση διατάξεων sonar- modems (telesonar) για την υλοποίηση του δικτύου.



Σχήμα 2.4 δίκτυο seaweb

Η δομή του συστήματος περιλαμβάνει:

- Βυθιζόμενους αυτόνομους κόμβους DADS (σχήμα 2.5), που είναι οι πλατφόρμες αισθητήρων του συστήματος. Είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να αντέχουν σε διανομή από αεροσκάφη και την αυξημένη υπό-επιφανειακή πίεση. Περιλαμβάνουν ακουστικούς, μαγνητικούς και ηλεκτρικούς αισθητήρες. Οι πληροφορίες που συλλέγονται, υφίστανται επεξεργασία τοπικά σε μεγάλο βαθμό. Έχουν δυνατότητα επικοινωνίας με τη βοήθεια telesonar μεταξύ τους και με πλωτήρες racom.
- Ράδιο-ακουστικούς κόμβους gateways (racom) (σχήμα 2.5) με δυνατότητα επικοινωνίας με κινητούς sink nodes (π.χ. υποβρύχια, πλοία επιφάνειας) ή δορυφορικά με σταθμούς επί του εδάφους.
- Σταθμούς όπως ο FRONT (front-resolving oceanographic network with telemetry), όπου γίνεται η ανάλυση των δεδομένων και ο έλεγχος του δικτύου.

Όπως φαίνεται από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που αποτελούν το δίκτυο, πρόκειται για εξαιρετικά ακριβείς υλοποιήσεις. Η ανάπτυξη των

κόμβων στο πεδίο είναι αραιή, οπότε δεν υπάρχει υιοθέτηση των παραδοσιακών πρωτοκόλλων WSN συστημάτων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του συστήματος ήταν εξαιρετικά ως προς την ανιχνευσιμότητα υποβρυχίων και ναρκών βυθού.



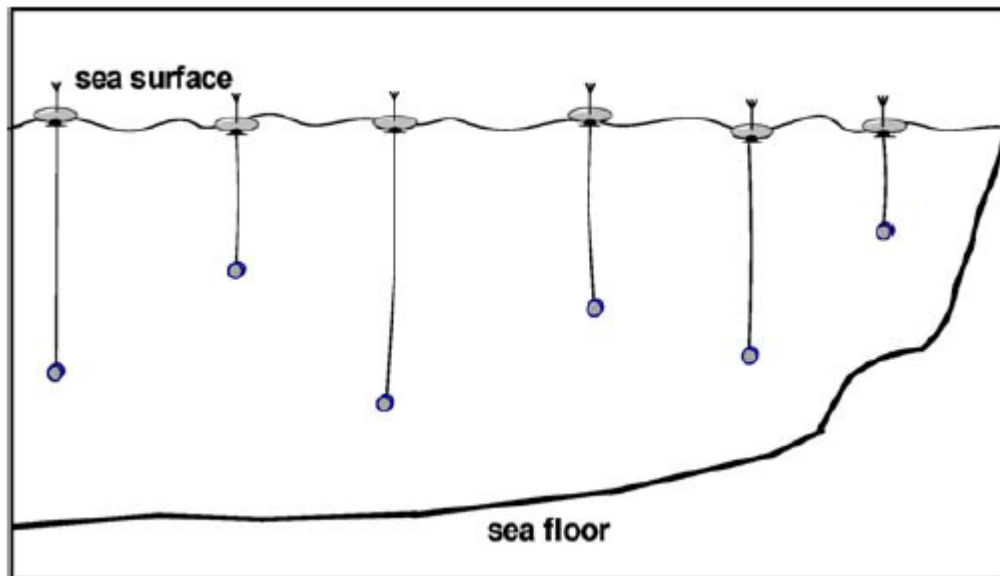
Σχήμα 2.5 gateway Σημαδούρα racom (αριστερά) και κόμβος DADS (δεξιά)

2.2.6.2 Μοντέλο 3D target tracking UWSS

Στην πρόταση αυτή δίνεται έμφαση στην κάλυψη του βυθού σε τρεις διαστάσεις. Οι κόμβοι του συστήματος είναι πλωτήρες (σταθερής θέσης ή μη), οι οποίες φέρουν και τις πλατφόρμες αισθητήρων. Περιλαμβάνουν ένα πακέτο αισθητήρων αποτελούμενο από αισθητήρες ακουστικούς, μαγνητικούς, ακτινοβολίας και microswitches, έτσι ώστε να καλύπτονται όλες οι πιθανές κατηγορίες απειλών.

Το πακέτο των αισθητήρων είναι τοποθετημένο σε ένα rod το οποίο βυθίζεται σε επιθυμητό βάθος προσδεμένο σε καλώδιο, με το οποίο γίνεται και η επικοινωνία με τον πλωτήρα. Η επεξεργασία των δεδομένων και οι επικοινωνίες πραγματοποιούνται από το επιφανειακό τμήμα του κόμβου. Τα δεδομένα διαβιβάζονται σε μια πλωτή πλατφόρμα sink node και μέσω αυτής σε σταθμό βάσης πλωτό ή επίγειο.

Η κάλυψη σε τρεις διαστάσεις επιτυγχάνεται με την αυξομείωση του βάθους του rod των αισθητήρων, σε συνδυασμό με τη θέση των πλωτήρων στην επιφάνεια. Σχετικοί αλγόριθμοι για προσχεδιασμένα και τυχαία ανάπτυξη παρουσιάζονται στο [24].



Σχήμα 2.6 Πρόταση για 3D ανίχνευση στόχου με χρήση υποθαλάσσιων συστημάτων παρακολούθησης.

2.2.6.3 Εφαρμογή Ship Detection with WSN

Στο [25] προτείνεται η εφαρμογή ανίχνευσης στόχων επιφάνειας, βασισμένη σε WSN. Οι κόμβοι του δικτύου στην περίπτωση αυτή είναι πλωτήρες σταθερής θέσης (αγκυροβολημένες) ή ελεύθερης θέσης (ad hoc). Η βασική λειτουργία ανίχνευσης γίνεται από τρία επιταχυνσιόμετρα (accelometers) τα οποία ανιχνεύουν τις αλλαγές θέσης που προκαλούν στις σηματοδούρες τα κύματα. Στη συνέχεια τα mote σε συνεργασία με πλωτούς ή επίγειους sink nodes ερμηνεύουν αν τα κύματα είναι φυσικά ή προέρχονται από πλοίο. Αν κριθεί ότι πρόκειται για πλοίο, γίνεται εκτίμηση της ταχύτητας του. Οι σχετικοί αλγόριθμοι παρατίθενται στο [25].

Η όλη υλοποίηση κρίνεται ως σχετικά χαμηλού κόστους, ενώ γίνεται χρήση τυποποιημένου mote. Βέβαια, τα 25 μέτρα απόστασης μεταξύ των κόμβων (διάταξη πειραματικής ανάπτυξης) καθιστούν την διάταξη πολύ πυκνή (με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διέλευση μεγάλων σκαφών) και εύκολα ανιχνεύσιμη.



Σχήμα 2.7 Πειραματική διάταξη Ship Detection WSN (αριστερά) και σταθερός κόμβος του WSN (δεξιά).

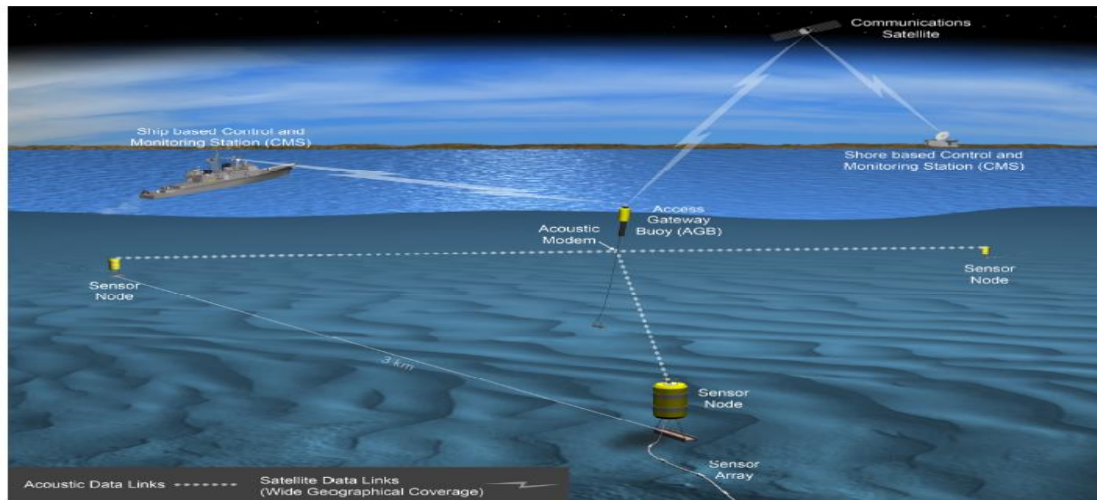
2.2.6.4 Σύστημα AUSSNET και AMASS.

Το σύστημα AUSSNET αποτελεί μια ολοκληρωμένη πρόταση από την εταιρία L3 oceania [26]. Πρόκειται για ένα UWWSN, το οποίο μπορεί να συγκεντρώνει, να επεξεργάζεται, να αποθηκεύει και να διαβιβάζει τα συλλεγόμενα δεδομένα μέσω δορυφόρου ή συστημάτων ακουστικής τηλεμετρίας σε σταθμούς βάσης επιφανειακούς, επίγειους ή εναέριους.

Η ανάπτυξη του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.8. Τα δεδομένα συλλέγονται υποθαλάσσια σε εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (500Hz) από κεραίες οριζόντια τοποθετημένες στον βυθό. Ακολουθεί η επεξεργασία και στη συνέχεια τα δεδομένα καταγράφονται σε σκληρούς δίσκους τοπικά. Ακολούθως, μεταδίδονται με ακουστικές επικοινωνίες σε σταθερή σταθερό πλωτήρα στην επιφάνεια (ο relay node του συστήματος) και από εκεί στον σταθμό ελέγχου και παρακολούθησης (παρακείμενο πλοίο ή σε άλλο σταθμό μέσω δορυφόρου).

Αντίθετα, το σύστημα AMASS αποτελεί ένα επιφανειακό WSN. Το AMASS είναι προϊόν σύμπραξης εταιρειών και φορέων [27]. Αποτελεί project συγχρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Σκοπός του project ήταν η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού συστήματος παρακολούθησης των θαλάσσιων προσβάσεων στα σύνορα της ΕΕ. Οι κόμβοι είναι πλωτήρες σταθερής θέσης με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Οπτικοί αισθητήρες (θερμικές κάμερες υψηλής ανάλυσης) και εξελιγμένα υδρόφωνα (ακουστικοί αισθητήρες).
- Εξοπλισμός επικοινωνιών για αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων με το κέντρο ελέγχου.
- Αυτόνομη τροφοδοσία (φωτοβολταϊκά πάνελ)



Σχήμα 2.8 Σύστημα AUSSNET.



Σχήμα 2.9 Κόμβος συστήματος AMASS. Διακρίνεται η θερμική κάμερα και τα ηλιακά πάνελ τροφοδοσίας.

Παράλληλα παρέχονται σταθμοί βάσης με πλήρη υποστήριξη σε λογισμικό για απεικόνιση της επιχειρησιακής κατάστασης σε πραγματικό χρόνο. Στο σύστημα έχει προβλεφθεί πιθανή μελλοντική αναβάθμιση, ενώ παρέχεται διασυνδεσιμότητα με τα υπάρχοντα μέσα επιτήρησης στην Ε.Ε. (σκάφη λιμενικού, αεροσκάφη).

Αναφορές 2ου Κεφαλαίου

- [1] Yanjun Li , Zhi Wang and Yeqiong Song "*Wireless Sensor Network Design For Wildfire Monitoring*" Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006.
- [2] Alan Mainwaring, Joseph Polastre, Robert Szewczyk David Culler and John Anderson "*Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*" WSNA '02 Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications Pages 88-97
- [3] Jeonggil Ko , Chenyang Lu , Mani B. Srivastava , John A. Stankovic , Andreas Terzis , Matt Welsh "*Wireless Sensor Networks for Healthcare*" Proceedings of the IEEE (Volume:98 , Issue: 11) Nov. 2010
- [4] Markus Becker , Bernd-ludwig Wenning , Carmelita Görg , Reiner Jedermann , Andreas Timm-giel "*Logistic applications with Wireless Sensor Networks*" Proceedings of HotEmNets 2010
- [5] Cholatip Yawut and Sathapath Kilaso "*A Wireless Sensor Network for Weather and Disaster Alarm Systems*" 2011 International Conference on Information and Electronics Engineering IPCSIT vol.6 (2011)
- [6] Stephen M. George, Wei Zhou, Harshavardhan Chenji, MyoungGyu Won, Yong Oh Lee, Andria Pazarloglou, and Radu Stoleru, Texas A&M University, Prabir Barooah, University of Florida "*DistressNet: A Wireless Ad Hoc and Sensor Network Architecture for Situation Management in Disaster Response*" Communications Magazine, IEEE (Volume:48 , Issue: 3) March 2010
- [7] A. Wood, G. Virone, T. Doan, Q. Cao, L. Selavo, Y. Wu, L. Fang, Z. He, S. Lin, J. Stankovic Department of Computer Science University of Virginia "*ALARM-NET: Wireless Sensor Networks for Assisted-Living*" July- Aug. 2008.
- [8] Herman Sahota, Ratnesh Kumar and Ahmed Kamal Department of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University, Ames "*A wireless sensor network for precision agriculture and its performance*" Wirel. Commun. Mob. Comput. 2011; 11:1628–1645

- [9] Yick, J. , Biswanath M. and Dipak G. "*Wireless Sensor Network Survey*" Computer Networks Journal (Elsevier) 52 (2008) 2292-2330
- [10] T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, L. Gu, J. Hui and B. Krogh, "*An Energy-Efficient Surveillance System Using Wireless Sensor Networks,*" 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, Boston, 6-9 June 2004.
- [11] <http://www.cs.berkeley.edu/~prabal/projects/xsm/>
- [12] Dutta, P. , Ohio State Univ., Columbus, OH, USA , Grimmer, M. ,Arora, A, Bibyk, S. "*Design of a Wireless Sensor Network Platform for Detecting Rare, Random, and Ephemeral Events*" Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005.
- [13] Z. Sun, et al., "*BorderSense: Border Patrol through Advanced Wireless Sensor Networks,*" Ad Hoc Networks, 2011, pp. 468-477.
- [14] Z. Sun, I.F. Akyildiz, "Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks" IEEE Transactions on Antenna and Propagation 58 (7) (2010) 2426–2435
- [15] M.C. Vuran, I.F. Akyildiz, A.M. Al-Dhelaan "*Channel modeling and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium*" Physical Communication Journal (Elsevier) (in press).
- [16] Z. Sun, I.F. Akyildiz "Connectivity in wireless underground sensor networks" in: Proc. IEEE SECON '10, Boston, MA, USA, June 2010.
- [17] I.F. Akyildiz, Z. Sun, M.C. Vuran "*Signal propagation techniques for wireless underground communication networks*" Physical Communication Journal (Elsevier) 2 (3) (2009) 167–183.
- [18] <http://www.tridsys.com/pdfs/ugsn-data-sheet.pdf>
- [19] I.F. Akyildiz, T. Melodia, K. Chowdhury "*Wireless multimedia sensor networks: applications and testbeds*" Proceedings of the IEEE 96 (10) (2008) 1588–1605.
- [20] Arora, P. Dutta, S. Bapat, V. Kulathumani, H. Zhang, V. Naik, V. Mittal, H. Cao, M. Demirbas¹, M. Gouda, Y. Choi², T. Herman³, S. Kulkarni, U. Arumugam⁴, M. Nesterenko, A. Vora, and M. Miyashita⁵ "*A Line*

- in the Sand: A Wireless Sensor Network for Target Detection, Classification, and Tracking"*
- [21] Peter Rothenpieler, Daniela Krueger, Dennis Pfisterer, Stefan Fischer, Denise Dudek, Christian Haas, Martina Zitterbart: "*FleGSens – Secure Area Monitoring Using Wireless Sensor Networks*"
- [22] A. Koeller, D.Pfisterer, C.Buschmann, S.P. Fekete and S. Fischer: "*Shawn: A new approach to simulating wireless sensor networks*", *in Design, Analysis and Simulation of Distributed Systems 2005 (DASD 05), Apr 2005, pp. 117-124.*
- [23] Joseph A. Rice "*Networked Undersea Acoustic Communication and Navigation for Autonomous Mine Countermeasure Systems*" *5th International Symposium on Technology and the Mine Problem, Montaray 2002*
- [24] Erdal Cayirci, Hakan Tezcan, Yasar Dogan, Vedat Coskun "*Wireless sensor networks for underwater surveillance systems*" Elsevier Ad Hoc Networks Journal, December 2004
- [25] Hanjiang Luo Kaishun Wu, Zhongwen Guo, Lin Gu, Ni, L.M. "*Ship Detection with Wireless Sensor Networks* " *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on (Volume:23 , Issue: 7) July 2012 Page(s):1336 - 1343 ISSN 1045-9219*
- [26] www.L-3com.com/Oceania
- [27] <http://www.amass-project.eu/amassproject/showarticle/amass/amass-key-features>

Κεφάλαιο 3ο

Αρχιτεκτονική δικτύου και πρωτόκολλα WSN επιτήρησης συνόρων.

3.1 Δικτυακή δομή των WSN

3.1.1 Η δόμηση επίγειων WSN με Low Rate WPAN και WLAN

Τα επίγεια δίκτυα WSN είναι δομημένα με σχεδιαστικούς άξονες τη χαμηλή πολυπλοκότητα, τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και τη δυνατότητα δικτύωσης μεγάλου πλήθους αυτόνομων συσκευών. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 ικανοποιεί αυτές τις επιδιώξεις, λειτουργώντας συμπληρωματικά προς τις άλλες WPAN τεχνολογίες. Με το IEEE 802.15.4 έγινε δυνατή η υλοποίηση εφαρμογών που παλαιότερα δεν θεωρούνταν πρακτικές ή είχαν μεγάλο κόστος.

Η μεγιστοποίηση της αυτονομίας στις συσκευές του δικτύου επιτυγχάνεται με βάση την υπόθεση ότι ο όγκος των δεδομένων είναι μικρός και η εκπομπή τους γίνεται ακανόνιστα, ώστε να διατηρείται μικρός ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle). Επιπλέον, η δομή των πακέτων σχεδιάστηκε ώστε η πληροφορία που αφορά τη δρομολόγηση (επιβάρυνση ή overhead) να είναι οι ελάχιστες δυνατές σε σχέση με το μέγεθος των δεδομένων που μεταφέρονται.

Τα χαρακτηριστικά αυτά έρχονται σε ευθεία αντίθεση με αυτά των προτύπων WLAN. Στα πρότυπα 802.11 [1,8] η βαρύτητα δίνεται στην επίτευξη μεγάλων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, ενώ το κόστος και η πολυπλοκότητα των συσκευών έρχονται σε δεύτερη μοίρα. Επιπλέον, η απόδοση διευθύνσεων IP σε κάθε συσκευή καθώς και η μεγάλη επιβάρυνση στα δεδομένα αυξάνουν τη πολυπλοκότητα δικτύων μεγάλης κλίμακας, όπως τα δίκτυα WSN.

Οι θεμελιώδεις διαφοροποιήσεις (πίνακας 3.1) ανάμεσα σε LowWPAN και WLAN περιπλέκουν τη μεταξύ τους επικοινωνία. Κάθε δίκτυο που επιδιώκει να συνδεθεί με το Internet πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει

διαδραστικά με το Internet Protocol (IP). Επίσης, υπάρχει η περίπτωση σε κάποιο δίκτυο WSN να είναι επιθυμητή η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων και χαρακτηριστικών ενός IP based δικτύου. Γίνεται φανερό ότι για την παραγωγή ολοκληρωμένων λύσεων δικτύων WSN είναι αναγκαία η ευελιξία στον συνδυασμό χαρακτηριστικών και πρωτοκόλλων.

3.1.2 Η δομή των επιφανειακών και υποθαλάσσιων WSN.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.1, το χαμηλό κόστος και η απλότητα σχεδίασης χαρακτηρίζουν τα επίγεια (υπέργεια ή υπόγεια) WSN αλλά όχι τα θαλάσσια ή υποθαλάσσια WSN. Λόγω των εξαιρετικά δυσμενών συνθηκών ανάπτυξης και των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των κόμβων του δικτύου, οι συσκευές που το απαρτίζουν είναι ακριβές υλοποιήσεις με μεγάλες απαιτήσεις στη συντήρησή τους. Γίνεται φανερό ότι τα UWWSN αποτελούν μια ιδιαίτερη ομάδα ασύρματων δικτύων, εντελώς διαφορετικών των zigbee based WSN.

Στα υποθαλάσσια και επιφανειακά WSN, τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες μεταφέρονται σε μία κεντρική μονάδα μέσω ασφαλών δορυφορικών ζεύξεων. Αν τα δεδομένα δεν συλλέγονται από τον κόμβο πύλη (gateway) αλλά από υποθαλάσσιους κόμβους, επιστρατεύονται επικοινωνίες ακουστικού τύπου, υλοποιούμενες με μέσα που αναφέρθηκαν στη παράγραφο 1.2.5. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου περιλαμβάνουν τον πληθυσμό των κόμβων, τη θέση τους και το μέγεθος της πληροφορίας που διαχειρίζονται. Επίσης, οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή ανάπτυξης του δικτύου επηρεάζουν το σχεδιασμό WSN βασισμένων σε δορυφορικές επικοινωνίες.

Παράλληλα, επιδιώκεται η βέλτιστη διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων με ταυτόχρονη διατήρηση της ποιότητας υπηρεσίας. Για το σκοπό αυτό υιοθετείται το πρωτόκολλο MF-TDMA. Με την MF-TDMA τεχνολογία επιτυγχάνεται η δυναμική ανάθεση του διαθέσιμου φάσματος σε μεγάλο αριθμό κόμβων, με την ταυτόχρονη παροχή μεγάλης χωρητικότητας καναλιού, ικανοποιητικής ποιότητας υπηρεσίας και απόδοσης. Τα δίκτυα που βασίζονται σε MF-TDMA υποστηρίζουν τοπολογία αστέρα και μπορεί να είναι πλήρως ή μερικώς δικτυωμένα. Αναλυτικά, οι τεχνολογίες και τα πρωτόκολλα

των ακουστικών και δορυφορικών επικοινωνιών παρατίθενται στα [14] και [12] αντίστοιχα, ενώ η δομή δορυφορικού δικτύου εφαρμοσμένου σε WSN αποτελούμενου από Smart Buoys παρατίθεται αναλυτικά στο [13].

3.2 Η διαδραστικότητα μεταξύ δικτύων στα επίγεια WSN.

Στις περιπτώσεις των επίγειων (υπέργειων, υπόγειων) WSN που αναφέρθηκαν στο 2ο κεφάλαιο, πλην της εφαρμογής Bordersense, γίνεται αποκλειστική χρήση συγκεκριμένων αισθητήρων όπως σεισμικών, μαγνητικών, IR κ.τ.λ. Πρόκειται δηλαδή για ομογενή WSN [2], όπου όλοι οι κόμβοι έχουν τις ίδιες δυνατότητες από πλευράς επεξεργαστικής ισχύος, επικοινωνιών και διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Στα ομογενή WSN, η συλλογή δεδομένων γίνεται από όλους τους κόμβους, οι οποίοι μεταβιβάζουν τις συλλεγόμενες πληροφορίες σε κάποιο τελικό αποδέκτη (π.χ. ένα φορητό Η/Υ).

	Traditional IP-Based Networks	Large Scale Wireless Sensor Networks
Networking Mode:	Application-independent	Application-specific
Routing Paradigms:	Address-centric	Data-centric, Location-centric
Typical Data Flow:	Arbitrary, One to one	To/from querying sink, One-to-many and many-to-one
Data Rates:	High (Mbps)	Low (kbps)
Resource constraints:	Bandwidth	Energy (battery-operated nodes), Limited processing and memory
Network Lifetime:	Long (years-decades)	Short (days-months)
Operation:	Attended, administered	Unattended, Self-configuring

Πίνακας 3.1. Βασικές διαφορές μεταξύ παραδοσιακών δικτύων βασισμένων σε IP και δικτύων WSN μεγάλης κλίμακας.

Η ενσωμάτωση σε ένα WSN επιπλέον δυνατοτήτων multimedia εγείρει αυξημένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ενέργεια και αποθηκευτικό χώρο. Η τεχνολογία Zigbee με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 250 kbps δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε video streaming από μια π.χ. θερμική κάμερα. Αντίθετα, ένα δίκτυο WiFi προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης απαιτητικών multimedia αισθητήρων, καθώς οι ταχύτητες μετάδοσης που υποστηρίζει το πρωτόκολλο IEEE 802.11 είναι της τάξης των Mbps.

Κατά συνέπεια, οι δυνατότητες ενός δικτύου WSN μπορούν να διευρυνθούν μέσω της διάδρασής του με άλλα δίκτυα δομημένα επί διαφορετικών του 802.15.4 πρωτοκόλλων. Η επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών δικτύων προϋποθέτει την ύπαρξη συσκευών στις οποίες πραγματοποιείται η μετατροπή των δεδομένων (δομή των πακέτων) από το ένα πρωτόκολλο στο άλλο, και οι οποίες ονομάζονται κόμβοι-πύλες (gateways).

Οι περισσότεροι κόμβοι πύλες είναι είτε ενσωματωμένοι σε κάποιο σύστημα Η/Υ, είτε ανεξάρτητες συσκευές αποκλειστικής χρήσης (dedicated). Ένας κόμβος του δικτύου WSN συνδεδεμένος με ένα φορητό Η/Υ μέσω USB, εφόσον ο Η/Υ διαθέτει τον απαραίτητο εξοπλισμό (ethernet, wifi, προσαρμογέα για mobile data) για σύνδεση με το Internet, αποτελεί ένα κόμβο-πύλη. Παράλληλα, ο Η/Υ διαθέτει την επεξεργαστική ισχύ και τις απεικονιστικές δυνατότητες για την αξιοποίησή του ως σταθμού βάσης. Από την άλλη πλευρά, οι συσκευές αποκλειστικής χρήσης είναι απλούστερες στη δομή τους, έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος και κόστος και απαιτούν συγκριτικά πολύ λιγότερη ενέργεια σε σχέση με έναν Η/Υ.

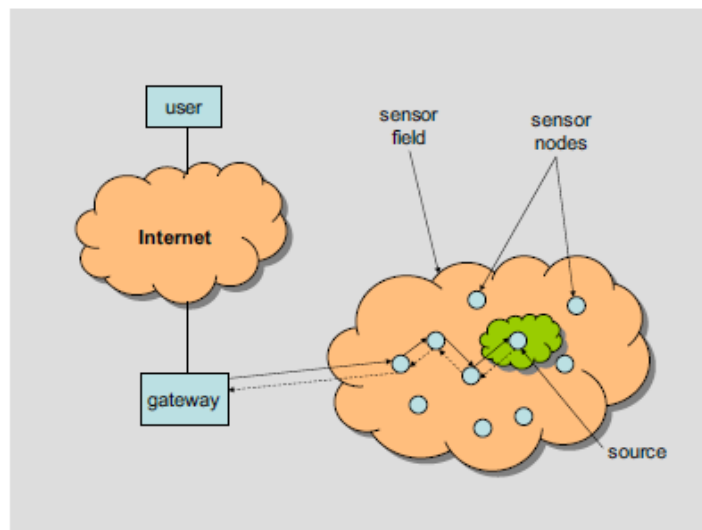
Σε ένα κόμβο-πύλη ασύρματου δικτύου Zigbee περιλαμβάνεται ένας ραδιοπομπός τεχνολογίας Zigbee, ένας επεξεργαστής περιορισμένων δυνατοτήτων και μία διάταξη επικοινωνίας με το έτερο δίκτυο. Η ρύθμισή τους γίνεται μέσω web browser ή άλλου τύπου απομακρυσμένης σύνδεσης. Είναι δυνατή η σταθερή λειτουργία τους (δεν απαιτείται επανεκκίνηση) για μεγάλες χρονικές περιόδους.

3.2.1 Ενσωμάτωση των κόμβων-πυλών σε δίκτυα WSN.

Ένας ή περισσότεροι κόμβοι-πύλες χρησιμοποιούνται σε ομογενή WSN, ενώ στην περίπτωση ετερογενών δικτύων είναι δυνατό να εφαρμοστεί ένα επικαλυπτικό IP δίκτυο (overlay IP network). Και οι δύο περιπτώσεις διάδρασης στα δίκτυα WSN (ομογενή ή ετερογενή) είναι πολύ σημαντικές, καθώς υπαγορεύουν την κατεύθυνση και τις δυνατότητες που μπορεί να διαθέτει μια εφαρμογή επιτήρησης.

3.2.1.1 Διάδραση σε ομογενή WSN

Ένα ομογενές δίκτυο WSN μπορεί να αποστέλλει τα δεδομένα που συγκεντρώνει σε έναν Η/Υ, ο οποίος ταυτόχρονα είναι συνδεδεμένος μέσω WiFi με ένα σύστημα WMSN, επιτελώντας το ρόλο του κόμβου-πύλης. Ταυτόχρονα, μέσω του συστήματος Η/Υ γίνεται η αποθήκευση και η επεξεργασία των δεδομένων, ενώ ο χρήστης μπορεί να διατυπώσει ερωτήματα τύπου SQL προς τα δύο διακριτά δίκτυα.



Σχήμα 3.1 Χρήση gateway για επικοινωνία WSN με το internet. Τα βέλη δείχνουν την πορεία των υποβαλλόμενων ερωτημάτων με αφετηρία τον σταθμό βάσης του WSN.

Έπειτα από δεδομένο - κεντρική επεξεργασία εντός του δικτύου (data-centric in-network processing), τα αποτελέσματα συλλέγονται από το δίκτυο

και παρουσιάζονται στο χειριστή του σταθμού βάσης. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει το μειονέκτημα του μεγάλου όγκου δεδομένων, ο οποίος δρομολογείται από τους κόμβους που γειτνιάζουν με τον κόμβο-πύλη και κατά συνέπεια της ταχείας ενεργειακής εξάντλησης τους.

Μία άλλη προσέγγιση είναι η ανάπτυξη περισσότερων του ενός κόμβου-πύλης εντός του δικτύου WSN. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης στους κόμβους, υπό την προϋπόθεση ότι η βαρύτητα των ερωτημάτων (όσον αφορά τα απαιτούμενα στοιχεία) είναι επίσης ομοιόμορφα κατανεμημένη. Μία εφαρμογή για παρακολούθηση συνόρων βασισμένη σε ομογενή WSN και WMSN με τη μορφή υβριδικού WSN μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των ελληνικών χερσαίων συνόρων.

3.2.1.2 Διάδραση σε ετερογενή WSN

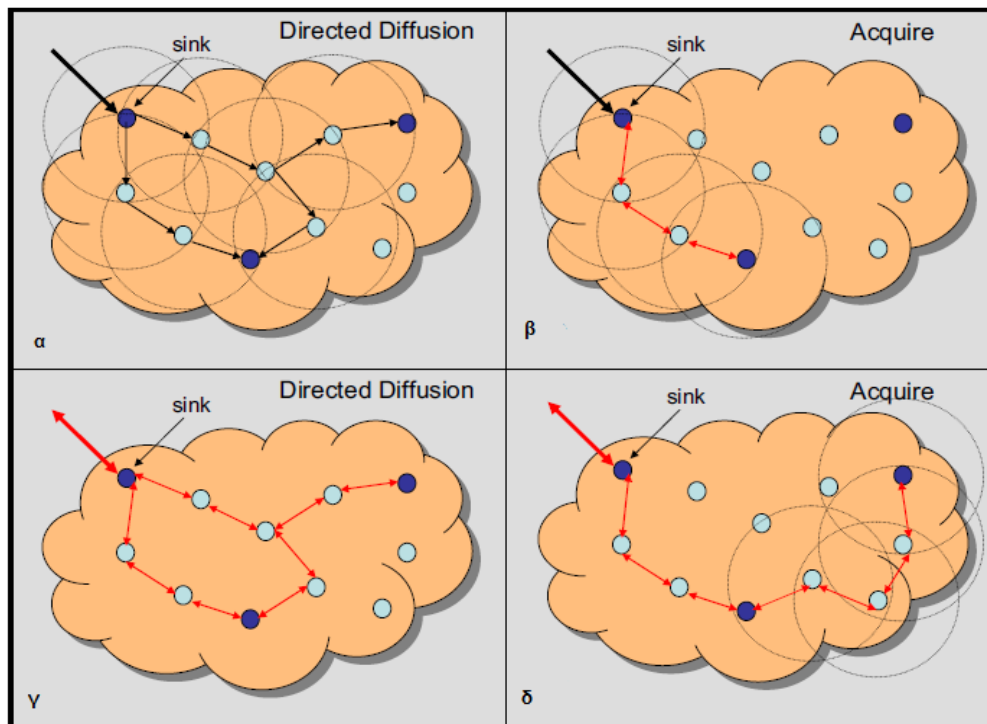
Τα ετερογενή δίκτυα επιτρέπουν την απόδοση διεύθυνσης IP στους περισσότερο εξελιγμένους κόμβους του δικτύου. Γενικά, οι περισσότερο εξελιγμένοι κόμβοι μπορούν να εκτελέσουν περισσότερες εργασίες και συνολικά να επωμιστούν μεγάλο μέρος των εργασιών που επιτελούνται στο δίκτυο. Υπάρχουν και άλλοι λόγοι που υπαγορεύουν τη διευθυνσιοδότηση τέτοιων κόμβων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κόμβων με ρόλο ενεργοποιητή (έλεγχος συσκευών, ρομποτικών μηχανισμών ή άλλων δράσεων) είναι χρήσιμη η απόδοση διευθύνσεων για ευκολότερη ανάθεση εργασιών.

Σε άλλη εκδοχή δικτύου, οι κόμβοι με IP διευθύνσεις μπορούν να λειτουργούν ως επικεφαλής ομάδων κόμβων. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η δόμηση ενός επικαλυπτικού IP δικτύου πάνω στο υφιστάμενο δίκτυο τεχνολογίας Zigbee. Τέτοια επικαλυπτικά IP δίκτυα αξιοποιούν την τεχνική της κατευθυνόμενης διάχυσης των δεδομένων (*directed diffusion*).

Η κατευθυνόμενη διάχυση των δεδομένων είναι μια δεδομένο-κεντρική τεχνική δρομολόγησης, η οποία διαφέρει από το δευθυνσιο-κεντρικό προσανατολισμό των παραδοσιακών δικτύων. Το κύριο πλεονέκτημα από την αξιοποίηση της κατευθυνόμενης διάχυσης σε επικαλυπτικά IP δίκτυα είναι η

χάραξη πολλαπλών διαδρομών για τα δεδομένα. Μειονέκτημα της είναι οι μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια.

Στην περίπτωση όπου η δρομολόγηση IP δεδομένων δεν επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό το δίκτυο και οι θέσεις των IP κόμβων είναι γνωστές, είναι δυνατή η χρήση του μηχανισμού δρομολόγησης ACQUIRE που περιγράφεται στο [5]. Στην περίπτωση του ACQUIRE ο μηχανισμός εύρεσης του της διαδρομής



Σχήμα 3.2. Ετερογενές δίκτυο WSN με overlay IP δίκτυο με. Διαδοχικά υποδεικνύονται:

- α. Η πρώτη φάση της κατευθυνόμενης διάχυσης με διασπορά του ερωτήματος για εύρεση των IP κόμβων
- β. Οι πολλαπλές διαδρομές που εντοπίζονται με το μηχανισμό κατευθυνόμενης διάχυσης
- γ. Ο ACQUIRE κατά τη διαδικασία δόμησης του επικαλυπτικού IP δικτύου, υποβάλλοντας ερώτημα μέσω τυχαία επιλεγμένων διαδρομών
- δ. Η μοναδική διαδρομή που βρέθηκε μέσω του ACQUIRE

δρομολόγησης γίνεται πιο οικονομικός από πλευράς κατανάλωσης, παρουσιάζοντας στον αντίποδα μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση σε

σύγκριση με τη κατευθυνόμενη διάχυση. Συμπερασματικά προκύπτει ότι ανάλογα με τις απαιτήσεις και τη διάρθρωση του δικτύου εφαρμόζονται διαφορετικοί μηχανισμοί δρομολόγησης για την υλοποίηση του επικαλυπτικού IP δικτύου.

3.3 Το πρότυπο IEEE 802.15.4 και η τεχνολογία ZigBee

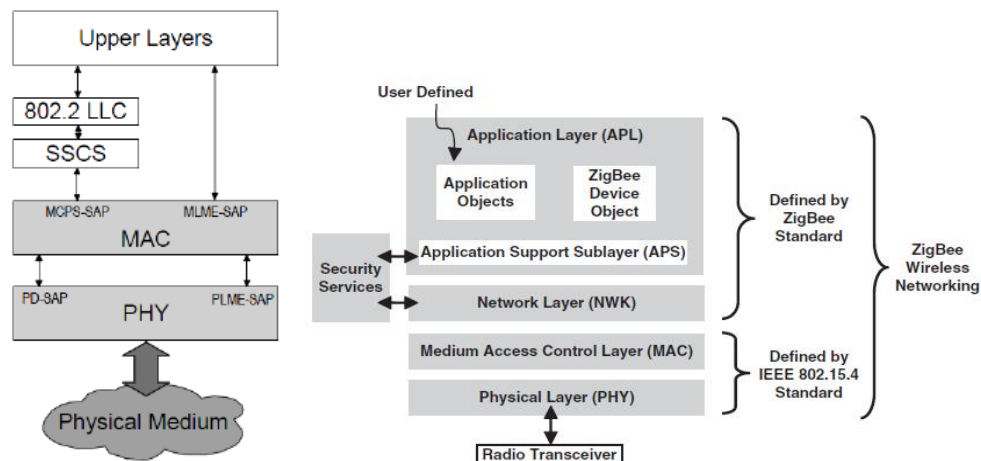
Το πρότυπο IEEE 802.15.4 αναπτύχθηκε με σκοπό την παροχή υπηρεσιών φυσικού επιπέδου και επιπέδου ζεύξης σε δίκτυα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και περιορισμένης κατανάλωσης ενέργειας, θεμελιώδη χαρακτηριστικά ενός WSN. Η αρχιτεκτονική του προτύπου IEEE 802.15.4 απεικονίζεται στην Σχήμα 3.3. Το πρότυπο ZigBee αποτελεί την επέκταση του IEEE 802.15.4 στα ανώτερα επίπεδα του δικτύου (επίπεδα δικτύου και εφαρμογής) υλοποιώντας μια ενιαία εμπορική πλατφόρμα που καλείται τεχνολογία ZigBee και βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (LowPAN – Low-rate Personal Area Networks). Η τεχνολογία ZigBee χρησιμοποιεί τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων περί τα 2.4 GHz (παγκόσμια χρήση), 915 MHz (Αμερική) και 868 MHz (Ευρώπη). Ο ρυθμός μετάδοσης της υπηρεσίας στη τεχνολογία είναι 250 kbps στα 2.4 GHz, 40 kbps στα 915 MHz και 100 kbps στα 868 MHz. Τα δύο φυσικά στρώματα που εξετάζει η παρούσα εργασία είναι στις ζώνες 868 MHz και 2.4 GHz.

	Frequency (MHz)	Number of Channels	Modulation	Chip Rate (Kchip/s)	Bit Rate (Kb/s)	Symbol Rate (Ksymbol/s)	Spreading Method
	868-868.6	1	BPSK	300	20	20	Binary DSSS
	902-928	10	BPSK	600	40	40	Binary DSSS
Optional	868-868.6	1	ASK	400	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	10	ASK	1600	250	50	5-bit PSSS
Optional	868-868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16-array orthogonal
	902-928	10	O-QPSK	1000	250	62.5	16-array orthogonal
	2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16-array orthogonal

Πίνακας 3.5. Συχνότητες λειτουργίας και ρυθμοί μετάδοσης προτύπου IEEE 802.15.4

Για εκπομπή στη χαμηλή ζώνη στα 868 MHz χρησιμοποιούνται τα σχήματα διαμόρφωσης BPSK (Binary Phase Shift Keying), ASK (Amplitude Shift Keying) και O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying). Το φυσικό στρώμα υψηλής ζώνης αξιοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων από 2.4GHz έως 2.483GHz. Προσφέρει 16 κανάλια με βήμα 5MHz με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 250kbps. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στη ζώνη αυτή είναι η O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying).

Το πρότυπο 802.15.4 ορίζει την απαίτηση για ευαισθησία του δέκτη στα -92dbm για τη χαμηλή ζώνη και στα -85dbm για την υψηλή ζώνη. Επίσης, απαιτεί δυνατότητα ισχύος εκπομπής 1mW, απαίτηση η οποία μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τους υφιστάμενους κανόνες και τα όρια ισχύος εκπομπής. Οι απαιτήσεις για όλο και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και η δυνατότητα χρήσης μεγαλύτερου αριθμού καναλιών έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση στα δίκτυα WSN ραδιοπομπών που αξιοποιούν την υψηλή ζώνη.



Σχήμα 3.3. Αρχιτεκτονική προτύπου IEEE 802.15.4 (αριστερά) και τεχνολογίας ZigBee (δεξιά). Παρατηρείται στην απεικόνιση ότι η τεχνολογία zigbee αφορά τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογής, λειτουργώντας συμπληρωματικά ως προς το IEEE 802.15.4.

3.3.1 Δομή δικτύων βασισμένων στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και την τεχνολογία zigbee.

Ένα δίκτυο δομημένο με βάση το πρότυπο IEEE 802.15.4 αποτελείται από τριών ειδών διατάξεις οι οποίες αναφέρονται ως:

- Διατάξεις συντονιστές δικτύου (Coordinators PAN):

Υπάρχει ένας συντονιστής PAN στο δίκτυο και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη διαχείριση της πληροφορίας που διακινείται στο δίκτυο. Πρόκειται για διάταξη με αυξημένες ικανότητες υπολογισμών και αποθήκευσης δεδομένων.

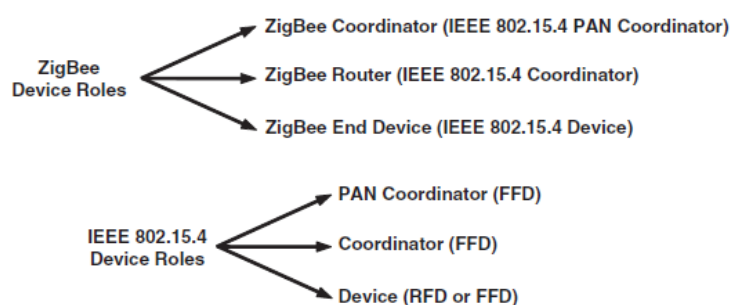
- Διατάξεις πλήρους λειτουργίας (FFD – Full-Function Devices):

Οι διατάξεις FFD υλοποιούν κόμβους αυξημένων αρμοδιοτήτων με μεγαλύτερη υπολογιστική ικανότητα. Είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται ως συντονιστές (coordinators) ή δρομολογητές (routers) του δικτύου καθώς έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με όλους τους τύπους διατάξεων στο δίκτυο.

- Διατάξεις περιορισμένης λειτουργίας (RFD – Reduced-Function Devices):

Οι διατάξεις RFD σε αντίθεση με τις FFD εμφανίζουν περιορισμένες υπολογιστικές ικανότητες και ως εκ τούτου αναλαμβάνουν απλές λειτουργίες, για τις οποίες δεν απαιτείται διακίνηση μεγάλου όγκου δεδομένων. Οι διατάξεις αυτές έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν μόνο με συσκευές FFD.

Ένα WSN βασισμένο στο πρότυπο ZigBee διαχωρίζει τις διατάξεις του δικτύου σε ένα συντονιστή, τις τελικές διατάξεις (end devices) και τους δρομολογητές. Με βάση την κατηγοριοποίηση των συσκευών από το πρότυπο IEEE 802.15.4, ο συντονιστής και οι δρομολογητές είναι συσκευές πλήρους λειτουργίας (FFD), ενώ οι τελικές συσκευές μπορούν να είναι είτε πλήρους είτε περιορισμένης λειτουργίας (FFD ή RFD). Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται οι προηγούμενες κατηγοριοποιήσεις.

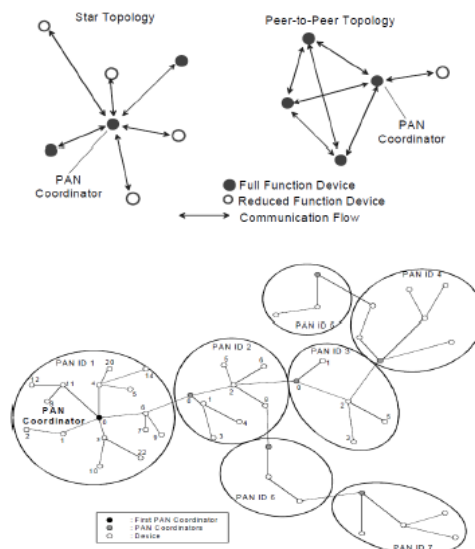


Σχήμα 3.4. Κατηγορίες συσκευών τεχνολογίας ZigBee

3.3.2 Υποστηριζόμενες τοπολογίες δικτύου

Η τεχνολογία ZigBee υποστηρίζει τις τοπολογίες αστέρα (star), πλέγματος (mesh) και δένδρου συστάδων (cluster tree). Στην τοπολογία αστέρα η επικοινωνία βασίζεται σε ένα κεντρικό κόμβο, ο οποίος καλείται συντονιστής PAN και υλοποιείται από διάταξη FFD. Ο συντονιστής PAN μπορεί να ελέγχει τόσο διατάξεις FFD όσο και RFD. Στην τοπολογία πλέγματος υπάρχει συντονιστής PAN δικτύου, όπως και στην τοπολογία αστέρα ωστόσο, όλες οι υπόλοιπες διατάξεις έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με οποιοδήποτε κόμβο εντός της εμβέλειάς τους (ευρεία χρήση FFD διατάξεων) και είναι εφικτή η επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων (multi-hop). Η συγκεκριμένη τοπολογία βρίσκει εφαρμογή σε ad-hoc αυτό-οργανούμενα (self-organizing) και αυτό-ιάσιμα (self – healing) δίκτυα και είναι συχνή σε εφαρμογές δικτύων WSN επιτήρησης και ελέγχου.

Η εφαρμογή της τοπολογίας πλέγματος σε WSN επιτήρησης και ελέγχου ενισχύει την αξιοπιστία του δικτύου λόγω του πλεονασμού δεδομένων που προκύπτει από την πολυδιαδρομική δρομολόγηση. Τέλος, η τοπολογία δένδρου συστάδων, η οποία μπορεί να μελετηθεί ως ειδική περίπτωση της τοπολογίας πλέγματος, έχει στην πλειονότητα της FFD διατάξεις, με πιθανή την ύπαρξη RFD συσκευών ως τερματικών κόμβων («φύλλα») «κλάδων» του δικτύου.



Σχήμα 3.5. Υποστηριζόμενες τοπολογίες τεχνολογίας ZigBee

Αν και οποιαδήποτε διάταξη FFD μπορεί να έχει το ρόλο του συντονιστή παρέχοντας συγχρονισμό στις υπόλοιπες συσκευές, μόνο μία μπορεί να επιλεγεί ως συντονιστής PAN του δικτύου, η οποία τίθεται επικεφαλής της πρώτης αναπτυχθείσας ομάδας του δικτύου. Η συγκεκριμένη τοπολογία διευκολύνει την ανάπτυξη δικτύων κάλυψης μεγάλης περιοχής. Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι τρεις τοπολογίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Αναφορές 3ου Κεφαλαίου

- [1] Π.Γ. Κωπτή, Π.Μ. Αράπογλου "Ασύρματες Επικοινωνίες" Κεφάλαιο 1, εκδόσεις Τζιόλα 2011, ISBN 978-960-418-268-8
- [2] Marco Zuniga Z. and Bhaskar Krishnamachari "Integrating Future Large-scale Wireless Sensor Networks with the Internet"
- [3] Howitt, I. Dept. of Electr. & Comput. Eng., North Carolina Univ., Charlotte, NC, USA Gutierrez, J.A. "IEEE 802.15.4 Low Rate – Wireless Personal Area Network Coexistence Issues" Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE (Volume:3)
- [5] N. Sadagopan, B. Krishnamachari, and A. Helmy, "The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks," First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA'03), May 2003.
- [6] Robert Faludi "Building Wireless Sensor Networks", Κεφάλαιο 7, O' Riley 2011 ISBN: 978-0-596-80773-3
- [7] Holger Karl and Andreas Willig "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", Κεφάλαιο 5, Σελίδες 139-145, Wiley 2005 ISBN 978-0-470-09510-2
- [8] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>
- [9] Sinem Coleri Ergen: ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary
- [10] Patrick Kinney: ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, Kinney Consulting LLC Chair of IEEE 802.15.4 Task Group Secretary of ZigBee BoD Chair of ZigBee Building Automation Profile WG
- [11] Shahin Farahani: ZigBee Wireless Networks and Tranceivers, Newnes, p. 1- 122
- [12] Jongwon Yoon, Hyogon Kim and Jeong-Gil Ko: Data Fragmentation Scheme in IEEE 802.15.4, Wireless Sensor Networks Department of Computer Science and Engineering, Korea University
- [13] Παναγιώτης Γ. Κωπτής, Χρήστος Ν. Καψάλης "Δορυφορικές επικοινωνίες", εκδόσεις Τζιόλα, 2013, ISBN 978-960-418-379-1
- [14] Θοδωρής Ε. Καρακώστας "Τηλεπισκοπική παρακολούθηση Θαλασσίων συνόρων με χρήση τεχνολογίας Smart Buoy", διπλωματική εργασία στον

τομέα συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών ΕΜΠ, Αθήνα 2014.

- [15] Ian F.Akyildiz, DarioPompili and TommasoMelodia "*Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges*" Elsevier Ad Hoc Networks 3 (2005) 257–279

Κεφάλαιο 4ο

Το πρόβλημα της κάλυψης και της συνδεσιμότητας σε ένα WSN επιτήρησης. Η μέθοδος κάλυψης φράγματος.

4.1 Σημασία της κάλυψης και συνδεσιμότητας σε ένα WSN

Η αποστολή ενός WSN επιτήρησης και παρακολούθησης έγκειται στην έγκαιρη επισήμανση των ξένων στοιχείων που έχουν εισβάλει στην επιτηρούμενη περιοχή. Ο εντοπισμός των εισβολέων από το WSN πρέπει να είναι εφικτός σε όλη την έκταση που εκτείνεται η περιοχή και να πραγματοποιείται με την ίδια πιθανότητα, ανεξάρτητα από τη διαδρομή που έχουν επιλέξει οι εισβολείς. Η ύπαρξη διαδρομών που δεν καλύπτονται ή καλύπτονται περιστασιακά από τους αισθητήρες του WSN υποβαθμίζει το δίκτυο και ακυρώνει την αποστολή του.

Η απαίτηση για αποτελεσματική *κάλυψη* σε χερσαία ή θαλάσσια σύνορα μήκους δεκάδων ή εκατοντάδων χιλιομέτρων οδήγησε στην ανάπτυξη εξειδικευμένων μεθόδων ανάπτυξης WSN. Οι μέθοδοι ανάπτυξης WSN αποσκοπούν στη χρήση του ελάχιστου αριθμού κόμβων για την επιτήρηση των προσβάσεων μίας περιοχής. Ταυτόχρονα, η κάλυψη μιας περιοχής με ένα WSN πρέπει να συνδυάζεται με την εξασφάλιση της δυνατότητας όλων των κόμβων να επικοινωνούν με το σταθμό βάσης. Τίθεται, δηλαδή, η απαίτηση για *συνδεσιμότητα*, σύμφωνα με την οποία οι κόμβοι πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένοι, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες στις συλλεγόμενες πληροφορίες. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούν μέθοδοι για την εξασφάλιση κάλυψης και συνδεσιμότητας σε WSN κατάλληλα για ανάπτυξη σε σύνορα.

Κάθε περιβάλλον (υπέργειο, υπόγειο, επιφανειακό ή υποθαλάσσιο) εισάγει διαφορετικές παραμέτρους και διαμορφώνει απαιτήσεις που είναι πιθανό να διαφοροποιούν τον τελικό αριθμό των κόμβων σε σχέση με τον υπολογιζόμενο από τα μαθηματικά μοντέλα που παρατίθενται στη συνέχεια. Η παράθεση των μεθόδων υπολογισμού αποσκοπεί στην παροχή μαθηματικών

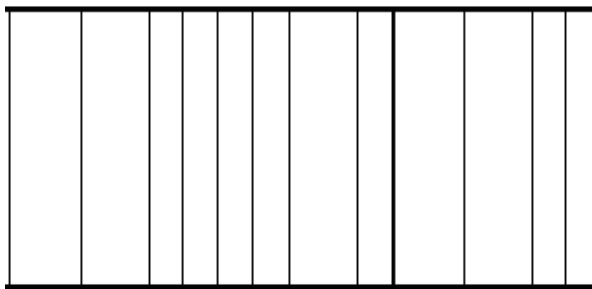
εργαλείων για την ασφαλή εκτίμηση της τάξης μεγέθους των δικτύων που προτείνονται στο 5ο κεφάλαιο.

4.2 Η κάλυψη σε επίγεια WSN.

4.2.1 Η μέθοδος κάλυψη τύπου φράγματος.

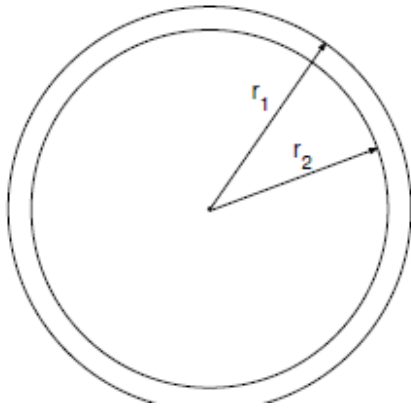
Σκοπός της μεθόδου φράγματος (barrier coverage) [1] είναι η ανίχνευση των εισβολέων καθώς διασχίζουν ή πρόκειται να παρεισφρήσουν σε μία ζώνη εδάφους (belt region). Επινοήθηκε για WSN που αναπτύσσονται σε συνοριακές γραμμές μήκους αρκετών χιλιομέτρων. Ονομάζεται μέθοδος φράγματος επειδή οι κόμβοι του WSN διατάσσονται έτσι ώστε να σχηματίζουν φράγμα ανίχνευσης και παρακολούθησης.

Σύμφωνα με το [1], μία διαδρομή που διασχίζει κατά πλάτος μία καλυπτόμενη εδαφική ζώνη είναι *k*-καλυμμένη, εφόσον διέρχεται από την αισθητήρια περιοχή τουλάχιστον *k* κόμβων. Για λόγους απλοποίησης, ένας κόμβος μπορεί να θεωρηθεί ως το κέντρο ενός κυκλικού δίσκου με ακτίνα *r* ίση με την εμβέλεια ανίχνευσης του αισθητήρα. Μία εδαφική ζώνη θεωρείται ότι είναι *k*-barrier καλυμμένη από ένα WSN, όταν όλες οι διαδρομές που τη διασχίζουν είναι *k*-καλυμμένες. Τα WSN που αναπτύσσονται με την *k*-barrier μέθοδο προορίζονται για εδαφικές ζώνες μεγάλου μήκους.



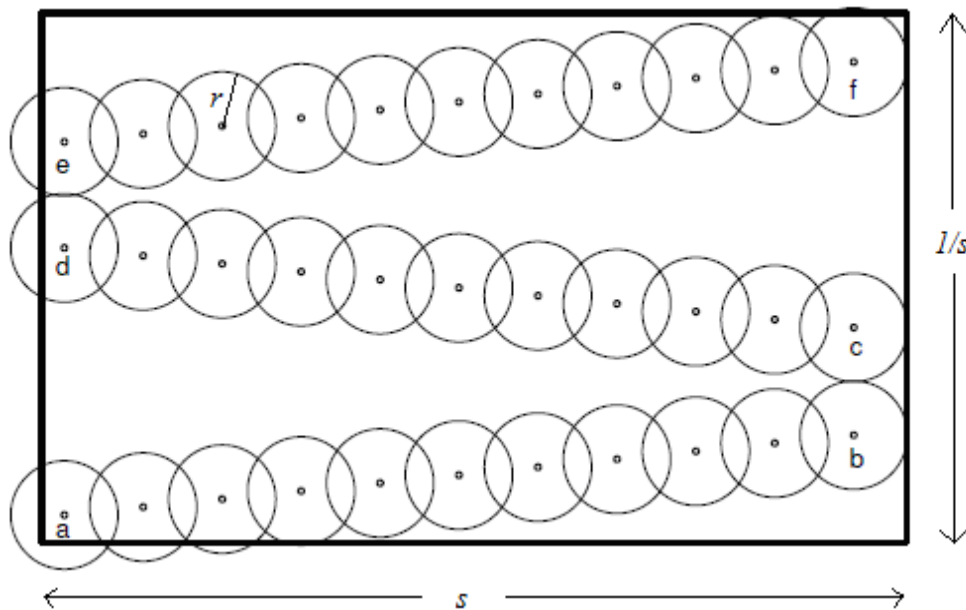
Σχήμα 4.1 Περιοχή διαστάσεων $(s, 1/s)$. Η περιοχή που απεικονίζεται έχει πλάτος $1/s$ και μήκος s . Καθώς το s τείνει στο άπειρο, το εμβαδόν της περιοχής παραμένει ίσο με 1.

Οι εδαφικές ζώνες διακρίνονται σε ανοικτές και κλειστές. Οι τύποι των περιοχών που ορίζονται στο [1] για την διατύπωση των προβλημάτων, φαίνονται στα σχήματα 4.1 και 4.2 (ανοικτή και κλειστή αντίστοιχα). Διευκρινίζεται ωστόσο ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν βρίσκουν εφαρμογή και σε περιοχές ακανόνιστου σχήματος.



Σχήμα 4.2 :Περιοχή διαστάσεων $(\lambda_1, \lambda_2, (1/s))$. Η περιοχή ορίζεται από δύο καμπύλες Π και Ω μήκους λ_1 και λ_2 αντίστοιχα, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους σταθερή απόσταση $1/s$. Στη περιοχή που απεικονίζεται $\lambda_1=2\pi r_1$, $\lambda_2=2\pi r_2$, $1/s=r_1-r_2$, με r_1 και r_2 ακτίνες των δύο ομόκεντρων κύκλων.

Για κάθε τύπο εδαφικής ζώνης στο πλαίσιο της μεθόδου φράγματος αναζητείται η κατάλληλη διάταξη των κόμβων ώστε να επιτυγχάνεται κ- κάλυψη με μεγάλη πιθανότητα (high probability), με χρήση του μικρότερου δυνατού αριθμού αισθητήρων. Εξετάζεται τόσο η περίπτωση της τυχαίας ανάπτυξης κόμβων (randomized deployment) εντός της ζώνης, όσο και η ανάπτυξη σε προκαθορισμένες θέσεις (deterministic deployment).



Σχήμα 4.3 Η περιοχή είναι κ-καλυμμένη με $k=3$, καθώς δεν υπάρχει διαδρομή (ή σύνολο διαδρομών) που να διασχίζει την περιοχή χωρίς να διέρχεται από τους αισθητήριους δίσκους τουλάχιστον τριών αισθητήρων.

4.2.1.1 Κάλυψη φράγματος για τυχαία ανάπτυξη WSN σε εδαφική ζώνη.

Για τη διατύπωση του μοντέλου του WSN κατά την τυχαία ανάπτυξη (π.χ. ρίψη από αεροπλάνο ή κινούμενο όχημα) θεωρείται, ότι η κατανομή των αισθητήρων γίνεται σύμφωνα με μία κατανομή Poisson τάξης n . Οι κόμβοι ενσωματώνουν τη λειτουργία ύπνωσης-αφύπνισης (sleep/wakeup scheme) σύμφωνα με αλγόριθμους όπως ο RIS (randomized independent sleeping) που προτείνεται στο [2]. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο RIS ο χρόνος λειτουργίας του WSN χωρίζεται σε διαστήματα, στα οποία οι αισθητήρες ενεργοποιούνται (ανεξάρτητα από τους άλλους αισθητήρες του WSN) με πιθανότητα p ή τίθεται σε ύπνωση με πιθανότητα $1-p$. Συνεπώς, ο βαθμός της Poisson κατανομής σε WSN τυχαίας ανάπτυξης κόμβων που ενσωματώνει το RIS, ισούται με np . Διαμορφώνεται τελικά ένα μοντέλο δικτύου $N(n,p,r)$ με κόμβους εμβέλειας r , με κατανομή στο εσωτερικό της ζώνης τύπου Poisson με βαθμό n , οι οποίοι αφυπνίζονται με πιθανότητα p .

Για το μοντέλο $N(n,p,r)$ ορίζονται οι βοηθητικές συναρτήσεις:

$$c(s) = \frac{2npr}{s \log(np)} \quad (4.1)$$

$$f_k(n) = \frac{\varphi(np) + (k-1)\log(\log(np))}{\log(np)} \quad (4.2)$$

όπου $\varphi(np)$ μία τυχαία συνάρτηση αργά αύξουσα και μονότονη που τείνει στο άπειρο.

Σύμφωνα με το θεώρημα 6.5 που διατυπώνεται στο [1], ορίζεται η *κρίσιμη συνθήκη (critical condition)* για κάλυψη k -barrier κάθε ομάδας παράλληλων διαδρομών, που διασχίζουν περιοχή ζώνης B_s διαστάσεων $(\lambda_1, \lambda_2, 1/s)$ με μεγάλη πιθανότητα ως εξής:

Για δίκτυο αισθητήρων $N(n,p,r)$ ανεπτυγμένο εντός ζώνης B_s όταν η $C(s)$ ικανοποιεί την σχέση

$$c(s) \geq 1 + \frac{\varphi(np) + (k-1)\log(\log(np))}{\log(np)} \quad (4.3)$$

για επαρκώς μεγάλο s , τότε η B_s είναι k καλυμμένη με μεγάλη πιθανότητα καθώς $s \rightarrow \infty$.

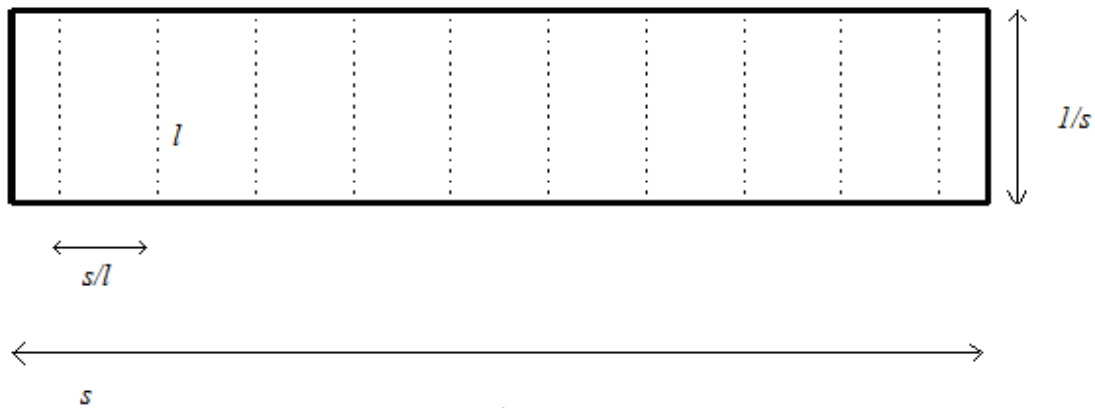
Αντίστοιχα, η επαρκής συνθήκη που υποδεικνύει ότι υπάρχει μία μη k -καλυμμένη διαδρομή που διασχίζει περιοχή B_s αποτυπώνεται στη σχέση:

$$c(s) \leq 1 - \frac{\varphi(np) + (k-1)\log(\log(np))}{\log(np)} \quad (4.4)$$

Εκτός από τις κρίσιμες συνθήκες και για εδαφικές περιοχές όμοιες με αυτή του σχήματος 4.2, προκύπτει ένα εξίσου ενδιαφέρον συμπέρασμα, το οποίο εκφράζεται στο λήμμα 6.1 του [1]:

Για ορθογώνια περιοχή διαστάσεων $s \times (1/s)$, η οποία διασχίζεται κάθετα κατά πλάτος από l διαδρομές ($l \in \mathbb{Z} > 0$), έστω L_l το σύνολο των l διαδρομών. Τα μονοπάτια απέχουν μεταξύ τους σταθερή απόσταση $t = s/l$. Αποδεικνύεται ότι όλες οι κάθετες διαδρομές της περιοχής είναι k -καλυμμένες από ένα δίκτυο με κόμβους εμβέλειας r εφόσον όλες οι διαδρομές του L_l είναι k -καλυμμένες από ένα ίδιο δίκτυο με κόμβους αισθητήριας εμβέλειας $r' = r - (s/l)$.

Με βάση το ανωτέρω συμπέρασμα προκύπτει ότι είναι δυνατή η απόδειξη πως όλες οι (άπειρες) κάθετες διαδρομές μιας περιοχής καλύπτονται από δίκτυο αισθητήριας εμβέλειας κόμβων r , αν δειχθεί ότι L_l διαδρομές (πεπερασμένος αριθμός) k -καλύπτονται από δίκτυο με αντίστοιχη $r' = r - (s/l)$.



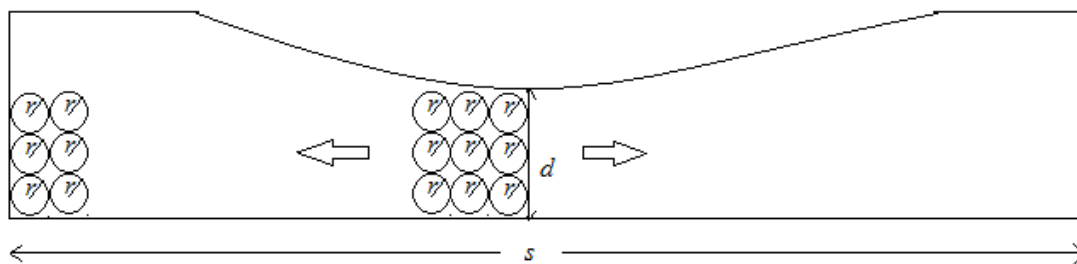
Σχήμα 4.3 belt region που διασχίζεται από $L(l)$ κάθετα μονοπάτια που ισαπέχουν κατά $t=s/l$.

4.2.1.2 Κάλυψη φράγματος για προκαθορισμένη ανάπτυξη WSN σε belt region

Στην περίπτωση της προκαθορισμένης ανάπτυξης WSN η διαδικασία εύρεσης του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού κόμβων απλοποιείται. Για το σχετικό υπολογισμό γίνεται η υπόθεση ότι οι γειτονικοί κόμβοι τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε οι αισθητήριοι δίσκοι των κόμβων να εφάπτονται. Σε μία εδαφική ζώνη (ανοικτή ή κλειστή) με μήκος s ο αριθμός των κόμβων που απαιτούνται για k -κάλυψη της περιοχής με κόμβους αισθητήριας ακτίνας r είναι

$$q = k \cdot (s/2r) \quad (4.5)$$

με $k \in [1, k_{\max}]$, $k \in \mathbb{Z}$. Το k_{\max} προκύπτει υπολογίζοντας τον αριθμό των αισθητήρων που είναι δυνατό να τοποθετηθούν κατά πλάτος της βραχύτερης διαδρομής που διασχίζει την περιοχή. Αν η βραχύτερη διαδρομή έχει μήκος d , τότε $k_{\max} = d/2r$.



Σχήμα 4.4 belt region στην οποία επισημαίνεται το βραχύτερο μονοπάτι που τη διασχίζει κάθετα.

4.2.1.3 Η διατήρηση της ποιότητας υπηρεσιών στη μέθοδο κάλυψης φράγματος

Η επιτυχής κάλυψη μιας εδαφικής ζώνης με τον ελάχιστο αριθμό αισθητήρων και τη ζητούμενη διάταξη δεν διασφαλίζει τη βιωσιμότητα των αισθητήρων και κατά συνέπεια του WSN. Οι κόμβοι μπορεί να παύσουν να λειτουργούν λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, εκτεταμένης χρήσης ή εξάντλησης της τροφοδοσίας τους. Στο [3] επιχειρείται η αξιολόγηση αναπτυγμένων WSN, ελέγχοντας το βαθμό στον οποίο υφίσταται η σχεδιασμένη k -κάλυψη.

Η μέθοδος ποιοτικού ελέγχου ορίζει ένα μέγεθος Q^* , το οποίο αντιπροσωπεύει την επιθυμητή ποιότητα και συνδέεται με την ολική k -κάλυψη

της εδαφική ζώνη. Αν Q_k η μετρούμενη ποιότητα ανάπτυξης του WSN, τότε εφόσον $Q_k < Q^*$ απαιτείται διορθωτική παρέμβαση. Το Q_k τίθεται $Q_k = -1$ αν η belt region περιέχει έστω μία ορθογώνια διαδρομή, η οποία τη διασχίζει και δεν είναι k-καλυμμένη. Η πρόκληση εντοπίζεται στον υπολογισμό της τιμής του Q_k για κάθε WSN εφόσον $Q_k \neq -1$.

Αν η belt region B έχει μήκος s τότε $Q^* = Q_k = s$. Το μέγεθος Q^* αντιπροσωπεύει τη k-κάλυψη της B σε όλο το μήκος της s . Εφόσον προκύψει μετά από εξέταση της B ότι $Q_k = L < s$, τότε η υπόλοιπη περιοχή είναι φραγμένη, αλλά όχι κατά k παράγοντα (weak zones). Ο σκοπός της αξιολόγησης του WSN γίνεται ακριβώς για τον εντοπισμό και την αποκατάσταση αυτών των αδύναμων ζωνών. Ο υπολογισμός του Q_k και η εύρεση των αδύναμων ζωνών γίνεται με τον αλγόριθμο GUARANTEE ο οποίος παρουσιάζεται στο [3].

Ο GUARANTEE εκτελείται σε δύο επίπεδα, στους κόμβους και τους κόμβους-πύλες. Οι κόμβοι ελέγχουν τους γειτονικούς τους για να διαπιστώσουν το είδος της κάλυψης. Αν η περί τον κόμβο περιοχή δεν είναι k-καλυμμένη, υποβάλλεται σχετική αναφορά προς τον κόμβο-πύλη. Ο κόμβος-πύλη ενημερώνει την τιμή του Q_k και τον κατάλογο με τις υπό επιδιόρθωση ζώνες, με βάση την υποβληθείσα αναφορά. Στη συνέχεια, ο χρήστης του συστήματος παρεμβαίνει ή όχι στη διάταξη του WSN ανάλογα με τα αποτελέσματα (προσθήκη, αναδιάταξη κόμβων).

4.2.2 Η συνθήκη συνδεσιμότητας σε ένα WSN

Αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.1 ο λόγος για τον οποίο η συνδεσιμότητα είναι ουσιώδης για την αποδοτική λειτουργία ενός WSN. Ενώ η κάλυψη συνδέεται άμεσα με την εμβέλεια ανίχνευσης του επιλεγμένου αισθητήρα της εφαρμογής, η συνδεσιμότητα εξαρτάται από τις δυνατότητες του ραδιοπομπού του κόμβου.

Στις εφαρμογές WSN για επιτήρηση και παρακολούθηση συνόρων οι οποίες αναπτύσσονται στη περιοχή κάλυψης σύμφωνα με τη μέθοδο φράγματος, η συνδεσιμότητα μπορεί να εξασφαλιστεί αξιοποιώντας τα

συμπεράσματα του [4]. Στο [4] αναλύεται ο αλγόριθμος OGDC (Optimal Geographical Density Control) που εξετάζει τη διαχείριση της πυκνότητας των κόμβων σε μια περιοχή. Παράλληλα, παρατίθεται και αποδεικνύεται το ακόλουθο θεώρημα:

"Η συνθήκη σύμφωνα με την οποία η εμβέλεια του ραδιοπομπού (r_t) πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της εμβέλειας ανίχνευσης του αισθητήρα (r_s), είναι ικανή και αναγκαία για τη διασφάλιση της συνδεσιμότητας στο WSN".

$$r_t \geq 2 \cdot r_s \quad (4.6)$$

Η εμβέλεια του ραδιοπομπού δεν πρέπει να υπερβαίνει κατά πολύ το διπλάσιο της r_s , καθώς αυτό δεν συμβάλλει στην οικονομία ενέργειας του δικτύου επειδή καταναλώνεται πολύτιμη ενέργεια από τους ραδιοπομπούς.

4.2.3 Πρόσθετοι παράγοντες διαμόρφωσης της κάλυψης και της συνδεσιμότητας σε ένα WSN.

Τα WSN επιτήρησης συνόρων προορίζονται για περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ως προς τη μορφολογία και τις επικρατούσες συνθήκες διάδοσης. Αν το έδαφος είναι ορεινό ή παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία σε συνδυασμό με έντονη βλάστηση, εμποδίζεται σε μεγάλο βαθμό η επικοινωνία και άρα η συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων. Οι εμβέλειες των ραδιοπομπών περιορίζονται λόγω του δυσμενούς περιβάλλοντος διάδοσης. Κατά συνέπεια, προκαλούνται σφάλματα και υπάρχουν απώλειες σε δεδομένα.

Για προκαθορισμένη ανάπτυξη του WSN, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κάλυψη και τη συνδεσιμότητα είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη στη σχεδίαση και οι κόμβοι να τοποθετηθούν σε επιθυμητά σημεία. Επιπλέον, πολλές από τις εμπορικές εφαρμογές [7] προσφέρουν δυνατότητες προσομοίωσης του υπό ανάπτυξη δικτύου στην επιθυμητή περιοχή λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία της. Η αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων γίνεται με ενσωμάτωση αλγορίθμων που

αυξομειώνουν την ένταση των πομπών ή με χρήση κόμβων-αναμεταδοτών (relay) [5].

Οι κόμβοι-αναμεταδότες μπορεί να είναι είτε κόμβοι του WSN όμοιοι με αυτούς που συλλέγουν πληροφορίες επιφορτισμένοι αποκλειστικά με τη διακίνηση δεδομένων είτε κόμβοι μεγαλύτερων δυνατοτήτων με αυξημένη εμβέλεια, ισχύ και υπολογιστικές δυνατότητες. Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζουν οι προσπάθειες ενσωμάτωσης κατευθυντικών κεραιών στους κόμβους ενός WSN [6], ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των πομπών λόγω εξοικονόμησης ενέργειας εκπομπής.

Σημαντική πρόκληση στην αποκατάσταση προβλημάτων κάλυψης σε ένα WSN αποτελεί η περίπτωση της τυχαίας ανάπτυξης. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχει πρότερος σχεδιασμός, οπότε τα όποια προβλήματα παρουσιαστούν πρέπει να αντιμετωπισθούν από το ίδιο το δίκτυο κατά τη διαδικασία αυτό-οργάνωσής του. Μια προσέγγιση στο πρόβλημα της εκτίμησης της ποιότητας κάλυψης σε σχέση με τη μορφολογία της περιοχής ανάπτυξης γίνεται στο [8], όπου παρουσιάζεται και σχετικός αλγόριθμος εύρεσης των πιθανών ακάλυπτων διαδρομών. Στο επόμενο κεφάλαιο, διατυπώνονται προτάσεις για WSN επιτήρησης συνόρων που αφορούν κατά κύριο λόγο WSN προκαθορισμένης ανάπτυξης, γεγονός που διευκολύνει τις διαδικασίες εντοπισμού και επίλυσης των προβλημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

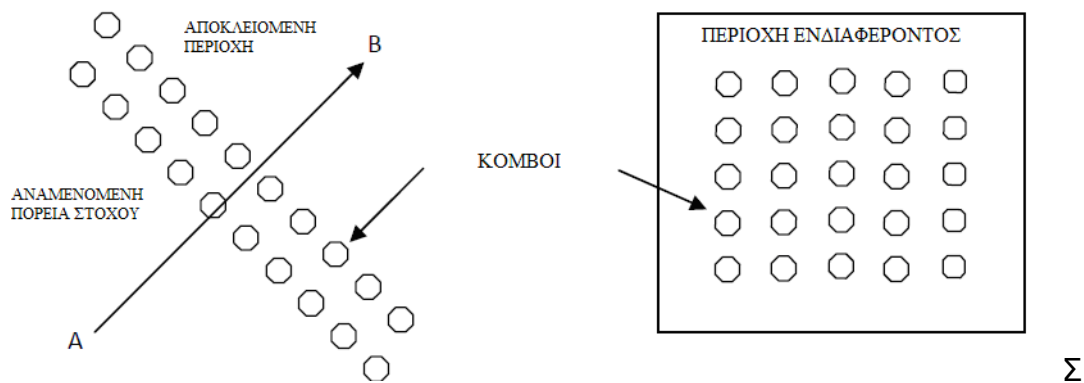
4.3 Η κάλυψη στα θαλάσσια WSN.

4.3.1 Κάλυψη για 2D και 3D deployment.

Στις εφαρμογές θαλάσσιων WSN που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2, διακρίνονται δύο κύριες περιπτώσεις ανάπτυξης:

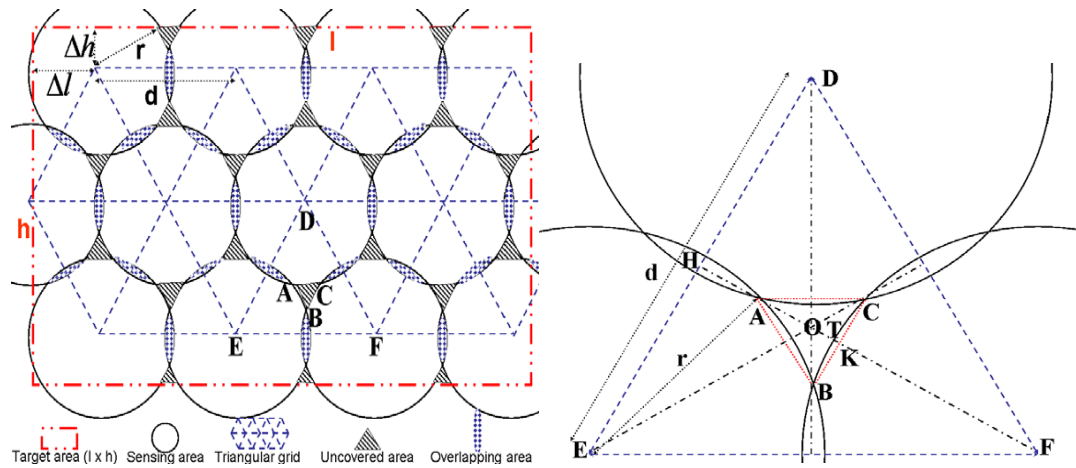
- Ανάπτυξη κόμβων στην επιφάνεια της θάλασσας για κάλυψη στόχων κινούμενων στην επιφάνεια (δισδιάστατη ανάπτυξη - 2D deployment)
- Ανάπτυξη κόμβων στην επιφάνεια ή το βυθό με δυνατότητα κάλυψης του υδάτινου όγκου ανάμεσα σε βυθό και επιφάνεια (τριδιάστατη ανάπτυξη- 3D deployment).

Στην πρώτη περίπτωση, και ανάλογα με τους σκοπούς της εφαρμογής, οι κόμβοι διατάσσονται έτσι ώστε να ανιχνεύουν διερχόμενους στόχους ή να παρακολουθούν του στόχους που κινούνται σε μία περιοχή (σχήμα 4.4). Για την κάλυψη μιας ζώνης επιφάνειας για ανίχνευση διερχόμενων απειλών ή στόχων, είναι δυνατή η υιοθέτηση σχήματος κάλυψης όμοιου με τη κάλυψη φράγματος. Στα θαλάσσια WSN οι κόμβοι λόγω υψηλού κόστους, μεγάλου μεγέθους και εμβέλειας ανίχνευσης είναι περιορισμένοι σε αριθμό. Κατά συνέπεια, δεν τίθεται θέμα εφαρμογής μεθόδου τυχαίας ανάπτυξης κόμβων. Οι smart buoys, οι οποίοι είναι κόμβοι σταθεροί (προσδεμένοι με άγκυρα στον βυθό), μπορούν να αναπτυχθούν σε περιοχή ενδιαφέροντος αποκλειστικά με χρήση μεθόδων ανάπτυξης κόμβων σε προκαθορισμένες θέσεις.



χήμα 4.4 Πιθανές αναπτύξεις σε δισδιάστατα πεδία ανίχνευσης. Αποκλεισμός περιοχής (αριστερά) και παρακολούθηση περιοχής ενδιαφέροντος (δεξιά).

Το πλήθος των απαιτούμενων αισθητήρων για k-κάλυψη περιοχής ζώνης υπολογίζεται από τη σχέση 4.5 σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στη παράγραφο 4.2.1.2.



Σχήμα 4.5 Ανάπτυξη σε περιοχή ενδιαφέροντος διαστάσεων $h \times l$.

Σύμφωνα με το [10] για ανάπτυξη σε διδιάστατη περιοχή ενδιαφέροντος διαστάσεων $h \times l$, εφαρμόζεται ένα τριγωνικό πλέγμα (σχήμα 4.5). Με βάση το πλέγμα υπολογίζεται η βέλτιστη πυκνότητα των κόμβων για πλήρη κάλυψη της περιοχής και τη συνδεσιμότητα των κόμβων. Αποδεικνύεται στο [10] ότι, για την επίτευξη μέγιστης κάλυψης, πρέπει η απόσταση d μεταξύ των κέντρων των γειτονικών αισθητήριων κόμβων με ακτίνα r να είναι

$$d = \sqrt{3} \cdot r \quad (4.7)$$

Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι ο μικρότερος δυνατός αριθμός αισθητήρων N για την επίτευξη της μέγιστης κάλυψης δίνεται από τη σχέση:

$$N = \left[\frac{l-d}{d} + 1 \right] \cdot \left[\frac{2\sqrt{3}h - 6d + 4\sqrt{3}r}{3d} + 1 \right] \quad (4.8)$$

Στις περιπτώσεις όπου τα WSN ενσωματώνουν κόμβους με αισθητήριες συσκευές μεταβλητού βάθους (όπως τα rods του μοντέλου της παραγράφου 2.2.6.2 της παρούσας εργασίας) λαμβάνονται υπόψη οι μετακινήσεις των συσκευών από τα θαλάσσια ρεύματα. Παράλληλα, στο [10] μελετάται η τυχαία ανάπτυξη κόμβων WSN στο βυθό. Στη συνέχεια, παρατίθεται ο σχετικός αλγόριθμος για τον έλεγχο της κάλυψης τρισδιάστατου χώρου μέσω της ρύθμισης του βάθους ανάπτυξης των rods.

Στο [11] επιχειρείται μια θεωρητική προσέγγιση της κάλυψης για ανάπτυξη WSN στο χώρο. Για πλήρη κάλυψη υδάτινου όγκου V και εμβέλεια ανίχνευσης υποθαλάσσιων κόμβων r , απαιτείται πλήθος κόμβων n για τον οποίο ισχύει:

$$(4/3) \cdot \pi \cdot (n/Vr^3) = \ln n + \ln(\ln n) + \omega(n) \quad (4.9)$$

όπου $1 \ll \omega(n) \ll \ln \ln n$. Στο πείραμα που παρουσιάζεται στο [10], τίθεται $\omega(n) = 1 + \ln(\ln(n/2))$.

4.3.2 Η συνθήκη συνδεσιμότητας στα θαλάσσια WSN

Στο [10] αναφέρεται ως εκτίμηση ότι, για $r_t \geq r_s$, η συνδεσιμότητα σε ένα WSN εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό. Σε συνδυασμό με τα όσα αποδεικνύονται στο [4] και αναφέρονται στην παράγραφο 4.2.2 της παρούσας, λόγω της ομοιότητας των προβλημάτων, είναι δυνατή η υιοθέτηση της αποδεδειγμένης συνθήκης (4.6) και για τα θαλάσσια WSN.

Αναφορές 4ου Κεφαλαίου

- [1] S. Kumar, Ten H. Lai and A. Arora "*Barrier Coverage With Wireless Sensors*" MobiCom 2005 ,Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking Pages 284-298
- [2] Santosh Kumar, Ten H. and Lai József Balogh "*On k-Coverage in a Mostly Sleeping Sensor Network*" MobiCom '04, Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking Pages 144-158
- [3] Ai Chen , Ten H. Lai and Dong Xuan "*Measuring and Guaranteeing Quality of Barrier-Coverage in Wireless Sensor Networks*" ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), May 2008, pp. 421-430.
- [4] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou "*Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks*", Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, Vol. 1, March 3 2005, pp. 89–124
- [5] Lloyd, E.L. and Guoliang Xue "*Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks*" Published in Computers, IEEE Transactions on (Volume:56 , Issue:1) Jan. 2007 Page(s):134 - 138 ISSN :0018-9340
- [6] Nilsson and Martin "*Directional antennas for wireless sensor networks.*" In: 9th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (Adhoc'09), 4-5 May 2009, Uppsala, Sweden.
- [7] <http://www.textronsystems.com/products/weapon-sensor/microobserver>
- [8] Onur, E., Ersoy, C., Delic, H. and Akarun, L " *Coverage in Sensor Networks When Obstacles Are Present* " Published in Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on (Volume:9) Date of Conference: June 2006 Page(s):4077 - 4082 ISSN :8164-9547
- [9] Ahmed M. Mahdy and Jonathan M. Groenke "*Target Tracking in Marine Wireless Sensor Networks*" International Journal on Advances in Networks and Services, vol 3 no 1 & 2, year 2010

- [10] Dario Pompili, Tommaso Melodia, Ian F. Akyildiz *"Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks"* Elsevier Ad Hoc Networks 7 (2009) 778–790
- [11] Vlady Ravelomanana *"Extremal Properties of Three-Dimensional Sensor Networks with Applications"* IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 3, NO. 3, JULY-SEPTEMBER 2004

Κεφάλαιο 5ο

Ανάπτυξη WSN για επιτήρηση των ελληνικών χερσαίων και θαλάσσιων συνόρων.

5.1 Προσδιορισμός του προβλήματος

Ο σκοπός της εργασίας είναι η πρόταση για ένα WSN επιτήρησης προσαρμοσμένο στα δεδομένα των χερσαίων συνόρων της Ελλάδας. Τα χαρακτηριστικά των περιοχών ανάπτυξης του προτεινόμενου WSN καθορίζουν και τις παραμέτρους της εφαρμογής. Με βάση τις επιχειρησιακές απαιτήσεις, είναι δυνατός ο διαχωρισμός των περιοχών για ανάπτυξη WSN ως εξής:

- α. στην ελληνοτουρκική μεθόριο ανατολικά και βόρεια του νομού Έβρου.
- β. στη μεθόριο με τα λοιπά κράτη της Βαλκανικής.
- γ. στα θαλάσσια σύνορα και τις ακτές νήσων.

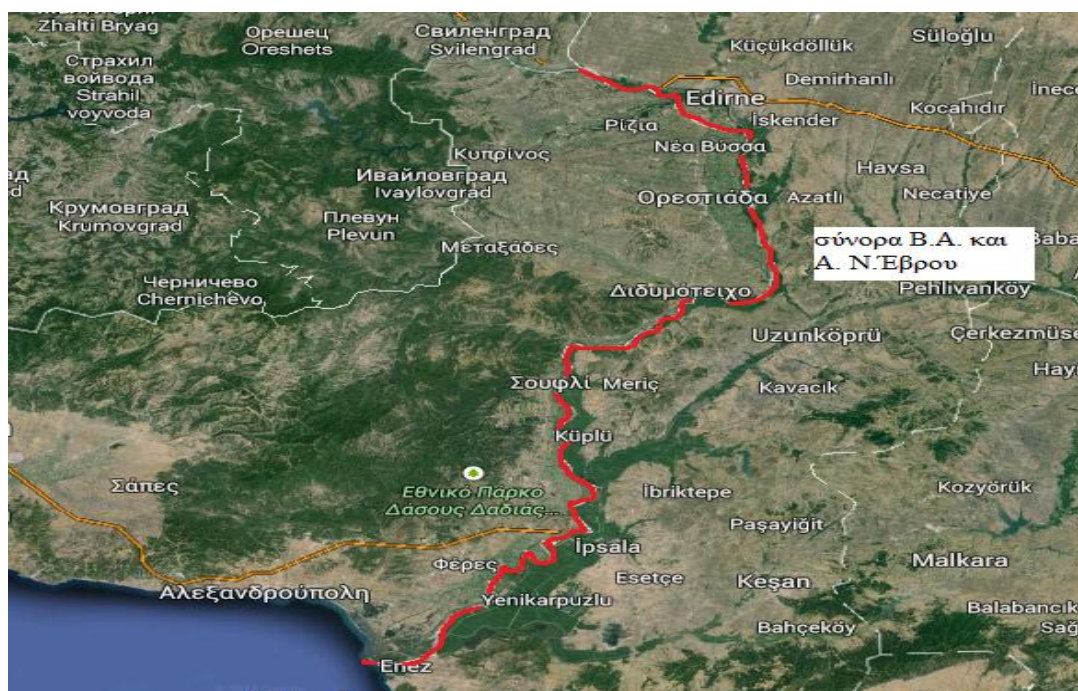
Κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις θα εξεταστεί μεμονωμένα, ώστε η πρόταση του εκάστοτε WSN συστήματος να είναι πλησιέστερα στις απαιτήσεις και τα ιδιαίτερα γεωφυσικά χαρακτηριστικά τους.

5.2 Κάλυψη χερσαίων συνόρων νομού Έβρου

5.2.1 Υφιστάμενη κατάσταση

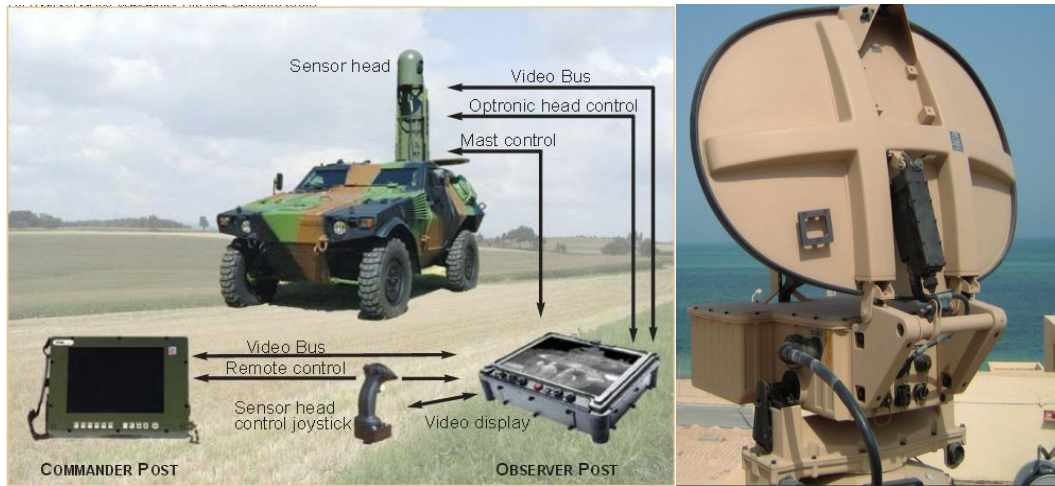
Το πρόβλημα της φύλαξης και επιτήρησης εστιάζεται κυρίως στα χερσαία σύνορα ανατολικά και βόρεια του νομού Έβρου. Για δεκαετίες ο νομός Έβρου αποτελεί πύλη διέλευσης παράνομων μεταναστών, όχι μόνο προς την Ελλάδα αλλά και προς την Ευρωπαϊκή Ένωση. Ταυτόχρονα, αποτελεί την περιοχή ανάπτυξης μεγάλου όγκου ελληνικών χερσαίων στρατιωτικών δυνάμεων. Σύμφωνα με το ισχύον στρατιωτικό επιχειρησιακό δόγμα, η Τουρκία αναγνωρίζεται ως ο μεγαλύτερος κίνδυνος για την εδαφική ακεραιότητα της Ελλάδας. Κατά συνέπεια, η συνοριακή φύλαξη αποτελεί ένα πρόβλημα με στρατιωτική και πολιτική επιχειρησιακή διάσταση .

Από την πλευρά του στρατού η φύλαξη πραγματοποιείται με αδιάλειπτες εποχούμενες περιπολίες στην περιοχή της δυτική όχθης του Έβρου ποταμού και στο τρίγωνο του Κάραγατς, ενώ η περιοχή είναι χωρισμένη σε τομείς επιτηρούμενους από επανδρωμένα φυλάκια. Τα φυλάκια εκτελούν επιτήρηση κυρίως με παθητικά μέσα επιτήρησης και διαθέτουν υποδομές επικοινωνιών



Σχήμα 5.1. Συνοριακή γραμμή Ελλάδας - Τουρκίας στο Ν. Έβρου.

ενσύρματων και ασύρματων. Βρίσκονται σε επαφή με επιχειρησιακά κέντρα στις έδρες των σχηματισμών στους οποίους υπάγονται. Στοιχεία που συλλέγονται από τα φυλάκια και τα απεικονιστικά μέσα που διαθέτουν οι σχηματισμοί, μεταδίδονται στο ΓΕΣ μέσω δεσμευμένων ενσύρματων κυκλωμάτων και ευρυζωνικής κρυπτογραφημένης ασύρματης σύνδεσης. Αφού γίνει η επεξεργασία των πληροφοριών, ενημερώνεται ένας δυναμικός χάρτης κατάστασης, ενώ είναι διαθέσιμη απευθείας εικόνα στο κέντρο επιχειρήσεων των ΓΕΣ/ΓΕΕΘΑ από περιορισμένα σε αριθμό ανεπτυγμένα απεικονιστικά μέσα (UAVs, pulse doppler radar επιτήρησης επιφάνειας τύπου BOR-A550-60 [27] και οι ηλεκτροπτικοί αισθητήρες MARGOT [28]).

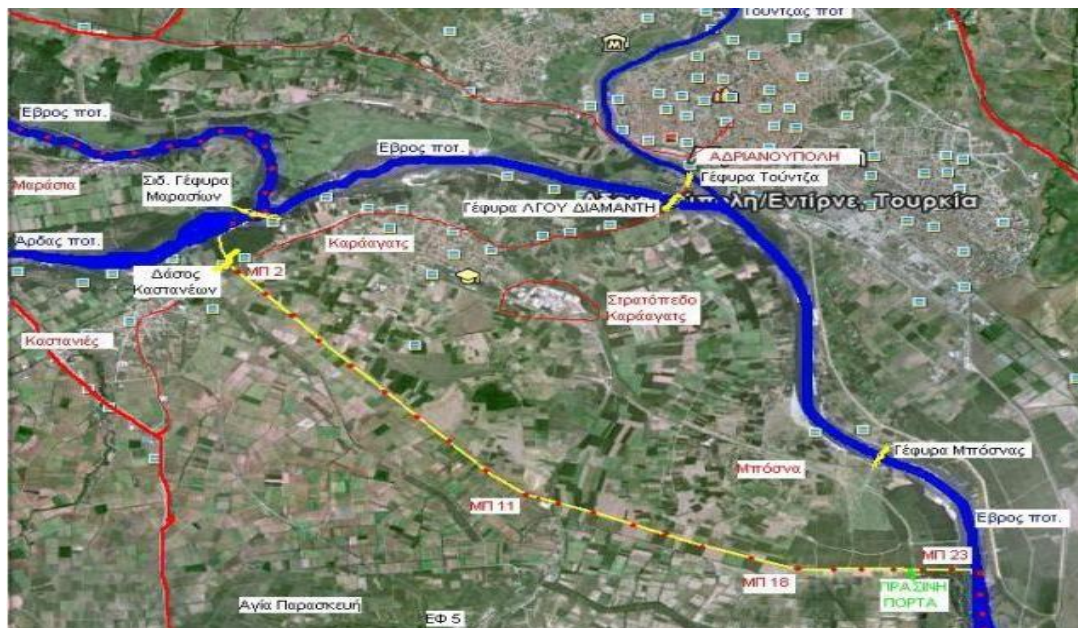


Σχήμα 5.2 Σύστημα MARGOT (αριστερά) και BOR-A550 (δεξιά) της THALES

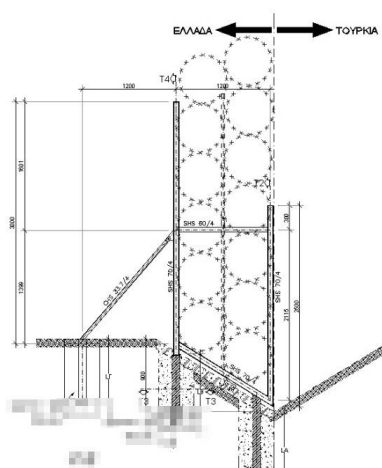
Η πολιτεία από την δική πλευρά της έχει αναπτύξει στην περιοχή σημαντική δύναμη συνοριοφυλάκων. Η αποστολή της φύλαξης εκτελείται από τη συνοριοφυλακή με εποχούμενες περιπολίες σε κρίσιμες μεθοριακές περιοχές (σημεία έντονης κινητικότητας) και με ΣΤΕΚ (σημεία τακτικού ελέγχου κίνησης) σε οδικούς κόμβους. Μέχρι το 2012 και την εφαρμογή του σχεδίου ΑΣΠΙΔΑ από το ΥΠΤΠ, οι δυνατότητες της συνοριοφυλακής ήταν περιορισμένες σε μέσα και ανθρώπινους πόρους. Το σχέδιο ΑΣΠΙΔΑ εφαρμόστηκε από την ΕΛΑΣ, στο πλαίσιο της επιχείρησης POSEIDON της FRONTEX [1] στη περιοχή. Ο σχεδιασμός περιελάμβανε την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού συνοριοφυλάκων στην περιοχή του Έβρου, με εξειδικευμένα οχήματα, μέσα παρατήρησης και επικοινωνίας [2]. Η επιχείρηση POSEIDON τερματίστηκε στις 31 Μαρτίου του 2012 αλλά η επιχείρηση ΑΣΠΙΔΑ συνεχίζεται μέχρι σήμερα με μεγάλο μέρος της να χρηματοδοτείται από κονδύλια της ΕΕ.

Η φύλαξη των συνόρων έναντι της παράνομης μετανάστευσης ενισχύθηκε σημαντικά με την υλοποίηση του φράκτη στο Β.Α. νομό Έβρου [3]. Πρόκειται για ένα εμπόδιο που αποτελείται από διπλή σειρά συρματοπλέγματος, ενισχυμένο ενδιάμεσα με ακανθωτό σύρμα, με μήκος 12,5 km. Κατασκευάστηκε ώστε να αποκλείσει όλες τις χερσαίες προσβάσεις στο τμήμα από τη μεθοριακή πυραμίδα Νο 2 μέχρι τη μεθοριακή πυραμίδα Νο 23 (Σχήμα 5.1). Ουσιαστικά, αποτελεί συνέχεια του φυσικού κωλύματος του Έβρου ποταμού κατά μήκος των συνόρων. Το φράκτη καλύπτουν 3 βασικές

θερμικές κάμερες σε ψηλούς ιστούς κι άλλες 20 βοηθητικές, οι οποίες καλύπτουν μια έκταση 12,5 km. Κάθε μία από τις μεγάλες κάμερες έχει εμβέλεια 2 km.



Σχήμα 5.3. Το κώλυμα (κίτρινο χρώμα) στην περιοχή του Β.Α. Ν.Εβρου κατά μήκος των ελληνοτουρκικών συνόρων.



Σχήμα 5.4. Τομή του εμποδίου (αριστερά) και φωτογραφία κατά το στάδιο της κατασκευής (δεξιά).

Η εικόνα από τα εποπτικά μέσα που καλύπτουν το φράκτη πηγαίνει σε περιφερειακά κέντρα διαχείρισης της πληροφορίας (Ν.Βύσσα Ορεσιτιάδας), ενώ, στη συνέχεια, ενημερώνεται το ΚΟΔΙΣΜΕ [4] (κέντρο ολοκληρωμένης διαχείρισης συνόρων και μετανάστευσης) στο αρχηγείο της ΕΛΑΣ. Στο σχεδιασμό προβλέπεται η επέκταση της κάλυψης από θερμικές κάμερες και

στο κεντρικό και νότιο τμήμα των συνόρων. Επιπλέον, ειδικό όχημα εξοπλισμένο με θερμικές κάμερες σαρώνει την περιοχή του Δέλτα του Έβρου, λόγω του μικρού βάθους των νερών στην περιοχή το οποίο διευκολύνει τη διέλευση από την Τουρκία στην Αλεξανδρούπολη.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, για τη φύλαξη ενός συνοριακού μετώπου μήκους 100 km περίπου, απασχολούνται περισσότεροι από 2000 μικτού προσωπικού (συνοριοφύλακες και στρατιώτικοί). Οι αριθμός των ανθρώπινων πόρων που διατίθενται, παρά την ύπαρξη σημαντικών (και σε πολλά σημεία απροσπέλαστων εμποδίων) αλλά και την ενσωμάτωση τεχνολογικών βοηθημάτων, παραμένει εξαιρετικά υψηλός. Σε πολύ μεγάλα επίπεδα παραμένει και το κόστος της συντήρησης της δύναμης φύλαξης (καύσιμα, συντήρηση τεχνικού υλικού, σίτιση, στέγαση), παρά τη σημαντική συνεισφορά της ΕΕ. Σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας στην εξοικονόμηση πόρων είναι και η πολλές φορές επικαλυπτόμενη δράση στρατού και αστυνομίας κατά μήκος των συνόρων, αλλά και η μη κοινή χρήση των τεχνολογιών, πληροφοριών και μέσων που διαθέτουν.

Απαιτείται, λοιπόν, η εισαγωγή και η ανάπτυξη ενός ενιαίου συστήματος έγκαιρης ανίχνευσης και παρακολούθησης, το οποίο θα ενισχύει το έργο της αστυνομίας για έλεγχο της λαθρομετανάστευσης, αλλά θα ικανοποιεί και τις επιχειρησιακές απαιτήσεις του στρατού.

5.2.2 Σύστημα WSN για την επιτήρηση του ανατολικού Ν. Έβρου

Στον άμεσο σχεδιασμό της πολιτικής ηγεσίας [3,4,5] βρίσκεται η επέκταση της κάλυψης από θερμικές κάμερες, εκτός από το φράκτη, καθ' όλο το μήκος των ελληνοτουρκικών συνόρων. Πρόκειται για συνοριογραμμή μήκους πάνω 100 km., η οποία στοιχίζεται στο πολύ σημαντικό εμπόδιο του Έβρου ποταμού. Η στρατηγική σημασία του ποταμού αποδίδεται στο ότι είναι απροσπέλαστος και ιδιαίτερα βαθύς σε αρκετά σημεία του. Επιπλέον, το έδαφος στις όχθες του είναι ιδιαίτερα λασπώδες και με έντονη βλάστηση, καθιστώντας την κίνηση μέσων και βαρέων οχημάτων αδύνατη, κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες.

Ένα WSN επιτήρησης θα μπορούσε να λειτουργήσει συμπληρωματικά ως προς μία επέκταση του φράκτη στα τμήματα που δεν καλύπτονται ή να αποτελέσει το ίδιο ένα ηλεκτρονικό φράκτη. Η κατασκευή της επέκτασης εκτός από το μεγάλο κόστος (3.2 Μ € περίπου για μήκος μόνο 12.5 km [6]), προσθέτει και ένα μόνιμο εμπόδιο μπροστά από το ήδη υπάρχον (ποταμός). Κατά συνέπεια, επιβάλλει αναθεώρηση του επιχειρησιακού σχεδιασμού του στρατού, εφόσον κάθε μόνιμο εμπόδιο δρα αποτρεπτικά και προς τις δύο πλευρές της μεθορίου. Αντίθετα, η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού φράγματος από αισθητήρες δεν περιορίζει την ευελιξία των χερσαίων δυνάμεων, παρέχοντας ταυτόχρονα παρακολούθηση και έγκαιρο εντοπισμό της πιθανής απειλής.

Η ανάπτυξη των θερμικών καμερών (προσδιορίζεται για το 2015), που θα καλύπτουν όλο το συνοριακό μέτωπο του ανατολικού Ν.Έβρου, θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ένα υβριδικό WSN όμοιο με αυτό της εφαρμογής *bordersense* [7] που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.5 της εργασίας. Η δομή ενός συστήματος στα πρότυπα του *bordersense* περιλαμβάνει τρία επίπεδα. Στο 1ο επίπεδο βρίσκεται ένα WSN, το οποίο ως κύρια αποστολή έχει τον εντοπισμό με ακρίβεια της θέσης του παραβάτη ή της απειλής. Η ταξινόμηση της απειλής μπορεί να είναι εφικτή από τις δυνατότητες του WSN του 1ου επιπέδου αλλά δεν αποτελεί προτεραιότητα. Στο 2ο επίπεδο βρίσκονται οι κάμερες, με τις οποίες γίνεται η εξακρίβωση και η ταυτοποίηση της απειλής. Η παρακολούθηση των στόχων και η επέμβαση μπορεί να γίνει με τη βοήθεια τεχνικών μέσων όπως UAV, ή απευθείας από στοιχεία ασφαλείας (περίπολοι εποχούμενες) που συνθέτουν το 3ο επίπεδο. Ο τύπος του WSN που πρόκειται να επιλεγεί (υπέργειο, υπόγειο, είδος αισθητήρα που ενσωματώνει) και τα λοιπά χαρακτηριστικά του, εξαρτώνται από το περιβάλλον όπου πρόκειται να αναπτυχθεί.

5.2.2.1 Η επιλογή του κατάλληλου τύπου WSN για το 1ο επίπεδο.

Για την επίμαχη περιοχή πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακραίες θερμοκρασίες (κατά τη χειμερινή περίοδο) και οι μεγάλες τιμές της υγρασίας. Επιπλέον, το έδαφος στις όχθες του ποταμού Έβρου παρουσιάζει

πυκνή βλάστηση, η οποία δεν συνοδεύεται από παρουσία πανίδας λόγω της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας. Σύμφωνα με τα [9,10], η τοποθέτηση ενός UWSN θα παρουσίαζε προβλήματα στη *συνδεσιμότητα* λόγω του ιδιαίτερα υγρού εδάφους. Επιπλέον, σοβαρά υπόψη πρέπει να ληφθεί και η φθορά από διάβρωση σε ένα τέτοιο περιβάλλον με ακραίες συνθήκες υγρασίας, πόσο μάλλον για ένα υπόγειο τοποθετημένο κόμβο. Αντίθετα, ένα υπέργειο σύστημα δεν παρουσιάζει αυτές τις ιδιαιτερότητες και η συνδεσιμότητα επηρεάζεται αποκλειστικά από τις καιρικές συνθήκες και τη βλάστηση. Σε γενικές γραμμές, απότομες διακυμάνσεις του εδάφους δεν υφίστανται και υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης των κόμβων σε οπτική επαφή. Δεν πρέπει να αμελούνται και οι συχνές πλημμύρες σε πολλά σημεία του Έβρου κατά τους χειμερινούς μήνες. Πρέπει να είναι εύκολη η περισυλλογή του συστήματος, γεγονός εξαιρετικά δύσκολο σε ένα UGSN.

Σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος των κόμβων, η βλάστηση συμβάλλει στην εύκολη *απόκρυψη* ενός συστήματος,. Για την *τροφοδοσία* του συστήματος, υπάρχει η δυνατότητα μέσω υποδομής υπόγειων φρεατίων σε όλο το μήκος της περιοχής να τροφοδοτηθεί το WSN με γραμμή παροχής. Ωστόσο, μία λύση τέτοιου τύπου αυξάνει την πολυπλοκότητα και την τρωτότητα του συστήματος, ενώ μειώνει και την ευελιξία στην ανάπτυξη του. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών, κυρίως ηλιακής ενέργειας, παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις όπως αναφέρεται στο [11] και μάλλον προσθέτει παρά λύνει προβλήματα. Η τροφοδοσία με ξηρά στοιχεία επιβάλλει την διάθεση εκπαιδευμένου προσωπικού και κονδυλίων για την αντικατάστασή τους, συνεκτιμώντας το μέγεθος του WSN (μέτωπο 100 km περίπου) και την ευκολία ή δυσκολία αντικατάστασης.

Ο *τύπος του αισθητήρα* ή των αισθητήρων που θα ενσωματώνονται στους κόμβους αποτελεί σημαντική παράμετρο του WSN. Εφόσον οι κάμερες που θα τοποθετηθούν προβλέπεται να είναι θερμικές, δεν υπάρχει λόγος να δοθεί έμφαση σε ενσωμάτωση IR αισθητήρα. Το ζητούμενο σε ένα WSN σύστημα για φύλαξη συνόρων είναι η έγκαιρη διαπίστωση της παραβίασης και αν είναι εφικτό η κατηγοριοποίηση του εισβολέα. Η ενσωμάτωση σεισμικού αισθητήρα [7] ή ενός αισθητήρα RADAR [12] εξασφαλίζει την ανίχνευση της απειλής σε ικανοποιητική ακτίνα, χωρίς όμως να παρέχονται πρόσθετες πληροφορίες όπως ο εξοπλισμός που φέρει ο παραβάτης ή οι

παραβάτες. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να ενσωματωθούν μαγνητικοί αισθητήρες, που ανιχνεύουν μεταλλικά αντικείμενα, όπως φορητό οπλισμό και οχήματα μη διαθέτοντας όμως, μεγάλη ακτίνα ανίχνευσης. Η ακτίνα ανίχνευσης συνδέεται άμεσα με την κάλυψη της περιοχής και, συνεπώς, καθορίζει τον αριθμό των υπό ανάπτυξη κόμβων.

Τέλος, για την επιλογή του συστήματος πρωταρχικής σημασίας ρόλο παίζει το κόστος. Σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα σε κονδύλια, πρέπει να γίνει η επιλογή συστήματος WSN που συνδυάζει το μεγαλύτερο ποσοστό από τα χαρακτηριστικά που παρατέθηκαν καθώς και ικανοποιητική τεχνική υποστήριξη. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλές ολοκληρωμένες εμπορικές λύσεις, όπως οι [14,15], ενώ η τυποποιημένη δομή των κόμβων δίνει τη δυνατότητα προμήθειας διαμορφώσεων κόμβων προσαρμοσμένων στις επιχειρησιακές απαιτήσεις του αγοραστή. Στην τελική επιλογή πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συμβατότητα και δυνατότητα διασύνδεσης με τα υπάρχοντα συστήματα (θερμικές κάμερες 2ου επιπέδου).

5.2.2.2 Υλοποίηση 2ου και 3ου επιπέδου.

Το 2ο επίπεδο μπορεί να υλοποιηθεί με τις θερμικές κάμερες που πρόκειται να τοποθετηθούν σε σταθερά σημεία στο πλαίσιο της επιχείρησης ΑΣΠΙΔΑ της ΕΛΑΣ. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί πλήρως επιχειρησιακά Κέντρα Επιτήρησης Χερσαίων Συνόρων (Ν.Βύσσα Ορεστιάδας), στα οποία μεταβιβάζεται η εικόνα από τις θερμικές κάμερες



Σχήμα 5.5. Συστήματα microserver (αριστερά) και UGSN (δεξιά).

του φράκτη, ενώ προβλέπονται και άλλα (Διδυμότειχο, περιοχή Αλεξανδρούπολης) μαζί με τις υπό εγκατάσταση κάμερες. Η διασύνδεση του WSN του 1ου επιπέδου μπορεί να γίνει με τα κέντρα αυτά, τα οποία στη συνέχεια έχουν την δυνατότητα εποπτείας και χειρισμού του 3ου επιπέδου του συστήματος.

Αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο η δυνατότητα χρήσης UAV, για την παρακολούθηση των απειλών που εντοπίζονται από τα δύο πρώτα επίπεδα του υβριδικού WSN. Ο στρατός διαθέτει συστήματα UAV τύπου SPERWER σε μικρό αριθμό που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στη δομή του WSN. Κάθε SPERWER φέρει περιστρεφόμενη και σταθεροποιούμενη κεφαλή αισθητήρων, που αποτελείται από τη μονάδα γυροσκοπίου, την κάμερα ημέρας DLTV (Day Light TV) και την κάμερα IR τύπου IRIS. Κάθε UAV φέρει επίσης υβριδικό σύστημα εύρεσης θέσης, δηλαδή συνδυασμό δορυφορικού και αδρανειακού συστήματος εύρεσης θέσης. Το σύστημα αυτό παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης των παρατηρούμενων στόχων με ακρίβεια 20 μ. περίπου.

Η ελληνική έκδοση έχει αναβαθμισμένες ικανότητες δορυφορικής ζεύξης, χαρακτηριστικό που της επιτρέπει να μεταδίδει εικόνα μέσω δορυφόρου σε σταθμούς λήψης εκατοντάδες ή και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από τα UAVs. Η ύπαρξη τόσο κάμερας ημέρας όσο και κάμερας IR παρέχει στο SPERWER τη δυνατότητα να επιχειρεί αποτελεσματικά ημέρα και νύκτα και σε συνθήκες περιορισμένης ορατότητας (χαμηλή νέφωση ή ομίχλη). Αφού γίνει η παρακολούθηση της απειλής, μπορούν να επέμβουν στοιχεία εδάφους (ΕΛΑΣ, ΕΣ), για το τελικό στάδιο της αντιμετώπισής της.



Σχήμα 5.6 UAV τύπου SPERWER του ΕΣ

Προκύπτει, λοιπόν, ότι το μεγαλύτερο και πιο ακριβό μέρος των τεχνολογικών βοηθημάτων και υποδομών είναι ή προβλέπεται να μπει σε υπηρεσία στα επόμενα δύο χρόνια και απομένει η σωστή επιλογή ενός WSN για την κάλυψη του 1ου επιπέδου του υβριδικού WSN. Η πραγματική πρόκληση εντοπίζεται κυρίως στην ανάγκη σύμπραξης ΕΣ και ΕΛΑΣ, ώστε να γίνει ορθή κατανομή υλικών πόρων, ανθρώπινου δυναμικού και πληροφοριών.

5.2.2.3 Μέθοδος ανάπτυξης του WSN

Η ανάπτυξη του WSN 1ου επιπέδου είναι δυνατό να γίνει με τη μέθοδο φράγματος (barrier) για την κάλυψη της περιοχής, όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.2 της εργασίας. Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου k_{\max} για k-κάλυψη φράγματος πρέπει να γίνει επισκόπηση όλης της περιοχής ενδιαφέροντος, που θεωρείται ως ανοικτή εδαφική ζώνη (belt region). Η ανοικτή εδαφική ζώνη οριοθετείται δυτικά από το ανάχωμα (αγροτικός χωμάτινος δρόμος κατασκευασμένος για αμυντικούς σκοπούς) και ανατολικά από τον ποταμό. Σε πολλά σημεία υπάρχουν διαφοροποιήσεις, όπως στην περιοχή της Καβησού, όπου υπάρχει ελληνικό έδαφος δεξιά του ποταμού, ή στο Δέλτα του Έβρου, όπου επίσης υπάρχουν ιδιαιτερότητες.

Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ένα τμήμα της εδαφικής ζώνης ανατολικά του χωριού Ν.Βύσσα στον Β.Α. Ν.Έβρου. Το συγκεκριμένο τμήμα της belt region έχει μήκος $s \cong 1080m$ και πλάτος d , με $40m \leq d \leq 160m$. Σύμφωνα με την παράγραφο 4.2.1 της παρούσας εργασίας που αναφέρεται σε WSN προκαθορισμένης ανάπτυξης, $k_{\max} = d/2r$. Αν στην τιμή του r τεθεί η μέση τιμή της ακτίνας ανίχνευσης των αισθητήρων $r=10m$ (ανίχνευση από μαγνητικούς και σεισμικούς αισθητήρες), τότε $k_{\max} = d_{\min}/2r = 40/2 \cdot 10 = 2$. Άρα η μέγιστη δυνατή k-κάλυψη φράγματος που επιτυγχάνεται, είναι μία 2-κάλυψη φράγματος υλοποιούμενη από δύο σειρές κόμβων που χρησιμοποιούν επιλεγμένους αισθητήρες. Ο συνολικός αριθμός κόμβων που απαιτείται για την 2-κάλυψη της εδαφικής ζώνης, προκύπτει από τη σχέση 5.5:

$$q = k \cdot \frac{s}{2r} = 2 \cdot \frac{1080}{2 \cdot 10} = 108.$$

Συνεπώς, ένα WSN για την κάλυψη φράγματος βαθμού $k=2$ της περιοχής που φαίνεται στο σχήμα 5.7, απαιτούνται 108 κόμβοι, χωρίς να υπολογίζονται οι κόμβοι-πύλες και οι κόμβοι-αναμεταδότες που ενδεχομένως να χρειάζονται. Αν υποτεθεί ότι στο υπόλοιπο συνοριακό μέτωπο υπάρχουν παρόμοιες διακυμάνσεις στη μορφολογία και τις διατάξεις της περιοχής, προκύπτει για την κάλυψη της εδαφικής ζώνης με $s \approx 100km$ ένα WSN μεγάλης κλίμακας της τάξης των 10000 κόμβων.

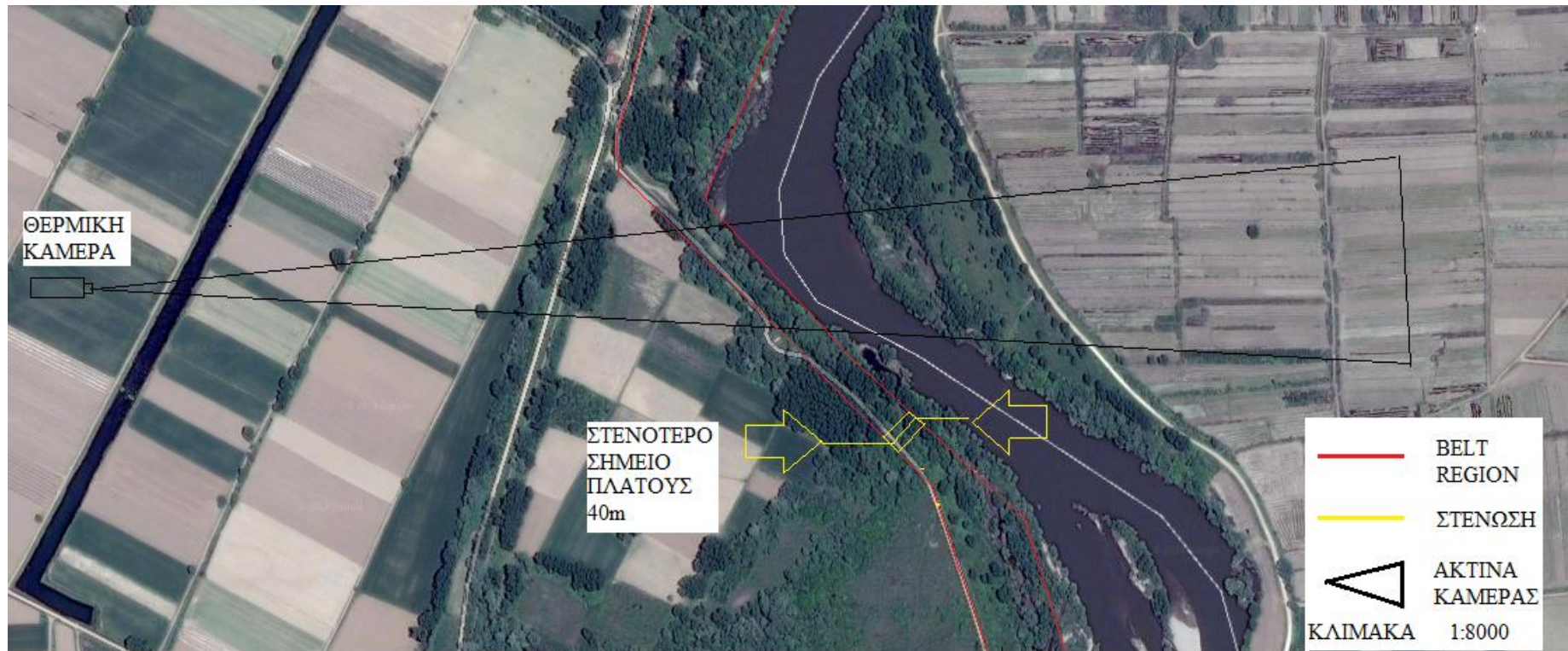
Στο [17] γίνεται μια επισκόπηση των κόμβων που διατίθενται στο εμπόριο και παρατίθενται στοιχεία που αφορούν το κόστος ανά κόμβο σε ένα WSN. Τα στοιχεία αυτά συνοψίζονται στον πίνακα 5.1. Οι κόμβοι (motes) TelosB, IRIS και MicaZ αποτελούν τις βάσεις πάνω στις οποίες στηρίζονται οι περισσότερες εμπορικές υλοποιήσεις. Ενδεικτικά, οι περισσότερες εφαρμογές WSN/Border Surveillance που αναφέρονται στο 3ο κεφάλαιο της εργασίας, ενσωματώνουν κόμβους που αναφέρονται στον πίνακα 5.1.

Mote Platform	Price	Comments
TelosB	US\$99 / US\$139	no sensors / with sensors
MicaZ/Mica2	US\$99	Mica2 no longer available
SHIMMER	EUR199	base SHIMMER SDK with 2 boards, several sensor boards and software available for EUR1,900
IRIS	US\$115	
Sun SPOT	US\$750	3 base boards and 2 sensors boards
EZ-RF2480	US\$99	3 nodes, one is a USB interface
EZ-RF2500	US\$49	2 nodes

Πίνακας 5.1. Ενδεικτικές τιμές ανά κόμβο για τις σημαντικότερες εκδόσεις κόμβων

Για ένα πιθανό υπό ανάπτυξη WSN που ενσωματώνει κόμβους βασισμένους σε telosB ή IRIS με μέσο κόστος $250\$=250*0.7579^1 \approx 190€$ (mote+sensor board+packaging), προσαυξημένο κατά ένα κόστος 300€ ανά κόμβο για τεχνική υποστήριξη (υλικό - λογισμικό - τεχνική εκπαίδευση) του συστήματος, προκύπτει WSN με μέσο κόστος ανά κόμβο 490€.

¹ Ισοτιμία ευρώ - δολαρίου Σεπτέμβριος 2014.



Σχήμα 5.7. Περιοχή ανατολικά της Ν.Βυσσας Ορεσιτιάδας στον Β.Α. Ν.Έβρου. Οριοθετείται με κόκκινες γραμμές η εδαφική ζώνη. Τα κίτρινα βέλη επισημαίνουν τη στένωση της ζώνης με πλάτος 40m. Παράλληλα στο σχήμα σημειώνεται ενδεικτικά η εμβέλεια κάμερας δυνατοτήτων παρόμοιων με αυτές που έχουν ήδη τοποθετηθεί στο φράκτη.

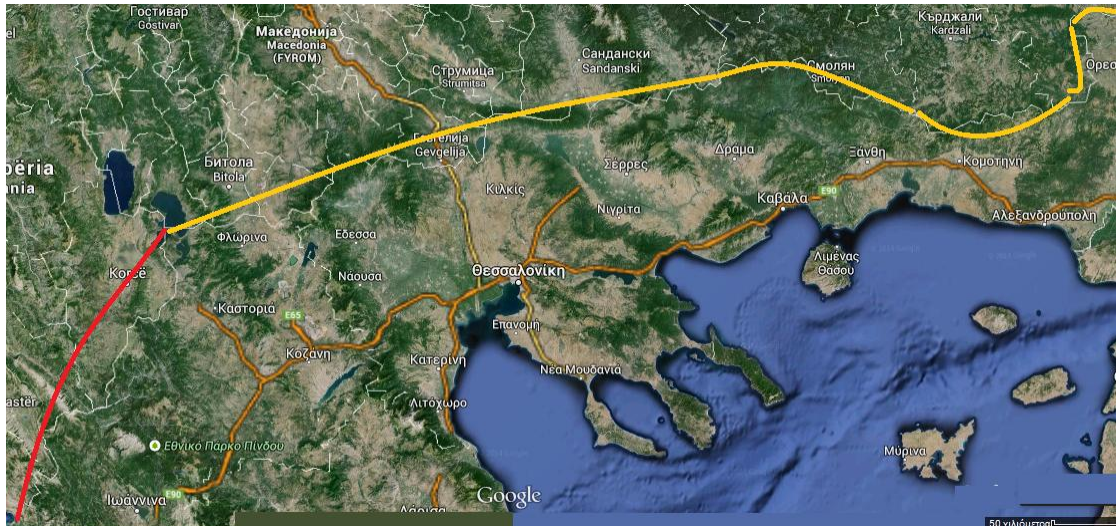
Για ένα επιχειρησιακό large scale του συστήματος UGSN της Trident Systems της τάξης των 10^4 κόμβων, το κόστος ανά κόμβο κυμαίνεται στα 500\$ ή 380€ περίπου [14]. Οπότε μία απαισιόδοξη εκτίμηση σύμφωνα με τις προσεγγίσεις για το κόστος που προηγήθηκαν είναι στα 5M € για κάλυψη 100 km. Ποσό συγκρίσιμο με το κόστος του φράχτη στον Β.Α. Ν.Έβρου (3.2M €) για κάλυψη 12.5 km συνόρων.

5.3 Επιτήρηση χερσαίων συνόρων με λοιπά κράτη της Βαλκανικής

5.3.1 Υφιστάμενη κατάσταση

Η έκταση των βόρειων συνόρων της Ελλάδας καθιστά απαγορευτική τη χρήση WSN για την επιτήρηση των συνόρων σε όλο το μήκος τους. Πρωταρχικός ανασταλτικός παράγοντας είναι το κόστος. Επιπλέον, η μορφολογία του εδάφους (ορεινό, δύσβατο ή ακόμα και απρόσιτο στα περισσότερα τμήματα του) δυσχεραίνει την ανάπτυξη ενός WSN για λόγους συντήρησης, συνδεσιμότητας και κάλυψης. Η φύλαξη των συνόρων γίνεται από δυνάμεις συνοριοφυλάκων, που διεξάγουν ελέγχους σε Σταθμούς Ελέγχου Κυκλοφορίας (ΣΤΕΚ), στους συνοριακούς σταθμούς και σε άλλα σημεία πρόσβασης (στενωποί, διαβάσεις). Η παρουσία του Ελληνικού Στρατού στα βόρεια σύνορα είναι αμελητέα. Επίσης, μέσα στο γενικότερο σχεδιασμό του ΥΠΤΠ [4,5], είναι η τοποθέτηση θερμικών καμερών και στα ελληνοαλβανικά σύνορα.

Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων ενός WSN θα μπορούσε να γίνει προκειμένου να επιτηρηθούν περάσματα που αποτελούν τις μοναδικές πύλες εισόδου στην ελληνική ενδοχώρα. Ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος παρουσιάστηκε στις παραγράφους 2.2.1 και 2.2.2 της εργασίας, σύμφωνα με τα αναγραφόμενα στο [16]. Στο σύστημα VigilNet ένα WSN δομείται πάνω σε ένα πέρασμα όπου κόμβοι εξοπλισμένοι με IR και μαγνητικούς αισθητήρες αποσκοπούν στον εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο των διερχόμενων από το πέρασμα στοιχείων (προσωπικό, οχήματα).



Σχήμα 5.8. Το Βόρειο συνοριακό μέτωπο της Ελλάδας με τα κράτη της Βαλκανικής. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το συνοριακό τόξο Ελλάδας - Αλβανίας όπου πρόκειται να εγκατασταθούν από το ΥΠΤΠ εποπτικά μέσα.

5.3.2 Η επιλογή του κατάλληλου τύπου WSN

Η μορφολογία του εδάφους και γενικότερα το περιβάλλον ανάπτυξης έχει ιδιαίτερη σημασία για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος WSN. Λόγω της μεγάλης έκτασης των συνόρων, υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία στις διαμορφώσεις του εδάφους, στη χλωρίδα και την πανίδα. Η βλάστηση μπορεί να είναι πυκνή ως ανύπαρκτη και υπάρχει έντονη παρουσία πανίδας. Το έδαφος παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις (υψώματα, χαραδρώσεις), ενώ οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση και το υψόμετρο.

Η απαιτήσεις που διαμορφώνονται οδηγούν στην επιλογή WSN με τα εξής χαρακτηριστικά :

α. κόμβους που φέρουν συνδυασμό αισθητήρων :

1/ μαγνητικών για ανίχνευση οχημάτων και μεταλλικού εξοπλισμού

2/ IR για ανίχνευση προσωπικού

3/ φωτός και ακουστικών για ανίχνευση περιστατικών και εντοπισμό στόχων που δεν ανιχνεύθηκαν από τους λοιπούς αισθητήρες.

β. Δυνατότητα για τοπική επεξεργασία και ταξινόμηση των στόχων και χαμηλό δείκτη ψευδών συναγερμών. Απαιτείται, δηλαδή, η ενσωμάτωση

αλγορίθμων, που θα κατηγοριοποιούν τους στόχους που ανιχνεύονται με παράλληλη κατανομή του υπολογιστικού φόρτου στο δίκτυο.

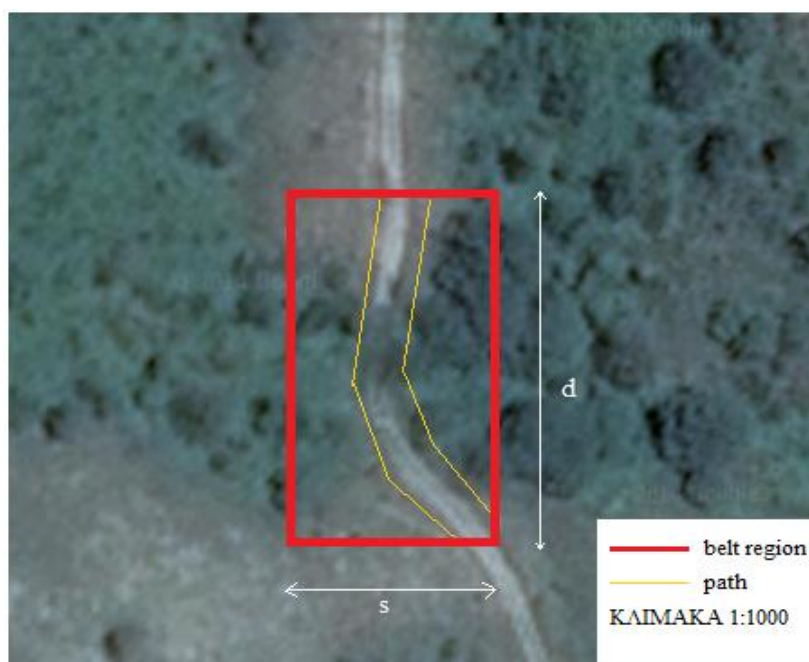
γ. Μεγάλη αυτονομία του δικτύου (συνδυασμός software - hardware).

δ. Διάθεση από τον προμηθευτή του συστήματος περιφερειακών εργαλείων προσομοίωσης του δικτύου που πρόκειται να αναπτυχθεί από το προσωπικό, για διασφάλιση της κάλυψης και της συνδεσιμότητας (software , hardware ή συνδυασμός) [14].

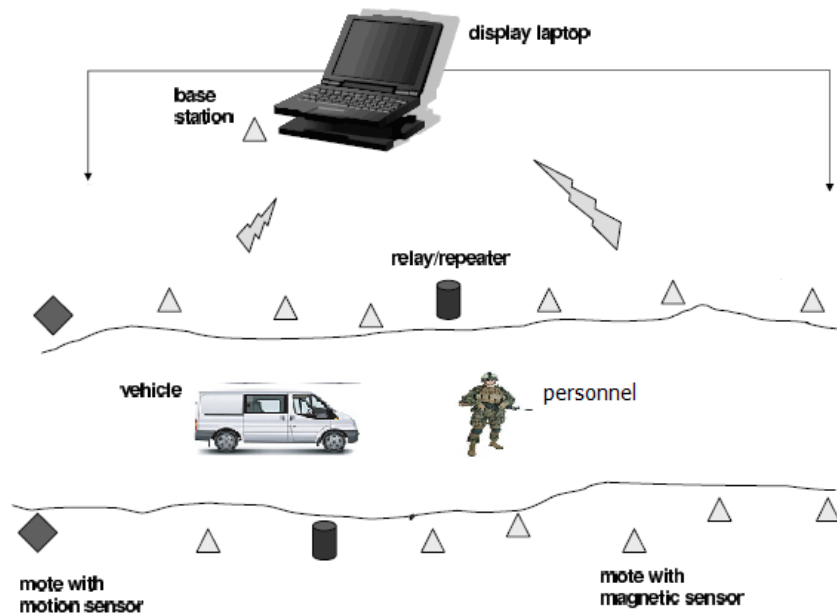
ε. Η συσκευασία (packaging) των κόμβων να τα προφυλάσσει από ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες).

5.3.3 Μέθοδος ανάπτυξης του WSN

Το WSN πρέπει να αναπτύσσεται κατά τρόπο ώστε η εμβέλεια ανίχνευσης των κόμβων να καλύπτει πλήρως το διάδρομο (pathway) που ελέγχεται. Η συνδεσιμότητα μπορεί να εξασφαλιστεί επιλέγοντας κόμβους με χαρακτηριστικά ραδιοπομπών, που να ικανοποιούν τη σχέση $r_t \geq 2 \cdot r_s$ (σχέση 4.6), όπου r_t η εμβέλεια του ραδιοπομπού και r_s η εμβέλεια ανίχνευσης του αισθητήρα.



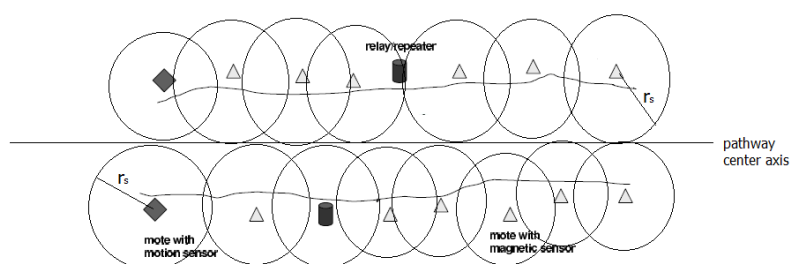
Σχήμα 5.9. Ορεινό πέρασμα (χωμάτινος δρόμος) Β.Α. της κοινότητας Μελίτη Ν. Φλώρινας λίγα χιλιόμετρα από τα σύνορα Σκοπίων - Ελλάδας.



Σχήμα 5.10. Ανάπτυξη WSN εκατέρωθεν περάσματος. Διακρίνονται οι κόμβοι αναμετάδοσης για επίτευξη επικοινωνίας με το σταθμό βάσης, ο οποίος ενδεχομένως είναι μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος.

Το πέρασμα μπορεί να θεωρηθεί ως μία εδαφική ζώνη μικρού μήκους $s = 30m$ και πλάτους $d = 60m$. Η τιμή της εμβέλειας ανίχνευσης ορίζεται $r = 10m$, κάνοντας την υπόθεση της παραγράφου 6.2.2.3. Για προσχεδιασμένη ανάπτυξη, προσδιορίζεται το $k = k_{\max} = d/2r = 60/20 = 3$. Για k -κάλυψη φράγματος απαιτούνται $q = k(s/2r) \approx 5$. Επιλέγεται τελικά η τιμή $q = 6$ κόμβοι για την υλοποίηση ζευγών κόμβων. Η βλάστηση κατά μήκος του περάσματος συντελεί στην απόκρυψη του συστήματος.

Η χρήση WSN μικρής κλίμακας ($q < 10^2$) προσδίδει μεγάλη ευελιξία στην ανάπτυξη και χρησιμοποίησή τους. Ένα όχημα μεταφορικής ικανότητας 3/4τόνων μπορεί να μεταφέρει ένα τέτοιο σύστημα (κόμβοι, σταθμός βάσης) και το απαραίτητο προσωπικό για να το αναπτύξει. Ο μικρός αριθμός των κόμβων κάνει εύκολη και την περισυλλογή του WSN, ώστε να αναπτυχθεί σε άλλη περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 5.11. Στην ανάπτυξη WSN εκατέρωθεν περάσματος προέχει η πλήρης κάλυψη της διαδρομής από τους αισθητήρες.

Ειδικότερα για τα ελληνοαλβανικά σύνορα και σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στα [2,3,4,5] προβλέπεται η τοποθέτηση θερμικών καμερών, όμοιων με αυτές που τοποθετήθηκαν και σχεδιάζεται να τοποθετηθούν στο Ν.Έβρου. Στην περίπτωση αυτή, είναι εφικτή η ανάπτυξη ενός υβριδικού WSN, όπως αυτό που περιγράφηκε στη παράγραφο 6.2.

5.4 Η επιτήρηση των θαλάσσιων συνόρων και των ακτών των παραμεθόριων νήσων.

5.4.1 Υφιστάμενη κατάσταση.

Το πρόβλημα της φύλαξης των ελληνικών θαλασσιών συνόρων εντοπίζεται στις θάλασσες του ανατολικού Αιγαίου πελάγους και του βόρειου Ιονίου πελάγους. Τα θαλάσσια σύνορα του Β.Ιονίου αποτελούν πύλες παράνομης διακίνησης ανθρώπων και εμπορευμάτων από και προς τις γείτονες χώρες. Η αστυνόμευση και η επιτήρηση γίνεται σχεδόν αποκλειστικά από τις δυνάμεις του Λιμενικού Σώματος. Επίσης, πραγματοποιούνται πτήσεις από Α/Φ του ΛΣ για τον έλεγχο της θαλάσσιας οδού λαθρομετανάστευσης προς την Ιταλία.

Το πρόβλημα είναι περισσότερο σύνθετο στο χώρο του Α. Αιγαίου, λόγω των αμφισβητήσεων [20,21,22,23,24] που προβάλλονται από την πλευρά της Τουρκίας. Συγκεκριμένα, στο θαλάσσιο χώρο του Αιγαίου τίθενται από την τουρκική πλευρά θέματα όπως:

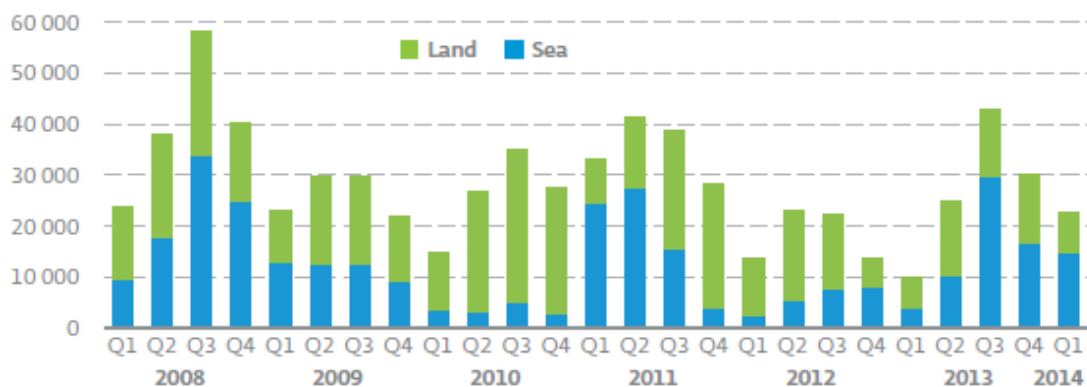
- αναγνώρισης της δυνατότητας επέκτασης της ελληνικής αιγιαλίτιδας ζώνης στα 12 nm.
- αναγνώρισης των υφιστάμενων θαλασσίων συνόρων.
- γκρίζων ζωνών, όπου αμφισβητείται η ελληνική κυριαρχία στα νησιά του Αιγαίου
- αποστρατιωτικοποίησης των νησιών.

Η επιτήρηση των ακτών των νησιών γίνεται από την εθνοφυλακή μέσω φυλακίων με παθητικά μέσα. Η παρακολούθηση του ενδιάμεσου θαλάσσιου χώρου των νησιών γίνεται και με RADAR επιτήρησης επιφάνειας τύπου BOR-A550-60 [27], τα οποία παρακολουθούνται από στρατιωτικούς σχηματισμούς με έδρα τα νησιά. Τα στοιχεία που συλλέγονται από πιθανές παραβιάσεις προωθούνται με τον ίδιο τρόπο που αναφέρεται στην παράγραφο 5.2.1 σε κέντρο επιχειρήσεων, όπου διατηρείται συνολική εικόνα κατάστασης του ελληνικού χώρου.

Ενεργός φύλαξη του θαλασσίου χώρου γίνεται από το Λιμενικό Σώμα, τόσο από την ξηρά (περιπολίες σε ακτές) όσο και με πλωτά μέσα (ακταιωροί - περιπολικά σκάφη). Τα περιπολικά σκάφη διαθέτουν RADAR και θερμικές κάμερες. Οι συλλεγόμενες πληροφορίες διαβιβάζονται σε κέντρο επιχειρήσεων που έχει έδρα στο Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας. Περιπολίες πραγματοποιούνται και από σκάφη του Πολεμικού Ναυτικού. Από τον Απρίλιο του 2013 εφαρμόζεται στο Αιγαίο το σχέδιο Poseidon της FRONTEX [25]. Το σχέδιο προβλέπει την ανάπτυξη μέσων και προσωπικού από τις χώρες - μέλη της ΕΕ για την ανακοπή του κύματος λαθρομετανάστευσης.

Σύμφωνα με τον απολογισμό της FRONTEX, κατά το πρώτο τέταρτο του 2014 (FRAN Q1 2014) [26] παρατηρείται αύξηση στην παράνομη είσοδο μεταναστών από τη θαλάσσια οδό του Ανατολικού Αιγαίου της τάξης του 100%. Η κατακόρυφη αυτή αύξηση αποδίδεται κυρίως στην επιτυχή φραγή του χερσαίου δρόμου Τουρκίας - Ελλάδας από τον συνδυασμό του φράκτη και της επιχείρησης ΑΣΠΙΔΑ της ΕΛΑΣ.

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι η θάλασσα του Αιγαίου και ο νησιωτικός χώρος πρέπει να αποτελέσουν πεδίο ανάπτυξης συστημάτων όπως τα WSN επιτήρησης και εντοπισμού, που θα οδηγήσουν σε ορθή κατανομή προσωπικού, μέσων και σε εξοικονόμηση πόρων.



Σχήμα 5.12 Ο εντοπισμός περιστατικών παραβίασης συνόρων μειώθηκε το πρώτο τέταρτο 2014 κατά τη χειμερινή περίοδο. Ειδικότερα στα θαλάσσια σύνορα, τα επίπεδα εντοπισμού ήταν σαφώς πάνω από το μέσο όρο των αντίστοιχων περιόδων προηγούμενων ετών. (πηγή FRAN Q1 2014)

5.4.2 Η επιλογή του κατάλληλου WSN.

5.4.2.1 WSN για επιτήρηση των θαλασσίων συνόρων.

Για το χώρο του Αιγαίου απαιτούνται συστήματα που διαθέτουν συνδυασμό αισθητήρων παθητικών και ενεργητικών με δυνατότητες ανίχνευσης διαφόρων τύπων στόχων, αλλά και αποθήκευσης και τοπικής επεξεργασίας των συλλεγόμενων δεδομένων. Λόγω της απλότητας του και του επιχειρησιακού προσανατολισμού του, προτείνεται το μοντέλο WSN "ship detection with WSN" που αναφέρεται στην παράγραφο 2.2.3.1. Η τοπική επεξεργασία περιλαμβάνει την ταυτοποίηση του στόχου και, στη συνέχεια, την αποστολή εικόνας και ήχου στο σταθμό βάσης με ασφαλή ζεύξη.

Οι κόμβοι του συστήματος AMASS [30] αποτελούν τυπικό δείγμα έξυπνων πλωτήρων (smart buoys) [29]. Διαθέτουν θερμικές κάμερες με εμβέλεια ανίχνευσης 5 km ενώ διαθέτουν και διάταξη υδροφόνων τοποθετημένων στο υποθαλάσσιο μέρος του πλωτήρα για ανίχνευση πλωτών και υποθαλάσσιων στόχων. Οι αισθητήρες συνοδεύονται από ειδικό λογισμικό που επιτρέπει την αναγνώριση και την κατηγοριοποίηση των στόχων. Είναι ενεργειακά αυτόνομο με συνδυασμό ανανεώσιμων πηγών και κυψελών καυσίμων μεθανόλης που κρατούν τα ξηρά στοιχεία φορτισμένα. Οι

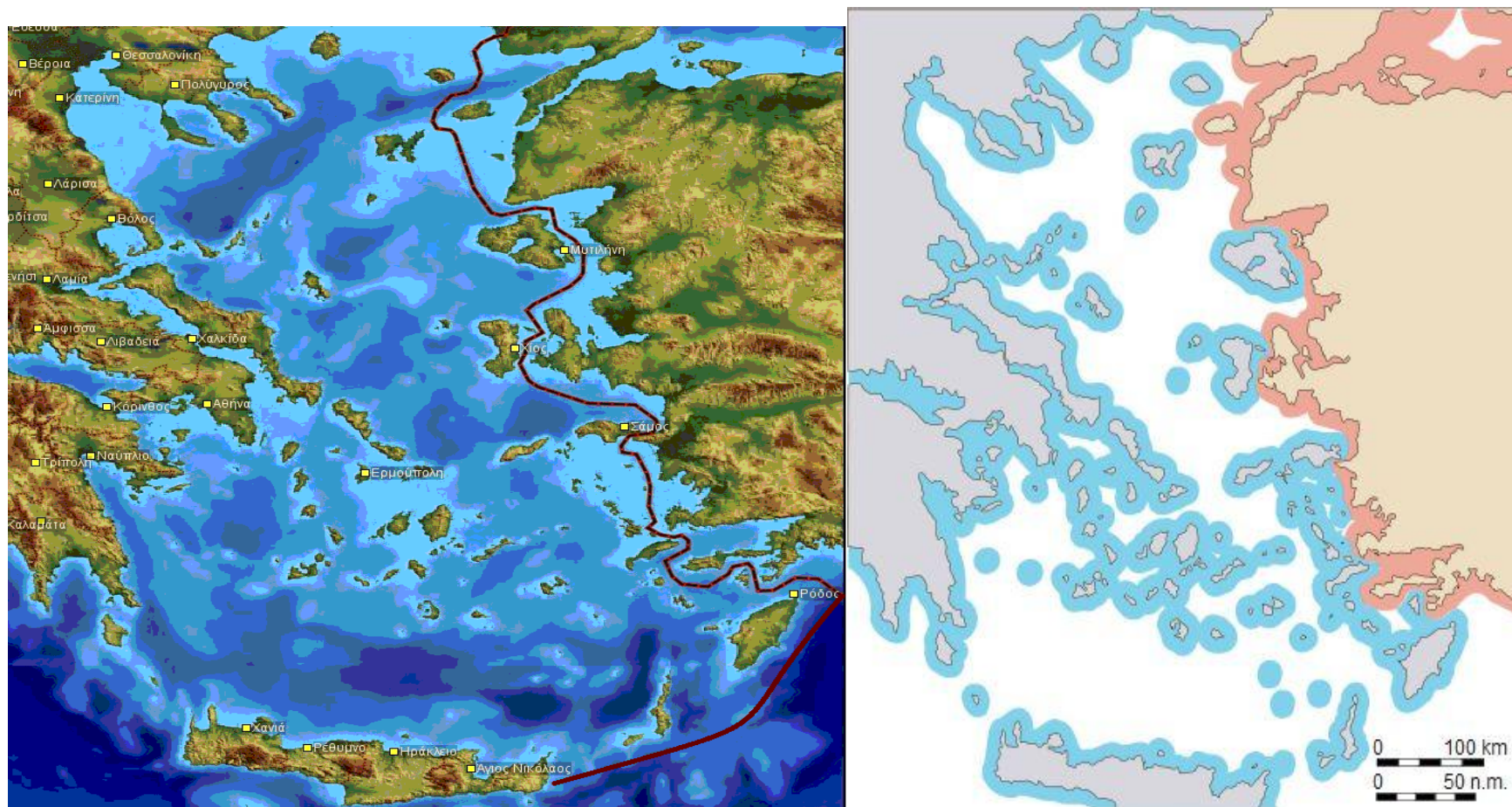
προδιαγραφές του συστήματος προβλέπουν τη δυνατότητα αποτελεσματικής λειτουργίας υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Άλλα δίκτυα είναι δυνατό να περιλαμβάνουν κόμβους που διαθέτουν δυνατότητα δορυφορικών επικοινωνιών. Συστήματα αυτού του τύπου περιγράφονται στο [29]. Ενδιαφέρουσα μορφή WSN θα ήταν αυτή ενός υβριδικού δικτύου με δυνατότητα χρήσης και των δύο μορφών επικοινωνίας. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής υιοθετείται και η κατάλληλη λύση. Ειδικότερα, η επιλογή επικοινωνιακής διασύνδεσης του δικτύου εξαρτάται από παράγοντες όπως:

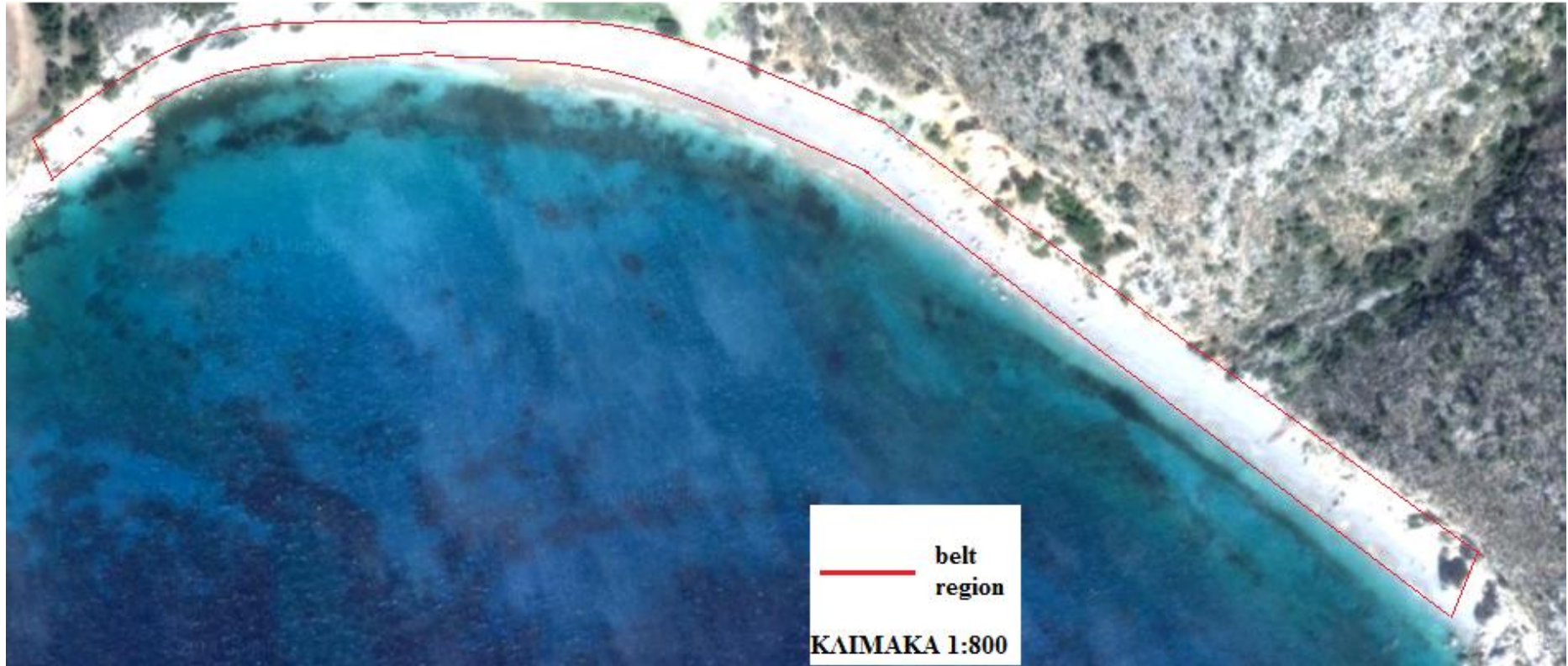
- η απόσταση του δικτύου από την ξηρά ή το σταθμό βάσης (εμβέλεια RF).
- η ενεργειακή αυτονομία των κόμβων και το κόστος υποστήριξής τους.
- Το εύρος ζώνης των προς εξυπηρέτηση υπηρεσιών από το δίκτυο (video σε πραγματικό χρόνο κ.τ.λ.)
 - οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή ανάπτυξης.
 - η επιθυμητή πυκνότητα του δικτύου (ασφαλής διέλευση σκαφών, παρεμβολές από γειτονικούς κόμβους, κόστος κόμβων).
- οι υπάρχουσες υποδομές και τεχνογνωσία από ήδη ανεπτυγμένα συστήματα.

5.4.2.2 Μέθοδος ανάπτυξης του WSN για επιτήρηση θαλάσσιων συνόρων.

Το υπό ανάπτυξη δίκτυο αποσκοπεί στην επιτήρηση των θαλάσσιων δρόμων που ακολουθούν οι διακινητές παράνομων μεταναστών από την Τουρκία προς την Ελλάδα. Κατά συνέπεια, ένα ιδανικό δίκτυο επιτήρησης πρέπει να καλύπτει το Ανατολικό Αιγαίο, με κόμβους τοποθετημένους με τη μέθοδο k-κάλυψης φράγματος σε εδαφική ζώνη



Σχήμα 5.13 Στον αριστερό χάρτη φαίνεται η εδαφική ζώνη (κόκκινο χρώμα) για πιθανή ανάπτυξη ενός 1-κάλυψης φράγματος WSN. Στο δεξιό χάρτη διακρίνονται τα ελληνικά χωρικά ύδατα (6 nm) και τα σημεία επαφής με τα τουρκικά χωρικά ύδατα. Όπου οι αποστάσεις είναι μικρότερες των 6 nm, τα θαλάσσια σύνορα ορίζονται στο μέσο της απόστασης.



Σχήμα 5.14 Ακτή δυτικά της νήσου Χίου. Διακρίνεται εδαφική ζώνη σημειωμένη με κόκκινο χρώμα και διαστάσεων $l = 1000m$ και $w = 10m$. Η ακτή δίνεται σαν παράδειγμα περιοχής ανάπτυξης άσχετα από την επιχειρησιακή αξία της περιοχής.

όπως αυτή του σχήματος 5.13. Λόγω του μεγάλου κόστους των κόμβων και κατά συνέπεια της ανάγκης περιορισμένου του αριθμού τους, τίθεται $k=1$. Αν πρόκειται για κόμβους δυνατοτήτων όμοιων με το σύστημα AMASS, τίθεται $r=5km$, όπου r η εμβέλεια ανίχνευσης της θερμικής κάμερας. Η ανάπτυξη προτείνεται να γίνει κατά μήκος της εδαφικής ζώνης που σημαίνεται με κόκκινο χρώμα στο χάρτη του σχήματος 5.13. Το μήκος της εδαφικής ζώνης είναι $s \approx 500Nm \approx 920km$. Από τη σχέση (4.6) προκύπτει ο αριθμός κόμβων $q = k \cdot (s/2r) = 1 \cdot (920/10) = 92$ κόμβοι, για κάλυψη φράγματος του Α. Αιγαίου από την Αλεξανδρούπολη μέχρι την Κρήτη.

Το αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης σχεδόν συμπίπτει με την εκτίμηση που γίνεται στο [29] για δίκτυο $q=100$ έξυπνων πλωτήρων στο χώρο του Αιγαίου. Σύμφωνα με την μελέτη κόστους που γίνεται στο [29], η οποία περιλαμβάνει εκτιμήσεις κόστους για όλες τις παραμέτρους του δικτύου (κέντρα διαχείρισης πληροφορίας, hubs, smart buoys, δέσμευση καναλιών), προκύπτει ένα τελικό κόστος εγκατάστασης της τάξης των 29.5M €. Στο σύστημα μπορούν να συμπράξουν και κινούμενοι κόμβοι όπως συστήματα UAVs, αριθμός των οποίων βρίσκεται ήδη σε υπηρεσία στον Ελληνικό Στρατό. Παράλληλα προκύπτει μεγάλο οικονομικό όφελος για το ελληνικό δημόσιο της τάξης των 10M € ετησίως από εξοικονόμηση πόρων.

Οι γενικές εκτιμήσεις που πραγματοποιήθηκαν προηγουμένως βασισμένες στο μοντέλο του WSN διαφοροποιούνται αν ληφθούν υπόψη παράμετροι που επιβάλλονται από το περίπλοκο περιβάλλον του Αιγαίου. . Συγκεκριμένα:

- ο περιορισμένος θαλάσσιος χώρος σε συνδυασμό με τη μεγάλη κινητικότητα επιβατικών, εμπορικών, στρατιωτικών σκαφών και υποβρυχίων.
- οι νομικές προεκτάσεις από την τοποθέτηση συστημάτων επιτήρησης σε διεθνή ύδατα (δήλωση θέσης, αλλαγή ή τροποποίηση θαλάσσιων δρόμων)
- οι πιθανές αντιδράσεις της τουρκικής πλευράς στην εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σε συνδυασμό με τις αμφισβητήσεις που διατυπώνει πάνω στο κυριαρχικό καθεστώς του Αιγαίου
- η μικρή έκταση των χωρικών υδάτων σε περιπτώσεις όπως τα στενά Σάμου - Τουρκίας και η δυνατότητα επιτήρησης από την ξηρά

- οι μεγάλες απώλειες σε υλικό λόγω δολιοφθορών και κλοπών υποδεικνύουν την ανάπτυξη ενός περιορισμένου αριθμητικά, αλλά στρατηγικά τοποθετημένου και ελεγχόμενου δικτύου αισθητήρων.

Το μοντέλο αυτό υπαγορεύει τη χρήση φραγμάτων αισθητήρων για απαγόρευση θαλάσσιων δρόμων παράνομης μετανάστευσης οι οποίοι στατιστικά παρουσιάζουν υψηλή κινητικότητα. Παράλληλα, η πλειοψηφία των δυνάμεων φύλαξης θα αναπτύσσονται σε χώρους όπου αναμένεται η εκτροπή της ροής από τα φράγματα αισθητήρων δρώντας συμπληρωματικά. Πιθανή αξιοποίηση των έξυπνων πλωτήρων θα μπορούσε να γίνει και για την ασφάλεια εγκαταστάσεων (λιμένων, ναυστάθμων) από εγκληματικές ενέργειες.

5.4.2.3 WSN για την επιτήρηση ακτών.

Πέρα από θαλάσσιες επιχειρήσεις, το Λιμενικό Σώμα εκτελεί περιπολίες στις ακτογραμμές των νησιών. Παράλληλα, οι ακτές στα νησιά του Α. Αιγαίου, αποτελούν αντικείμενο επιτήρησης από τις δυνάμεις Εθνοφυλακής στο πλαίσιο του αμυντικού σχεδιασμού των νησιών. Σε συνδυασμό με το εκτεταμένο μήκος των ακτών και τον αριθμό των νησιών, γίνεται αντιληπτό το μέγεθος του ανθρώπινου δυναμικού που απασχολείται σε επιχειρήσεις τέτοιου τύπου καθώς και του λειτουργικού κόστους.

Κάποιες από τις ακτές αυτές θα μπορούσαν να αποτελέσουν πεδίο ανάπτυξης WSN επιτήρησης. Οι τύποι WSN (αισθητήρες, υπέργεια, υπόγεια) που θα μπορούσαν να αναπτυχθούν είναι όμοιοι με αυτούς που αξιοποιούνται στην παράγραφο 5.2.2.1. για τα χερσαία σύνορα του Ν. Έβρου. Ένα WSN που προορίζεται για ακτή πρέπει να είναι ευέλικτο, δηλαδή να είναι εύκολη και ταχεία η ανάπτυξη και η αποκομιδή του. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το πόσο πολυσύχναστη είναι κατά περιόδους η ακτή. Η ορθή προσέγγιση για χρήση WSN στις ακτές είναι η περιστασιακή χρήση ανάλογα με τις επιχειρησιακές ανάγκες και την αναμενόμενη απειλή, ώστε να καλυφθούν κρίσιμοι τομείς για τους οποίους δεν διατίθενται μέσα και προσωπικό.

Αν η εγκατάσταση είναι προσχεδιασμένη για την περιοχή και υλοποιείται με μέθοδο k-φράγματος, ακολουθείται η διαδικασία της παραγράφου 5.2.2.3. Εφόσον η κάλυψη πρέπει να γίνει με τυχαίο τρόπο (random deployment), για την επίτευξη k-φράγματος κάλυψης εφαρμόζονται τα αναγραφόμενα στη

παραγράφο 4.2.1.1. Για την κατανομή των κόμβων με τυχαίο τρόπο (π.χ. από ένα όχημα γενικής χρήσης), η επίτευξη κάλυψης φράγματος επιθυμητού k με μεγάλη πιθανότητα απαιτεί αριθμό κόμβων² που υπολογίζεται παρακάτω.

Η belt region του σχήματος 5.14, έχει διαστάσεις μήκους $l=1000m$ και πλάτους $w=10m$. Επειδή το μαθηματικό μοντέλο τυχαίας ανάπτυξης της παραγράφου 4.2.1.1 αναπτύσσεται για περιοχή διαστάσεων $s \times (1/s)$, χρησιμοποιείται στο [31] μοντέλο υπολογισμού υπό κλίμακα, σύμφωνα με την οποία το μήκος της περιοχής του υπό κλίμακα μοντέλου ισούται με $s = \sqrt{l/w} = 10$ και το πλάτος αντίστοιχα $1/s = 1/10 = 0.1$. Αν χρησιμοποιηθούν κόμβοι με εμβέλεια ανίχνευσης $r=10m$ που τυγχάνει να ισούται με το πραγματικό πλάτος της περιοχής w . Για το μοντέλο υπολογισμού θα υιοθετηθεί αντίστοιχα τιμή εμβέλειας $r' = 0.1 = 1/s$. Για επιθυμητό duty cycle της τάξης 10%³ το $p = 0.1$. Το πλάτος της εδαφικής ζώνης (μοντέλου υπολογισμού) επιβάλλει τη χρήση $k=1$. Αντικαθιστώντας τις τιμές s, r', p στην ανισότητα (4.3): $c(s) \geq 1 + \frac{\varphi(np) + (k-1)\log(\log(np))}{\log(np)}$ όπου $c(s) = \frac{2npr'}{s \log np}$

(4.2) και $\varphi(np) = \sqrt{\log(\log(np))}$, προκύπτει ότι ελάχιστος αριθμός προς ανάπτυξη κόμβων n_{\min} για την επίτευξη 1-barrier κάλυψης της ακτής είναι $n_{\min} = 432$ κόμβοι.

5.5 Σύνοψη προτάσεων ανάπτυξης WSN για επιτήρηση συνόρων.

Στις παραγράφους 5.2 ως 5.4 επιχειρήθηκε μια προσέγγιση στο ζήτημα της ασφάλειας των ελληνικών χερσαίων συνόρων με τη χρήση WSN για το σκοπό αυτό. Τα μοντέλα ανάπτυξης WSN που περιγράφηκαν στο 2ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας και οι πρακτικές που ενσωματώνουν για κάλυψη και συνδεσιμότητα, αποτέλεσαν οδηγό για την διαμόρφωση προτάσεων προσαρμοσμένων στα ελληνικά δεδομένα. Στον πίνακα 5.2 παρατίθενται συνοπτικά τα αναφερόμενα στις παραγράφους 5.2 έως και 5.4 της παρούσας εργασίας.

² με την προϋπόθεση ότι η κατανομή των κόμβων γίνεται ομοιόμορφα.

³ σύμφωνα με το επιλεγμένο sleep-wake up σχήμα λειτουργίας του WSN.

σύνορα	μέθοδος κάλυψης	τύπος εφαρμογής WSN που υιοθετείται	παρατηρήσεις
Β. και Α. Ν. Έβρου	Κάλυψη φράγματος προσχεδιασμένη	Bordersense	Μεγάλης κλίμακας υβριδικό WSN ($\geq 10^4$)
Β. Ελλάδα εκτός συνόρων με Αλβανία	Κάλυψη φράγματος προσχεδιασμένη	vigilnet	ευέλικτα μικρής κλίμακας WSN ($\leq 10^2$)
Δ. Ελλάδα (σύνορα με Αλβανία)	Κάλυψη φράγματος προσχεδιασμένη	Bordersense	Μεγάλης κλίμακας υβριδικό WSN ($\geq 10^4$)
θαλάσσια σύνορα Α. Αιγαίου	Κάλυψη φράγματος προσχεδιασμένη	Ship detection with WSN	Μικρό πλήθος κόμβων ($\leq 10^2$). Αξιοποίηση RF, ακουστικών και δορυφορικών επικοινωνιών.
Ακτές Νήσων	Κάλυψη φράγματος τυχαία	Bordersense	Μέσης ή Μεγάλης κλίμακας ($\geq 10^2$)

Πίνακας 5.2 Προτεινόμενες αναπτύξεις WSN για τα ελληνικά χερσαία και θαλάσσια σύνορα.

Αναφορές 5ου Κεφαλαίου

- [1] <http://frontex.europa.eu/operations/archive-of-operations/ZCQzCe>
- [2] <http://www.kathimerini.gr/778815/article/epikairothta/ellada/o-evros-den-einai-pia-3efrago-ampeli>
- [3] <http://www.kathimerini.gr/480361/article/epikairothta/ellada/oyte-koynoypi-den-perna-apo-to-fraxth-ston-evro>
- [4] http://www.mopocp.gov.gr/index.php?option=ozo_content&perform=view&id=5101&Itemid=597&lang=
- [5] http://www.mopocp.gov.gr/index.php?option=ozo_content&perform=view&id=5100&Itemid=597&lang=
- [6] <http://www.protothema.gr/greece/article/175172/ksekinoynta-erga-giati-ton-fraxth-ston-ebro/>
- [7] Z. Sun, et al., "*BorderSense: Border Patrol through Advanced Wireless Sensor Networks*," Ad Hoc Networks, 2011, pp. 468-477.
- [8] http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_month_html?drmonth=12
- [9] Z. Sun, I.F. Akyildiz "Connectivity in wireless underground sensor networks" in: Proc. IEEE SECON '10, Boston, MA, USA, June 2010.
- [10] I.F. Akyildiz, Z. Sun, M.C. Vuran "Signal propagation techniques for wireless underground communication networks" Physical Communication Journal (Elsevier) 2 (3) (2009) 167–183
- [11] Raghunathan, V. Dept. of Electr. Eng., California Univ., Los Angeles, Kansal, A. , Hsu, J. , Friedman, J. and Srivastava, M.B. "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems" Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005
- [12] Prabal K. Dutta, Anish K. Arora and Steven B. Bibyk "Towards Radar Enabled Sensor Networks" Information Processing in Sensor Networks, 2006
- [13] Gardner W. J., "*Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές*", Τζιόλας 2000, ISBN 960-13

- [14] <http://www.tridsys.com/integrated-c41-systems.htm>
- [15] <http://www.textronsystems.com/products/weapon-sensor/microobserver>
- [16] Dutta, P. , Ohio State Univ., Columbus, OH, USA , Grimmer, M. ,Arora, A, Bibyk, S. "*Design of a Wireless Sensor Network Platform for Detecting Rare, Random, and Ephemeral Events*" Information Processing in Sensor Networks, 2005.
- [17] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/gkrizes-zones.html>
- [18] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/thalassia-sinora.html>
- [19] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/aigialitida-zoni-casus-belli.html>
- [20] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/>
- [21] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/aigialitida-zoni-casus-belli.html>
- [22] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/thalassia-sinora.html>
- [23] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/gkrizes-zones.html>
- [24] <http://www.mfa.gr/zitimata-ellinotourkikon-sheseon/eidikotera-keimena/tourkikoi-ishirismo-i-apostratikopoiisis-nison-aigaiou.html>
- [25] <http://frontex.europa.eu/operations/archive-of-operations/8HPItg>
- [26] http://frontex.europa.eu/publications/Risk_Analysis/Fran_Q1_2014.pdf
- [27] <https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/BOR-A-v4-small.pdf>
- [28] [https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/MARGO T%205000%20-%20MANON.pdf](https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/MARGO_T%205000%20-%20MANON.pdf)
- [29] Θοδωρής Ε. Καρακώστας "*Τηλεπισκοπική παρακολούθηση Θαλασσίων συνόρων με χρήση τεχνολογίας Smart Buoy*", διπλωματική εργασία στον τομέα συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών ΕΜΠ, Αθήνα 2014.
- [30] http://cordis.europa.eu/result/rcn/55354_en.html

Κεφάλαιο 6ο

Επίλογος - Συμπεράσματα

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν επιχειρήθηκε η συγκέντρωση και η παράθεση των σημαντικότερων τεχνολογικών εξελίξεων και εφαρμογών στο θέμα της επιτήρησης συνόρων με χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ο σημαντικότερος στόχος της παρούσας εργασίας υπήρξε η προσαρμογή των εφαρμογών και των μοντέλων WSN που έχουν αναπτυχθεί, ώστε να είναι ρεαλιστική η πιθανή χρήση τους στην ελληνική πραγματικότητα.

Για το σκοπό αυτό έγινε προσπάθεια επισκόπησης των παραμέτρων (περιβαλλοντικών, γεωπολιτικών, οικονομικών) που μπορούν ενδεχομένως να επηρεάσουν μια ανάπτυξη WSN για επιτήρηση του συνόλου ελληνικών συνόρων, αντικείμενο που δεν έχει θιγεί μέχρι τώρα στην εγχώρια βιβλιογραφία. Ταυτόχρονα, παρατίθενται στον αναγνώστη απλοποιημένα μαθηματικά μοντέλα που διέπουν την ανάπτυξη συστημάτων WSN επιτήρησης, με έμφαση στη μέθοδο φράγματος.

Διερευνήθηκε το κόστος μιας πιθανής ανάπτυξης στην περιοχή του Έβρου ποταμού, όπου προέκυψε κόστος συγκρίσιμο (ενδεχομένως πολύ μικρότερο) αυτού των ήδη εγκατεστημένων υποδομών ασφάλειας. Διενεργήθηκε επίσης μελέτη κάλυψης του θαλάσσιου χώρου του Αιγαίου Πελάγους με WSN, αλλά και των ακτών των νήσων. Η εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων ανάπτυξης WSN έγινε με βάση επιχειρησιακά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Η πιθανή υιοθέτηση ενός WSN στο πεδίο της φύλαξης των χερσαίων συνόρων, εκτός από σημαντική βελτίωση που θα επιφέρει στις δυνατότητες των ελληνικών δυνάμεων (ΕΛΑΣ, ΕΣ), θα εισαγάγει πολύτιμη τεχνογνωσία πάνω σε ένα αντικείμενο με πολλές πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

Παράλληλα, η Ελλάδα καλείται να φυλάξει και να επιτηρήσει ένα εξαιρετικά εκτεταμένο θαλάσσιο χώρο με αμφισβητούμενο status quo. Η επιτήρηση των θαλασσιών συνόρων με ηλεκτρονικά μέσα μπορεί να περιορίσει το ρεύμα της παράνομης μετανάστευσης και εντάσσεται στις επιδιώξεις της Ελληνικής Ακτοφυλακής.