



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Υλοποίηση συστημάτων τηλεμετρίας μέσω
ασύρματων δικτύων αισθητήρων για
παρακολούθηση περιβάλλοντος

ΠΕΤΕΙΝΟΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ 2118238

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Υλοποίηση συστημάτων τηλεμετρίας μέσω
ασύρματων δικτύων αισθητήρων για
παρακολούθηση περιβάλλοντος

ΠΕΤΕΙΝΟΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ 2118238

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

Implementation of telemetry systems using
wireless sensor networks for environmental
monitoring

PETEINOS ARISTEIDIS 2118238

FINAL THESIS
ADVISOR

DR. THEOFILOS CHRYSIKOS

TUTOR – ASSOCIATE UNIVERSITY OF THESSALY

Lamia 2023

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: ...6.../3.../2023.....

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης έχουν γίνει σημαντικές κινητήριες δυνάμεις για την έρευνα και την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN). Οι οικολογικοί και περιβαλλοντικοί επιστήμονες έχουν αναπτύξει μια κυβερνοϋποδομή με τη μορφή περιβαλλοντικών παρατηρητηρίων, που αποτελούνται από μια ποικιλία συστημάτων αισθητήρων, εξελιγμένους υπολογιστικούς πόρους και πληροφορική, για να παρατηρούν, να μοντελοποιούν, να προβλέπουν και τελικά να συμβάλλουν στη διατήρηση της υγείας του φυσικού περιβάλλοντος.

Μια τέτοια υποδομή γίνεται όλο και πιο σημαντική καθώς αναγνωρίζουμε ότι ο φυσικός κόσμος είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την ανθρώπινη κοινωνία και σχηματίζει ένα εξαιρετικά πολύπλοκο οικοσύστημα. Τα συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης που βασίζονται σε WSN υπόσχονται να δώσουν τη δυνατότητα στους επιστήμονες του τομέα να εργαστούν με σύνολα δεδομένων πρωτοφανούς λεπτής χωροχρονικής ανάλυσης.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων, όπως τα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (MEMS), οι ασύρματες επικοινωνίες, τα ενσωματωμένα συστήματα, η κατανομημένη επεξεργασία και οι εφαρμογές ασύρματων αισθητήρων έχουν συμβάλει τελευταία σε ένα μεγάλο μετασχηματισμό των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSN). Βοηθά και βελτιώνει την απόδοση των εργασιών τόσο στον τομέα της βιομηχανίας όσο και στην καθημερινή μας ζωή.

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλούς τομείς, ιδίως για την επιτήρηση και την παρακολούθηση στη γεωργία και την παρακολούθηση των βιοτόπων. Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος έχει γίνει ένας σημαντικός τομέας ελέγχου και προστασίας, παρέχοντας επικοινωνία του συστήματος και του ελέγχου σε πραγματικό χρόνο με τον φυσικό κόσμο.

Ένα ευφύες και έξυπνο σύστημα ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να συγκεντρώσει και να επεξεργαστεί μεγάλο όγκο δεδομένων από την αρχή της παρακολούθησης και να διαχειριστεί την ποιότητα του αέρα, τις συνθήκες κυκλοφορίας, έως τις καιρικές συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία, συζητάμε και εξετάζουμε τις εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Προκειμένου να υλοποιηθεί ένα καλό σύστημα παρακολούθησης, πρέπει να ακολουθηθούν διάφορες απαιτήσεις. Από μελέτες που έχουν γίνει έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για την αντικατάσταση της συμβατικής μεθόδου που χρησιμοποιεί τη δύναμη των ανθρώπων για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Αποδεικνύεται επίσης ότι οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος, να παρέχουν μια βολική και αποτελεσματική μέθοδο και μπορούν επίσης να εκπληρώσουν τις λειτουργικές απαιτήσεις.

Στο Κεφάλαιο 1 συζητάμε τις εφαρμογές τηλεμετρίας περιβάλλοντος για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζουμε την μεθοδολογία ενσωμάτωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε κυβερνοϋποδομή περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζουμε ασύρματο σύστημα τηλεμετρίας και στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου σε συγκεκριμένες συνθήκες ράδιο-διάδοσης και παρέχουμε την επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον MATLAB.

ABSTRACT

Environmental monitoring applications have become important drivers for the research and development of wireless sensor networks (WSNs). Ecological and environmental scientists have developed a cyberinfrastructure in the form of environmental observatories, consisting of a variety of sensor systems, sophisticated computing resources and information technology, to observe, model, predict and ultimately help maintain the health of the natural environment.

Such infrastructure is becoming increasingly important as we recognize that the natural world is inextricably linked to human society and forms a highly complex ecosystem. WSN-based environmental monitoring systems promise to enable scientists in the field to work with datasets of unprecedented fine spatio-temporal resolution.

The development of sensor technologies such as Micro-Electromechanical Systems (MEMS), wireless communications, embedded systems, distributed processing and wireless sensor applications have recently contributed to a major transformation of Wireless Sensor Networks (WSNs). It helps and improves the performance of operations in both the industrial sector and in our daily lives.

Wireless Sensor Network has been widely used in many fields, especially for surveillance and monitoring in agriculture and habitat monitoring. Environmental monitoring has become an important area of control and protection, providing real-time system and control communication with the natural world.

An intelligent and intelligent wireless sensor network system can collect and process large volumes of data from the beginning of monitoring and manage air quality, traffic conditions, to weather conditions.

In this paper, we discuss and review the applications of wireless sensor networks for environmental monitoring. In order to implement a good monitoring system, several requirements must be followed. From studies that have been done, it has been shown to be an alternative way to replace the conventional method that uses human power to monitor the environment. It is also shown that these approaches can improve the performance of the system, provide a convenient and efficient method and can also fulfill the operational requirements.

In Chapter 1 we discuss the applications of environmental telemetry for wireless sensor networks. In Chapter 2, we present the methodology of integrating wireless sensor networks into an environmental monitoring cyberinfrastructure. In Chapter 3 we consider wireless telemetry system and in Chapter 4 we present the results of field measurements under specific radio propagation conditions and provide the processing of the results in MATLAB environment.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	1
(Υποκεφάλαιο 1.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
(Υποκεφάλαιο 1.2) ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	2
(Υποκεφάλαιο 1.3) ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
Ενοσωμάτωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε κυβερνοϋποδομή περιβαλλοντικής παρακολούθησης	13
(Υποκεφάλαιο 2.1) Εισαγωγή	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ασύρματο σύστημα τηλεμετρίας	29
(Υποκεφάλαιο 3.1) Αρχιτεκτονική ασύρματου συστήματος τηλεμετρίας	29
(Υποκεφάλαιο 3.2) Υπηρεσίες απομακρυσμένης συλλογής δεδομένων	33
(Υποκεφάλαιο 3.3) Διαχείριση δεδομένων αισθητήρων	36
(Υποκεφάλαιο 3.4) Οπτικοποίηση και ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΕΔΙΟΥ	43
(Υποκεφάλαιο 4.1) Ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων στο πεδίο μετρήσεων	43
(Υποκεφάλαιο 4.2) Χαρακτηρισμός των επιδόσεων του συστήματος και αποτελέσματα δοκιμών πεδίου	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

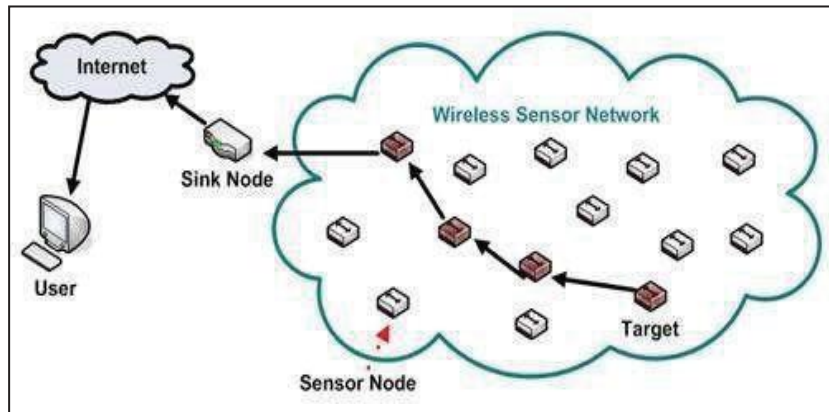
(Υποκεφάλαιο 1.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πρόσφατες τεχνολογίες στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών έκαναν πραγματικότητα το όραμα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN), το οποίο αύξησε την ανάπτυξη των αισθητήρων χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος και πολλαπλών λειτουργιών, οι οποίοι είναι μικροί σε μέγεθος και μπορούν να επικοινωνούν σε μικρή εμβέλεια. Κάθε κόμβος αποτελείται από μικροελεγκτές, μνήμη και πομποδέκτη. Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση εργασιών, την επεξεργασία δεδομένων και την υποβοήθηση της λειτουργίας άλλων στοιχείων στον κόμβο αισθητήρων. Όσον αφορά τη μνήμη, χρησιμοποιείται κυρίως για την αποθήκευση δεδομένων, ενώ ο πομποδέκτης δρα από το συνδυασμό των λειτουργιών πομπού και δέκτη [1].

Τα δεδομένα φυσικών φαινομένων, όπως η θερμοκρασία, το φως, ο ήχος και η πίεση, συλλέγονται από αισθητήρες και στη συνέχεια διαβιβάζονται σε έναν διακομιστή. Αυτοί οι κόμβοι που τροφοδοτούνται από μπαταρίες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος από απομακρυσμένες τοποθεσίες. Τα τελευταία χρόνια, οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί και εφαρμοστεί ευρέως στην ιατρική, στρατιωτική, βιομηχανική, γεωργική και περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου αισθητήρων που εφαρμόζεται στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος και περιλαμβάνει κόμβους αισθητήρων, χρήστη και κόμβο υποδοχής. Οι κόμβοι αισθητήρων θα επικοινωνούν μεταξύ τους και θα μεταδίδουν τα επεξεργασμένα δεδομένα στον κόμβο υποδοχής μέσω ασύρματης επικοινωνίας. Ο κόμβος υποδοχής

συλλέγει δεδομένα από όλους τους κόμβους και μεταδίδει τα αναλυμένα δεδομένα στον χρήστη μέσω του Διαδικτύου [1].



Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου αισθητήρων [1]

Τα τελευταία χρόνια, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων εφαρμόζονται σε διάφορους τομείς και κυρίως σε εφαρμογές παρακολούθησης του περιβάλλοντος.

(Υποκεφάλαιο 1.2) ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος αποτελεί σημαντικό μέρος των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Αναπτύσσεται ευρέως μαζί με την ανάπτυξη της πρόσφατης τεχνολογίας. Γενικά, το σύστημα παρακολούθησης περιβάλλοντος ελέγχει και παρακολουθεί περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το φως και η πίεση. Υπάρχουν αρκετές μελέτες που επικεντρώνονται σε εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης [4],[5].

Ορισμένοι ερευνητές εφαρμόζουν την ανοχή σε σφάλματα και μελετούν τον συμβιβασμό μεταξύ της δαπάνης του εργαλείου και της διάρκειας ζωής του δικτύου αισθητήρων [6] για να βεβαιωθούν ότι η ανοχή σε σφάλματα είναι στις τρισδιάστατες ρυθμίσεις. Οι ερευνητές στα [7] και [8] ανέπτυξαν εφαρμογές επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων, πράγμα που σημαίνει ότι τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της υγρασίας θα μεταδίδονται στον γειτονικό κόμβο και στη συνέχεια θα αποστέλλονται στον υπολογιστή του τελικού χρήστη.

Η μέτρηση των δεδομένων των περιβαλλοντικών παραμέτρων θα εμφανίζει το αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας Java [3] και τα δεδομένα ερμηνεύονται σε γράφημα

και πίνακα. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να κατανοηθούν οι απαιτήσεις για την ανάπτυξη εφαρμογών παρακολούθησης [9].

Αυτονομία

Είναι υποχρεωτικό να βεβαιωθούμε ότι η χρησιμοποιούμενη μπαταρία είναι σε θέση να λειτουργεί σωστά καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης, επειδή ο ραδιοπομποδέκτης είναι ένας σταθερός καταναλωτής ενέργειας και το δίκτυο πρέπει να είναι ενεργειακά συνετό.

Αξιοπιστία

Απαιτείται απλός χειρισμός και προβλέψιμες λειτουργίες, προκειμένου να αποφεύγονται απροσδόκητες συντριβές του συστήματος. Εξάλλου, θα πρέπει να αποφεύγεται η συντήρηση από οποιοδήποτε άτομο, διότι οι τελικοί χρήστες μπορεί να μην έχουν γνώσεις σχετικά με τη δικτύωση, καθώς και τις αλλαγές στην περιοχή ενδιαφέροντος που συχνά συμβαίνουν κατά τη μετάδοση των δεδομένων πακέτων. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να επιτευχθεί αξιοπιστία προκειμένου να αποφευχθεί η απώλεια πακέτων κατά τη διάρκεια κακών καιρικών συνθηκών.

Ανθεκτικότητα

Το δίκτυο πρέπει να είναι ανθεκτικό για να αντιμετωπίζει προβλήματα όπως βλάβες υλικού και κακή συνδεσιμότητα σήματος. Για παράδειγμα, η επίδραση της υγρασίας μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα βραχυκυκλώματος και να οδηγήσει σε επανεκκίνηση του συστήματος.

Ευελιξία

Ο χρήστης πρέπει να μπορεί να προσθέτει, να μετακινεί ή να αλλάζει σταθμούς ανά πάσα στιγμή ανάλογα με τις απαιτήσεις των σταθμών. Για παράδειγμα, η τρέχουσα θέση των σταθμών μπορεί να είναι εκτός εμβέλειας για τους κόμβους για τη μετάδοση σήματος ή ο χρήστης μπορεί να θέλει να προσθέσει νέους σταθμούς προκειμένου να βελτιώσει το σημείο ενδιαφέροντος των κόμβων. Επομένως, οι απαιτήσεις αυτές είναι ουσιώδεις κατά την ανάπτυξη ενός δικτύου προκειμένου να εφαρμοστεί ένα καλό και σταθερό σύστημα παρακολούθησης.

Πρόσφατες υλοποιήσεις συστημάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης έχουν πραγματοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές προκειμένου να βοηθήσει τους ανθρώπους στην εργασία τους και να μειώσει το κόστος και το χρόνο. Οι εφαρμογές της περιβαλλοντικής παρακολούθησης έχουν αυξηθεί ραγδαία στη γεωργική παρακολούθηση, την παρακολούθηση βιοτόπων, την παρακολούθηση εσωτερικών χώρων, την παρακολούθηση θερμοκηπίων, την παρακολούθηση του κλίματος και την παρακολούθηση δασών. Πρόκειται για μια καλή προσπάθεια και αποφέρει πλεονέκτημα επειδή η κοινότητα έχει συνειδητοποιήσει τη σημασία των τεχνολογιών ασύρματων δικτύων αισθητήρων στη ζωή της.

Γεωργική παρακολούθηση

Η γεωργική παρακολούθηση επικεντρώνεται πάντα κυρίως σε γεωργικές περιοχές. Ορισμένες μελέτες ορίζουν την παρακολούθηση των ζώων ως εντοπισμό των ζώων [10] αλλά η έννοια είναι η ίδια. Υπάρχουν μεθοδολογίες που πρέπει να εφαρμοστούν για να περάσουν από κάθε φάση που έχει καθοριστεί καλά για ολόκληρο τον κύκλο ζωής [11]. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ζώων και ανθρώπων έχει αναπτυχθεί και αναγνωριστεί εδώ και δεκαετίες. Η συμβολή της αγάπης των ζώων, της αληθινής καρδιάς και της συνέχειας της ζωής μπορεί να προσφέρει θετικό αντίκτυπο στη φυσική και ψυχική κατάσταση του ανθρώπου [12],[13].

Ωστόσο, στις μέρες μας πολλά ζώα στερούνται κατάλληλης θεραπείας και υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου οι ασθένειες αυτών των ζώων δεν ανιχνεύονται. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα σύστημα παρακολούθησης για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των ζώων και την παραγωγή μιας έκθεσης σχετικά με την υγεία ή τη συμπεριφορά τους σε σύστημα πραγματικού χρόνου.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι ταυτοποίησης για την παρακολούθηση της υγείας των ζώων, αλλά ορισμένες από αυτές είτε αποτυγχάνουν είτε δεν είναι αποτελεσματικές και δεν είναι φιλικές προς τον χρήστη. Ο σχεδιασμός του

συστήματος κινητής παρακολούθησης με βάση την τεχνολογία RFID (RFID-MMS) [14] βοηθά τους χρήστες να ελέγχουν τη συμπεριφορά και την κίνηση των ζώων.

Στα [15] και [16] προτείνονται περιλαίμια εντοπισμού για την παρακολούθηση άγριων ζώων. Θα παρακολουθεί τον βιότοπο, το μοτίβο κίνησης και τη συμπεριφορά των ζώων. Ως ζώα-στόχοι χρησιμοποιούνται άγριοι λύγκες ή κυνίδες. Οι κόμβοι αισθητήρων που έχουν κατασκευαστεί γύρω από τα περιλαίμια θα συλλέγουν τη θέση του GPS και τα δεδομένα του πολυτροπικού αισθητήρα, θα διανέμονται μέσω του συστήματος στον πελάτη. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι η εμβέλεια της επικοινωνίας σήματος μπορεί να επιτευχθεί από 200 - 250 μέτρα και αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη προκειμένου να σχεδιαστεί ένα αυτοσυντηρούμενο σύστημα που θα είναι πιο αποδοτικό στο μέλλον.

Στο [17] υλοποιείται ένα σύστημα παρακολούθησης του γεωργικού περιβάλλοντος, το οποίο περιλαμβάνει το υλικό σχεδιασμού των κόμβων αισθητήρων και την ανάπτυξη λογισμικού που αποτελείται από το διάγραμμα ροής λογισμικού. Από τη δοκιμή που διεξήχθη, το σύστημα αποδείχθηκε ότι καταναλώνει χαμηλή ισχύ αλλά παρέχει υψηλή αξιοπιστία, η οποία μπορεί να ελέγξει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο για την απροστάτευτη γεωργική και περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Το σύστημα παρακολούθησης πουλερικών προσφέρει επίσης μεγάλο πλεονέκτημα στους χρήστες, ιδίως στους αγρότες. Στο [18] προτείνεται και αναπτύσσεται ένα σύστημα παρακολούθησης πουλερικών το οποίο είναι διαδικτυακή εφαρμογή. Χρησιμοποιούν τα βελάκια TelosB μοτίβου που μπορούν να ενσωματωθούν με τους αισθητήρες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του κοτόπουλου. Στο τέλος της μελέτης, επιτυγχάνουν μέγιστη απόσταση εμβέλειας σήματος έως και 40 μέτρα με ανεκτή απώλεια πακέτων 5%. Από το αποτέλεσμα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα είναι ικανό να ανιχνεύει τις ανωμαλίες του περιβάλλοντος στο εκτροφείο κοτόπουλων. Αυτός ο τύπος

παρακολούθησης δεν εφαρμόζεται μόνο για πουλερικά, αλλά και για την παρακολούθηση βοοειδών [19], [20].

Παρακολούθηση βιοτόπων

Η παρακολούθηση των βιοτόπων είναι ένα από τα βασικά μέρη της περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Ως βιότοπος νοείται ο τόπος στον οποίο ένα ζώο ή φυτό αναπτύσσεται ή ζει φυσιολογικά. Ως εκ τούτου, η παρακολούθηση των βιοτόπων είναι σημαντική για να διασφαλιστεί η αυτονομία των ειδών τους και να αποτραπεί οποιαδήποτε οικολογική διαταραχή για τα ζώα και τα φυτά. Η ρύπανση μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και την οικολογική ισορροπία. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να διαχειριστούμε ένα σύστημα που να μπορεί να παρακολουθεί τη ρύπανση, ώστε να είναι υπό έλεγχο.

Στο [21] αναπτύσσεται μια διαδικτυακή γραφική διεπαφή χρήστη για την αποτελεσματική διαχείριση των δεδομένων της ρύπανσης. Οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούνται για να διαβάζουν τις τρέχουσες ενδείξεις των αισθητήρων. Στο τέλος της μελέτης, καταφέρνουν να βελτιώσουν την απόδοση της τεχνολογίας των αισθητήρων κερδίζοντας μια σταθερή επικοινωνία, παρόλο που η μέση διάρκεια ζωής των αισθητήρων έχει μειωθεί λόγω της απαίτησης της καθυστέρησης.

Στο [22], προτείνεται μια αρχιτεκτονική συστήματος για την παρακολούθηση της φωλεοποίησης και της συμπεριφοράς των θαλασσοπουλιών. Αντί να διεξάγουν την έρευνά τους φυσικά, με τη χρήση των κόμβων αισθητήρων, τώρα τους επιτρέπεται να συλλέγουν δεδομένα online χωρίς να διαταράσσουν τη ζωή και τη ρουτίνα των πτηνών. Από τη μελέτη αυτή, δημιουργούνται οι κατευθυντήριες γραμμές του kit παρακολούθησης βιοτόπων για τη χρήση από άλλους ερευνητές και επιστήμονες σε άλλους τομείς.

Υπάρχουν επίσης μελέτες που παρουσιάζουν πρακτικά ζητήματα στην ενσωμάτωση αισθητήρων, πραγματικούς ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας και αναπτύσσουν μια πρακτική μεθοδολογία ιεραρχικής δρομολόγησης. Προκειμένου να ληφθούν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, είναι αδύνατο για τους ανθρώπους

να συλλέγουν τα δεδομένα σε απομακρυσμένο σημείο. Έτσι, μια παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο για την περιβαλλοντική παρακολούθηση απροστάτευτων οικοτόπων αναπτύσσεται από το [23]. Μετρούν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη συγκρίνουν με την πραγματική θερμοκρασία. Αυτό βελτιώνει την αξιοπιστία και την ακρίβεια του συστήματος παρακολούθησης.

Επιπλέον, στο [24] παρουσιάζεται μια εφαρμογή για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού. Έχει κατασκευαστεί για την παρακολούθηση του υλικού και την οπτικοποίηση των δεδομένων και στη συνέχεια αναλύει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας τη γνώση των εμπειρογνομόνων για την εκτέλεση αυτόματου ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό θα διασφαλιστεί το επίπεδο ποιότητας του νερού. Από τα αποτελέσματα της ανάπτυξης, αποδεικνύεται ότι είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη σύστημα, καθώς μπορεί να στείλει μήνυμα στον χρήστη σχετικά με απρόβλεπτα γεγονότα που συμβαίνουν.

Παρακολούθηση εσωτερικών χώρων διαβίωσης

Οι τεχνολογίες αισθητήρων για την ασφάλεια στην παρακολούθηση της διαβίωσης έχουν γίνει μια από τις κύριες επιλογές των ανθρώπων για την ασφάλεια του εσωτερικού περιβάλλοντος. Στο [25] υλοποιείται ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για σύστημα ασφαλείας χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Bluetooth. Αυτό το σύστημα αποτελείται από κόμβους αναμετάδοσης, κόμβους ελέγχου και ένα σύστημα ελέγχου που μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα δωμάτιο ενός κτιρίου. Οι κόμβοι αποτελούνται από μια μονάδα Bluetooth, μια θυγατρική πλακέτα RF, μια θύρα UART και έναν διακόπτη on-off 4-bit για την εξομοίωση εξωτερικών εισόδων.

Κατά την διάρκεια ορισμένων συμβάντων, όπως η παράνομη είσοδος ενός εισβολέα σε μια περιοχή ασφαλείας, οι κόμβοι αισθητήρων και οι αναμεταδότες καταγράφουν τα συμβάντα και τα αναφέρουν στους κόμβους ελέγχου. Στη συνέχεια, οι κόμβοι ελέγχου στέλνουν την αναφορά στο τοπικό σύστημα ελέγχου ασφαλείας. Από εκεί, αυτό απαντά με μήνυμα ACK στους αντίστοιχους κόμβους. Στο τέλος, καταφέρνουν να αναπτύξουν πρόγραμμα εφαρμογών το οποίο μπορεί να

ενσωματώσει τη μονάδα Bluetooth με τη διεπαφή HCI και να χρησιμοποιήσει επίσης δενδρικές τοπολογίες για τη διαμόρφωση του δικτύου και τη δρομολόγηση.

Επιπλέον, σχεδιάζεται επίσης ένα ασύρματο σύστημα οικιακής ασφάλειας [26] για την ανίχνευση οποιουδήποτε εισβολέα στο σπίτι. Χρησιμοποιεί αισθητήρα κίνησης ως κόμβο αισθητήρα. Όταν ο αισθητήρας κίνησης ανιχνεύσει έναν εισβολέα, στέλνει μια αναφορά στον τελικό κόμβο. Ο τελικός κόμβος συνδέεται με τον υπολογιστή σε σειριακή θύρα RS232, ενώ ο υπολογιστής λειτουργεί ως διεπαφή χρήστη (UI) μεταξύ χρήστη και συστήματος, ενώ ενσωματώνει τα δεδομένα και με το κινητό τηλέφωνο του χρήστη. Μετά από δευτερόλεπτα, ο χρήστης θα λάβει τις πληροφορίες μέσω συστήματος σύντομων μηνυμάτων (SMS).

Στο [27] υλοποιείται ένα σύστημα ανίχνευσης κίνησης εισβολέα χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα TMote Sky Platform ως κόμβους αισθητήρων. Δυστυχώς, κατά το στάδιο της ανάπτυξης, εμφανίζονται πολλά προβλήματα. Το πρόγραμμα δεν μπορεί να μεταγλωττιστεί στον αισθητήρα και στο τέλος, έφτασε στο τέλος της ζωής του. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναλύσουν και να προτείνουν έναν εναλλακτικό τρόπο για μελλοντικές εργασίες χρησιμοποιώντας άλλες μονάδες αισθητήρων, όπως η τεχνολογία Sun Small Programmable Object Technology (SunSPOT), η τεχνολογία ZigBee και η Sentilla. Για την τροφοδοσία ρεύματος, προτείνουν τη χρήση ηλιακής ενέργειας ή επαναφορτιζόμενων μπαταριών αντί μιας μπαταρίας μιας χρήσης για την εξοικονόμηση του περιβάλλοντος.

Υπάρχουν επίσης μελέτες για την ανίχνευση πυρκαγιάς σε κτίρια [28] . Το σύστημα παρέχει παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και συναγερμό σε περίπτωση παρουσίας πυρκαγιάς, και επίσης ενημερώνει για την ακριβή τοποθεσία της πυρκαγιάς αυτής. Επίσης, διανέμει κατευθύνσεις συλλέγοντας, αναλύοντας και διατηρώντας συνεχώς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο.

Παρακολούθηση θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου εμφανίζεται όταν η ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η θερμότητα του ήλιου, παγιδεύεται από τα αέρια της γήινης ατμόσφαιρας

και αντανακλάται από τη γη. Έτσι, θερμαίνει την επιφάνεια της γης και οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ως εκ τούτου, το σύστημα παρακολούθησης του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι σημαντικό για τη διασφάλιση της σταθεροποίησης του περιβάλλοντος.

Στο [29] αναπτύσσεται σύστημα παρακολούθησης θερμοκηπίου χρησιμοποιώντας το TinyOS ως βασική πλατφόρμα για τη μέτρηση και παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, του φωτός και της υγρασίας. Η μονάδα αισθητήρα που χρησιμοποιείται είναι η SHT 15 και το φωτοαντιστάτη ως αισθητήρας φωτός, ενώ η nesC ως γλώσσα προγραμματισμού. Το σύστημα συλλέγει, αποστέλλει και ελέγχει τις πληροφορίες των παραμέτρων αυτόματα και αποδεικνύεται ότι η απόδοση του συστήματος είναι αποτελεσματική καθώς ο χρήστης μπορεί να συλλέξει δεδομένα υψηλής ακρίβειας του περιβάλλοντος χωρίς καμία διαταραχή.

Η εφαρμογή της παρακολούθησης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου με βάση το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ZigBee στο [30] χρησιμοποιεί την ορμητική ανάλυση και την πειραματική μέθοδο δοκιμής για να εξασφαλίσει την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Συλλέγει την υγρασία, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα που είναι οι παράμετροι των περιβαλλοντικών παραμέτρων του θερμοκηπίου και αποδεικνύει τις επικοινωνίες των κόμβων και του συντονιστή του δικτύου, εκτελεί σταθεροποίηση του δικτύου και συμμόρφωση μεταξύ θεωρητικών δεδομένων και πραγματικών καταστάσεων.

Το σύστημα αποδεικνύεται ότι είναι εύρωστο, αξιόπιστο και εύκολο για την εγκατάσταση του χρήστη. Οι ίδιες μελέτες στο [31] υλοποιούν ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ZigBee που μπορεί να μετρήσει τη θερμοκρασία και την υγρασία του θερμοκηπίου. Καταφέρνουν να σχεδιάσουν χαμηλό σύστημα παρακολούθησης της κατανάλωσης ενέργειας με την ενίσχυση της σταθερότητας του συστήματος και την παράταση του χρόνου λειτουργίας των κόμβων αισθητήρων.

Το σύστημα παρακολούθησης θερμοκηπίων μπορεί επίσης να είναι σύστημα βασισμένο στο διαδίκτυο (απομακρυσμένο σύστημα) [32] για να επιτρέπει στον χρήστη την πρόσβαση, τον έλεγχο και την παρακολούθηση του εργαστηρίου θερμοκηπίων χρησιμοποιώντας σύνδεση στο διαδίκτυο. Ο χρήστης, που είναι οι φοιτητές, καταφέρνει να αναπτύξει τις μαθησιακές του δεξιότητες και να βελτιώσει τις πρακτικές του δεξιότητες για την ανάπτυξη και τον έλεγχο του εργαστηρίου προσομοίωσης, καθώς μπορεί εύκολα να έχει πρόσβαση στο σύστημα από το σπίτι του.

Το υλικό του συστήματος αποτελείται από διάφορες μονάδες που αποτελούν το βασικό μέρος του συστήματος, όπως η πλακέτα αισθητήρων, η πλακέτα επεξεργαστή και η κονσόλα παρακολούθησης, ενώ οι συσκευές Sun SPOT χρησιμοποιούνται ως πλατφόρμες λογισμικού για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και τη μέτρηση του φωτός. Το σύστημα παρέχει οφέλη στον χρήστη, καθώς μπορεί να έχει πρόσβαση και να ελέγχεται από παντού χρησιμοποιώντας μόνο το πρόγραμμα περιήγησης στο διαδίκτυο και είναι επίσης πολύ αξιόπιστο, επειδή μπορεί να υποβάλει έκθεση από τα ελεγχόμενα αντικείμενα.

Παρακολούθηση του κλίματος

Η κλιματική αλλαγή στον κόσμο στις μέρες μας έχει επιφέρει πολλές επιπτώσεις, όπως το σπάσιμο των θαλάσσιων πάγων, η αύξηση της στάθμης του θαλάσσιου νερού, τα κύματα καύσωνα, το λιώσιμο των παγετώνων, η αύξηση της θερμοκρασίας των λιμνών και πολλά άλλα. Έτσι, σε μια προσπάθεια ελέγχου και παρακολούθησης της κλιματικής αλλαγής, στο [33] αναπτύσσεται ένα σύστημα παρακολούθησης που διαχειρίζεται και διατηρεί δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και εστιάζει στην επεξεργασία διαχρονικών ερωτημάτων.

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται χωρική και υπάρχουσα χρονική προσέγγιση για να βοηθήσουν τα διαχρονικά ερωτήματα και να διατηρήσουν τα δεδομένα των αισθητήρων και να δημιουργήσουν ένα σύστημα για το δίκτυο αισθητήρων περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Τα εισερχόμενα δεδομένα

διατηρούνται ως τμήμα και επισημαίνονται με χρονοσφραγίδα, εάν συμβαίνουν αλλαγές στην τιμή του στοιχείου.

Τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο εμφανίζονται και η τιμή του τμήματος τροποποιείται ή εισάγεται νέα πλειάδα για να εμφανιστεί η ενημερωμένη τιμή μετά από σύγκριση των αρχικών τιμών με την τελευταία τιμή στη βάση δεδομένων. Χειρίζονται τη μέθοδο με βάση το τμήμα για να διατηρήσουν τη ροή δεδομένων και να μειώσουν την αποθηκευμένη εγγραφή χωρίς απώλεια δεδομένων. Από το αποτέλεσμα του ερωτήματος, η ακρίβεια του συστήματος βελτιώνεται και η μέθοδος που χρησιμοποιείται μπορεί να μειώσει το κόστος χειρισμού.

Παρακολούθηση δασών

Τα δάση είναι σημαντικές πηγές για τη βιοποικιλότητα και την οικολογική ισορροπία. Παρέχουν πολλά οφέλη και είναι οι κύριες λειτουργίες για τη διατήρηση των υδάτων και του εδάφους, των γενετικών πόρων για τα φυτά και τα ζώα, καθώς και πηγή εφοδιασμού με ξύλο και άλλα δασικά αγαθά. Ωστόσο, πρόσφατα το πράσινο δασικό περιβάλλον έχει διακοπεί από μη ηθικές δραστηριότητες, όπως η παράνομη υλοτομία, καθώς και από δραστηριότητες ανάπτυξης της χώρας που μειώνουν τα οφέλη από τη συμβολή των δασών.

Συνεπώς, προκειμένου να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη αυτονομία των δασών, είναι σημαντικό να εφαρμοστεί ένα σύστημα παρακολούθησης που να είναι υπεύθυνο για την παροχή αποτελεσματικής παρακολούθησης του δασικού περιβάλλοντος [34]. Αρκετές μελέτες έχουν επισημάνει το σύστημα παρακολούθησης των δασών [35],[36]. Αντί να χρησιμοποιούν μπαταρίες μίας χρήσης ως τροφοδοτικά, οι ερευνητές στο [37] χρησιμοποιούν σύστημα ηλιακής ενέργειας κόμβου και μπαταρία ιόντων λιθίου για τη συνέχεια της ισχύος και παρουσιάζουν συνοπτικά τον ρυθμιστικό έλεγχο της μεθόδου του συστήματος και τον σχεδιασμό του συστήματος λογισμικού. Το σύστημά τους μπορεί να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ιόντων λιθίου για να διασφαλίσει την επιχειρησιακή συνέχεια του συστήματος.

Αλλά για την εφαρμογή του συστήματος ηλιακής ενέργειας, χρειάζεται ακόμη να επαναλάβουν τον πειραματισμό σχετικά με τη λειτουργία του ελέγχου φόρτισης και εκφόρτισης για να βεβαιωθούν ότι ο έλεγχος και η εκτίμηση της ακρίβειας της ισχύος της μπαταρίας πληρούν τις απαιτήσεις του συστήματος.

Η παρακολούθηση των δασών δεν περιορίζεται μόνο σε περιβαλλοντικά ζητήματα, αλλά περιλαμβάνει επίσης την παρακολούθηση και τον εντοπισμό πυρκαγιών στα δάση [38]-[41]. Ως εκ τούτου, στο [42] αναπτύσσεται ένα πλαίσιο για την παρακολούθηση των δασών και την ανίχνευση πυρκαγιών, το οποίο ανακαλύπτει την προσέγγιση ανάπτυξης κόμβων αισθητήρων, μια αρχιτεκτονική για δίκτυο αισθητήρων ανίχνευσης πυρκαγιών, πρωτόκολλο αλληλεπίδρασης εντός και μεταξύ των συστάδων.

Στην εργασία αυτή αναπτύσσεται ένας προσομοιωτής για την εκτέλεση δοκιμών προσομοίωσης προκειμένου να εξετάσουν τα προτεινόμενα πρωτόκολλα και στοιχεία του συστήματος. Τελικά, το σύστημά τους καταφέρνει να παρέχει αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία που εξοικονομεί λιγότερη ενέργεια χωρίς να διαταράσσει την ικανότητα ταχείας αντίδρασης.

Σε άλλες μελέτες, στο [43] προτείνεται ένα σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς που χρησιμοποιεί ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) σε συνδυασμό με την τεχνολογία των κόμβων αισθητήρων. Το σύστημα που έχει οριστεί σε ασύρματο δίκτυο πλέγματος χρησιμοποιεί κόμβους πολλαπλών αισθητήρων με κάμερες βασισμένες σε IP για την ανίχνευση της παρουσίας πυρκαγιάς. Όταν ανακαλύπτεται πυρκαγιά από τους κόμβους, ο συναγερμός των αισθητήρων διαδίδεται μέσω ασύρματου δικτύου σε έναν κεντρικό διακομιστή. Ο κεντρικός διακομιστής επιλέγει την πλησιέστερη στον πολύ-αισθητήρα ασύρματη κάμερα και μεταδίδει σε αυτήν ένα μήνυμα για να ανακτήσει στοιχεία σε πραγματικό χρόνο από την περιοχή. Τα σημαντικότερα οφέλη από αυτή τη μελέτη είναι ότι ενσωματώνει αισθητηριακά δεδομένα με εικόνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ενσωμάτωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε κυβερνοϋποδομή περιβαλλοντικής παρακολούθησης

(Υποκεφάλαιο 2.1) Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) έχουν μεγάλες δυνατότητες να φέρουν επανάσταση σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της μηχανικής. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε ένα νέο σύστημα περιβαλλοντικής παρακολούθησης με έμφαση στη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος για απρόσκοπτη ενσωμάτωση ενσύρματων και ασύρματων αισθητήρων για μακροχρόνια, απομακρυσμένη και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση [44].

Παρουσιάζουμε επίσης ένα ενοποιημένο πλαίσιο για τη συλλογή, διαχείριση, οπτικοποίηση, διάδοση και ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων, το οποίο συμμορφώνεται με το νέο πρότυπο Sensor Web Enablement. Παρουσιάζονται επίσης ορισμένα αρχικά αποτελέσματα δοκιμών πεδίου. Το σύστημα παρακολούθησης ενσωματώνεται στην υποδομή του Περιβαλλοντικού Παρατηρητηρίου του Τέξας για μακροχρόνια λειτουργία.

Στο πλαίσιο του ολοκληρωμένου συστήματος, αναπτύσσεται ένα νέο σύστημα παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας με βάση το WSN για την υποστήριξη της έρευνας υδρολογικής παρακολούθησης και μοντελοποίησης. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί σημαντική συμβολή στην εμπειρική μελέτη της αναδυόμενης τεχνολογίας WSN [45]-[52]. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια νέα κυβερνο-υποδομή περιβαλλοντικής παρακολούθησης που διαθέτει (1) παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας με ευέλικτη χωρική κάλυψη και ανάλυση, (2) απρόσκοπτα ενσωματωμένους ενσύρματους και ασύρματους αισθητήρες, (3) μακροπρόθεσμη, αυτόνομη, απομακρυσμένη και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση, (4) δημόσια διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες για οπτικοποίηση και διάδοση

δεδομένων αισθητήρων και (5) απομακρυσμένη παρακολούθηση και συντήρηση του συστήματος.

Παρόλο που η εργασία εστιάζει στη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση ενσύρματων και ασύρματων αισθητήρων για μακροχρόνια, απομακρυσμένη και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση, παρουσιάζουμε επίσης μια σειρά πρωτοκόλλων δικτύωσης αισθητήρων και διάφορους σχετικούς οδηγούς συσκευών που έχουν αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης και αντιμετωπίζουν πολλά πρακτικά ζητήματα σε σενάρια εφαρμογών στον πραγματικό κόσμο, τα οποία συχνά παραμελούνται στην υπάρχουσα βιβλιογραφία [45]-[52].

Το νέο σύστημα παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας με βάση το WSN αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τη μακροπρόθεσμη υδρολογική παρακολούθηση και την έρευνα μοντελοποίησης. Η αυξανόμενη αστικοποίηση επιφέρει αλλαγές στην εδαφοκάλυψη μιας δεδομένης περιοχής αποστράγγισης, η οποία με τη σειρά της αυξάνει την ποσότητα του νερού που ρέει στην ξηρά και μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για να φθάσει η ροή αιχμής [53], αυξάνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις τον κίνδυνο αιφνίδιων πλημμυρών.

Τα μοντέλα υδρολογικής λογικής είναι χρήσιμα στην πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο οι αλλαγές στη γη κάλυψης σε ταχέως αναπτυσσόμενες αστικές περιοχές μεταφράζονται σε αλλαγές στην στο σύστημα παροχής των υδάτων. Τα μοντέλα αυτά απαιτούν εισροές που είναι δύσκολο να μετρηθούν σε μεγάλες περιοχές, ιδίως μεταβλητές που σχετίζονται με τα γεγονότα καταιγίδων, όπως οι συνθήκες της προϋπάρχουσας εδαφικής υγρασίας του εδάφους και η ποσότητα και η ένταση της βροχόπτωσης.

(Υποκεφάλαιο 2.2) Απαιτήσεις σχεδιασμού

Στο τρέχον υποκεφάλαιο, παρουσιάζουμε ένα νέο σύστημα περιβαλλοντικής παρακολούθησης για να βελτιώσουμε σημαντικά τις δυνατότητες και τη χρηστικότητα του συστήματος που αναπτύσσεται σήμερα στο πάρκο Greenbelt Corridor (GBC) στο Denton του Τέξας, το οποίο διαχειρίζεται το Texas Parks and

Wildlife Department [44]. Στην παρούσα ενότητα προσδιορίζονται ορισμένες βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού.

Παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας με ευέλικτη χωρική κάλυψη και ανάλυση

Στο υπάρχον σύστημα, όλοι οι αισθητήρες αναπτύσσονται μέσα σε μια μικρή περιφραγμένη περιοχή, μια κατάσταση που είναι χαρακτηριστική για πολλά συστήματα παρακολούθησης του περιβάλλοντος. Υπάρχει ανάγκη να παρέχεται ευελιξία για την επέκταση της χωρικής κάλυψης και την προσαρμογή της χωρικής ανάλυσης των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας. Η χωρική κάλυψη του συστήματος περιορίζεται από τον φυσικό περιορισμό του μήκους του καλωδίου που συνδέει τους αισθητήρες με τον καταγραφέα δεδομένων. Αντίθετα, η χωρική κάλυψη και η ανάλυση του WSN μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα ώστε να έχουν νόημα για τους επιστήμονες του τομέα.

Ενσωμάτωση των WSN με υφιστάμενα περιβαλλοντικά παρατηρητήρια

Παρά τους περιορισμούς τους, τα παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης του περιβάλλοντος με διάφορους ενσύρματους αισθητήρες είναι ικανά να επιτελέσουν πολλές εργασίες παρακολούθησης, και έχουν γίνει σημαντικές επενδύσεις για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, της βροχόπτωσης και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η δραστική αντικατάσταση των υφιστάμενων συστημάτων με μια ανώριμη τεχνολογία όπως το WSN θεωρείται απαράδεκτη για πολλούς επιστήμονες και επαγγελματίες του χώρου. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να εισαχθεί η νέα τεχνολογία WSN χωρίς να διαταραχθεί συνεχιζόμενη λειτουργία των περιβαλλοντικών παρατηρητηρίων μέσω της απρόσκοπτης ενσωμάτωσης ενσύρματων και ασύρματων αισθητήρων.

Μακροπρόθεσμη, αυτόνομη, απομακρυσμένη, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο περιβαλλοντική παρακολούθηση

Πολλά συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες περιοχές στις οποίες δεν είναι εύκολη η πρόσβαση για την ανάκτηση δεδομένων και την ανάπτυξη και διαχείριση του συστήματος.

Παραδοσιακά, ένας αυτόνομος σταθμός πεδίου αποτελείται από έναν καταγραφέα δεδομένων και έναν αριθμό αισθητήρων. Ο καταγραφέας είναι προγραμματισμένος να λαμβάνει δείγματα με σταθερό ρυθμό και τα δεδομένα αποθηκεύονται στην εσωτερική του μνήμη.

Τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν μέσω της θύρας RS232 με τη χρήση υπολογιστή. Έτσι, η πρόσβαση στα δεδομένα απαιτεί επίσκεψη στο σταθμό πεδίου, η οποία είναι άβολη και είναι εξαιρετικά δύσκολη, αν όχι αδύνατη, κατά τη διάρκεια δύσκολων συνθηκών, για παράδειγμα πλημμυρικών φαινομένων. Επιπλέον, έχει πρόσφατα αναγνωριστεί ότι πολλές οικολογικές και περιβαλλοντικές μελέτες χρειάζονται μακροχρόνια συλλογή και διαχείριση δεδομένων.

Έτσι, τα συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης πρέπει να είναι ανθεκτικά σε ακραίες περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες για μακροχρόνια λειτουργία με περιορισμένη ανθρώπινη παρέμβαση, καθιστώντας τη συγκομιδή ενέργειας και την ενεργειακή αποδοτικότητα σημαντικά ζητήματα σχεδιασμού. Η συλλογή δεδομένων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο είναι ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό για την υποστήριξη περιβαλλοντικών μελετών ευαίσθητων στο χρόνο, το οποίο απαιτεί μια βολική αλλά αξιόπιστη ασύρματη σύνδεση επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας.

Δημόσια διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες για οπτικοποίηση και διάδοση δεδομένων αισθητήρων

Είναι σημαντικό να δημοσιοποιηθούν τα δεδομένα προς όφελος ενός ευρέος φάσματος φορέων, όπως οι περιβαλλοντικοί ερευνητές, οι τοπικοί πολίτες και οι υπεύθυνοι χάραξης κυβερνητικής πολιτικής, καθώς και οι εκπαιδευτικοί και οι μαθητές της K-12. Επιπλέον, η εκρηκτική αύξηση των περιβαλλοντικών δεδομένων που συλλέγονται από διάφορους αισθητήρες σε μακροχρόνια λειτουργία απαιτεί ένα ενιαίο πλαίσιο για τη συλλογή, διαχείριση, ενσωμάτωση, οπτικοποίηση και διάδοση δεδομένων. Ένα τέτοιο πλαίσιο θα πρέπει να συμμορφώνεται με πρότυπα, όπως το πρότυπο Sensor Web Enablement (SWE) που προτάθηκε από την Open Geographic

Consortium (OGC) [54], για να καταστεί δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων και η διαλειτουργικότητα.

Απομακρυσμένη παρακολούθηση και διαχείριση της κατάστασης του συστήματος

Για τα συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης που αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες περιοχές, η απομακρυσμένη παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος είναι εξαιρετικά χρήσιμη για σκοπούς ανάπτυξης, αποσφαλμάτωσης και συντήρησης του συστήματος. Έτσι, διάφορα δεδομένα κατάστασης του συστήματος πρέπει να ορίζονται προσεκτικά και να συλλέγονται μαζί με τα δεδομένα των περιβαλλοντικών αισθητήρων. Επιπλέον, είναι σημαντικό να προσαρμόζονται εξ αποστάσεως οι διαμορφώσεις του συστήματος και να ενημερώνονται και να αναβαθμίζονται τα προγράμματα λογισμικού.

(Υποκεφάλαιο 2.3) Αρχιτεκτονική του συστήματος των κόμβων αισθητήρων

Η πλατφόρμα υλικού WSN που χρησιμοποιήθηκε στον τρέχοντα σχεδιασμό είναι το IRIS mote της Crossbow Technology [55]. Το IRIS mote παρέχει μια ιδιαίτερα ολοκληρωμένη, οικονομικά αποδοτική λύση υλικού για εφαρμογές WSN χαμηλής ισχύος. Σε κάθε κόμβο αισθητήρα, ο αισθητήρας εδαφικής υγρασίας είναι συνδεδεμένος σε μια προαιρετική πλακέτα συλλογής δεδομένων MDA300. Ο κόμβος του σταθμού βάσης (BS) είναι εγκατεστημένος σε μια πλακέτα επέκτασης MIB510, η οποία διασυνδέεται με τον RFG Server μέσω της σειριακής θύρας RS232.

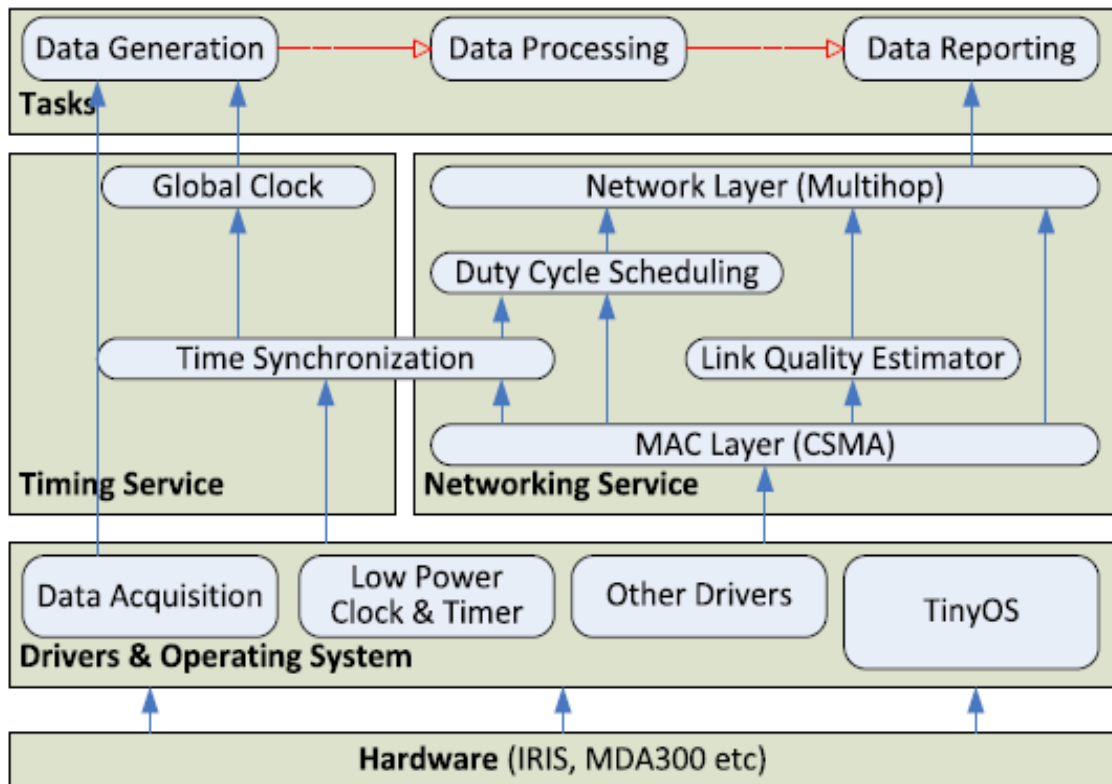
Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους κινητήρες μεταδίδονται περιοδικά στον κόμβο BS μέσω επικοινωνιών πολλαπλών διαδρομών. Στη συνέχεια, ο κόμβος BS διαβιβάζει συγκεντρωτικά δεδομένα στον διακομιστή RFG μέσω σειριακής θύρας. Για να επιτευχθεί μακροχρόνια λειτουργία με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση, οι κινητήρες τροφοδοτούνται από ηλιακές κυψέλες και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Οι χωρητικότητες της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας και της ηλιακής κυψέλης καθορίζονται μέσω ανάλυσης του προϋπολογισμού ισχύος.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του κόμβου αισθητήρων που υλοποιήθηκε στην εργασία [44]. Σε γενικές γραμμές, στις

εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, κάθε κόμβος αισθητήρα εκτελεί περιοδικά τρεις κύριες εργασίες, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής δεδομένων μέσω της ανίχνευσης, της επεξεργασίας δεδομένων και της αναφοράς δεδομένων μέσω ασύρματων επικοινωνιών πολλαπλών ζεύξεων. Για την εκτέλεση της εργασίας παραγωγής δεδομένων, οι ενδείξεις των αισθητήρων συλλέγονται περιοδικά με ορισμένη συχνότητα και τα δεδομένα των αισθητήρων φέρουν χρονοσήμανση κατά τη δειγματοληψία, γεγονός που καθιστά αναγκαίο τον συγχρονισμό στο δίκτυο.

Στη συνέχεια, κατά την εργασία επεξεργασίας δεδομένων, οι κόμβοι αισθητήρων βαθμονομούν, συγκεντρώνουν, αθροίζουν και συμπιέζουν τα δεδομένα. Για παράδειγμα, οι τεχνικές συγκέντρωσης και σύνοψης δεδομένων, όπως η μέθοδος E2K [56], μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του φόρτου επικοινωνίας με την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων χωροχρονικής συσχέτισης που είναι εγγενείς σε πολλά δεδομένα αισθητήρων. Τέλος, κατά τη διάρκεια της εργασίας αναφοράς δεδομένων, τα δεδομένα μεταδίδονται στον κόμβο BS μέσω ασύρματων επικοινωνιών πολλαπλών σταθμών.

Η εργασία αναφοράς δεδομένων ενεργοποιείται από μια ποικιλία υπηρεσιών λογισμικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, οι οποίες υλοποιούν βασικά πρωτόκολλα χρονοισμού, επικοινωνίας και δικτύωσης για την ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων πολλαπλών διαδρομών σε καταναμημένα δίκτυα.



Σχήμα 2 Λειτουργικό διάγραμμα μπλοκ ενός κόμβου αισθητήρα [44]

Ο κατασκευαστής των motes παρέχει μια σειρά εργαλείων για τη μεταγλώττιση, τη δημιουργία και τη δοκιμή προγραμμάτων motes. Το ενσωματωμένο δέντρο πηγών TinyOS 1.1 περιλαμβάνει τους περισσότερους από τους βασικούς οδηγούς για κινητήρες και πλακέτες αισθητήρων, καθώς και μια ιδιόκτητη, πλήρως εξοπλισμένη στοίβα πρωτοκόλλων πολλαπλών βημάτων, ad-hoc, πλέγματος, το XMesh. Δυστυχώς, η στοίβα XMesh δεν προσφέρει λειτουργία ανακύκλωσης καθήκοντος στην πλατφόρμα IRIS και η μη ανοιχτού κώδικα φύση της δεν επιτρέπει να την προσαρμόσουμε για συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογών.

Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε στο [44] να μην υιοθετηθεί η λύση XMesh αλλά να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί μία νέα στοίβα πρωτοκόλλων δικτύωσης. Η γλώσσα NesC που βασίζεται στα δομικά στοιχεία, με την οποία είναι γραμμένο το TinyOS, υπόσχεται ότι οι σχεδιαστές μπορούν εύκολα να συνθέσουν νέες εφαρμογές και υπηρεσίες συνδέοντας τα υπάρχοντα συστατικά μεταξύ τους.

Ωστόσο, η υλοποίηση ενός πλήρους λειτουργικού συστήματος δεν είναι τόσο εύκολη όσο η συναρμολόγηση δομικών στοιχείων. Αρχικά έγινε στην [44] απόπειρα αντικατάστασης του προεπιλεγμένου πρωτοκόλλου Media Access Control (MAC) στο TinyOS (δηλ. CSMA) με το πιο αποδοτικό σε ισχύ S-MAC [57] και να συνδυαστεί με το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών. Το αποτέλεσμα αποδείχθηκε απογοητευτικό: δεν σχηματίστηκε ένα σταθερό δέντρο δρομολόγησης.

Το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης multihop χρησιμοποιεί ενεργό ανιχνευτικό έλεγχο καθώς και υποκλοπή για την εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης, κάτι που λειτουργεί καλά με το CSMA. Ωστόσο, το S-MAC εφαρμόζει μηχανισμό αποφυγής κρυφακούσματος και έτσι αποδίδει ακατάλληλη και λανθασμένη εκτίμηση της ποιότητας σύνδεσης, η οποία είναι επιζήμια για τη σωστή επιλογή μονοπατιού δρομολόγησης. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να αναδιαρθρωθούν ή ακόμη και να επανασχεδιαστούν τα περισσότερα από τα δομικά στοιχεία, ιδίως τα πρωτόκολλα δικτύωσης, για να κατασκευαστεί ένα σύστημα που λειτουργεί αξιόπιστα. Είναι κατανοητό ότι σε μια πλατφόρμα με περιορισμένους πόρους, όπως ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων, η στοίβα των πρωτοκόλλων πρέπει να βελτιστοποιηθεί από κοινού, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του δικτύου και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά πρωτόκολλα χαμηλότερης ισχύος, αλλά τα περισσότερα από τα υπάρχοντα δεν είναι βελτιστοποιημένα για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Για παράδειγμα, στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, οι κατανεμημένοι κόμβοι αισθητήρων σχηματίζουν συνήθως μια δομή δέντρου με ρίζες σε έναν κόμβο BS (ή καταβόθρα) συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε η πλειοψηφία των δεδομένων να μεταφέρεται από τον κόμβο αισθητήρα στον κόμβο BS.

Ωστόσο, τα περισσότερα από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα προορίζονται για ομότιμες εφαρμογές, όπου τα δεδομένα δρομολογούνται μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων στο δίκτυο. Μια τέτοια αρχιτεκτονική συστήματος εισάγει συνήθως

μεγάλο ποσό επιβάρυνσης επικοινωνίας και δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί τη μοναδική δενδρική δομή για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

(Υποκεφάλαιο 2.4) Πρωτόκολλα δικτύωσης για συλλογή δεδομένων πολλαπλών διαδρομών

Στα ασύρματα δίκτυα, τα πρωτόκολλα επιπέδου MAC κατατάσσονται ευρέως σε δύο ομάδες, τις μεθόδους που βασίζονται στο χρονοδιάγραμμα και τις μεθόδους που βασίζονται στον ανταγωνισμό [57], [58]. Στα πρωτόκολλα με βάση το χρονοδιάγραμμα, όπως οι μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου, συχνότητας και κώδικα (δηλαδή TDMA, FDMA και CDMA), οι ασύρματες συσκευές προγραμματίζονται να καταλαμβάνουν διαφορετικά κανάλια που είναι φυσικά ή λογικά ανεξάρτητα. Αντίθετα, σε πρωτόκολλα που βασίζονται στην προσοχή, όπως η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με αίσθηση φορέα (CSMA), οι ασύρματες συσκευές ανταγωνίζονται για ένα κοινό κανάλι.

Ένα πρωτόκολλο βασισμένο στον ανταγωνισμό είναι ιδιαίτερα αυτόνομο αλλά σχετικά ενεργειακά αναποτελεσματικό λόγω του υψηλού ρυθμού συγκρούσεων στο κοινόχρηστο κανάλι και της ακρόασης σε αδράνεια. Ένα πρωτόκολλο με βάση το χρονοδιάγραμμα μπορεί να εξαλείψει πλήρως την υπερηχητική ακρόαση και τη σύγκρουση μεταξύ γειτονικών κόμβων για να επιτύχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, αλλά μπορεί να υποστεί παρεμβολές στο ίδιο κανάλι από άλλους τύπους συσκευών που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, ειδικά στη μη αδειοδοτημένη ζώνη ISM που συνήθως χρησιμοποιούν τα δίκτυα αισθητήρων.

Έτσι, τα πρωτόκολλα με βάση το χρονοδιάγραμμα χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ενός βρόχου, πολλών προς έναν, με αδειοδοτημένη ζώνη, όπως τα κυψελοειδή δίκτυα. Ωστόσο, στα WSN πολλαπλών βημάτων, αν και οι περισσότερες μετακινήσεις είναι πολλές προς μία, ορισμένα από τα πακέτα ελέγχου και σηματοδοσίας πρέπει να μεταδίδονται μεταξύ γειτονικών κόμβων προκειμένου να δημιουργηθούν διαδρομές πολλαπλών βημάτων.

Κατά συνέπεια, τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα MAC που έχουν σχεδιαστεί για δίκτυα αισθητήρων υιοθετούν το CSMA ως βασικό μηχανισμό και εφαρμόζουν αλγόριθμους χρονοδρομολόγησης χρονοθυρίδων για τον συντονισμό του duty-cycling [57]-[61]. Για παράδειγμα, ένα απλό σχήμα ανακύκλωσης καθήκοντος υλοποιείται στο [62], όπου ένας αισθητήρας διατηρεί τον ασύρματο σε λειτουργία για 1 s σε μια περίοδο 2 λεπτών. Στο [63], οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το S-MAC [57], το οποίο βασίζεται στο CSMA και στο σύγχρονο χρονοπρογραμματισμό ύπνου. Και τα δύο δίκτυα αισθητήρων εδαφικής υγρασίας που παρουσιάζονται στα [62],[63] περιορίζονται σε εμβέλεια ενός βρόχου, καθιστώντας τα συστήματα μη κλιμακούμενα για την καταγραφή των χαρακτηριστικών της χωρικής μεταβολής σε μια μεγάλη περιοχή.

Στην παρούσα έρευνα [44], αναπτύσσεται ένα υβριδικό πρωτόκολλο επιπέδου MAC που ενσωματώνει CSMA και χρονοδιάγραμμα κύκλου εργασίας για να επιτύχουμε υψηλή ενεργειακή απόδοση για την υποστήριξη μακροπρόθεσμων, χαμηλού ρυθμού και μεγάλης κλίμακας εφαρμογών δικτύων αισθητήρων. Το υβριδικό πρωτόκολλο MAC χρησιμοποιεί έναν κατανεμημένο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού κύκλων εργασίας για τον συντονισμό του ύπνου των κόμβων αισθητήρων.

Παρόμοια με τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα MAC χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, το πρωτόκολλό μας διαιρεί ολόκληρο τον άξονα χρόνου σε υπερπλαίσια, καθένα από τα οποία στη συνέχεια διαιρείται σε χρονοθυρίδες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.

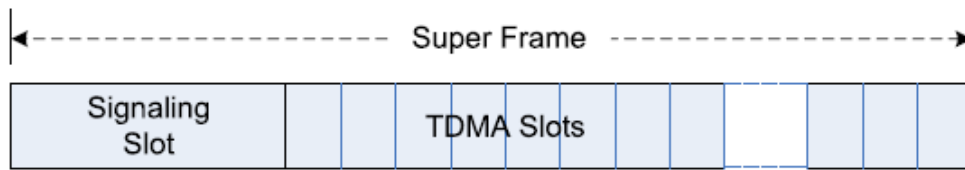
Κάθε υπερπλαίσιο αρχίζει με μια σχισμή σηματοδότησης όπου όλοι οι κόμβοι μεταδίδουν και λαμβάνουν ενεργά πακέτα. Οι κόμβοι αισθητήρων ανταγωνίζονται για τις χρονοθυρίδες TDMA και ανταλλάσσουν πληροφορίες ελέγχου με τους γείτονες κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Ο κύκλος εργασίας κάθε κόμβου προγραμματίζεται από τον γονέα του- δηλαδή, ένας γονέας κόμβος αναθέτει μια υποδοχή TDMA στο του παιδί κατόπιν αιτήματος.

Στην συνέχεια, οι κόμβοι αισθητήρων απενεργοποιούν τους πομποδέκτες τους και παραμένουν σε κατάσταση ύπνου εκτός από τις δικές τους ενεργές χρονοθυρίδες TDMA για εξοικονόμηση ενέργειας. Κατά τη διάρκεια κάθε σχισμής TDMA, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται CSMA για να αποφευχθεί οποιαδήποτε απροσδόκητη σύγκρουση λόγω ανακριβούς χρονικού συγχρονισμού, ομοκαναλικής παρεμβολής από άλλους τύπους συσκευών κ.λπ. Έτσι, το υβριδικό πρωτόκολλο προσπαθεί να διατηρήσει την ευελιξία των πρωτοκόλλων που βασίζονται σε ανταγωνισμό, βελτιώνοντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση σε δίκτυα πολλαπλών διαδρομών.

Για να εγγυηθούν τη μοναδικότητα της ανάθεσης της χρονοθυρίδας TDMA, οι συγγραφείς στο [44] υιοθέτησαν ένα πρωτόκολλο κράτησης χρονοθυρίδας παρόμοιο με το μηχανισμό αποφυγής συγκρούσεων RTS-CTS του προτύπου 802.11. Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα κατανομής δικτύου (NAT), παρόμοιο με τον NAV στο 802.11. Αντί όμως να διατηρεί μόνο το πεδίο διάρκειας, ο NAT παρακολουθεί την κατανομή των υποδοχών TDMA των γειτονικών κόμβων. Σε ένα δίκτυο συλλογής δεδομένων από πολλούς προς έναν αισθητήρες, όλα τα πακέτα δεδομένων δρομολογούνται από τους κόμβους-παιδιά στους γονείς τους. Ως εκ τούτου, η εκχώρηση υποδοχής αφορά μόνο το ζεύγος γονέα-παιδιού.

Συγκεκριμένα, ένας κόμβος-παιδί επιλέγει τυχαία μια σχισμή που δεν βρίσκεται στο NAT, δηλαδή δεν καταλαμβάνεται από κανέναν γείτονα, και ζητά τη σχισμή στέλνοντας ένα πακέτο αίτησης (REQ) στον γονέα του. Ο γονέας κόμβος απαντά με ένα πακέτο απάντησης (RPL) εάν η ζητούμενη υποδοχή δεν βρίσκεται στο NAT του, δηλαδή δεν χρησιμοποιείται.

Στην συνέχεια, ο κόμβος-παιδί επιβεβαιώνει την κατανομή της υποδοχής και ολοκληρώνει αυτό το αίτημα. Άλλοι γειτονικοί κόμβοι που κρυφακούν τη συνομιλία ενημερώνουν το NAT τους, το οποίο με τη σειρά του χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί ότι όταν ένας κόμβος διαπραγματεύεται χρονοθυρίδες με τον γονέα του, οι χρονοθυρίδες που καταλαμβάνονται από τους γείτονές του δεν θα επαναχρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 3 Δομή χρονοθυρίδας ενός super frame στο υβριδικό πρωτόκολλο MAC [44]

Οι χρονοθυρίδες TDMA είναι αποκλειστικές για επικοινωνίες μεταξύ ζευγαριών γονέα-παιδιού. Με τη βοήθεια του αλγορίθμου ανάθεσης χρονοθυρίδων, μπορούμε να εγγυηθούμε ότι, για κάθε χρονοθυρίδα TDMA, θα υπάρχει μόνο ένα ζεύγος γονέα-παιδιού ενεργό σε κάθε γειτονιά δύο βημάτων. Σε ένα σύστημα παρακολούθησης πολλαπλών βημάτων, όπως το συγκεκριμένο [44], το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης δεδομένων προέρχεται από την αναμετάδοση μετρήσεων κατά μήκος του δέντρου δρομολόγησης. Οι χρονοθυρίδες TDMA σχεδιάζονται κυρίως για να παρέχουν ένα κανάλι χωρίς συγκρούσεις για την προώθηση τέτοιων πακέτων δεδομένων. Επιπλέον, άλλοι γειτονικοί κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο ζεύγος γονέα-παιδιού μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια αποφεύγοντας την υπερηχογράφιση περιττών πακέτων.

Έτσι, για τη μετάδοση ενός πακέτου, ένας κόμβος ανταγωνίζεται για τη χρονοθυρίδα όχι μόνο με τους κόμβους της ίδιας συστάδας, αλλά και με κόμβους από άλλες συστάδες. Για την αποφυγή πιθανών συγκρούσεων, η διαδικασία RTS-CTS χρησιμοποιείται σε κάθε αποστολή, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη επιβάρυνση. Για έναν άσχετο κόμβο, ο οποίος δεν είναι ούτε ο αποστολέας ούτε ο παραλήπτης στη συστάδα, πρέπει να ξυπνήσει για να λάβει πιθανά εισερχόμενα πακέτα.

Αν και το S-MAC εφαρμόζει έναν μηχανισμό αποφυγής υπερηχογράφισης, όπου ένας κόμβος απενεργοποιεί τον πομποδέκτη όταν λαμβάνει RTS που δεν του απευθύνεται, είναι αναπόφευκτο ο κόμβος να υπερηχογραφήσει το πακέτο RTS και

να σπαταλήσει ενέργεια για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του πομποδέκτη.

Το T-MAC [59] ακολουθεί τη σχεδίαση του S-MAC, αλλά υπερτερεί του S-MAC με μεταβλητό φορτίο εισάγοντας προσαρμοστικό σχήμα κυκλικής λειτουργίας. Ωστόσο, πάσχει από το ίδιο πρόβλημα με το S-MAC. Το B-MAC [60] χρησιμοποιεί μια μη συγχρονισμένη προσέγγιση, η οποία διαφέρει από το S-MAC και το υβριδικό μας πρωτόκολλο.

Στο B-MAC, οι κόμβοι αισθητήρων ακολουθούν ανεξάρτητα ένα χρονοδιάγραμμα ύπνου με βάση τον στόχο του κύκλου λειτουργίας και ανιχνεύουν περιοδικά τη δραστηριότητα του καναλιού. Πριν από τη μετάδοση μηνυμάτων, ο αποστολέας απαιτείται να μεταδώσει ένα πολύ μεγάλο προοίμιο για να αφυπνίσει κάθε κόμβο στη γειτονιά, συμπεριλαμβανομένου του παραλήπτη. Δεδομένου ότι οι κόμβοι αισθητήρων δεν είναι συγχρονισμένοι, το προοίμιο πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την περίοδο ύπνου, ώστε ο δέκτης να είναι σε θέση να το ανιχνεύσει.

Αν και το B-MAC εξαλείφει την επιβάρυνση του χρονικού συγχρονισμού, δαπανά σημαντική ποσότητα ενέργειας για την αποστολή του προοιμίου αφύπνισης. Ωστόσο, ο χρονικός συγχρονισμός δεν μπορεί να αφαιρεθεί από το εν λόγω σύστημα, καθώς απαιτείται και από άλλα στοιχεία.

Το Z-MAC [61] είναι ένα ακόμη υβριδικό πρωτόκολλο TDMA- CSMA. Παρόμοια με το δικό μας πρωτόκολλο, το Z-MAC χρησιμοποιεί ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο ανάθεσης υποδοχής που ονομάζεται DRAND, για να εξασφαλίσει μοναδική ανάθεση υποδοχής. Πριν από την κανονική λειτουργία και όταν αλλάζει η τοπολογία, το πρωτόκολλο DRAND πρέπει να εκτελεστεί για την ανάθεση υποδοχών. Η μεγάλη επιβάρυνση που συνδέεται με το DRAND το καθιστά ακατάλληλο για δίκτυα με συχνά μεταβαλλόμενη τοπολογία. Επιπλέον, το Z-MAC είναι χτισμένο πάνω στο B-MAC, έτσι ώστε να κληρονομεί τις ελλείψεις του B-MAC που μόλις αναφέρθηκαν.

Η απόδοση του πρωτοκόλλου MAC με βάση το χρονοδιάγραμμα εξαρτάται από την ακρίβεια του χρονικού συγχρονισμού. Το πρωτόκολλο χρονικού συγχρονισμού πλημμύρας (FTSP) που προτάθηκε στο [64] προτείνει χρονοσήμανση των μηνυμάτων συγχρονισμού στο MAC επίπεδο, το οποίο αφαιρεί τη μη ντετερμινιστική καθυστέρηση τόσο στον αποστολέα όσο και στον παραλήπτη που προκαλείται από τον αβέβαιο χρόνο επεξεργασίας στο λειτουργικό σύστημα για εναλλαγές περιβάλλοντος, επιβάρυνση κλήσεων συστήματος, χειρισμό διακοπών και άλλες βασικές λειτουργίες.

Το FTSP είναι σε θέση να συγχρονίσει πολλαπλούς δέκτες με ένα μόνο μήνυμα εκπομπής. Μια τέτοια μέθοδος με βάση την μέθοδο της πλημμύρας είναι ανεπηρέαστη στις τοπολογικές αλλαγές. Σε ένα δίκτυο με δενδροειδή δομή, εάν κάθε κόμβος συγχρονίζεται με τον γονέα του, τελικά όλοι οι κόμβοι του δικτύου θα μπορούσαν να συγχρονιστούν με τη ρίζα για να επιτευχθεί παγκόσμιος συγχρονισμός του χρόνου.

Στην έρευνα που παρουσιάζεται στο παρόν Κεφάλαιο [44], αναπτύχθηκε ένα τροποποιημένο FTSP για την αξιοποίηση της μοναδικής δενδρικής δομής του WSN περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Σε αντίθεση με το FTSP όπου η ρίζα συγχρονισμού επιλέγεται τυχαία, κάθε κόμβος στο εν λόγω δίκτυο συγχρονίζεται με το BS, το οποίο έχει πρόσβαση στο ρολόι πραγματικού χρόνου. Στη νέα σχεδίαση, παρόμοια με το FTSP, κάθε κόμβος διατηρεί έναν απομονωτή που περιέχει τις τελευταίες χρονικές σφραγίδες για την εκτίμηση της μετατόπισης και της μετατόπισης του ρολογιού.

Το παράθυρο του ρυθμιστικού διαύλου χρησιμοποιείται επίσης για την ανίχνευση ακραίων τιμών για το φιλτράρισμα των αλλοιωμένων μετρήσεων χρόνου. Στην πειραματική μελέτη [44], παρατηρήθηκε ότι το FTSP μπορεί να επιτύχει σφάλματα χρονισμού μικρότερα από 1 ms σε ένα δίκτυο τριών βημάτων όταν η λειτουργία διαχείρισης ισχύος είναι απενεργοποιημένη. Ωστόσο, σε λειτουργίες χαμηλής ισχύος, το FTSP οδηγεί σε σφάλματα αρκετών εκατοντάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου.

Μέσω προσεκτικής εξέτασης του προγράμματος οδήγησης χρονοδιακόπτη που παραδίδεται με το FTSP, διαπιστώθηκε ότι το πρόγραμμα οδήγησης δεν είναι σε θέση να επιστρέψει συνεπείς χρονικές σφραγίδες σε καταστάσεις χαμηλής ισχύος. Στο TinyOS, το πρόγραμμα οδήγησης χρονοδιακόπτη απαιτείται να υλοποιεί δύο τύπους διεπαφών χρονοδιακόπτη: χρονοδιακόπτη μιας φοράς και χρονοδιακόπτη επανάληψης. Ένας χρονοδιακόπτης μιας βολής πυροδοτείται μόνο μία φορά, ενώ ένας επαναλαμβανόμενος χρονοδιακόπτης πυροδοτείται περιοδικά μέχρι να διακοπεί.

Όλοι οι υπάρχοντες οδηγοί χρονοδιακόπτη βασίζονται σε ένα μόνο ρολόι υλικού για τον χειρισμό και των δύο τύπων χρονοδιακόπτη. Για την υποστήριξη των one-shot timers, οι οποίοι συνήθως πυροδοτούνται σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, το ρολόι πρέπει να λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα, γεγονός που οδηγεί σε υψηλή χρήση της CPU και υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Για την εξοικονόμηση ενέργειας σε καταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, οι υπάρχοντες οδηγοί χρονοδιακόπτη κατεβάζουν τη συχνότητα του ρολογιού στην οποία ζητούν οι επαναλαμβανόμενοι χρονοδιακόπτες όταν δεν υπάρχουν ενεργοί χρονοδιακόπτες one-shot.

Δυστυχώς, η εναλλαγή μεταξύ υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων έχει ως αποτέλεσμα ασυνεχείς χρονικές σφραγίδες. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε [44] ένας νέος οδηγός χρονοδιακόπτη δύο επιπέδων για να αντικαταστήσει τους αρχικούς οδηγούς, ο οποίος χρησιμοποιεί δύο μεμονωμένα ρολόγια υλικού για την αντιμετώπιση των δύο τύπων χρονοδιακόπτη ξεχωριστά. Ένα ρολόι υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιείται για την οδήγηση χρονοδιακοπών μιας βολής, το οποίο παραμένει ενεργό για σύντομο χρονικό διάστημα σε κανονική λειτουργία.

Αντίθετα, ένα ρολόι χαμηλής ταχύτητας και συνεπώς χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας λειτουργεί συνεχώς για την υποστήριξη των χρονοδιακοπών επανάληψης. Τα δύο ρολόγια συγχρονίζονται από καιρό σε καιρό για να διασφαλίζεται η συνέπεια στις χρονοσφραγίδες.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών στο επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για την εγκαθίδρυση και τη διατήρηση της ιεραρχίας δρομολόγησης στο κατακευματισμένο WSN. Αν και η δομή δρομολόγησης στις εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης είναι ένα απλό δέντρο και η ροή δεδομένων είναι σχεδόν μονόδρομη, η δυναμική και αναξιόπιστη φύση των ασύρματων επικοινωνιών δημιουργεί μεγάλες δυσκολίες στην οργάνωση και διατήρηση μιας αξιόπιστης ιεραρχίας δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών. Σε αυτή την έρευνα που παρουσιάζουμε [44], υλοποιήθηκε έναν εκτιμητή ποιότητας σύνδεσης που βασίζεται στη μέθοδο εκτίμησης του εκθετικά σταθμισμένου κινητού μέσου όρου (EWMA) [65].

Το βάρος που χρησιμοποιείται εδώ είναι η κανονικοποιημένη λαμβανόμενη ισχύς σήματος του πακέτου συγχρονισμού, η οποία στη συνέχεια θα μειωθεί στο μισό σε κάθε κύκλο. Ένας τέτοιος εκτιμητής αντιδρά γρήγορα σε δυνητικά μεγάλες αλλαγές στην ποιότητα των συνδέσεων, ενώ είναι αρκετά σταθερό όταν οι αλλαγές είναι μικρές. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών χρησιμοποιεί τον εκτιμητή ποιότητας συνδέσεων για τη διατήρηση μιας αξιόπιστης τοπολογίας δρομολόγησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ασύρματο σύστημα τηλεμετρίας

(Υποκεφάλαιο 3.1) Αρχιτεκτονική ασύρματου συστήματος τηλεμετρίας

Το νέο σύστημα περιβαλλοντικής παρακολούθησης μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα κύρια επίπεδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, συμπεριλαμβανομένων του φυσικού επιπέδου δεδομένων, του λογικού επιπέδου δεδομένων, του επιπέδου παρουσίασης στο διαδίκτυο και του επιπέδου χρήστη. Μια τέτοια προσέγγιση σε επίπεδα καθιστά δυνατή την υλοποίηση του συστήματος με ευέλικτο, επεκτάσιμο και αποτελεσματικό τρόπο. Στο επίπεδο φυσικών δεδομένων, χρησιμοποιούνται διάφοροι αισθητήρες για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Τα δεδομένα των αισθητήρων διαβιβάζονται από μια τοποθεσία παρακολούθησης σε έναν κεντρικό διακομιστή συλλογής δεδομένων (CDC). Για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων σχεδιασμού, ενσωματώνουμε ένα μόντεμ GPRS για ασύρματη τηλεμετρία, έναν υπολογιστή μονής πλακέτας (SBC) ως διακομιστή απομακρυσμένης πύλης πεδίου (RFG) και ένα WSN για καταναμημένη παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας. Ο διακομιστής RFG παρέχει αποτελεσματικό έλεγχο, διαχείριση και συντονισμό δύο σχετικά ανεξάρτητων συστημάτων αισθητήρων, δηλαδή ενός παραδοσιακού ενούρματου συστήματος αισθητήρων με βάση τον καταγραφέα δεδομένων και του ασύρματου συστήματος αισθητήρων με βάση το WSN. Ο βασισμένος στο Linux RFG Server υποστηρίζει απομακρυσμένη σύνδεση για να επιτρέπει τον μέγιστο απομακρυσμένο χειρισμό των συσκευών στο πεδίο, όπως το SBC, ο καταγραφέας δεδομένων και το WSN.

Στο επίπεδο λογικών δεδομένων, τα δεδομένα αισθητήρων που συλλέγονται από τους καταναμημένους σταθμούς παρακολούθησης αποθηκεύονται σε έναν διακομιστή βάσης δεδομένων PostgreSQL (DB). Ο διακομιστής CDC ενεργεί ως ενδιάμεσο στοιχείο για την απόκρυψη της ετερογένειας των διαφορετικών συσκευών φυσικού επιπέδου και την υποστήριξη της επικύρωσης δεδομένων που απαιτείται

από τον διακομιστή DB. Ο διακομιστής CDC και ο διακομιστής καθρέφτης του αρχειοθετούν επίσης τα ακατέργαστα δεδομένα σε τοπικά συστήματα αρχείων.

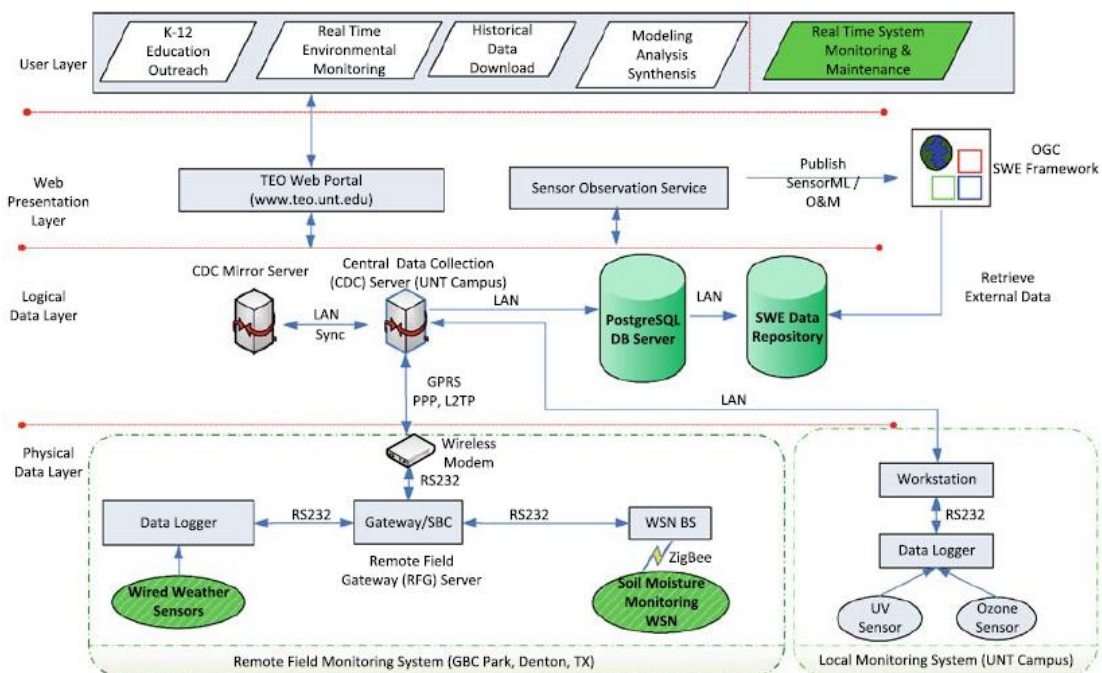
Τα προγράμματα daemon που εκτελούνται στον CDC Server επεξεργάζονται εκ των προτέρων τα δεδομένα πριν εισαχθούν στη βάση δεδομένων και εκτελούν περιοδικά εργασίες συγχρονισμού. Για την ανταλλαγή δεδομένων εγκαθίσταται ένα αποθετήριο δεδομένων συμβατό με το SWE, το οποίο δέχεται δεδομένα τόσο από τον εσωτερικό DB Server όσο και από εξωτερικές πηγές μέσω των υπηρεσιών ιστού του OGC.

Το επίπεδο παρουσίασης διαδικτύου αποτελείται από μια διαδικτυακή πύλη, δηλαδή το TEO Online [44], και μια διαδικτυακή εφαρμογή αισθητήρων. Η διαδικτυακή πύλη χρησιμεύει ως μια φιλική προς το χρήστη διεπαφή για την οπτικοποίηση δεδομένων, την ανάλυση, τη σύνθεση, τη μοντελοποίηση και τις δραστηριότητες εκπαιδευτικής προβολής K-12. Παρέχει επίσης χρήσιμες δυνατότητες για τους προγραμματιστές και τους χειριστές του συστήματος να παρακολουθούν εξ αποστάσεως την κατάσταση του συστήματος tem και να ενημερώνουν εξ αποστάσεως το λογισμικό και τη διαμόρφωση του συστήματος, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τις εργασίες εντοπισμού σφαλμάτων και συντήρησης του συστήματος.

Εφαρμόζονται επίσης υπηρεσίες παρατήρησης αισθητήρων (Sensor Observation Services - SOS) σε αυτό το επίπεδο, σύμφωνα με το πρότυπο SWE για τη διευκόλυνση της ανταλλαγής δεδομένων. Η πρότυπη αναπαράσταση δεδομένων SensorML/ O&M καθιστά εύκολη την ενσωμάτωση των δεδομένων των αισθητήρων μας στις υπάρχουσες διαδικτυακές υπηρεσίες γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) και την ανταλλαγή των δεδομένων με άλλους οργανισμούς. Η διαδικτυακή υπηρεσία SOS θα δημοσιευθεί σε μια υπηρεσία καταλόγου στο πλαίσιο OGC SWE για να είναι δημόσια προσβάσιμη στο Διαδίκτυο. Τέλος, το επίπεδο χρήστη αφηγείται μια ποικιλία αναγκών για σκοπούς εκπαίδευσης, ενημέρωσης, έρευνας, ανάπτυξης και διαχείρισης του συστήματος.

Για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση μιας πληθώρας συσκευών στο πεδίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, υλοποιήθηκε στα πλαίσια περιβαλλοντικών μετρήσεων ένας διακομιστής RFG χρησιμοποιώντας ένα συμπαγές, ανθεκτικό, εξαιρετικά χαμηλής ισχύος SBC TS-7260 της Technology Systems, Inc. [66].

Το SBC παρέχει ένα σταθερό σύνολο ενσωματωμένων περιφερειακών και περιλαμβάνει έλεγχο κατανάλωσης ενέργειας λογισμικού για τις ενσωματωμένες περιφερειακές συσκευές, καθιστώντας το ιδανικό για σχέδια ευαισθητα στην κατανάλωση ενέργειας, όπως ενσωματωμένα συστήματα που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια ή μπαταρίες. Για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, το σύστημα παρακολούθησης του περιβάλλοντος λειτουργεί αυτόματα με εναλλαγή λειτουργίας μεταξύ των ενεργών και των καταστάσεων αναστολής λειτουργίας.



Σχήμα 4 Αρχιτεκτονική συστήματος ασύρματης τηλεμετρίας [44]

Η κατάσταση αναστολής λειτουργίας του SBC ενεργοποιείται από την προαιρετική πλακέτα εφεδρικής μπαταρίας TS-BAT3, η οποία χρησιμεύει επίσης ως ενσωματωμένο αδιάλειπτο τροφοδοτικό (UPS) για την υποστήριξη συνεχούς τροφοδοσίας. Οι συσκευές που αναπτύσσονται στο πεδίο είναι συνήθως εξοπλισμένες με σειριακή θύρα RS232, συμπεριλαμβανομένων των καταγραφικών δεδομένων, του

ασύρματου μόντεμ και του κόμβου BS του WSN. Έτσι, με πέντε σειριακές θύρες επί του σκάφους, το SBC είναι κατάλληλο για να χρησιμεύσει ως διακομιστής πύλης. Άλλα εναλλακτικά προϊόντα στην αγορά παρέχουν συνήθως λιγότερες σειριακές θύρες και έχουν πολύ υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με το TS-7260.

Η ασύρματη επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων από το πεδίο στον διακομιστή CDC υλοποιείται με τη χρήση ενός μόντεμ GPRS. Το GPRS, που σημαίνει General Packet Radio Service, είναι μια κινητή υπηρεσία δεδομένων προσανατολισμένη σε πακέτα, η οποία είναι διαθέσιμη στους υπογράφους των κυψελοειδών δικτύων GSM. Η σύνδεση GPRS διατηρείται από το SBC χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο PPP (Point-to-Point), ένα πρωτόκολλο σύνδεσης δεδομένων που χρησιμοποιείται συνήθως για την εγκαθίδρυση μιας απευθείας σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων μέσω σειριακού καλωδίου, τηλεφωνικής γραμμής, κινητού τηλεφώνου ή dial-up δικτύων.

Κατά την εκκίνηση, το δίκτυο SBC πραγματοποιεί αυτόματα κλήση στο δίκτυο GPRS και διατηρεί τη σύνδεση ζωντανή καθ' όλη τη διάρκεια της ενεργής περιόδου. Για να καταστεί δυνατή η ασφαλής πρόσβαση στο σύστημα, χρησιμοποιείται το Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP) για την υποστήριξη εικονικού ιδιωτικού δικτύου που δημιουργεί μια ασφαλή σύνδεση σημείου-προς-σημείο μεταξύ του διακομιστή RFG και του διακομιστή CDC μέσω του δημόσιου Διαδικτύου. Για να είναι ενεργειακά αποδοτικό, το ασύρματο μόντεμ απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της περιόδου αναστολής λειτουργίας του συστήματος.

Το ασύρματο σύστημα τηλεμετρίας στο πεδίο τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια με ένα μεγάλο ηλιακό πάνελ και μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία μολύβδου- οξέος. Οι απαιτούμενες χωρητικότητες της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας και του ηλιακού συλλέκτη προσδιορίζονται μέσω ανάλυσης του προϋπολογισμού ισχύος. Στην ανάλυση του προϋπολογισμού ισχύος, η μέση κατανάλωση ισχύος κάθε συσκευής φορτίου ισχύος προσδιορίζεται από τη μέτρηση ή την εκτίμηση της μέσης κατανάλωσης ρεύματος και του χρόνου που δαπανάται σε κάθε μια από τις καταστάσεις λειτουργίας του..

Για να επιβιώσουμε σε ακραίες καιρικές συνθήκες σε μακροχρόνιες λειτουργίες, στοχεύουμε στην υποστήριξη του συστήματος με πλήρως φορτισμένη μπαταρία για τουλάχιστον μία εβδομάδα χωρίς επαναφόρτιση. Στο σύστημα αυτό, το επίπεδο τάσης της μπαταρίας παρακολουθείται στενά ως μέρος της υπηρεσίας απομακρυσμένης παρακολούθησης της κατάστασης του συστήματος.

Η παρακολούθηση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο τέτοιων δεδομένων κατάστασης του συστήματος είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας της μπαταρίας και την έγκαιρη ανίχνευση σοβαρής υποβάθμισης της μπαταρίας, ώστε να αποφευχθεί η αποτυχία του συστήματος και η απώλεια σημαντικών δεδομένων του αισθητήρα.

(Υποκεφάλαιο 3.2) Υπηρεσίες απομακρυσμένης συλλογής δεδομένων

Το SBC που αναπτύχθηκε στη σχεδίασή μας υποστηρίζει το πλήρως εξοπλισμένο Debian GNU/Linux, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να καλύπτει διάφορες ανάγκες ενσωματωμένων υπολογιστών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι, είναι βολικό να αναπτύξετε υπηρεσίες απομακρυσμένης συλλογής δεδομένων εκμεταλλευόμενοι τα πακέτα λογισμικού που παρέχει το Debian, συμπεριλαμβανομένου ενός πλήρους περιβάλλοντος ανάπτυξης GNU C/C, πολλών υπηρεσιών Linux όπως PPP, FTP, Telnet και διακομιστή βάσεων δεδομένων MySQL, καθώς και διαφόρων βιβλιοθηκών και βοηθητικών προγραμμάτων GNU/Linux.

Ο διακομιστής RFG ξυπνάει περιοδικά για να εκτελεί υπηρεσίες συλλογής δεδομένων. Κατά την εκκίνηση, ο διακομιστής RFG εκτελεί μια σειρά από σενάρια για την εκκίνηση διαφόρων υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένου ενός διαύλου καταγραφής συμβάντων, ενός διακομιστή βάσης δεδομένων MySQL, ενός διακομιστή FTP, ενός τερματικού SSH και ενός τερματικού Telnet. Ένα δίαυλος PPP εκκινείται επίσης για τη δημιουργία και τη διατήρηση μιας σύνδεσης PPP με το δίκτυο GPRS. Το ασύρματο μόντεμ ενεργοποιείται ταυτόχρονα με τον διακομιστή RFG.

Στη συνέχεια, ξεκινούν διάφορες ανεξάρτητες διεργασίες συλλογής δεδομένων για τη συλλογή δεδομένων από τον κόμβο WSN BS και τους καταγραφείς δεδομένων μέσω θυρών RS232. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τον RFG Server εισάγονται σε μια τοπική βάση δεδομένων MySQL, αντί να αποθηκεύονται στο τοπικό σύστημα αρχείων ή να αποστέλλονται απευθείας στον CDC Server μέσω του ασύρματου μόντεμ. Ο διακομιστής βάσης δεδομένων παρέχει ικανή διαχείριση δεδομένων που διευκολύνει την αποτελεσματική αναζήτηση δεδομένων, επιτρέπει την ταυτόχρονη πρόσβαση στα δεδομένα, ελαχιστοποιεί τον πλεονασμό των δεδομένων, επιβάλλει την ακεραιότητα των δεδομένων και βελτιώνει τη συνέπεια των δεδομένων.

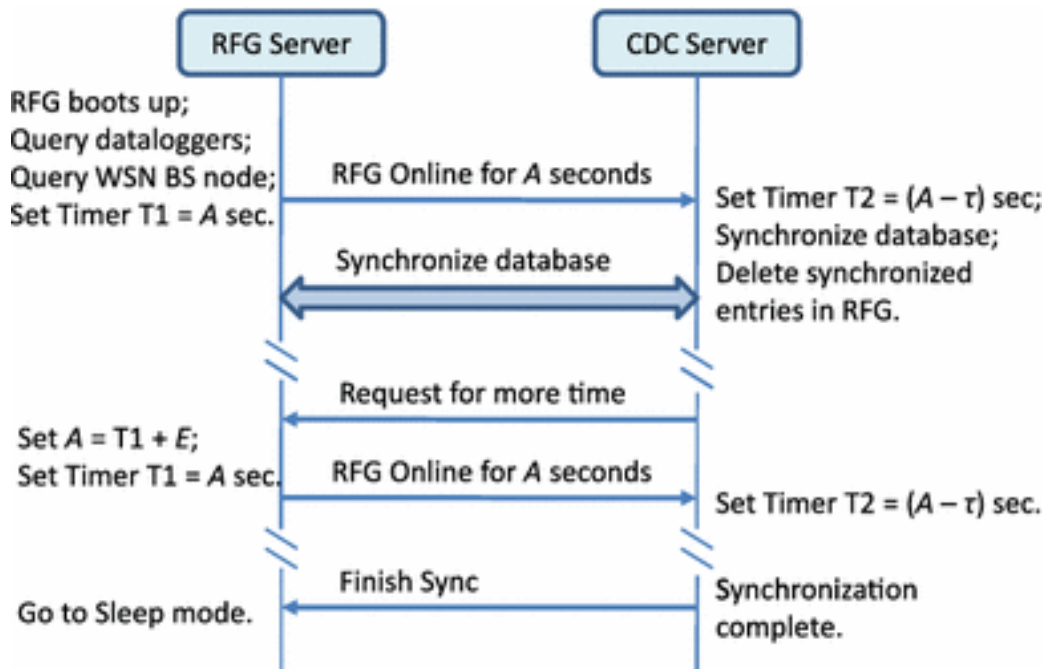
Με την βάση δεδομένων, τα δεδομένα των αισθητήρων μπορούν να ανακτηθούν εύκολα μέσω μιας ενιαίας διεπαφής και να αποθηκευτούν με ασφάλεια στο πεδίο, ακόμη και σε περίπτωση αποτυχίας του δικτύου μεταξύ του RFG Server και του CDC Server.

Μετά την απόκτηση όλων των δεδομένων, ο RFG Server ειδοποιεί τον CDC Server ότι τα νέα δεδομένα είναι έτοιμα για ανάκτηση. Στη συνέχεια, ο CDC Server συγχρονίζει τη βάση δεδομένων του με τη βάση δεδομένων RFG. Η διάρκεια της διαδικασίας συγχρονισμού της βάσης δεδομένων έχει τυχαίο χαρακτήρα λόγω των εγγενών αβεβαιοτήτων στην ποσότητα των δεδομένων που πρέπει να συγχρονιστούν και στην κατάσταση φόρτου κυκλοφορίας στο δίκτυο.

Έτσι, αντί να υιοθετήσουμε μια ενεργό περίοδο σταθερού μήκους, εφαρμόζουμε έναν απλό κύκλο εργασίας πρωτόκολλο διαπραγμάτευσης μεταξύ του διακομιστή RFG και του διακομιστή CDC για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του ηλιακού συστήματος τηλεπαρακολούθησης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, ο διακομιστής CDC μπορεί να ζητήσει περισσότερο χρόνο όταν χρειάζεται.

Εάν ο συγχρονισμός ολοκληρωθεί πριν από τη λήξη του χρονοδιακόπτη T2, ο διακομιστής CDC αποστέλλει μια εντολή Finish Sync στον διακομιστή RFG για να τον θέσει αμέσως σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Ο RFG Server και ο CDC Server προστατεύονται από πιθανές αποτυχίες του δικτύου από τους χρονοδιακόπτες T1 και T2 αντίστοιχα, δηλαδή η διαδικασία συλλογής δεδομένων τερματίζεται όταν λήξουν οι χρονοδιακόπτες.



Σχήμα 5 Πρωτόκολλο διαπραγμάτευσης του κύκλου λειτουργίας μεταξύ του διακομιστή RFG και του διακομιστή CDC. Η σταθερά $\tau = RTT + \epsilon$, όπου RTT είναι ο εκτιμώμενος χρόνος κυκλικής διαδρομής και ϵ είναι ένας κατάλληλος χρόνος ζώνης προστασίας [44]

Διάφορα δεδομένα κατάστασης του συστήματος συλλέγονται επίσης με τον ίδιο τρόπο όπως και τα δεδομένα των αισθητήρων, ώστε να είναι δυνατή η εξ αποστάσεως παρακολούθηση και διαχείριση των συστημάτων παρακολούθησης που αναπτύσσονται στο πεδίο. Οι κόμβοι αισθητήρων του WSN αναφέρουν την κατάσταση του συστήματος μαζί με δεδομένα μετρήσεων αισθητήρων, όπως το επίπεδο τάσης της μπαταρίας, δεδομένα τοπολογίας του δικτύου και στατιστικά στοιχεία απόδοσης του δικτύου.

Το επίπεδο τάσης της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας, η οποία τροφοδοτεί το SBC, το ασύρματο μόντεμ και τους καταγραφείς δεδομένων στο εσωτερικό του σταθμού, παρακολουθείται από έναν καταγραφέα δεδομένων και τα δεδομένα τάσης της μπαταρίας αναφέρονται μαζί με τα δεδομένα των ενσύρματων αισθητήρων. Ο διακομιστής RFG καταγράφει τα μη φυσιολογικά συμβάντα στο τοπικό του σύστημα αρχείων και αναφέρει αμέσως στον διακομιστή CDC, εφόσον είναι συνδεδεμένος.

Οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν τις παραμέτρους του συστήματος, όπως ο κύκλος λειτουργίας και ο ρυθμός δειγματοληψίας, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο από την πύλη web, στέλνοντας εντολές στον RFG Server μέσω του CDC Server. Ο απομακρυσμένος επαναπρογραμματισμός των dataloggers και δικτύου WSN ακολουθεί τα ίδια βήματα, αλλά επειδή πρέπει να μεταφορτωθεί μεγάλος όγκος δεδομένων από τον CDC Server στον RFG Server, ο κύκλος λειτουργίας του RFG Server απενεργοποιείται προσωρινά. Μόλις ο διακομιστής RFG Server λάβει μια νέα εικόνα προγράμματος, οι κόμβοι αισθητήρων επαναπρογραμματίζονται μέσω ενός πρωτοκόλλου προγραμματισμού over-the-air.

(Υποκεφάλαιο 3.3) Διαχείριση δεδομένων αισθητήρων

Ο διακομιστής CDC λαμβάνει δεδομένα είτε με λειτουργίες έλξης είτε με λειτουργίες ώθησης. Σε μια λειτουργία έλξης, ο διακομιστής CDC συνδέεται περιοδικά με την πηγή δεδομένων και αντλεί τα δεδομένα. Σε μια λειτουργία ώθησης, ο διακομιστής CDC ανοίγει μια θύρα, όπως μια θύρα FTP, μέσω της οποίας τα δεδομένα μπορούν να προωθηθούν από την πηγή δεδομένων. Ένας τέτοιος μηχανισμός επιτρέπει στον CDC Server να προσαρμόζεται ευέλικτα σε διαφορετικούς τύπους πηγών δεδομένων. Τα δεδομένα αισθητήρων που συλλέγονται από τον CDC Server αρχειοθετούνται πρώτα στο τοπικό σύστημα αρχείων.

Για κάθε πηγή δεδομένων, χρησιμοποιείται ένας back-end χειριστής δεδομένων (πρόγραμμα daemon) για τον έλεγχο της ακεραιότητας των δεδομένων. Με βάση ένα σύνολο προκαθορισμένων κανόνων επικύρωσης, τα δεδομένα καθαρίζονται πριν από την αποστολή στον διακομιστή DB PostgreSQL. Ο χειριστής δεδομένων μπορεί επίσης να απαιτήσει από τον διακομιστή RFG να ανακτήσει και να μεταδώσει εκ

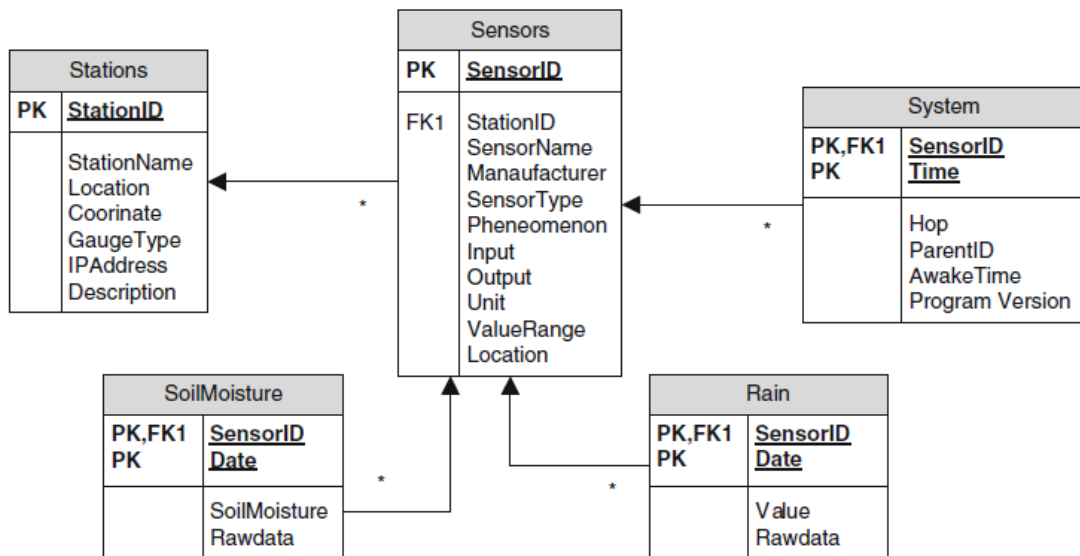
νέου τα πακέτα δεδομένων που λείπουν. Οι χειριστές δεδομένων εκτελούνται σε ξεχωριστούς χώρους χρηστών για να αποφεύγονται οι συγκρούσεις μεταξύ διαφορετικών πηγών δεδομένων. Ένας νέος χειριστής δεδομένων προστίθεται για κάθε νέα πηγή δεδομένων με ελάχιστες αλλαγές στα στρώματα βάσης δεδομένων και οπτικοποίησης ιστού. Ως εκ τούτου, η ευστάθεια και η επεκτασιμότητα του συστήματος ενισχύονται σημαντικά.

Ο σχεδιασμός των βάσεων δεδομένων αισθητήρων καθοδηγείται από την έμφαση στην επεκτασιμότητα του συστήματος, λόγω της ανάγκης διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων που συλλέγονται από ετερογενείς πηγές σε μακροχρόνιες λειτουργίες. Όλες οι πληροφορίες των αισθητήρων περιέχονται σε μία σχέση ή έναν πίνακα, ενώ κάθε παρατήρηση αποθηκεύεται σε ξεχωριστή σχέση.

Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου σχήματος βάσης δεδομένων παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Όταν αναπτύσσονται περισσότεροι αισθητήρες καθώς το σύστημα επεκτείνεται, καταχωρούνται ως νέες εγγραφές στη σχέση αισθητήρων από τους χειριστές δεδομένων στον CDC Server. Οι παρατηρήσεις από νέους αισθητήρες προστίθενται ως νέοι πίνακες. Οι παρατηρήσεις και οι αισθητήρες συνδέονται μέσω μοναδικών κωδικών αναγνώρισης αισθητήρων. Έτσι, θα αναγνωρίζονται αυτόματα από τις διαδικτυακές εφαρμογές ανώτερου επιπέδου μόλις προστεθούν στη βάση δεδομένων. Ένας τέτοιος σχεδιασμός επιτρέπει την ευέλικτη ανάπτυξη του συστήματος και το σχεδιασμό της διεπαφής ιστού. Διευκολύνει επίσης τη μετατροπή των δεδομένων στη μορφή SensorML [67], ώστε να είναι δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων και η διαλειτουργικότητα με ευκολία μέσω υπηρεσιών ιστού.

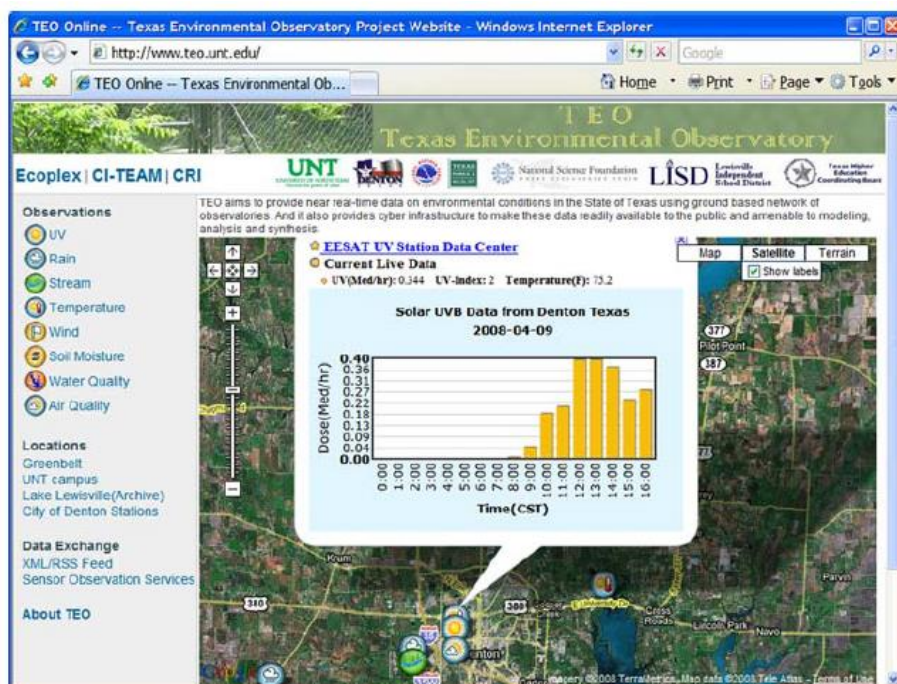
(Υποκεφάλαιο 3.4) Οπτικοποίηση και ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων

Ως αναπόσπαστο μέρος του νέου συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης, αναπτύχθηκε μια ειδική διαδικτυακή πύλη, το TEO Online [44], με ένα σύνολο από δημόσια διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες για την οπτικοποίηση και την ανταλλαγή των δεδομένων των αισθητήρων.



Σχήμα 6 Απεικόνιση του σχήματος της βάσης δεδομένων [44]

Κατά το σχεδιασμό του πλαισίου απεικόνισης δεδομένων, αξιοποιούνται πλήρως τα ευέλικτα APIs των χαρτών Google [68] για να συσχετιστούν οι αισθητήρες με τις γεωγραφικές τους θέσεις διαισθητικά στη διεπαφή χάρτη δορυφορικής προβολής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7 Στιγμιότυπο της διαδικτυακής διεπαφής ΤΕΟ για την οπτικοποίηση δεδομένων [44]

Κάθε αισθητήρας αναπαρίσταται από ένα σημάδι θέσης KML (Keyhole Markup Language [69]) και εμφανίζεται ως διαδραστικός δείκτης που παραπέμπει σε μια σελίδα με πληροφορίες για λεπτομερή διαγράμματα παρατήρησης. Μια τέτοια διεπαφή παρέχει άμεση απεικόνιση της χωρικής κατανομής των αισθητήρων και των δεδομένων των αισθητήρων, η οποία αποτελεί σημαντική πτυχή των περιβαλλοντικών μελετών.

Η πύλη TEO Online έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την ευελιξία ώστε να ανταποκρίνεται στα διάφορα ενδιαφέροντα των χρηστών, και παρέχει ποικίλους τρόπους εξερεύνησης των δεδομένων παρατήρησης αισθητήρων. Για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορούν να περιηγηθούν σε διάφορες επικαλυπτόμενες κατηγορίες, όπως ο τύπος των παρατηρήσεων (υπεριώδης ακτινοβολία, εδαφική υγρασία κ.λπ.), η θέση του αισθητήρα ή ο τύπος των αισθητήρων (ενούρματοι, ασύρματοι κ.λπ.).

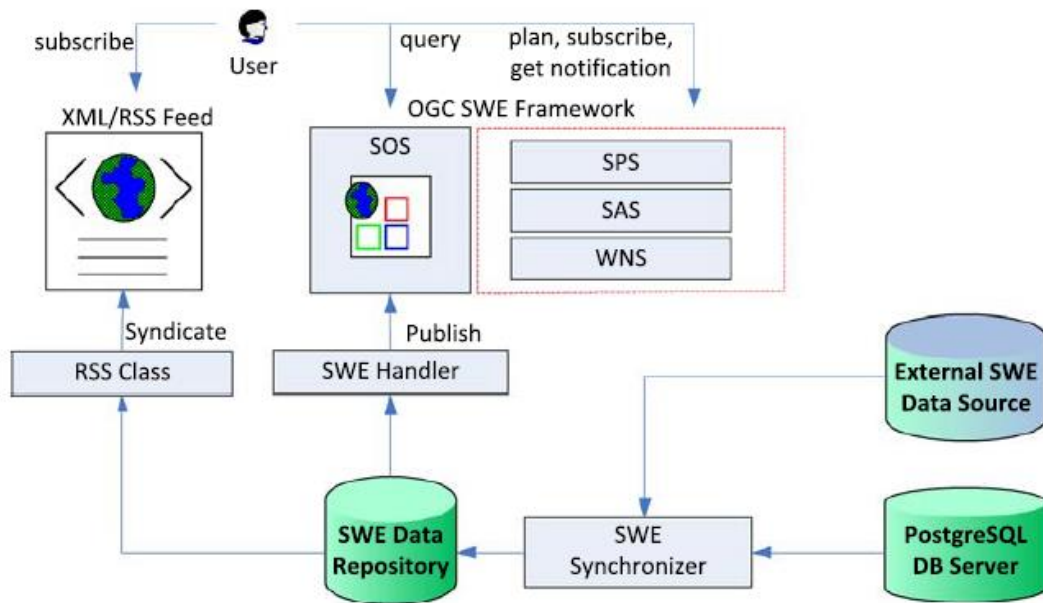
Στη σελίδα με τις αναλυτικές πληροφορίες, τα δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και τα ιστορικά δεδομένα, καθώς και τα στατιστικά στοιχεία της χρονικής τους διακύμανσης μπορούν να προβληθούν σε διάφορες μορφές. Ανάλογα με τον τύπο του φυσικού φαινομένου, παρέχονται διάφοροι τύποι διαγραμμάτων αναλαμπής μίας και πολλαπλών σειρών. Για ένα διάγραμμα μίας σειράς, οι χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν το διάστημα αναφοράς δεδομένων και το επίπεδο μεγέθυνσης του χρονικού εύρους για να προβάλλουν τις τάσεις των δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές λεπτομέρειες. Διάφορες προκαθορισμένες λειτουργίες επιτρέπουν την ανάλυση στατιστικών στοιχείων δεδομένων, όπως ο μέσος όρος και οι μέγιστες τιμές. Με ένα διάγραμμα πολλαπλών σειρών, οι χρήστες μπορούν να συγκρίνουν τις ενδείξεις από αισθητήρες που έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες για να αναλύσουν τα χαρακτηριστικά χωρικής κατανομής φυσικών φαινομένων.

Η διαλειτουργικότητα των δεδομένων αναδεικνύεται σε σημαντικό ζήτημα με την ευρεία εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων σε διάφορους τομείς. Στην έρευνα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την ανταλλαγή δεδομένων και τη διαλειτουργικότητα [70]-[74].

Στο σύστημα [44] που παρουσιάζει η πτυχιακή εργασία, αναπτύσσεται ένα ευέλικτο πλαίσιο με στόχο την προσαρμογή των απαιτήσεων ανταλλαγής δεδομένων τόσο των γενικών χρηστών όσο και των ειδικών του τομέα. Η ανταλλαγή δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ανταλλαγής δεδομένων μέσω της γλώσσας XML (Extensible Markup Language), της τροφοδοσίας RSS (Really Simple Syndication) και των υπηρεσιών παρατήρησης αισθητήρων (Sensor Observation Services), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.

Η διαλειτουργικότητα των δεδομένων των αισθητήρων επιτυγχάνεται με ένα ειδικό αποθετήριο δεδομένων SWE, καθώς και με ένα front-end RSS feed και υπηρεσίες ιστού που βασίζονται στο αποθετήριο [75]. Η ροή RSS χρησιμοποιείται ευρέως για τη δημοσίευση συχνά μεταβαλλόμενων δεδομένων και για να επιτρέψει στους χρήστες να εγγραφούν στα δεδομένα. Τα στοιχεία και οι σύνδεσμοι RSS αποθηκεύονται σε έναν πίνακα RSS στο αποθετήριο, ενώ τα ζωντανά δεδομένα ενσωματώνονται στη σελίδα RSS από τις λειτουργίες της κλάσης RSS του επιπέδου ιστού. Οι γενικοί χρήστες μπορούν να εγγραφούν σε ροή RSS και να ανακτήσουν ζωντανά δεδομένα αυτόματα χρησιμοποιώντας εργαλεία συνδικαλισμού RSS από την πλευρά του πελάτη που είναι ευρέως διαθέσιμα σήμερα.

Για παράδειγμα, όταν ένας χρήστης επισκέπτεται για πρώτη φορά τη σελίδα RSS feed χρησιμοποιώντας ένα ενημερωμένο πρόγραμμα περιήγησης στο διαδίκτυο (όπως ο πιο πρόσφατος Internet Explorer, Firefox κ.λπ.), θα εμφανιστεί ένα κουμπί "Εγγραφή τώρα" (ή ένας σύνδεσμος "Εγγραφή σε αυτό το feed"), μέσω του οποίου μπορεί να εγγραφεί στο feed. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί επίσης να προσθέσει τη διεύθυνση της ροής στη βιβλιοθήκη συνδρομής ειδικών εργαλείων RSS (όπως το Google Reader). Μετά την εγγραφή, ο χρήστης θα να είναι σε θέση να λαμβάνουν αυτόματα τα πιο πρόσφατα δεδομένα παρατήρησης αισθητήρων μέσω του εργαλείου RSS χωρίς να επισκέπτονται τον ιστότοπο του ΤΕΟ.



Σχήμα 8 Πλαίσιο διάδοσης και ανταλλαγής δεδομένων αισθητήρων [44]

Παρέχεται επίσης μια ακόμη πιο ισχυρή και ευέλικτη διεπαφή ανταλλαγής δεδομένων μέσω του πλαισίου SWE του OGC. Το SWE είναι ένα νέο πρότυπο που καθορίζει διαλειτουργικές διεπαφές και κωδικοποιήσεις μεταδεδομένων για να καταστεί δυνατή η ενσωμάτωση ετερογενών δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο [66]. Τα κυριότερα πρότυπα κωδικοποίησης περιλαμβάνουν το SensorML που περιγράφει πληροφορίες για το σύστημα αισθητήρων και το O&M (Observations and Measurements) που κωδικοποιεί πραγματικά δεδομένα σε ζωντανή κατάσταση [67].

Τα πρότυπα διεπαφής διαλειτουργικότητας περιλαμβάνουν τα SOS (Sensor Observation Services), SAS (Sensor Alert Services), SPS (Sensor Planning Services) και WNS (Web Notification Services). Συγκεκριμένα, το SOS παρέχει ένα API για την ανάκτηση δεδομένων παρατήρησης αισθητήρων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, το SAS παρέχει τυποποιημένη διεπαφή υπηρεσίας ιστού για να επιτρέπει την εγγραφή σε ειδοποιήσεις από αισθητήρες, το SPS χρησιμεύει ως ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ της διεπαφής χρήστη για την αίτηση αποκλήσεων που καθοδηγούνται από τον χρήστη και του συστήματος αισθητήρων και το WNS επιτρέπει την ασύγχρονη μετάδοση μηνυμάτων ειδοποίησης αισθητήρων.

Οι ενότητες αυτές συνεργάζονται μεταξύ τους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή διαφόρων εφαρμογών που βασίζονται στο διαδίκτυο ή σε επιτραπέζιες εφαρμογές για περιβαλλοντικούς επιστήμονες. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό διαδικτυακών εφαρμογών, η τυπική μέθοδος HTTP POST μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε διαδικτυακές φόρμες για την ανάκτηση δεδομένων από το διακομιστή SOS (<http://sensorweb.cse.unt.edu:8080/teo/sos>).

Τα αιτήματα HTTP εκφράζονται με τη χρήση μερικών απλών μηνυμάτων σε μορφή XML. Ένα μήνυμα "DescribeSensor" με παράμετρο το όνομα ενός αισθητήρα (που ορίζεται μέσα στις ετικέτες "procedure") μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθούν οι πληροφορίες του σχήματος του αισθητήρα ως έγγραφο SensorML. Ένα μήνυμα "GetObservation" με τις παραμέτρους τύπου δεδομένων, χρόνου, φαινομένων και μορφής απόκρισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση των δεδομένων παρατήρησης του αισθητήρα ως έγγραφο O&M. Οι λεπτομέρειες κάθε μηνύματος αίτησης και μορφής απόκρισης μπορούν να βρεθούν στα πρότυπα SWE [66].

Ο δικτυακός τόπος του ΤΕΟ παρέχει επίσης ένα δείγμα διαδικτυακής εφαρμογής SOS στη διεύθυνση <http://www.teo.unt.edu/xml/sos.php> για την επίδειξη της χρήσης των αιτημάτων υπηρεσιών ιστού. Τα επιστρεφόμενα αποτελέσματα από τον διακομιστή SOS είναι επίσης σε μορφή XML που μπορεί εύκολα να αναλυθεί και να μετατραπεί σε διάφορες μορφές που απαιτούνται για ειδικούς σκοπούς του τομέα.

Ομοίως, όταν προτιμάται μια εφαρμογή-πελάτης με βάση την επιφάνεια εργασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα εργαλεία ανάπτυξης διεπαφής επιφάνειας εργασίας, όπως το Java Development Kit (JDK) και το Adobe Flex, εφόσον τα εργαλεία αυτά υποστηρίζουν τις παραπάνω τυποποιημένες μορφές μηνυμάτων υπηρεσιών ιστού. Στο JDK, για παράδειγμα, οι υπηρεσίες ιστού μπορούν να υποστηριχθούν με τη χρήση της στοίβας υπηρεσιών Metro [76]. Τα περισσότερα άλλα κιτ ανάπτυξης διαθέτουν επίσης παρόμοια ενσωματωμένη υποστήριξη για τα εν λόγω πρότυπα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

(Υποκεφάλαιο 4.1) Ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων στο πεδίο μετρήσεων

Ο μετεωρολογικός σταθμός GBC στο Denton του Τέξας λειτουργεί εδώ και εννέα χρόνια με αισθητήρες θερμοκρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, μετρητή βροχής, ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου και υγρασίας εδάφους, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με καλώδια σε συσκευές καταγραφής δεδομένων και έχουν αναπτυχθεί μέσα σε μια μικρή περιφραγμένη περιοχή. Τον Μάρτιο του 2008, ο σταθμός GBC επεκτάθηκε αναπτύσσοντας ένα ασύρματο μόντεμ, ένα SBC και ένα μικρό πιλοτικό WSN αποτελούμενο από 8 μωτέρ, για να υλοποιηθεί το ολοκληρωμένο σύστημα που φαίνεται στο Σχήμα 9.

Ένα χρόνο αργότερα, τον Μάρτιο του 2009, επεκτάθηκε το WSN σε μια εγκατάσταση αποτελούμενη από 16 μωτέρ (σε δύο ομάδες των οκτώ μωτέρ η καθεμία) κατά μήκος μιας εγκάρσιας διατομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Για την υποστήριξη της μακροχρόνιας υδρολογικής παρακολούθησης και μοντελοποίησης στην περιοχή της πλημμυρικής ζώνης του Elm Fork του ποταμού Trinity, κάθε κόμβος αισθητήρων συλλέγει δεδομένα κάθε 10 λεπτά από αισθητήρες εδαφικής υγρασίας (συνδεδεμένους με καλώδιο με τις κινητήρες) και ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Αυτή η τοπολογία του δικτύου παρέχει την ευκαιρία να συλλεχθεί ένα διπλό σύνολο μεταβολών της εδαφικής υγρασίας κατά μήκος μιας διατομής από την όχθη του ποταμού (υψηλότερο υψόμετρο και αμμώδες έδαφος) έως τον μετεωρολογικό σταθμό (χαμηλότερο υψόμετρο και αργιλώδες έδαφος). Ο χαρακτηρισμός της διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με το υψόμετρο και τον τύπο του εδάφους είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της κατανομής της βλάστησης κατά μήκος της πεδιάδας, καθώς και της αντίδρασης στις πλημμύρες.

Για να επιβιώσουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τα μοτέρ εγκαταστάθηκαν σε αδιάβροχα κουτιά και τα κουτιά είναι εγκατεστημένα 4 πόδια πάνω από το έδαφος, πάνω σε μεταλλικούς στύλους, ώστε να αποφεύγονται οι πλημμύρες και να μην αφήνουν τα πεσμένα φύλλα να καλύπτουν τις ηλιακές κυψέλες. Πριν από την εγκατάσταση, πραγματοποιήθηκε μια έρευνα τοποθεσίας για να μετρηθεί η εμβέλεια ραδιοεπικοινωνίας ενός βήματος μεταξύ των μοτέρ στο περιβάλλον εγκατάστασης, το οποίο περιλαμβάνει πυκνοκατοικημένα δέντρα και χόρτα.

Τα χαρακτηριστικά της ραδιοπροβολής του περιβάλλοντος διαφέρουν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου λόγω της εποχιακής μεταβολής της βλάστησης στην περιοχή. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που συλλέχθηκαν στο σύνολο, παρατηρήθηκε ότι με μέγιστη ισχύ μετάδοσης 3 dBm, οι κινητήρες IRIS είναι σε θέση να μεταδώσουν κατά μέσο όρο 30 m με 95% ρυθμό λήψης πακέτων (PRR) και 50 m με 80% PRR. Έτσι, αναπτύχθηκε μοτέρ με μέγιστη one-hop απόσταση περίπου 30 μέτρα.

Οι αισθητήρες δεν αναπτύσσονται σε κανονικά σημεία πλέγματος, κυρίως λόγω της ακανόνιστης διάταξης των μονοπατιών, των χαρακωμάτων, των δέντρων, των πυκνών θάμνων κ.λπ. στο πεδίο.

Η διαδικτυακή πύλη TEO Online [44] λειτουργεί από τον Μάρτιο του 2008 με τις περισσότερες από τις βασικές διαδικτυακές υπηρεσίες να έχουν υλοποιηθεί. Διάφορα δεδομένα περιβαλλοντικών αισθητήρων και δεδομένα κατάστασης του συστήματος από διάφορες τοποθεσίες παρακολούθησης μπορούν να προβληθούν και να μεταφορτωθούν από τη διαδικτυακή πύλη.

Επί του παρόντος, τα δεδομένα των αισθητήρων μοιράζονται με την πόλη Denton και την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία στο Fort Worth για διάφορους σκοπούς παρακολούθησης, μοντελοποίησης και πρόβλεψης, πράγμα που γίνεται εξαιρετικά βολικό από το νέο πλαίσιο ανταλλαγής δεδομένων που υλοποιήσαμε στο πλαίσιο αυτού του έργου.



Σχήμα 9 Ο μετεωρολογικός σταθμός GBC και το ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες κουτί εγκατάστασης για μοτίβα [44]



Σχήμα 10 Τοπολογία ανάπτυξης αισθητήρων στο πεδίο, όπως εμφανίζεται στη διαδικτυακή πύλη ΤΕΟ Online με βάση τον χάρτη Google Map [44]

(Υποκεφάλαιο 4.2) Χαρακτηρισμός των επιδόσεων του συστήματος και αποτελέσματα δοκιμών πεδίου

Όπως συζητήθηκε, η ενεργειακή απόδοση είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα σχεδιασμού των συστημάτων απομακρυσμένης περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Η ανακύκλωση λειτουργίας παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο για την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης. Στην τρέχουσα ρύθμιση, ο διακομιστής RFG Server ξυπνά για 90 δευτερόλεπτα κάθε 10 λεπτά για συλλογή δεδομένων με κύκλο λειτουργίας περίπου 15%. Το ασύρματο μόντεμ απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια ανενεργών περιόδων.

Ο Πίνακας 1 δείχνει την κατανάλωση ρεύματος και τον κύκλο λειτουργίας των συσκευών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του σταθμού GBC, που τροφοδοτούνται από ένα ηλιακό πάνελ με ρεύμα αιχμής 960 mA και μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία μολύβδου 12 Ah. Στην πράξη, μια μπαταρία μολύβδου- οξέος δεν μπορεί να εκφορτιστεί επανειλημμένα κατά 100%. Επομένως, είναι απαραίτητο να αποφορτιστεί η μπαταρία κατά κάποιο ποσό, συνήθως 25% [44]. Έτσι, η μπαταρία που αναπτύσσεται στο πεδίο μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα για περίπου 7 ημέρες χωρίς επαναφόρτιση. Γενικά, η χωρητικότητα ενός ηλιακού συλλέκτη πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από τη μέση κατανάλωση ισχύος του φορτίου [44]- ο ηλιακός συλλέκτης που αναπτύχθηκε στο πεδίο πληροί αυτή την απαίτηση.

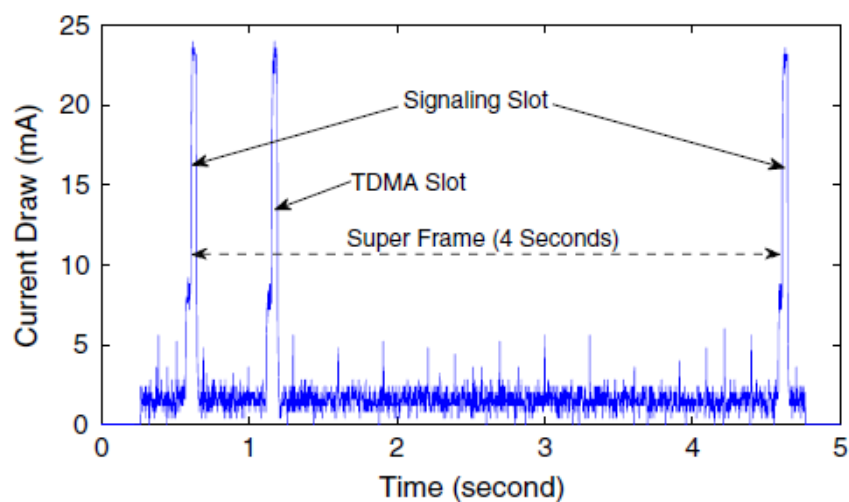
Στην τρέχουσα υλοποίησή, κάθε υπερπλαίσιο των 4 δευτερολέπτων αποτελείται από μια σχισμή σηματοδότησης των 40 ms και 99 TDMA σχισμές των 40 ms το καθένα. Με τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού κύκλου εργασίας, οι κινητήρες είναι ενεργοί μόνο κατά τη διάρκεια μερικών χρονοθυρίδων TDMA για την αναφορά και αναμετάδοση δεδομένων αισθητήρων και μιας χρονοθυρίδας σηματοδότησης για το συγχρονισμό του χρόνου, τη διαχείριση της λίστας γειτόνων και την ενημέρωση των πληροφοριών των γονέων. Εκτός από αυτές τις ενεργές περιόδους, οι κινητήρες παραμένουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας και καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από ό,τι στην ενεργή κατάσταση.

Πίνακας 1 Η κατανάλωση ρεύματος και ο κύκλος λειτουργίας των συσκευών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του σταθμού GBC [44]

Device	Mode	Current draw (mA)	Duty cycle (%)	Avg. current draw (mA)
SBC	Active	60	15	9.0
	Sleep	0	85	
TS-BAT3	Charging	100	10	11.8
	Idle	2	90	
Modem	Active	250	5	13.5
	Idle	60	10	
	Sleep	0	85	
WSN BS	Active	11	100	11
Datalogger	Active	30	1	2.28
	Idle	2	99	
Total				47.58

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται ένα αποτέλεσμα μέτρησης της κατανάλωσης ρεύματος και του κύκλου λειτουργίας, που καταγράφηκε με παλμογράφο, ενός μη γονικού κόμβου (δηλ. κόμβου φύλλου στη δενδρική δομή) από μια πειραματική διάταξη στο εργαστήριο. Ένας κόμβος-γονέας θα έχει το πολύ 9 ενεργές χρονοθυρίδες TDMA μέσα σε ένα υπερπλαίσιο με μέγιστο αριθμό 8 παιδιών, γεγονός που οδηγεί σε κύκλο λειτουργίας όχι περισσότερο από 10% για έναν κόμβο. Η μέση απορρόφηση ρεύματος 24 mA στην ενεργή λειτουργία που φαίνεται στο σχήμα ταιριάζει καλά με τα δεδομένα του κατασκευαστή. Στη λειτουργία αναστολής λειτουργίας, ο πομποδέκτης ραδιοεπικοινωνίας είναι απενεργοποιημένος και η CPU ξυπνά περιστασιακά για να χειριστεί ρουτίνες διακοπών υλικού και συμβάντα λογισμικού, όπως υπηρεσίες χρονομέτρων και ενημερώσεις μετρητών, προκειμένου να διατηρηθεί το δίκτυο στοιβας και να παραμείνει συγχρονισμένη.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, η μέση κατανάλωση ρεύματος είναι περίπου 16 IA όταν τόσο ο ραδιοπομποδέκτης όσο και η CPU βρίσκονται σε κατάσταση βαθιάς αναστολής λειτουργίας. Με όλες τις περιφερειακές συσκευές απενεργοποιημένες μπορούμε να επιτύχουμε τουλάχιστον 90 IA σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας- ωστόσο, η χρήση της προαιρετικής πλακέτας MDA300 και των ενδεικτικών λυχνιών LED έχει ως αποτέλεσμα μια μέση κατανάλωση ρεύματος 1,53 mA. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 11, η μέση κατανάλωση ρεύματος από ένα mote είναι περίπου 2,73 mA με κύκλο λειτουργίας 5%.



Σχήμα 11 Μέτρηση της απορρόφησης ρεύματος και του κύκλου λειτουργίας ενός μοτέρ [44]

Έτσι, δύο πλήρως φορτισμένες μπαταρίες NiMh 2500 mAh με ρυθμό αυτοεκφόρτισης 30% μπορούν να διατηρήσουν έναν αισθητήρα για περίπου 4 εβδομάδες χωρίς επαναφόρτιση. Η ηλιακή κυψέλη που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των μοτέρ είναι σε θέση να παρέχει ρεύμα αιχμής 100 mA στα 3 V, περίπου 36 φορές τη μέση κατανάλωση ρεύματος του φορτίου- επιλέγεται πολύ μεγαλύτερο περιθώριο σχεδιασμού για την ηλιακή κυψέλη (που τροφοδοτεί τα μοτέρ) από ό,τι για τον ηλιακό πίνακα (που τροφοδοτεί τις συσκευές στο εσωτερικό του μετεωρολογικού σταθμού), επειδή οι ηλιακές κυψέλες, καθώς εγκαθίστανται πιο κοντά στο έδαφος από ό,τι ο ηλιακός πίνακας, είναι πιο πιθανό να σκιάζονται από τα δέντρα στο δάσος.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει μερικά στατιστικά στοιχεία για την κατάσταση του δικτύου αισθητήρων διατομής που συλλέχθηκαν από δοκιμές πεδίου σε διάστημα ενός μήνα. Η απόσταση μεταξύ κάθε κόμβου και BS προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μετρήσεις συντεταγμένων GPS.

Από τις μετρήσεις του αριθμού των μεταπηδήσεων (μεταξύ κάθε κόμβου και BS) μπορούμε να παρατηρήσουμε σαφώς ότι η δενδρική δομή του δικτύου αισθητήρων πολλαπλών μεταπηδήσεων υφίσταται δυναμικές μεταβολές και το δίκτυο αισθητήρων είναι σε θέση να αναδιοργανώνεται αυτόνομα μπροστά στις αλλαγές του περιβάλλοντος και του δικτύου. Ο μέσος κύκλος λειτουργίας κάθε κόμβου είναι περίπου γύρω στο 5% και παρατηρούμε ότι η τάση υψηλότερου κύκλου λειτουργίας για τους κόμβους με μεγαλύτερες τιμές μέσου αριθμού διαδρομών.

Το ποσοστό λήψης δεδομένων που παρουσιάζεται στον πίνακα είναι το ποσοστό των δεδομένων που λαμβάνονται επιτυχώς από τον BS από κάθε κόμβο αισθητήρα, ενώ κάθε κόμβος παράγει ένα δείγμα δεδομένων κάθε 10 λεπτά. Στην τρέχουσα υλοποίησή μας, δεν διαθέτουμε μηχανισμούς επιβεβαίωσης από άκρο σε άκρο και επαναμετάδοσης από άκρο σε άκρο, έτσι ώστε, όπως φαίνεται στα αποτελέσματα, το ποσοστό λήψης δεδομένων μειώνεται σχεδόν εκθετικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μεταπηδήσεων.

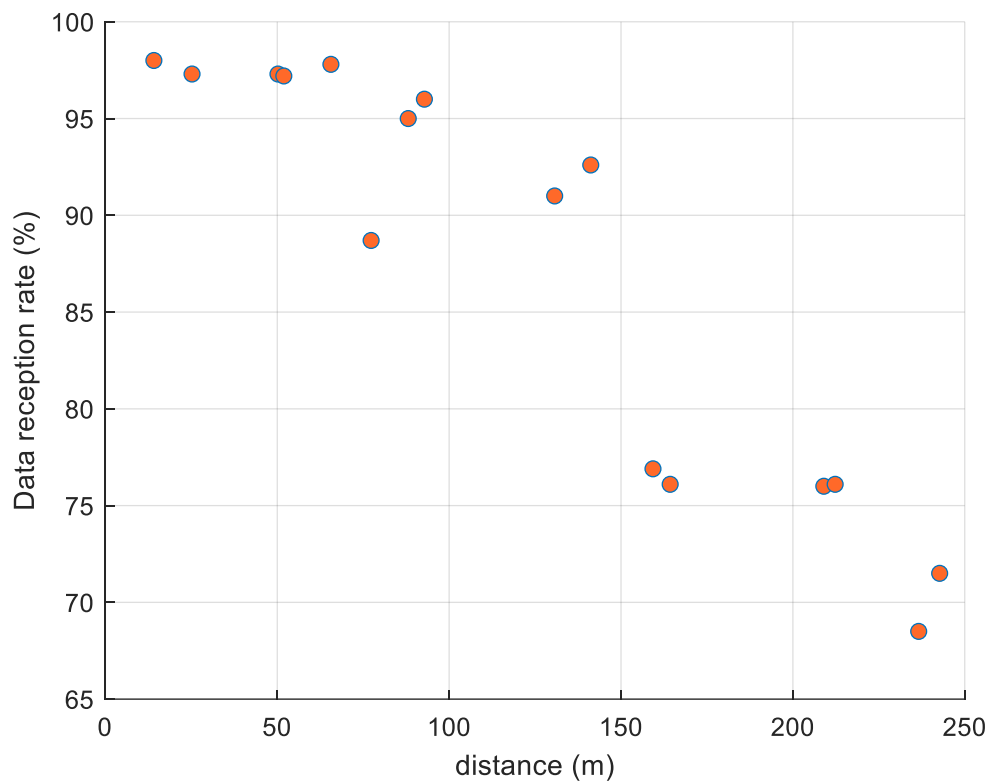
Για την ανάλυση και τη μοντελοποίηση, τα δεδομένα που λείπουν ανακατασκευάζονται μέσω παρεμβολής, αξιοποιώντας τη χρονική δομή των δεδομένων των μεμονωμένων αισθητήρων. Όμως, διερευνούμε τη χρήση της πλήρους χωροχρονικής δομής των δεδομένων για την ανακατασκευή των ελλειπών σημείων δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, αναπτύσσουμε επίσης εναλλακτικά πρωτόκολλα δικτύωσης για την επίτευξη αξιοπιστίας από άκρο σε άκρο σε δίκτυα αισθητήρων πολλαπλών διαδρομών συλλογής δεδομένων και για τη μελέτη του συμβιβασμού μεταξύ αξιοπιστίας και ενεργειακής απόδοσης σε πρακτικά σενάρια εφαρμογών.

Πίνακας 2 Στατιστικά στοιχεία των δεδομένων κατάστασης του δικτύου αισθητήρων που συλλέχθηκαν από τις δοκιμές πεδίου [44]

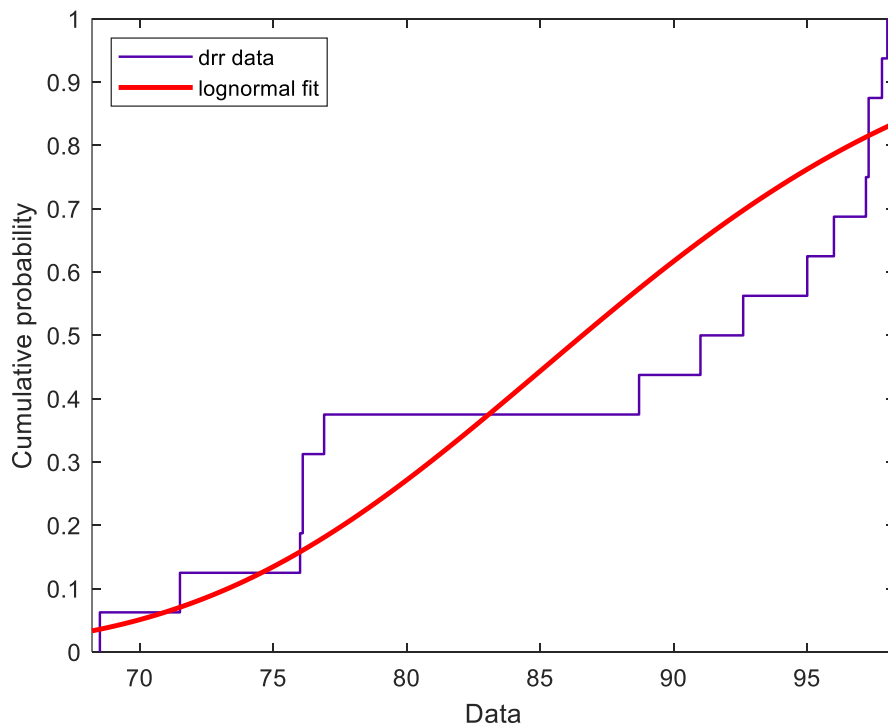
Node ID	Distance to BS (m)	Min. hop count	Max. hop count	Avg. hop count	Avg. duty cycle (%)	Data reception rate (%)
1 (BS)	0	0	0	0	6.2	1
2	88.1	1	6	2.3	5.0	95.0
3	92.8	1	5	1.6	4.1	96.0
4	65.6	1	3	2.0	4.5	97.8
5	50.2	1	2	1.0	4.0	97.3
6	130.7	2	6	2.9	4.7	91.0
7	51.9	1	3	1.6	4.4	97.2
8	141.2	2	6	3.5	3.8	92.6
9	209.0	3	8	4.3	6.4	76.0
10	159.3	3	8	4.6	4.3	76.9
11	77.3	1	5	1.5	4.2	88.7
12	14.1	1	3	1.1	2.5	98.0
13	164.3	3	7	3.7	4.4	76.1
14	236.6	4	9	5.7	4.5	68.5
15	242.7	4	9	5.9	4.1	71.5
16	25.2	1	2	1.1	2.0	97.3
17	212.3	3	8	5.1	4.8	76.1

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας προβαίνουμε σε περαιτέρω καινοτόμο επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον MATLAB. Εστιάζουμε συγκεκριμένα στην σχέση ανάμεσα στην απόσταση και στο data reception rate (%) που αποτελεί και την βασικότερη παράμετρο ενδιαφέροντος ως προς την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων μας.

Αναζητούμε αρχικά την γραφική απεικόνιση της σχέσης ανάμεσα στις δύο παραμέτρους την οποία και αποτυπώνουμε στο Σχήμα 12. Παρατηρούμε την εμφανώς φθίνουσα απόδοση στο επιτυχές ποσοστό παράδοσης δεδομένων όσο αυξάνεται η απόσταση και μάλιστα με μη-γραμμικό τρόπο. Στο Σχήμα 13 μέσω του εργαλείου distribution fitting tool του MATLAB μελετούμε την φύση της μεταβολής των τιμών του data reception rate (%).



Σχήμα 12. Μεταβολή των τιμών του data reception rate (%) ως προς την απόσταση



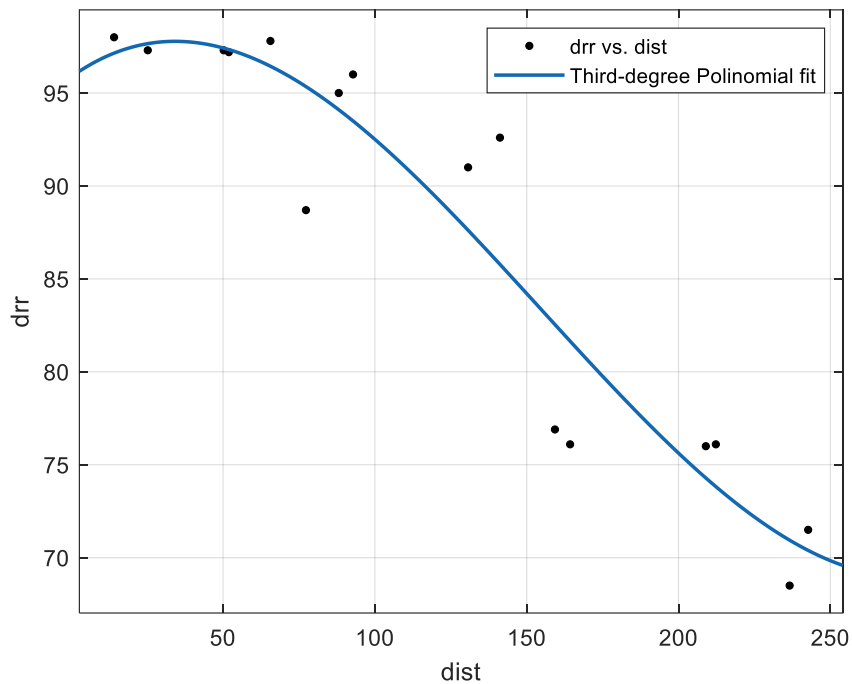
Σχήμα 13. Κατανομή της μεταβολής των τιμών του data reception rate (%)

Παρατηρούμε πως η κατανομή που περιγράφει καλύτερα, δηλαδή κάνει fit με το μικρότερο δυνατό σφάλμα, στις τιμές του data reception rate (%) είναι η Log-normal κατανομή όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3 που ακολουθεί. Πρόκειται για ένα πολύ ενδιαφέρον εύρημα καθώς είναι γνωστό από την βιβλιογραφία [78]-[80] ότι οι τιμές της μέσης λαμβανόμενης ισχύος σε μελέτη μεγάλης κλίμακας (large-scale attenuation) ακολουθούν (στην γραμμική κλίμακα) την Log-normal κατανομή. Φαίνεται λοιπόν πως μία αντιστοιχη «συμπεριφορά» αντιστακλάται και στο data reception rate (%).

Πίνακας 3. Παραμετροποίηση Log-normal κατανομής για βέλτιστο fit στις τιμές του data reception rate (%)

Distribution: Lognormal		
Log likelihood: -60.9371		
Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$		
Mean: 87.3129		
Variance: 129.947		
Parameter Estimate Std. Err.		
mu	4.46105	0.0325018
sigma	0.130007	0.0241417
Estimated covariance of parameter estimates:		
	mu	sigma
mu	0.00105636	-3.96326e-18
sigma	-3.96326e-18	0.000582822

Στο Σχήμα 14 μελετάμε περαιτέρω την σχέση του data reception rate (%) με την απόσταση. Πιο συγκεκριμένα, με το εργαλείο Curve fitting του MATLAB αναζητούμε την κατάλληλη συνάρτηση, με την κατάλληλη συγκεκριμενοποίηση παραμέτρων, για να βρούμε μία μαθηματική σχέση ανάμεσα στην απόσταση και στις τιμές του data reception rate (%).



Σχήμα 14. Εφαρμογή curve fitting tool για την μαθηματική συσχέτιση του data reception rate (%) με την απόσταση

Πίνακας 4. Παραμετροποίηση τριτοβάθμιας πολυωνυμικής συνάρτησης για βέλτιστο fit της απόστασης στις τιμές του data reception rate (%)

$f(x) = p1 \cdot x^3 + p2 \cdot x^2 + p3 \cdot x + p4$ <p>where x is normalized by mean 122.6 and std 75.41</p> <p>Coefficients (with 95% confidence bounds):</p> <p>p1 = 1.767 (-1.619, 5.153)</p> <p>p2 = -2.256 (-5.114, 0.6015)</p> <p>p3 = -12.57 (-18.46, -6.679)</p> <p>p4 = 89 (85.63, 92.36)</p> <p>Goodness of fit:</p> <p>SSE: 189.9</p> <p>R-square: 0.894</p> <p>Adjusted R-square: 0.8675</p> <p>RMSE: 3.978</p>
--

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο Curve fitting παρατηρούμε ότι η βέλτιστη μαθηματική σχέση ανάμεσα στην απόσταση και στις τιμές του data reception rate (%), από πλευράς ελάχιστου σφάλματος προσέγγισης, είναι το πολυώνυμο τρίτου βαθμού. Οι τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων παρατίθενται στον Πίνακα 4.

Με επαναληπτικές δοκιμές παρατηρούμε ότι πιο σύνθετες συναρτήσεις όπως το sum of sinuoids αλλά και πολυώνυμα μεγαλύτερου βαθμού δεν δίνουν πιο αξιόπιστα fit από πλευράς αισθητά μικρότερου σφάλματος. Υπάρχει δηλαδή ένα άνω threshold στο βέλτιστο fit που στην απλούστερη μαθηματική έκφραση ισοδυναμεί με την πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία διερεύνησε πραγματικές εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης που βασίζονται σε WSNs. Η ανάλυση ανέδειξε ότι αυτή η αναδυόμενη τεχνολογία είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη βελτίωση του τρόπου παρακολούθησης του περιβάλλοντος από την άποψη ακρίβειας και ποιότητας.

Μετά την κατηγοριοποίηση των εφαρμογών περιβαλλοντικής παρακολούθησης σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες πεδίων, στη συνέχεια συζητήσαμε τα βασικά στοιχεία υλικού που χρησιμοποιούν οι υφιστάμενες εφαρμογές WSN. Πέντε εύχρηστοι οδηγοί παρουσιάστηκαν οι οποίοι συζητούν βασικές εκτιμήσεις για την ανάπτυξη WSN σε καθένα από αυτά τα πεδία ανάπτυξης. Οι οδηγοί που δημιουργήθηκαν κάλυπταν διάφορα θέματα, όπως πλατφόρμες κόμβων αισθητήρων, λειτουργικά συστήματα (OS), τοπολογίες, εγκατάσταση και συντήρηση και πολλά άλλα. Με βάση την κατανόησή μας, επισημάναμε επίσης ζητήματα και ανοικτές προκλήσεις σχετικά με την εφαρμογή των WSNs σε κάθε κατηγορία ανάπτυξης.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε επίσης ένα σύστημα απομακρυσμένης περιβαλλοντικής παρακολούθησης σχεδόν σε πραγματικό χρόνο που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών μελετών, με έμφαση στη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση του αναδυόμενου συστήματος που βασίζεται σε WSN και του παλαιού ενσύρματου συστήματος αισθητήρων.

Περιγράψαμε επίσης ένα ενοποιημένο πλαίσιο για τη συλλογή, διαχείριση, διάδοση και ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων. Λόγω περιορισμένου χώρου, πολλές τεχνικές λεπτομέρειες των στοιχείων του συστήματος δεν καλύπτονται σε αυτό το έγγραφο- περισσότερες λεπτομέρειες σχεδιασμού και υλοποίησης του WSN παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας και των υπηρεσιών ιστού για την οπτικοποίηση, διαχείριση, διάδοση και ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων θα

εμφανιστούν σε ξεχωριστές δημοσιεύσεις για την κατανόηση της απόκρισης των φυτών στην εδαφική υγρασία.

Στα πλαίσια ενός τέτοιου πρότυπου συστήματος παρατέθηκαν αποτελέσματα από πραγματικές μετρήσεις αισθητήρων τηλεμετρίας. Επεξεργαστήκαμε αυτά τα αποτελέσματα και δώσαμε καινοτόμα ευρήματα για την σχέση απόστασης και data reception rate (%) με προσομοιώσεις στο MATLAB κάνοντας χρήση ποικίλων διαθέσιμων εργαλείων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Othman, Mohd Fauzi, and Khairunnisa Shazali. "Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system." *Procedia Engineering* 41 (2012): 1204-1210.
- [2] V. Mhatre and C. Rosenberg, "Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 45-63, Jan. 2004.
- [3] A. M. Adnan, "Data Gathering In Wireless Sensor Network For Environmental Monitoring," 2010.
- [4] W.-S. Jang, W. M. Healy, and M. J. Skibniewski, "Wireless sensor networks as part of a web-based building environmental monitoring system," *Automation in Construction*, vol. 17, no. 6, pp. 729-736, Aug. 2008.
- [5] R. Mittal and M. P. S. Bhatia, "Wireless Sensor Networks for Monitoring the Environmental Activities," *Analysis*, 2010.
- [6] Y. Guo and J. McNair, "Fault Tolerant Three Dimensional Environment Monitoring Using Wireless Sensor Networks," pp. 1-7.
- [7] N. S. Shamsuddin, "Development Of Sensor Nodes In Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring (WisNEM)," 2008.
- [8] A. S. Ramli, "Design of Wireless Sensor Network For Environmental Monitoring (WISNEM)," 2008.
- [9] G. Barrenetxea, F. Ingelrest, G. Schaefer, and M. Vetterli, "Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring: The SensorScope Experience," 2008 IEEE International Zurich Seminar on Communications, pp. 98-101, Mar. 2008.
- [10] R. Kays et al., "Tracking Animal Location and Activity with an Automated Radio Telemetry System in a Tropical Rainforest," *The Computer Journal*, vol. 54, no. 12, pp. 1931-1948, Aug. 2011.
- [11] S. E. Díaz, J. C. Pérez, A. C. Mateos, M.-C. Marinescu, and B. B. Guerra, "A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 76, no. 2, pp. 252-265, May 2011.
- [12] S. Hemsworth and B. Pizer, "Pet ownership in immunocompromised children--a review of the literature and survey of existing guidelines," *Eur J Oncol Nurs*, vol. 10, no. 2, pp. 117-127, 2006.
- [13] L. Spencer, "Pets prove therapeutic for people with AIDS.," *Journal of the American Veterinary Medical Association*, vol. 201, no. 11, pp. 1664-1668, 1992.
- [14] J. S. L. Ting, S. K. Kwok, W. B. Lee, A. H. C. Tsang, and B. C. F. Cheung, "A Dynamic RFID-based Mobile Monitoring System in Animal Care Management over a Wireless Network," pp. 2085-2088, 2007.
- [15] R. Zviedris, A. Elsts, and G. Strazdins, "LynxNet : Wild Animal Monitoring Using Sensor," *Networks*, no. 2009, pp. 170-173, 2010.
- [16] P. Mentor and P. Team, "wildCENSE – Sensor Network for wildlife monitoring," pp. 1-105.
- [17] Y. Zhu, J. Song, and F. Dong, "Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring," *Procedia Engineering*, vol. 16, pp. 608-614, Jan. 2011.
- [18] M. Murad, K. M. Yahya, and G. M. Hassan, "Web Based Poultry Monitoring System Using Wireless Sensor Network," 2009.
- [19] J. I. Huiracán et al., "ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 74, no. 2, pp. 258-264, Nov. 2010.
- [20] K. H. Kwong et al., "Practical considerations for wireless sensor networks in cattle monitoring applications," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 81, pp. 33-44, Feb. 2012.
- [21] S. Roy, "Testbed Implementation of a Pollution Monitoring System Using Wireless Sensor Network for the Protection of Public Spaces," pp. 263-276.

- [22] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," *Habitat*, pp. 88-97.
- [23] M. López et al., "Wireless monitoring of the pH, NH₄⁺ and temperature in a fish farm," *Procedia Chemistry*, vol. 1, no. 1, pp. 445-448, Sep. 2009.
- [24] M. Zhang, D. Li, and L. Wang, "Design and Development of Water Quality Monitoring System Based on Wireless," pp. 629-641. [25] S.-hwan Choi, B.-kug Kim, J. Park, C.-hee Kang, and D.-seop Eom, "An Implementation of Wireless Sensor Network for Security System using Bluetooth," vol. 50, no. 1, pp. 236-244, 2004.
- [26] M. 'Izzul H. M. Solehuddin, "Development of Wireless Sensor Network For Motion Detection," *Network*, 2010.
- [27] J. I. Chanin and A. R. Halloran, "Wireless Sensor Network for Monitoring Applications."
- [28] S. Bhattacharjee, P. Roy, S. Ghosh, S. Misra, and M. S. Obaidat, "Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines," *Journal of Systems and Software*, vol. 85, no. 3, pp. 571-581, Mar. 2012.
- [29] R. Gao, "2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE 2011) A Wireless Sensor Network Environment Monitoring System Based on TinyOS," *Electronics*, no. Iceoe, pp. 497-501, 2011.
- [30] L.-ling Li, S.-feng Yang, L.-yan Wang, and X.-ming Gao, "The greenhouse environment monitoring system based on wireless sensor network technology," 2011 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, pp. 265-268, Mar. 2011.
- [31] S. Gong, C. Zhang, L. Ma, J. Fang, and S. Wang, "Design and Implementation of a Low-Power ZigBee," pp. 616-622, 2011.
- [32] I. Matijevics, "Wireless Sensors Networks – Theory and Practice," pp. 405-417, 2009.
- [33] Y. K. Lee, Y. J. Jung, and K. H. Ryu, "Design and Implementation of a System for Environmental Monitoring Sensor Network," 2007.
- [34] H. Tao and H. Zhang, "Forest Monitoring Application Systems Based on Wireless Sensor Networks," 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops, pp. 227-230, Nov. 2009.
- [35] X. Jiang, G. Zhou, Y. Liu, and Y. Wang, "Wireless Sensor Networks for Forest Environmental Monitoring," no. Figure 2, pp. 2-5, 2010.
- [36] A. Awang, M. H. Suhaimi, B. S. Iskandar, and P. D. Ridzuan, "RIMBAMON © : A Forest Monitoring System Using Wireless Sensor Networks," pp. 1101-1106, 2007.
- [37] Z.- Sun, W.-bin Li, H.-fei Xiao, and L. Xu, "The Research on Solar Power System of Wireless Sensor Network Node for Forest Monitoring," 2010 International Conference on Web Information Systems and Mining, pp. 395-398, Oct. 2010.
- [38] M. Hefeeda and M. Bagheri, "Wireless Sensor Networks for Early Detection of Forest Fires," no. August 2003, 2007.
- [39] Y. Liu, Y. Gu, G. Chen, Y. Ji, and J. Li, "A Novel Accurate Forest Fire Detection System Using Wireless Sensor Networks," 2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, pp. 52-59, Dec. 2011.
- [40] H. Soliman, K. Sudan, and A. Mishra, "A smart forest-fire early detection sensory system: Another approach of utilizing wireless sensor and neural networks," 2010 IEEE Sensors, pp. 1900-1904, Nov. 2010.
- [41] A.-A. Y. Al-Habashneh, M. H. Ahmed, and T. Husain, "Reliability analysis of Wireless Sensor Networks for forest fire detection," 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 1630-1635, Jul. 2011.
- [42] Y. E. Aslan, I. Korpeoglu, and Ö. Ulusoy, "A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring," *Computers, Environment and Urban Systems*, Apr. 2012.

- [43] J. Lloret, M. Garcia, D. Bri, and S. Sendra, "A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification," *Sensors* (Basel, Switzerland), vol. 9, no. 11, pp. 8722-47, Jan. 2009.
- [44] Yang, J., Zhang, C., Li, X. et al. Integration of wireless sensor networks in environmental monitoring cyber infrastructure. *Wireless Netw* 16, 1091–1108 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11276-009-0190-1>
- [45] Martinez, K., Hart, J. K., & Ong, R. (2004). Environmental sensor networks. *IEEE Computer*, 37, 50–56.
- [46] Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., & Anderson, J. (2002). Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*.
- [47] MoteLab. Harvard sensor network testbed. Available at <http://motelab.eecs.harvard.edu>
- [48] ExScal. Extreme scale wireless sensor networking. Available at <http://cast.cse.ohio-state.edu/exscal>
- [49] Kansei. Sensor testbed for At-scale experiments. Available at <http://ceti.cse.ohio-state.edu/kansei>
- [50] CitySense. An open, urban-scale sensor network testbed. Available at <http://www.citysense.net>
- [51] SCADDS. Scalable coordination architectures for deeply distributed systems. Available at <http://www.isi.edu/scadds/testbeds>
- [52] Texas Environmental Observatory. Available at <http://www.teo.unt.edu>
- [53] Cheng, S., & Wang, R. (2002). An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes*, 16, 1403–1418.
- [54] Sensor Web Enablement WG., Open Geographic Consortium Inc. Available at <http://www.opengeospatial.org>.
- [55] Crossbow Inc. Available at <http://www.xbow.com>
- [56] Harrington, B., Huang, Y., Yang, J., & Li, X. (2009). Energy-efficient map interpolation for sensor fields using Kriging. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(5), 622–635.
- [57] Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2002). An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 21st international annual joint conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)* (Vol. 3, pp. 1567–1576).
- [58] Stallings, W. (2004). *Wireless communications & networks*, 2nd edn. Prentice Hall.
- [59] van Dam T., & Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the international conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*.
- [60] Polastre, J., Hill, J., & Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the international conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*.
- [61] Rhee, I., Warrier, A., Aia, M., & Min, J. (2005). Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks. In *Proceedings of the international conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*.
- [62] Musaloiu-E, R., Terzis, A., Szlavecz, K., Szalay, A., Cogan, J., & Gray, J. (2006). Life under your feet: A wireless soil ecology sensor network. In *Proceedings of the third workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets)*.
- [63] Cardell-Oliver, R., Smettem, K., Kranz, M., & Mayer, K. (2005). A reactive soil moisture sensor network: Design and field evaluation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 1(2), 149–162.

- [64] Maroti, M., Kusy, B., Simon, G., & Ledeczi, A. (2004). The flooding time synchronization protocol. In Proceedings of the ACM conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys).
- [65] Woo, A., Tong, T., & Culler, D. (2003). Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In Proceedings of the international conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys).
- [66] Technologic Systems Inc. Available at <http://www.embeddedarm.com>
- [67] SensorML, UAH VAST. Available at <http://vast.uah.edu/SensorML>
- [68] Google Maps API, Google. Available at <http://code.google.com/apis/maps/>
- [69] Keyhole Markup Language, Google. Available at <http://code.google.com/apis/kml>
- [70] Delicato, F. C., Pires, P. F., Pinnez, L., Fernando, L., & da Costa, L. F. R. (2003). A flexible web service based architecture for wireless sensor networks. In Proceedings of the 23rd international conference on distributed computing systems workshops.
- [71] Zhang, J., Hart, Q., Gertz, M., Rueda, C., & Bergamini, J. (2009). Sensor data dissemination systems using Web-based standards: A case study of publishing data in support of evapotranspiration models in California. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 26(1), 35–52.
- [72] Garcia, R. M., Carvalhal, P., Ferreira, M. J., Silva, L. F., Almeida, H., Santos, C., et al. (2009). A flexible framework for data exchange and presentation between wireless sensor networks and personal devices. In The international conference on “Computer as a Tool”.
- [73] Sleman A., & Moeller, R. (2008). Integration of wireless sensor network services into other home and industrial networks using device profile for web services (DPWS). In The 3rd international conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications (ICTTA).
- [74] Kawahara, Y., Kawanishi, N., Ozawa, M., Morikawa, H., & Asami, T. (2007). Designing a framework for scalable coordination of wireless sensor networks, context information and web services. In The 27th international conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW).
- [75] 52North Sensor Web, 52north.org. Available at <http://52north.org/>
- [76] Metro Web Services, Sun Microsystems, Inc. Available at <http://java.sun.com/webservices/>
- [77] NovaLynx Corporation. Power budget calculations. Available at <http://www.novalynx.com>
- [78] Seybold, J.S. *Introduction to RF Propagation*; Wiley Interscience: Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [79] Rappaport, T. *Wireless Communications: Principles & Practice*; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1999.
- [80] Chrysikos, T.; Kotsopoulos, S. Characterization of large-scale fading for the 2.4 GHz channel in obstacle-dense indoor propagation topologies. In Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2012), Quebec City, QC, Canada, 3–6 September 2012