

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Πειραματική Ανάπτυξη
Πρωτοκόλλων Διάδοσης Πληροφορίας και Εφαρμογών
σε Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων

Γεώργιος Χ. Μυλωνάς

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Σωτήρης Νικολετσέας

Πάτρα, Δεκέμβριος 2008

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Πειραματική Ανάπτυξη
Πρωτοκόλλων Διάδοσης Πληροφορίας και Εφαρμογών σε
Ασύρματα Δίκτυα Μικροαισθητήρων

Γεώργιος Χ. Μυλωνάς

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Επίκουρος Καθηγητής Σωτήρης Νικολετσέας (Επιβλέπων)
Καθηγητής Μάνος Βαρβαρίγος (Μέλος Τριμελούς Επιτροπής)
Καθηγητής Παύλος Σπυράκης (Μέλος Τριμελούς Επιτροπής)
Καθηγητής Χρήστος Κακλαμάνης
Καθηγητής Παναγιώτης Τριανταφύλλου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ιωάννης Γαροφαλάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής Χρήστος Ζαρολιάγκης

Η παρούσα διατριβή αποτέλεσε τμήμα του έργου 'Αλγόριθμοι για Δίκτυα Έξυπνης Σκόνης' (ΑΛΓΟ.Δ.Ε.Σ., κωδικός έργου 03ΕΔ568), το οποίο υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Ενίσχυσης Ερευνητικού Δυναμικού (ΠΕΝΕΔ 2003), και χρηματοδοτήθηκε κατά 75% από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και κατά 25% από το Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), στα πλαίσια του μέτρου 8.3 του Επιχειρησιακού Προγράμματος Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Ευχαριστίες

Πάτρα, Δεκέμβριος 2008

Πρώτους από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδελφό μου, οι οποίοι με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια. *Τους αφιερώνω την παρούσα διατριβή.*

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και συνεργάτες, οι οποίοι με ανέχονται όλα αυτά τα χρόνια, και τους οποίους είχα την τύχη να γνωρίσω στη διάρκεια των τελευταίων δέκα χρόνων (πέρασαν κιόλας δέκα χρόνια αλήθεια) και να συνεργαστώ μαζί τους, ιδιαίτερα το Γιάννη Χατζηγιαννάκη, το Θανάση Αντωνίου και τον Παναγιώτη Κόκκινο. Είχα την ευτυχία να είμαι μέλος μιας παρέας με δημιουργικότητα και μαζί τους είχα την ευκαιρία να συμμετέχω σε πολλά όμορφα πράγματα τα τελευταία χρόνια. Παραδέχομαι ότι θα μπορούσα να είμαι 'λίγο' καλύτερος στη συνεργασία μου μαζί τους!

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Σωτήρη Νικολετσέα, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων του διδακτορικού μου, για τις συμβουλές του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην (μακρά) πορεία της εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές Μάνο Βαρβαρίγο και Παύλο Σπυράκη, οι οποίοι συμμετείχαν στην τριμελή επιτροπή για το διδακτορικό μου, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής, τους καθηγητές Χρήστο Κακλαμάνη και Παναγιώτη Τριανταφύλλου και τους αναπληρωτές καθηγητές Ιωάννη Γαροφαλάκη και Χρήστο Ζαρολιάγκη, για την τιμή που μου έκαναν, καθώς και για τα χρήσιμα σχόλιά τους.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους συνάδελφους μου Θανάση Κίναλη και Χριστόφορο Ραπτόπουλο, για την εποικοδομητική συνεργασία και την αρμονική συνύπαρξη που είχαμε τα τελευταία χρόνια ως συν-υποψήφιοι διδάκτορες. Επίσης, ευχαριστώ τον συνάδελφο Αποστόλη Παπαγεωργίου, με τον οποίο συνεργαστήκαμε στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής του εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και δασκάλους μου που με βοήθησαν τα τελευταία χρόνια και μου δείχνανε καινούριους δρόμους με το παράδειγμα και τις γνώσεις τους.

Πρόλογος

Τα ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων είναι μια πρόσφατη κατηγορία αδόμητων υπολογιστικών δικτύων, τα οποία αποτελούνται από κόμβους με μικρό μέγεθος και περιορισμένους υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους. Τέτοιοι κόμβοι έχουν δυνατότητες μέτρησης φυσικών μεγεθών (όπως πχ. θερμοκρασία, υγρασία, κ.α.), ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ τους, και σε κάποιες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον τους (μέσω κατάλληλων ηλεκτρομηχανικών μερών).

Καθώς τα δίκτυα αυτά έχουν αρχίσει να γίνονται πιο προσιτά (από άποψη κόστους και διαθεσιμότητας hardware), το πεδίο εφαρμογής και η φιλοσοφία χρήσης τους συνεχώς εξελίσσεται και διευρύνεται. Έτσι, έχουμε παραδείγματα εφαρμογών από παρακολούθηση της βιοποικιλότητας μιας περιοχής έως την παρακολούθηση στατικότητας κατασκευών, και δίκτυα με πλήθος κόμβων από δεκάδες έως και εκατοντάδες ή και χιλιάδες κόμβων.

Κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής ασχοληθήκαμε με τις εξής βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις που αφορούν στα συγκεκριμένα δίκτυα:

- την εξομοίωσή τους,
- την ανάπτυξη πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας κατάλληλων για αυτά τα δίκτυα και τη μελέτη της απόδοσής τους μέσω εξομοίωσης,
- τη μοντελοποίηση εχθρικών συνθηκών (‘έμποδιών’) σε ένα τέτοιο δίκτυο και την εφαρμογή τους στο επίπεδο της εξομοίωσης,
- την ανάπτυξη εφαρμογών για τη διαχείρισή τους.

Στο σκέλος της εξομοίωσης, δόθηκε αρχικά έμφαση στην αποδοτική εξομοίωση τέτοιου τύπου δικτύων με μέγεθος αρκετών χιλιάδων κόμβων, και στα πλαίσια της έρευνας μας αναπτύχθηκε ένα περιβάλλον εξομοίωσης (simDust), με δυνατότητα προσθήκης νέων πρωτοκόλλων καθώς και οπτικοποίησης. Το περιβάλλον αυτό χρησιμοποιήθηκε ακολούθως για την επέκταση και πειραματική αξιολόγηση ορισμένων χαρακτηριστικών υπαρχόντων πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας σε ασύρματα δίκτυα μικροαισθητήρων. Παράλληλα, αναπτύξαμε ένα νέο πρωτόκολλο και κάναμε μια σύγκριση της απόδοσής του με άλλα αντίστοιχα πρωτόκολλα. Η πειραματική μας αξιολόγηση έδειξε ότι το νέο πρωτόκολλο, το οποίο βασίζεται σε δυναμικές αλλαγές της ακτίνας μετάδοσης των κόμβων του δικτύου, συμπεριφέρεται αποδοτικότερα από άλλα πρωτόκολλα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, και συγκεκριμένα σε δίκτυα με εμπόδια και ανομοιογενή ανάπτυξη των αισθητήρων.

Στη συνέχεια, δόθηκε έμφαση στην προσθήκη ‘ρεαλιστικών’ συνθηκών κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης τέτοιων πρωτοκόλλων, οι οποίες να λειτουργούν ανταγωνιστικά ως προς τα πρωτόκολλα αυτά. Σκοπός μας ήταν να προταθεί ένα μοντέλο, το οποίο να μπορεί να

περιγράψει συνθήκες που περιορίζουν την αποτελεσματικότητά τους. Συγκεκριμένα, προτείναμε και υλοποιήσαμε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο ‘εμποδίων’, το οποίο εισάγει μικρή πρόσθετη υπολογιστική πολυπλοκότητα σε έναν εξομοιωτή, ενώ παράλληλα για να εξετάσουμε την επίδρασή του εστιάσαμε σε πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούν γεωγραφική γνώση (απόλυτη ή σχετική) για να δρομολογήσουν την πληροφορία μέσα σε ένα δίκτυο ασύρματων μικροαισθητήρων. Τέτοια πρωτόκολλα είναι σχετικά ευαίσθητα σε δυναμικές αλλαγές της τοπολογίας και των συνθηκών του δικτύου. Μέσω πειραματικής αξιολόγησης δείξαμε την σημαντική επίδραση που μπορούν να έχουν συγκεκριμένες αντίξοες συνθήκες μέσα στο δίκτυο στην απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων.

Στο σκέλος των εφαρμογών, προτείναμε αρχικά μια αρχιτεκτονική (WebDust/Share-Sense) για ένα σύστημα διαχείρισης τέτοιων δικτύων, το οποίο να παρέχει βασικές δυνατότητες δημιουργίας εφαρμογών για τέτοια δίκτυα σε συνδυασμό με επεκτασιμότητα. Χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν είναι η δυνατότητα διαχείρισης πολλαπλών ετερογενών ασύρματων δικτύων μικροαισθητήρων, η ανοικτότητα, η χρήση peer-to-peer αρχιτεκτονικής για τη διασύνδεση πολλών διαφορετικών δικτύων. Υλοποιήθηκε μέρος του προτεινόμενου συστήματος, ενώ στη συνέχεια το σύστημα αναθεωρήθηκε σε ότι αφορά την αρχιτεκτονική του και εμπλουτίστηκε με πρόσθετες δυνατότητες παρουσίασης.

University of Patras
School of Engineering
Department of Computer Engineering and Informatics

PhD Thesis

Design, Simulation and Experimental Development of Data
Propagation Protocols and Applications for Wireless Sensor
Networks

Georgios c. Mylonas

Supervisor: Assistant Professor Sotiris Nikolettseas

Abstract

Wireless sensor networks are a recently introduced category of ad hoc computer networks, which are comprised by nodes of small size and limited computing and energy resources. Such nodes are able of measuring physical properties such as temperature, humidity, etc., wireless communication between each other and in some cases interaction with their surrounding environments (through the use of electromechanical parts).

As these networks have begun to be widely available (in terms of cost and commercial hardware availability), their field of application and philosophy of use is constantly evolving. We have numerous examples of their applications, ranging from monitoring the biodiversity of a specific outdoor area to structural health monitoring of bridges, and also networks ranging from few tens of nodes to even thousands of nodes.

In this PhD thesis we investigated the following basic research lines related to wireless sensor networks:

- their simulation,
- the development of data propagation protocols suited to such networks and their evaluation through simulation,
- the modelling of “hostile” circumstances (obstacles) during their operation and evaluation of their impact through simulation,
- the development of a sensor network management application.

Regarding simulation, we initially placed an emphasis to issues such as the effective simulation of networks of several thousands of nodes, and in that respect we developed a network simulator (simDust), which is extendable through the addition of new data propagation protocols and visualization capabilities. This simulator was used to evaluate the performance of a number of characteristic data propagation protocols for wireless sensor networks. Furthermore, we developed a new protocol (VRTP) and evaluated its performance against other similar protocols. Our studies show that the new protocol, that uses dynamic changes of the transmission range of the network nodes, performs better in certain cases than other related protocols, especially in networks containing obstacles and in the case of non-homogeneous placement of nodes.

Moreover, we emphasized on the addition of “realistic” conditions to the simulation of such protocols, that have an adversarial effect on their operation. Our goal was to introduce a model for obstacles that adds little computational overhead to a simulator, and also study the effect of the inclusion of such a model on data propagation protocols that use geographic information (absolute or relative). Such protocols are relatively sensitive to dynamic topology changes and network conditions. Through our experiments, we show that the inclusion of obstacles during simulation can have a significant effect on these protocols.

Finally, regarding applications, we initially proposed an architecture (WebDust/ShareSense), for the management of such networks, that would provide basic capabilities of managing such networks and developing applications above it. Features that set it apart are the capability of managing multiple heterogeneous sensor networks, openness, the use of a peer-to-peer architecture for the interconnection of multiple sensor network. A large part of the proposed architecture was implemented, while the overall architecture was extended to also include additional visualization capabilities.

Περιεχόμενα

I	Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	1
1	Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	3
1.1	Μια νέα κατηγορία δικτύων υπολογιστών	3
1.2	Διαφορές με άλλους τύπους δικτύων	5
1.2.1	Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων – Ερευνητικά προβλήματα	8
1.3	Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων	8
1.4	Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων – Μια λύση προς αναζήτηση προβλήματος;	11
1.5	Συνεισφορά – οργάνωση της παρούσας διατριβής	13
2	Ενδιάμεσο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	17
2.1	Τι είναι το ενδιάμεσο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων;	19
2.2	Θέματα σχεδιασμού και απαιτήσεις για το ενδιάμεσο λογισμικό	20
2.3	Ταξινομίες ενδιάμεσου λογισμικού	21
2.4	Μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση	23
2.4.1	Σκοπός – Χαρακτηριστικά ανάπτυξης εφαρμογών και επεκτασιμότητα	23
2.4.2	Προσαρμοστικότητα – Διαχείριση δικτύου ή αυτο-οργάνωση	24
2.4.3	Ανοχή σε σφάλματα	24
2.4.4	Επίπεδο που εκτελείται το λογισμικό	24
2.4.5	Πλήθος ξεχωριστών δικτύων αισθητήρων και ετερογένεια	25
2.4.6	Κινητικότητα κόμβων και κέντρων ελέγχου δικτύου	26
2.4.7	Διαφάνεια	26
2.4.8	Διεπαφή με τον υπόλοιπο κόσμο	27
2.4.9	Ασφάλεια και εμπιστοσύνη	27
2.5	Συζήτηση – Τρέχουσες και μελλοντικές τάσεις	28
II	Διάδοση Πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	29
3	Το πρωτόκολλο VTRP για τη διάδοση πληροφορίας σε δίκτυα έξυπνης σκόνης	31
3.1	Το πρόβλημα – Διάδοση πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	32
3.1.1	Το πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών γεγονότων	32
3.1.2	Σχετικό τεχνολογικό υπόβαθρο	33
3.1.3	Σχετική έρευνα αιχμής	34

3.2	Το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιείται στο VTRP	35
3.3	Το πρωτόκολλο VTRP αναλυτικά	36
3.4	Το πρωτόκολλο LTP	38
3.5	Ο εξομοιωτής simDust – Μεταφορά του VTRP στον εξομοιωτή	38
3.6	Μέτρα εκτίμησης απόδοσης	45
3.7	Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυσή τους	46
3.8	Συμπεράσματα	49
III	Ρεαλιστική εξομοίωση δικτύων	55
4	Ρεαλιστική εξομοίωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων	57
4.1	Περιγραφή του προβλήματος – Ανάλυση της σημασίας του	57
4.1.1	Μοντέλα εμποδίων για χρήση σε εξομοιώσεις ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων	59
4.1.2	Λύσεις στο πρόβλημα της αποφυγής εμποδίων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – Σχετικές μελέτες με χρήση εξομοιώσεων	61
4.1.3	Η συνεισφορά μας	63
4.1.4	Ένα νέο συστηματικό και γενικό μοντέλο εμποδίων	64
4.1.5	Το περιβάλλον εξομοίωσης – Υλοποίηση και μετρικές	66
4.1.6	Πειραματική αξιολόγηση – Σενάρια και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	71
4.1.7	Συμπεράσματα	76
4.2	Το περιβάλλον εξομοίωσης TRAILS	76
4.2.1	Σχετική έρευνα αιχμής	81
4.2.2	Αρχιτεκτονική και υλοποίηση του TRAILS	83
IV	Το περιβάλλον WebDust	93
5	Αρχιτεκτονική του WebDust	95
5.1	Εισαγωγή στο πρόβλημα	95
5.2	Σχετική έρευνα αιχμής	97
5.2.1	Τα συστήματα SenseWeb και SensorMap	97
5.2.2	Πρότυπα διασύνδεσης δικτύων αισθητήρων	100
5.3	Η αρχιτεκτονική του WebDust	101
5.4	Υλοποίηση του συστήματος	107
5.4.1	Υπηρεσίες πυρήνα – σχετικές οντότητες	107
5.4.2	Βάση δεδομένων	112
5.4.3	Διαχειριστές Πληροφορίας	116
5.5	Διεπαφή χρήστη με το σύστημα	120
6	Πειραματικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων – Εφαρμογή του συστήματος WebDust	125
6.1	Σκοπός του πειράματος	125
6.2	Υλικό που χρησιμοποιήσαμε	126
6.3	Αρχιτεκτονική του δικτύου	128
7	Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις	133

V	Δημοσιεύσεις – Βιβλιογραφία	137
8	Λίστα Δημοσιεύσεων	139

Μέρος Ι

Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

1

Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

“If we knew what it was we were doing, it would not be called research, would it?”

(Αν γνωρίζαμε τι είναι αυτό που κάνουμε, δε θα λεγόταν έρευνα, έτσι δεν είναι;)

Albert Einstein

1.1 Μια νέα κατηγορία δικτύων υπολογιστών

Τα τελευταία χρόνια έχουμε γίνει μάρτυρες μιας μεγάλης συζήτησης σχετικά με το ποιο θα είναι το επόμενο μεγάλο βήμα στον κόσμο της πληροφορικής, μετά τη διάδοση του Διαδικτύου και τη δημιουργία του παγκόσμιου δικτυακού χώρου. Μία από τις κατευθύνσεις για την οποία γίνεται συχνά λόγος είναι η σύνδεση του ψηφιακού με τον φυσικό κόσμο. Αυτή η σύνδεση έχει δύο κατευθύνσεις:

- από τη μια πλευρά ο ψηφιακός κόσμος επικοινωνεί με το περιβάλλον του ανθρώπου, γίνεται ‘αόρατος’, μέρος της καθημερινότητάς του και αλληλεπιδρά μαζί του παρατηρώντας τις ενέργειές του.
- από την άλλη, ο άνθρωπος παρατηρεί τις διεργασίες και τη δραστηριότητα του φυσικού κόσμου, μέσω του ψηφιακού κόσμου.

Για αυτές τις δύο γενικές και βασικές κατευθύνσεις, που καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών, έχουν κατά καιρούς υιοθετηθεί διάφορα ονόματα ανάλογα με τη σκοπιά και το όραμα των ερευνητών που ασχολούνται με το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα σχετικά με την πρώτη περίπτωση, δηλαδή της επικοινωνίας του ψηφιακού κόσμου με τον άνθρωπο, είναι τα *ambient intelligence*, *disappearing computer*, *pervasive computing*, κ.α.,

το περιεχόμενο των οποίων δεν παραμένει σταθερό, αλλά κι αυτό μεταβάλλεται παράλληλα με τις εξελίξεις της τεχνολογίας, δίνοντας κατά καιρούς βάρος σε διάφορες πλευρές της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Σχετικά με τη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή της παρατήρησης του φυσικού κόσμου μέσω του ψηφιακού, μέχρι πρόσφατα υπήρχαν αρκετοί περιορισμοί σε ότι σχετίζεται με την κλίμακα και την λεπτομέρεια τέτοιων παρατηρήσεων. Ως τώρα η σύνδεση του ψηφιακού με τον φυσικό κόσμο εντοπιζόταν σε συγκεκριμένα πεδία και εφαρμογές, ενώ οι λεπτομερείς μετρήσεις δεν αφορούσαν παρά μόνο σε μικρό μέρος του φυσικού κόσμου, ή ακόμα ήταν ασυνεχείς, λόγω της φύσης των μέσων παρατήρησης που χρησιμοποιούμε (π.χ. δορυφόροι, κλασικοί μετεωρολογικοί σταθμοί). Την κατάσταση αυτή έρχονται να αλλάξουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μια νέα κατηγορία δικτύων υπολογιστών που υπόσχονται, σε ένα βαθμό, να γεφυρώσουν τον φυσικό και τον ψηφιακό κόσμο και να μας βοηθήσουν στην καλύτερη παρατήρησή του, αλλά και να γίνουν μέρος της καθημερινότητάς μας.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια ειδική κατηγορία υπολογιστικών δικτύων, για την οποία άρχισε να γίνεται λόγος μόλις στα τέλη της περασμένης δεκαετίας (28). Με τον όρο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων εννοούμε ένα πλήθος υπολογιστικών κόμβων, οι οποίοι διαθέτουν μικρό φυσικό μέγεθος, δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και φέρουν αισθητήρες που τους επιτρέπουν να παρατηρούν διάφορα φυσικά μεγέθη (όπως θερμοκρασία, υγρασία, κτλ.). Το πλήθος των κόμβων, οι υπολογιστικές τους δυνατότητες, το μέγεθός τους, το είδος των αισθητήρων τους, κτλ., είναι όλοι τους παράγοντες που μεταβάλλονται και μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Έτσι, μια εφαρμογή ασύρματων δικτύων αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιεί από μερικές δεκάδες έως και χιλιάδες τέτοιους κόμβους, και το μέγεθός τους μπορεί να ποικίλει από μικροσκοπικό έως ενός μικρού υπολογιστικού συστήματος. Ανάλογα μπορούν να διαφέρουν και οι δυνατότητες σε επικοινωνία, χρησιμοποιώντας ασύρματη επικοινωνία εμβέλειας μερικών μέτρων έως και χιλιομέτρων. Η ιδέα για τα δίκτυα αυτά έγινε εφικτή μόλις πριν από μερικά χρόνια, χάρη στην πρόοδο που έχει συντελεστεί στον τομέα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η οποία επέτρεψε τη δημιουργία τέτοιων κόμβων με πλήθος δυνατοτήτων, μικρό μέγεθος και λογικό κόστος.

Γενικά, στην *πλειοψηφία* των δικτύων αυτού του τύπου, χρησιμοποιούνται κόμβοι οι οποίοι έχουν *αρκετά περιορισμένους πόρους*: υπολογιστικούς, ενεργειακούς, επικοινωνιακούς. Οι ερευνητικές αλλά και οι εμπορικά διαθέσιμες πλατφόρμες υλικού για τέτοια δίκτυα, οι οποίες έχουν παρουσιαστεί τουλάχιστον μέχρι στιγμής, διαθέτουν συνήθως υπο-πολλαπλάσιους υπολογιστικούς πόρους (αρχιτεκτονική και ταχύτητα επεξεργαστή, μνήμη, κ.α.) σε σχέση με τους σημερινούς υπολογιστές που χρησιμοποιούμε στο γραφείο και το σπίτι μας (προσεγγίζουν το αντίστοιχο επίπεδο που επικρατούσε προ εικοσιπενταετίας στις περισσότερες περιπτώσεις), αν και για ειδικούς σκοπούς (όπως η κρυπτογράφηση και η επικοινωνία) χρησιμοποιούν ειδικά ολοκληρωμένα για να αναπληρώσουν αυτή την έλλειψη. Σε εφαρμογές που απαιτούνται σεβαστοί υπολογιστικοί πόροι μπορεί βεβαίως να ακολουθείται διαφορετική προσέγγιση στη σχεδίαση του υλικού των κόμβων, προκειμένου να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των εφαρμογών. Σε ότι αφορά τους ενεργειακούς πόρους, χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις μπαταρίες μικρού μεγέθους και κόστους (κάποιες φορές σε συνδυασμό με κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας όπως η ηλιακή). Αυτό το γεγονός συνεπάγεται πρόσθετους περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας, αν λάβουμε υπόψη ότι επιθυμούμε τα δίκτυα αυτά να λειτουργούν ιδανικά επί άοριστον.

Ανεξάρτητα από τα επί μέρους χαρακτηριστικά τους, η βασική ιδέα είναι ότι οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων *συνεργάζονται* για να παρατηρήσουν συγκεκριμένα φυσικά μεγέθη στον χώρο στον οποίο έχουν τοποθετηθεί, ακολουθώντας μία *‘ισχύς εν τη ενώσει’* λογική,

αναπληρώνοντας όπου αυτό είναι δυνατό την έλλειψη πόρων μέσω του πλήθους τους. Η συνεργασία αυτή ωφελεί τη λειτουργία του δικτύου συνολικά με διάφορους τρόπους:

- *στην επικοινωνία*: κάνουμε καταρχήν τη γενική παραδοχή ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από κόμβους αναξιόπιστους, λόγω των περιορισμών σε υλικό (hardware) και λογισμικό, καθώς επίσης ότι οι κόμβοι αυτοί λειτουργούν σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενες συνθήκες, τα οποία μπορεί να είναι ακόμα και εχθρικά. Επομένως, πρέπει με κάποιο τρόπο να αναπληρωθεί αυτή η έλλειψη αξιοπιστίας, τουλάχιστον στο επίπεδο της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Η τοποθέτηση και χρήση μεγάλου αριθμού κόμβων που συνεργάζονται μεταξύ τους για να αντιμετωπίσουν τέτοιες συνθήκες βοηθά στο να δημιουργηθούν δυναμικά πολλαπλές (ακόμα και πλεονάζουσες) δίοδοι επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, ενισχύοντας την επικοινωνία του συνόλου.
- *στην παρατήρηση του φαινομένου*: όπως αναφέραμε, συνήθως υπάρχουν περιορισμοί στο κόστος κατασκευής (αλλά και στο μέγεθος των αισθητήρων) των κόμβων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, γεγονός που αντικατοπτρίζεται και στην επιλογή των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στους κόμβους αυτούς. Η χρήση πολλαπλών κόμβων μπορεί δυνητικά σε ένα βαθμό να αναπληρώσει την έλλειψη ακρίβειας των αισθητήρων, χρησιμοποιώντας τις πολλαπλές μετρήσεις και εξάγοντας π.χ., μέσους όρους. Επίσης, σε ορισμένες εφαρμογές όπως π.χ., ο εντοπισμός της θέσης κάποιου εισβολέα, είναι απαραίτητη η χρήση πολλαπλών κόμβων για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης.
- *στην εξοικονόμηση ενέργειας*: η εξοικονόμηση ενέργειας είναι από τα βασικότερα ερευνητικά προβλήματα στο χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι κόμβοι του δικτύου πρέπει να λειτουργήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο με λιγοστά αποθέματα ενέργειας, τα οποία επιπλέον μπορεί να μην αναπληρώνονται.
- *στην αξιοπιστία*: η χρήση πολλαπλών (πλεονάζόντων) κόμβων χρησιμεύει στην αύξηση της αξιοπιστίας ενός δικτύου αισθητήρων ως σύνολο. Οι πλεονάζοντες κόμβοι μπορούν να πάρουν τη θέση των κόμβων οι οποίοι σταματούν τη λειτουργία τους λόγω σφαλμάτων ή εκτέλεσης κάποιου αλγόριθμου για την εξοικονόμηση ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό παρατείνεται η χρονική διάρκεια της σωστής λειτουργίας του συστήματος.

Μολονότι η βασική ιδέα φαίνεται αρκετά απλή, απεναντίας η υλοποίησή της είναι δύσκολη και τις περισσότερες φορές μία λύση δεν εφαρμόζεται το ίδιο ικανοποιητικά σε όλες τις περιπτώσεις, όπως φαίνεται και από το γεγονός ότι η ερευνητική δραστηριότητα στο συγκεκριμένο τομέα τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς και εμπλουτίζεται με νέα στοιχεία. Μια πολύ καλή εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και στα σχετικά ερευνητικά προβλήματα αποτελούν τα βιβλία (108) και (54).

1.2 Διαφορές με άλλους τύπους δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν αρκετές διαφορές με συναφείς κατηγορίες δικτύων υπολογιστών, όπως τα κλασικά δίκτυα αισθητήρων και τα αδόμητα κινητά δίκτυα υπολογιστών (mobile ad hoc networks). Τα κλασικά δίκτυα αισθητήρων, έχουν κατά κύριο λόγο, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

1. Τοποθετούνται πολλές φορές σχετικά μακριά από το φαινόμενο προς παρατήρηση, γεγονός το οποίο μπορεί ενδεχομένως να έχει επίπτωση στην ποιότητα των μετρήσεων που λαμβάνουν.
2. Τοποθετούνται σε μικρούς αριθμούς (λόγω του σχετικά υψηλού κόστους τους) με κάποιο *προσχεδιασμένο* τρόπο, το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα σε εφαρμογές που απαιτούν πολλαπλές πηγές μετρήσεων ή καλύπτουν μεγάλη έκταση (τουλάχιστον όχι δίκως αυξημένο κόστος).
3. Συνήθως μεταδίδουν περιοδικά μετρήσεις προς κάποιο κεντρικό σταθμό χρησιμοποιώντας ειδικά ενσύρματα δίκτυα (σε κτίρια ή άλλες κατασκευές, π.χ., γέφυρες) ή ασύρματη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις (π.χ., ασύρματοι μετεωρολογικοί σταθμοί), δεν υπάρχει δηλαδή συνεργασία των κόμβων για την επικοινωνία μέσα στο δίκτυο.
4. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ενσύρματα δίκτυα αισθητήρων (συνήθως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μεγάλες κατασκευές, αυτοματισμούς κτιρίων), αυτά συνδυάζονται με διατάξεις ελέγχου, οι οποίες συνοδεύονται από διάφορες απαιτήσεις πραγματικού χρόνου (*real-time constraints*), οι οποίοι δεν υπάρχουν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τουλάχιστον όχι τόσο επιτακτικοί.
5. Συνδυάζονται με πηγές μόνιμης παροχής ενέργειας και επομένως δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας – επομένως δεν υπάρχουν οι αντίστοιχοι περιορισμοί στη σχεδίαση και λειτουργία του λογισμικού που υπάρχουν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Σε αντίθεση, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων:

1. Αποτελούνται από μεγάλο (συνήθως) έως πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων και η ανάπτυξή τους στο πεδίο ενδιαφέροντος μπορεί να γίνεται με εντελώς τυχαίο τρόπο.
2. Οι κόμβοι του δικτύου βρίσκονται *μέσα* στο πεδίο ενδιαφέροντος. Οι μετρήσεις που λαμβάνουμε είναι συνεπώς ακριβείς ειδικά σε εφαρμογές στο φυσικό περιβάλλον (πάντοτε στο μέτρο της ακρίβειας των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων).

3. Αντί να στέλνει ο κάθε κόμβος κατευθείαν (single-hop) τις μετρήσεις που παίρνει σε κάποιο κεντρικό (βασικό) σταθμό, χρησιμοποιείται ένα πιο σύνθετο πρωτόκολλο δικτύου για να προωθηθεί η πληροφορία προς το βασικό σταθμό, σε περισσότερα από ένα βήματα.
4. Μια άλλη διαφορά είναι το κόστος – συνήθως οι εμπορικά διαθέσιμοι κόμβοι για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν χαμηλότερο κόστος σε σχέση με μια κλασική υλοποίηση ενός σταθμού μετρήσεων ή αντίστοιχα ενός ενσύρματου δικτύου αισθητήρων.
5. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στην υλοποίηση εξειδικευμένων εφαρμογών, καθώς το σχετικό υλικό και λογισμικό γενικά προσφέρει περισσότερες δυνατότητες παραμετροποίησης σε σύγκριση με ένα ειδικά σχεδιασμένο σταθμό μετρήσεων.

Διαβάζοντας κάποιος τα παραπάνω χαρακτηριστικά, ίσως συμπεράνει ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι απλά ad hoc δίκτυα και να αναρωτηθεί: 'γιατί δεν εφαρμόζουμε απλά τις μεθόδους και τα πρωτόκολλα που έχουμε αναπτύξει τα τελευταία χρόνια;'. Η απάντηση είναι ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αν και παρουσιάζουν ομοιότητες με τα κλασικά ad hoc δίκτυα, δεν ταυτίζονται μαζί τους. Αντίθετα, οι ήδη υπάρχουσες μέθοδοι για τα δίκτυα αυτά πολλές φορές δεν επαρκούν για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και παραθέτουμε τους κυριότερους λόγους για αυτό:

- *Είδος εφαρμογών:* τα κινητά ad hoc δίκτυα (MANET) γενικά χρησιμοποιούνται (ή θεωρητικά τουλάχιστον απευθύνονται) σε διαφορετικές εφαρμογές. Συνέπεια αυτού είναι οι διαφορετικές απαιτήσεις, κυρίως στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επίσης, στα δίκτυα αυτά υπάρχει ένα πιο συγκεκριμένο σύνολο απαιτήσεων σε σύγκριση με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στα οποία το ευρύ πεδίο εφαρμογών συνεπάγεται εντελώς διαφορετικές απαιτήσεις για ξεχωριστές εφαρμογές. Ακόμα, στα MANET είναι έντονη η αλληλεπίδραση με τον χρήστη ο οποίος κουβαλά μαζί του και χρησιμοποιεί κάποιον κόμβο που ανήκει σε ένα τέτοιο δίκτυο, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αυτό δεν είναι απαραίτητο, αρκετές φορές ο ανθρώπινος παράγοντας δεν αλληλεπιδρά άμεσα με το σύστημα παρά μόνο στο επίπεδο του τελικού χρήστη του συστήματος. Για το λόγο αυτό τις περισσότερες φορές άλλωστε οι κόμβοι για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν έχουν κάποια διεπαφή χρήστη (οθόνη, κουμπιά. κτλ.).
- *Χρησιμοποιούμενο υλικό και περιορισμοί στην ενέργεια:* στα MANET επίσης οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται έχουν αυξημένους υπολογιστικούς πόρους σε σύγκριση με τους αντίστοιχους στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, στα δίκτυα αυτά δεν είναι τόσο ακραίες οι απαιτήσεις για την κατανάλωση ενέργειας, με άλλα λόγια δεν χρειάζεται να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα – ο σκοπός τους είναι πολλές φορές η δημιουργία μιας εφήμερης δικτυακής υποδομής. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η κατανάλωση ενέργειας παίζει βασικότατο ρόλο στη σχεδίαση υλικού και λογισμικού.
- *Διαφορετικά πρότυπα δημιουργίας και κίνησης πληροφορίας:* στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η πληροφορία παράγεται και κινείται στο δίκτυο με διαφορετικούς τρόπους από ότι στα MANET. Έχουμε συνήθως λιγοστή κίνηση πληροφορίας η οποία μπορεί να συνδυάζεται με περιόδους έντονης δραστηριότητας στις οποίες πολλοί κόμβοι προσπαθούν να στείλουν πληροφορία ταυτόχρονα (π.χ., ανιχνεύεται κάποιο κρίσιμο γεγονός).

- *Μέγεθος δικτύου*: στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, το πλήθος κόμβων στα MANET δεν φτάνει το αντίστοιχο στα δίκτυα αισθητήρων. Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αποτελείται ακόμα και από χιλιάδες κόμβων.

Μια ακόμα τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την υλοποίηση του οράματος του ubiquitous computing είναι τα RFID, και μάλιστα τελευταία έχουν εμφανιστεί και ευρέως διαθέσιμες εμπορικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία στα σίπια μας (101),(72). Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες από RFID, κάποιες διαθέτουν αισθητήρες για να παρακολουθούν φυσικά μεγέθη, μερικές λειτουργούν μόνο παθητικά λαμβάνοντας ασύρματα ενέργεια από κάποιο ελεγκτή, άλλες έχουν περισσότερες δυνατότητες. Τα RFID έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον ως τώρα στη διαχείριση εμπορευμάτων και αποθηκών, με άλλα λόγια το εύρος των εφαρμογών στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί είναι περιορισμένο. Επιπλέον, λόγω της φύσης τους, τα RFID έχουν περιορισμένες δυνατότητες και βασίζονται στην παρουσία κάποιας άλλης υποδομής για να λειτουργήσουν. Τελευταία, υπάρχει ένα αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών για την υλοποίηση εφαρμογών.

1.2.1 Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων – Ερευνητικά προβλήματα

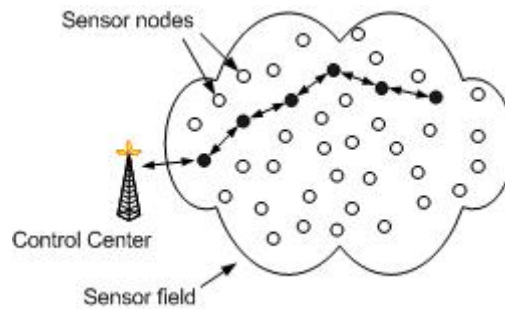
Οι κυρίαρχοι παράγοντες στο σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων, είναι οι εξής: *δυνατότητα κλιμάκωσης* (scalability), *αποδοτική διαχείριση πόρων* (υπολογιστικών, ενεργειακών, επικοινωνιών), *ανοχή σε σφάλματα* (fault tolerance) και *προσαρμοστικότητα* (adaptability). Υπάρχουν και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά, αλλά αυτά είναι παρόντα σε όλες τις εφαρμογές για τα δίκτυα αισθητήρων. Αυτό προκύπτει από τα χαρακτηριστικά των κόμβων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων και από τη φύση των προβλημάτων στα οποία καλούμαστε να δώσουμε λύση με τα δίκτυα αυτά. Μια αρκετά αναλυτική συζήτηση για τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων περιέχεται στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, οπότε ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει εκεί για περισσότερες λεπτομέρειες.

1.3 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται, όπως αναφέραμε προηγουμένως από ένα (σχετικά μεγάλο έως πολύ μεγάλο) πλήθος από κόμβους με τα εξής χαρακτηριστικά: μικρό μέγεθος, περιορισμένους υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους, δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας και ένα πλήθος από αισθητήρες που μετρούν συγκεκριμένα φυσικά μεγέθη. Διακρίνουμε τα εξής βασικά στοιχεία ενός τέτοιου δικτύου:

- τους *κόμβους* (moten ή particles) του δικτύου που βρίσκονται τοποθετημένοι μέσα σε μία συγκεκριμένη *περιοχή*,
- τα *φαινόμενα* τα οποία θέλουμε να παρακολουθήσουμε με το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και τα οποία δημιουργούν κάποια γεγονότα στην περιοχή του δικτύου,
- η *αρχή* (sink, gateway, control center) στην οποία αναφέρονται οι πληροφορίες που σχετίζονται με την ανίχνευση των γεγονότων μέσα στο δίκτυο.

Μία πολύ γενική αρχιτεκτονική για ένα τέτοιο δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 1.2. Υπάρχουν οι κόμβοι του δικτύου που ανιχνεύουν τα διάφορα γεγονότα και αποστέλλουν την πληροφορία σε μία



Σχήμα 1.2: Γενική άποψη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

μοναδική αρχή, το κέντρο ελέγχου του δικτύου. Αυτό είναι το κλασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να δείξει τη λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο όμως δεν δείχνει τις παραλλαγές που υπάρχουν σε αυτή την απλή αρχιτεκτονική εξ' αιτίας των ακόλουθων παραγόντων:

- την *κατανομή* των κόμβων του δικτύου στο χώρο,
- την *κινητικότητα* των κόμβων του δικτύου,
- το *πλήθος*, τη *θέση* και την *κινητικότητα* των κέντρων ελέγχου του δικτύου,
- το *είδος* και την *κινητικότητα* των *φαινομένων* που παρακολουθούμε με το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Κατανομή κόμβων στο χώρο: οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να αναπτυχθούν στην περιοχή που μας ενδιαφέρει να παρακολουθούμε με κάποιο προσχεδιασμένο, π.χ., με τοπολογία grid, ή ακόμα και εντελώς τυχαίο τρόπο, με μια κλασική τυχαία ομοιόμορφη κατανομή. Σε εφαρμογές που σχετίζονται με κτίρια, η ανάπτυξη των κόμβων γίνεται συνήθως με τρόπο που εξασφαλίζει την συνεκτικότητα του δικτύου ή προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσουμε την ενεργειακή κατανάλωση των κόμβων ή την απόδοση συνολικά της εφαρμογής. Υπάρχει μεγάλος όγκος έρευνας στον τομέα αυτό, δηλαδή αν θεωρήσουμε ότι μπορούμε να υπολογίσουμε εκ των προτέρων τον τρόπο που θα αναπτύξουμε το δίκτυο, το ερώτημα είναι το κατά πόσον μπορούμε να μεγιστοποιήσουμε τα οφέλη μας από μια συγκεκριμένη κατανομή κόμβων. Από την άλλη, σε εφαρμογές που έχουν σχέση με το φυσικό περιβάλλον ή ακόμα και σε πεδία μαχών, δεν είναι εύκολο ή εφικτό να υπολογίσουμε από πριν τον τρόπο που θα τοποθετήσουμε τους κόμβους του δικτύου. Έχουν κατά καιρούς προταθεί σενάρια στα οποία χρησιμοποιούνται ακόμα και αεροπλάνα για να διασκορπίσουν τους κόμβους στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η επιλογή του μοντέλου κατανομής κόμβων έχει μεγάλη επίδραση τόσο στην πραγματική εφαρμογή όσο και στις εξομοιώσεις των δικτύων αυτών.

Κινητικότητα κόμβων: σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων οι κόμβοι μπορούν να είναι εντελώς στατικοί, να κινούνται τυχαία ή να κινούνται ακολουθώντας κάποιο προσχεδιασμένο πρόγραμμα. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι κόμβοι είναι εντελώς στατικοί, με άλλα λόγια τους τοποθετούμε σε κάποιο σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος και φροντίζουμε να μην μετακινηθούν από εκεί πέρα, ειδικά στις εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα μέσα σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Από την άλλη, αν λαμβάνουν χώρα μέσα στο φυσικό περιβάλλον είναι πιθανό οι κόμβοι να μετακινούνται με τυχαίους και απρόβλεπτους τρόπους. Π.χ., αν είναι προσδεμένοι πάνω σε

κάποιο ζώο, δεν μπορούμε να προβλέψουμε τις μετακινήσεις του. Επίσης, μπορεί οι κόμβοι να είναι πάνω σε κάποιον άνθρωπο ο οποίος μετακινείται μέσα σε μια πόλη. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι οι κόμβοι σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να μετακινούνται από το ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο άλλο, δηλαδή ανήκουν προσωρινά σε ένα τέτοιο δίκτυο. Προφανώς, οι περιπτώσεις αυτές δημιουργούν πλήθος από νέες προκλήσεις και ενδεχόμενα.

Κέντρα ελέγχου: στο κλασικό μοντέλο δικτύου για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το κέντρο ελέγχου του δικτύου είναι μοναδικό και βρίσκεται στα σύνορα της περιοχής ενδιαφέροντος με τον υπόλοιπο κόσμο. Καταρχήν, για λόγους αποδοτικότητας, το κέντρο ελέγχου του δικτύου μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος – μια ιδιαίτερα αποδοτική περίπτωση είναι να βρίσκεται στο κέντρο του, αν και αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Επίσης, μπορούμε να έχουμε πολλαπλά κέντρα ελέγχου: αυτό αποσυμφορεί το μοναδικό κέντρο ελέγχου (στο οποίο πέφτει όλος ο φόρτος εξυπηρέτησης των κόμβων του δικτύου) καθώς και των κόμβων που βρίσκονται πλησίον του, και καθιστά πιο αποδοτικό και αξιόπιστο το δίκτυο μας συνολικά. Ακόμα, το κέντρο ελέγχου του δικτύου μπορεί να κινείται μέσα στην περιοχή του δικτύου, αντί να είναι ακίνητο σε κάποιο σημείο του – δημιουργούνται έτσι νέα σενάρια για το πώς επικοινωνούν οι κόμβοι του δικτύου μεταξύ τους και με το κέντρο ελέγχου.

Κινητικότητα φαινομένων: εκτός από την κινητικότητα των κόμβων και των κέντρων ελέγχου, υπάρχει το ενδεχόμενο τα φαινόμενα που παρατηρούμε να μετακινούνται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αν π.χ., θέλουμε να ανιχνεύσουμε έναν εισβολέα μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, τότε το φαινόμενο που παρατηρούμε είναι κινητό, και ανάλογα πρέπει να οργανωθεί το δίκτυο ώστε να αναφερθεί επιτυχώς στο κέντρο ελέγχου.

Στα παραπάνω στοιχεία πρέπει να προσθέσουμε επίσης και τα μοντέλα της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου, για να δώσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα, τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις εφαρμογές στις οποίες καλούνται να δώσουν λύσεις τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Υπάρχουν δύο βασικές παράμετροι, η *ιεραρχία* στο δίκτυο και το ποιοι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Στο κλασικό μοντέλο δικτύου έχουμε μια επίπεδη ιεραρχία, στο οποίο υπάρχει μόνο ο διαχωρισμός των κόμβων και του κέντρου ελέγχου. Προφανώς, στην κορυφή της ιεραρχίας του δικτύου βρίσκεται το κέντρο ελέγχου, αφού ο τελικός σκοπός είναι να αναφερθούν επιτυχώς τα γεγονότα που συμβαίνουν μέσα στο δίκτυο προς το κέντρο ελέγχου. Από την άλλη, μπορούν να εισέρχονται ενδιάμεσα επίπεδα ιεραρχίας στο δίκτυο με βάση τις δυνατότητες και τους πόρους των κόμβων ανήκουν στα ενδιάμεσα επίπεδα. Ισχυροί κόμβοι με αυξημένους υπολογιστικούς πόρους μπορούν να παίζουν το ρόλο του συντονιστή (όπως π.χ., στο Zigbee), ή απλοί κόμβοι να λαμβάνουν περιοδικά το ίδιο ρόλο προκειμένου να επιτύχουμε μικρότερη κατανάλωση (45).

Επιπλέον, έχουμε και τους τρόπους επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και με το κέντρο ελέγχου του δικτύου. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων γίνεται συνήθως λόγος για το λεγόμενο *data-centric* μοντέλο, στο οποίο δεν παίζει ρόλο το ποιος κόμβος στέλνει την πληροφορία αλλά η ίδια η πληροφορία, αν και το συγκεκριμένο μοντέλο έχει πρακτικό νόημα μόνο όταν έχουμε πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων μέσα στο δίκτυο. Η επικοινωνία μεταξύ κόμβων και κέντρου ελέγχου αντικατοπτρίζει την λογική αυτή, καθώς στην πράξη δεν μας ενδιαφέρει να μπορούν να επικοινωνήσουν όλοι με όλους. Ένα αρκετά διαδεδομένο μοντέλο (στην πράξη) είναι οι κόμβοι του δικτύου να σχηματίζουν δέντρα με ρίζες τα κέντρα ελέγχου και να μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα μόνο με τους γείτονές τους και την ρίζα του δέντρου. Σε άλλες περιπτώσεις οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν με οποιονδήποτε κόμβο μέσα στο δίκτυο. Μας ενδιαφέρει οπωσδήποτε το κέντρο ελέγχου να μπορεί να επικοινωνήσει με όλους τους κόμβους του δικτύου, και

σε αρκετές περιπτώσεις με ένα υποσύνολο μόνο του δικτύου. Αυτό εξαρτάται πάντα από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής (βλ. επόμενη ενότητα).

1.4 Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων – Μια λύση προς αναζήτηση προβλήματος;

Τα τελευταία χρόνια έχουμε δει να προτείνεται μια πληθώρα από διαφορετικές προτάσεις για εφαρμογές που χρησιμοποιούν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτό το κύμα νέων προτάσεων βέβαια δεν είναι κάτι πρωτόγνωρο, καθώς κατά καιρούς έχει προταθεί αντίστοιχος όγκος εφαρμογών και για άλλες καινοτόμες ιδέες στο χώρο της πληροφορικής – συγκεκριμένα μόλις λίγα χρόνια πριν και για τα δίκτυα MANET είχαν αρχικά προταθεί αρκετές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, πολλές φορές αναφέρονται σενάρια για εφαρμογή των MANET σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (φυσικές καταστροφές, ατυχήματα, κ.α.), στρατιωτικές, σχετικές με οχήματα, κτλ. Το γεγονός είναι ότι παρά την πληθώρα τέτοιων προτάσεων, είναι σχετικά λίγες οι εφαρμογές που όντως έχουν υλοποιηθεί και χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις.

Αντίθετα, βλέπουμε να έχουν υλοποιηθεί πολλές διαφορετικές εφαρμογές βασιζόμενες σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έστω και σε μορφή πρωτότυπου και παρά το γεγονός ότι είναι μια αρκετά νέα κατηγορία δικτύων. Αυτό κατά τη γνώμη μας δείχνει ότι υπάρχει όντως εφαρμογή για τα δίκτυα αυτά, έστω κι αν ακόμα δεν έχει φανεί στον ορίζοντα το 'killer application' το οποίο θα οδηγήσει στο να γίνουν μέρος της καθημερινότητάς μας (όπως ήταν το αρχικό όραμα για τα δίκτυα αυτά). Μπορεί κάποιος επίσης να επιχειρηματολογήσει ότι σε πολλές περιπτώσεις οι εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί με δίκτυα αισθητήρων θα μπορούσαν να έχουν υλοποιηθεί με άλλους τρόπους. Γενικά, είναι επίσης λίγο ασαφή τα όρια μεταξύ του τί μπορεί να θεωρηθεί δίκτυο αισθητήρων και τί όχι.

Ένας βασικός λόγος για το ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών, είναι καταρχήν το πλήθος των διαφορετικών αισθητήρων οι οποίοι είναι σήμερα διαθέσιμοι, και οι οποίοι μπορούν να μετρήσουν φυσικά μεγέθη όπως:

- θερμότητα,
- ορατό και υπέρυθρο φως,
- υγρασία ατμόσφαιρας, εδάφους, επιφάνειας, φυτών,
- βαρομετρική πίεση,
- ανίχνευση αερίων (π.χ., μονοξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του άνθρακα, κ.α.),
- επιτάχυνση και δονήσεις,
- μαγνητικά πεδία,
- ανίχνευση κίνησης,
- ανίχνευση μικροοργανισμών, ζιζανίων, κτλ.,
- θόρυβος – ηχορύπανση.

Τα παραπάνω είναι τα πιο συνήθη φαινόμενα για τα οποία χρησιμοποιούμε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προκειμένου να τα καταγράψουμε, αλλά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πλήθος άλλων αισθητήρων σε πραγματικές εφαρμογές. Εκτός από τους αισθητήρες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλα και διατάξεις ελέγχου (actuators), προκειμένου να μπορούμε να παρέμβουμε στο περιβάλλον των αισθητήρων εκτός από το να παρατηρούμε. Με τον όρο διατάξεις ελέγχου εννοούμε ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, οι οποίες ελέγχουν τη λειτουργία άλλων συστημάτων, π.χ., μια μηχανική διάταξη-κινήτρια για να ελέγξουμε την κίνηση ενός μηχανικού βραχίονα, ή ένα διακόπτη για να ελέγξουμε την παροχή ρεύματος σε μια μονάδα εξαερισμού κάποιου κτιρίου.

Μέχρι σήμερα, τα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχουν οδηγήσει στην υλοποίηση αρκετών διαφορετικών εφαρμογών:

- *Σχετικές με το περιβάλλον:* κατά καιρούς έχουν προταθεί εφαρμογές από την παρακολούθηση της βιοποικιλότητας (37), έως παρακολούθηση της μόλυνσης της ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές (19) ή σε παγετώνες (4).
- *Σχετικές με φυσικές καταστροφές:* η ανίχνευση πυρκαγιών σε δασικές εκτάσεις είναι μια από τις συνήθεις προτάσεις για εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (25), ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις έγκαιρης ανίχνευσης πλημμυρών (5).
- *Στρατιωτικές – ασφάλεια:* από τις πρώτες εφαρμογές που προτάθηκαν ήταν οι στρατιωτικές, ένα συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ο εντοπισμός της θέσης ελεύθερων σκοπευτών σε ένα πεδίο μάχης (30). Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής είναι η χρήση αισθητήρων για την ανίχνευση ατόμων που προσπαθούν να περάσουν λαθραία κάποιον φράκτη (106).
- *Εξοικονόμηση ενέργειας:* τελευταία υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την εξοικονόμηση ενέργειας και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε κτίρια ελέγχοντας την κατανάλωση ρεύματος λόγω θέρμανσης, φωτισμού και κλιματισμού, παρέχοντας μια πιο οικονομική λύση σε σχέση με την εγκατάσταση μόνιμης υποδομής στα κτίρια αυτά. Έχουν μάλιστα αρχίσει να εμφανίζονται εμπορικά διαθέσιμες λύσεις στο συγκεκριμένο τομέα.
- *Παρακολούθηση αποθήκης:* τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταγράφουν τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη μεταφορά και αποθήκευση εμπορευμάτων δίνοντας μια ακριβή εικόνα στις εταιρίες διακίνησης και εμπορίας αγαθών, σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπως τα RFID (32).
- *Γεωργία και κτηνοτροφία:* χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής των δικτύων αισθητήρων είναι η χρήση σε καλλιέργειες για την λεπτομερή καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών για να προβλέψουμε την ποιότητα της σοδειάς καθώς και ανίχνευσης ακραίων συνθηκών για την αποφυγή καταστροφής της σοδειάς. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στάβλους για την καταγραφή των συνθηκών στις οποίες διαβιούν τα εκτρεφόμενα ζώα (104).
- *Υγεία:* άλλη μια εφαρμογή των δικτύων αυτών είναι στην παρακολούθηση ασθενών ή ηλικιωμένων – μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε συσκευές με αισθητήρες για τη θερμοκρασία και υγρασία σώματος, τους παλμούς της καρδιάς, κτλ., για να μπορεί το νοσηλευτικό προσωπικό να παρακολουθεί από απόσταση τους ανθρώπους αυτούς και να ειδοποιείται αυτόματα για κρίσιμα γεγονότα.

- **Κατασκευές – κτίρια:** τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή των καταπονήσεων που δέχονται μεγάλες κατασκευές και κτίρια και τη μελέτη της στατικότητάς τους. Συνήθως σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται επιταχυνσιόμετρα και αισθητήρες κλίσης (107).

Δίνουμε ακολούθως πιο αναλυτικά κάποιες εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Έξυπνα κτίρια: η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε 'έξυπνα κτίρια' (smart buildings) έχει ως σκοπούς την εξοικονόμηση ενέργειας, τον εντοπισμό έκτακτων καταστάσεων, την ανίχνευση κίνησης, την παρακολούθηση της θέσης ανθρώπων και εξοπλισμού. Η χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων λύνει αρκετά προβλήματα που έχουν οι ενσύρματες εγκαταστάσεις, και επιπλέον παρέχει ένα αρκετά γενικό και προγραμματίσιμο πλαίσιο για την ανάπτυξη εφαρμογών σε σχέση με πιο παραδοσιακές λύσεις όπως PLC κτλ. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορους αισθητήρες σε συνδυασμό για να υλοποιήσουμε κάποια σύνθετη λογική εξοικονόμησης ενέργειας, π.χ., ανίχνευση κίνησης και καταγραφή θερμότητας, υγρασίας για να αποφασίσουμε για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της θέρμανσης ή του φωτισμού σε κάποιο χώρο του κτιρίου, να ανιχνεύσουμε φωτιές ή διαρροή επικίνδυνων αερίων ή άλλων υλικών. Μπορούμε επίσης σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες να καταγράφουμε τη θέση προσωπικού ή εξοπλισμού μέσα στο κτίριο, ώστε να γνωρίζουμε που βρίσκονται ανά πάσα στιγμή ή σε κρίσιμες καταστάσεις να γνωρίζουμε αν κάποιος χώρος έχει εγκαταλειφθεί ή όχι από το προσωπικό.

Γεωργία ακριβείας: η γεωργία ακριβείας αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας κυρίως, αλλά και στην αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών στις οποίες εφαρμόζεται. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε αμπελώνες για την ακριβή καταγραφή των συνθηκών που επικρατούν στη διάρκεια της χρονιάς, έτσι ώστε να μπορεί να μπορεί να προβλεφθεί η ποιότητα της σοδειάς, αλλά και να αποφευχθούν καταστάσεις υποβάθμισης της ποιότητας (ακραίες καιρικές συνθήκες, ξηρασία εδάφους, ζιζάνια, κ.α.)(63). Παράδειγμα εμπορικά διαθέσιμου σχετικού προϊόντος είναι το (27).

Μέτρηση ατμοσφαιρικών συνθηκών - μόλυνσης σε αστικές περιοχές: Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσφέρουν μετρήσεις των συνθηκών που επικρατούν στην ατμόσφαιρα ή της μόλυνσης σε αστικές περιοχές με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και σε μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται ως σήμερα, με μικρότερο κόστος (αν και προς το παρόν είναι συγκρίσιμο). Το (19) προτείνει τη δημιουργία μιας μόνιμης υποδομής σε αστικό επίπεδο για την παρακολούθηση τέτοιων χαρακτηριστικών. Στο (47) προτείνεται η συμμετοχή κινητών σταθμών (με αυτοκίνητα) τα οποία ανάμεσα στα άλλα θα μετράνε τη μόλυνση στους δρόμους μιας μεγαλούπολης.

1.5 Συνεισφορά – οργάνωση της παρούσας διατριβής

Δίνουμε στη συνέχεια συνοπτικά τη συνεισφορά της παρούσας διατριβής, σύμφωνα με τη σειρά με την οποία παρουσιάζονται οι θεματικές ενότητές της.

Στο κεφάλαιο 2 κάνουμε μια αρκετά εκτενή ανασκόπηση της τρέχουσας έρευνας αιχμής στο χώρο του ενδιάμεσου λογισμικού (middleware) για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κάνουμε αρχικά μια συζήτηση πάνω στον ορισμό του ενδιάμεσου λογισμικού για τα δίκτυα αυτά, για τον απλό λόγο ότι επικρατεί μια ασάφεια στη σχετική βιβλιογραφία και έχει υπάρξει μεγάλη διαφοροποίηση στην πορεία της εξέλιξης των δικτύων αυτών. Ακόμα, συζητούμε τα θέματα σχεδιασμού που απαιτούνται της συγκεκριμένης κατηγορίας λογισμικού και τις κατηγοριοποιήσεις που χρησιμοποιούνται

συνήθως για το χαρακτηρισμό του. Επιπλέον, προτείνουμε μια νέα κατηγοριοποίηση για αυτή την κατηγορία λογισμικού, η οποία βασίζεται στη λειτουργικότητα που πρέπει να υλοποιεί και τις προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει ένα τέτοιο λογισμικό, τώρα και στο μέλλον, δίνοντας στην πορεία και αρκετά παραδείγματα για την κατηγοριοποίηση αυτή. Τέλος, κάνουμε μια σύντομη συζήτηση πάνω στις τάσεις που επικρατούν στο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα τελευταία χρόνια. Αυτή η ανασκόπηση συγκαταλέγεται στις λίγες αντίστοιχες συστηματικές προσπάθειες που έχουν γίνει μέχρι τώρα για την καταγραφή του διαθέσιμου λογισμικού που υπάρχει στον χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Είναι επίσης η μοναδική, σε τέτοια έκταση, που υπάρχει γραμμένη στα ελληνικά ως τώρα.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το πρωτόκολλο VTRP, το οποίο προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα του εντοπισμού και διάδοσης πολλαπλών γεγονότων (multiple event detection and propagation) στα δίκτυα έξυπνης σκόνης, μιας ειδικής κατηγορίας ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Το πρόβλημα αυτό συνίσταται στον εντοπισμό ενός πλήθους από καίρια συμβάντα μέσα στο δίκτυο και της διάδοσης των αναφορών για τα συμβάντα αυτά σε ένα κέντρο ελέγχου, με έναν αποδοτικό τρόπο όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στην ανοχή σε σφάλματα μετάδοσης. Το στοιχείο που διαφοροποιεί το VTRP σε σχέση με τα υπόλοιπα συναφή πρωτόκολλα είναι η μεταβολή της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων του δικτύου έξυπνης σκόνης, όταν αυτό επιβάλλεται από τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Αυτό συμβάλλει στην καλύτερη αντιμετώπιση, σε σχέση με τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν σταθερή εμβέλεια μετάδοσης, καταστάσεων όπως δίκτυα αισθητήρων με χαμηλή πυκνότητα κόμβων, καθώς και περιπτώσεις όπου εμπόδια δυσχεραίνουν την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ή κόμβοι οι οποίοι έχουν κλείσει τους πομποδέκτες τους. Επίσης, με την αύξηση της εμβέλειας μετάδοσης είναι πιθανόν να υπερπηδηθούν κόμβοι που αλλιώς θα είχαν πολύ μεγαλύτερο φόρτο επικοινωνίας γενικότερα και προώθησης μηνυμάτων ειδικότερα, όπως οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου. Για να δείξουμε τη συμπεριφορά του VTRP σε τέτοιες περιπτώσεις, γίνεται η σύγκρισή του μέσω εξομίωσης με το LTP ((17), (74)), ένα αντίστοιχο πρωτόκολλο. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση του VTRP οδηγεί έως και σε 100% βελτίωση, σε σχέση με το LTP.

Στο κεφάλαιο 4 προτείνουμε ένα συστηματικό και γενικό μοντέλο εμποδίων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της εξομίωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και παρέχουμε μια κατηγοριοποίηση κάποιων βασικών τύπων εμποδίων, βασιζόμενοι σε μερικά κριτήρια. Είναι πεποίθησή μας ότι η συμπερίληψη εμποδίων στην έρευνα σχετικά με τα δίκτυα αυτά που γίνεται μέσω εξομίωσης θα δώσει σε αρκετές περιπτώσεις ενδιαφέροντα αποτελέσματα και ότι η κατηγοριοποίηση των εμποδίων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εξομιώσεις είναι απαραίτητη. Επιπλέον, το μοντέλο μας εμπεριέχει εμπόδια ποικίλων σχημάτων τα οποία σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό μπορούν να αντιστοιχιστούν σε συνθήκες που συναντούμε σε πραγματικές εφαρμογές (και ιδιαίτερα σε εφαρμογές σε εξωτερικά περιβάλλοντα, π.χ. δάση). Τα διάφορα σχήματα που περιγράφουμε μπορούν να συνδυαστούν για να προκύψουν περισσότερο πολύπλοκα εμπόδια. Υλοποιήσαμε εν μέρει το μοντέλο που προτείνουμε στον εξομοιωτή δικτύων simDust. Με βάση την υλοποίηση αυτή, παρέχουμε κάποια πειραματικά αποτελέσματα από μερικά πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας, τα οποία είναι σε ένα βαθμό αντιπροσωπευτικά των βασικών κατηγοριών τέτοιων πρωτοκόλλων όπως αναφέρονται στη σχετική ενότητα της διατριβής. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε πειραματικές μελέτες και συγκρίσεις της απόδοσης των πρωτοκόλλων αυτών σε συνδυασμό με ένα πλήθος από διαφορετικές συνθήκες στο εξομοιούμενο δίκτυο. Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι τα εμπόδια μέσα στο δίκτυο ενδέχεται να έχουν καθοριστική επίδραση στην απόδοση τέτοιων πρωτοκόλλων, αλλά και ότι οι διαφορετικοί τύποι εμποδίων επιδρούν διαφορετικά πάνω στο δίκτυο.

Ακολουθώντας, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική του συστήματος WebDust, το οποίο προσπαθεί να αντιμετωπίσει κάποια από αυτά τα βασικά προβλήματα. Το σύστημα αυτό 'ενοποιεί' πολλά διακριτά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιώντας μια peer-to-peer λογική, και παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές έτσι ώστε ο προγραμματιστής ή ο απλός χρήστης να μην χρειάζεται να γνωρίζει πολλές λεπτομέρειες για την υλοποίηση που υπάρχει στα κατώτερα επίπεδα του συστήματος. Κάποια από τα ζητήματα που προσπαθεί να αντιμετωπίσει το σύστημά μας είναι τα ακόλουθα: α) διαχείριση της ετερογένειας που θα υπάρχει μέσα στο δίκτυο αισθητήρων, β) διαχείριση της μη συνεχούς σύνδεσης μεμονωμένων κόμβων ή και ολόκληρων δικτύων με τον υπόλοιπο κόσμο, γ) υποστήριξη δυνατότητας κλιμάκωσης της εφαρμογής σε ότι αφορά πλήθος κόμβων και δικτύων, δ) απλοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης μιας εφαρμογής για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το WebDust χρησιμοποιεί ένα 'υπόστρωμα' (ένα σύνολο από πρωτόκολλα και προδιαγραφές-διεπαφές) το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη και χρήση peer-to-peer υπηρεσιών. Η κεντρική ιδέα είναι ότι υπάρχει ένα πλήθος από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικό μέρος το καθένα και να είναι εντελώς διακριτά μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτό, μπορεί κάποιος ερευνητής που διαθέτει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων να γίνει μέλος ενός δικτύου ομοτίμων, στο οποίο θα συμμετέχουν και άλλοι χρήστες με τα δικά τους δίκτυα. Το σύστημα του δίνει τη δυνατότητα να δημοσιεύει τις μετρήσεις που παίρνει από το δίκτυό του, και αντίστοιχα να μπορεί να ενημερώνεται για τις μετρήσεις που παίρνουν οι υπόλοιποι χρήστες από τα δικά τους δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζουμε συνοπτικά μια πιλοτική εφαρμογή του συστήματος μας, που σχετίζεται με την ενεργειακή διαχείριση κτιριακών εγκαταστάσεων. Εγκαταστήσαμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο κτίριο του Ερευνητικού Ακαδημαϊκού Ινστιτούτου Υπολογιστών (E.A.I.T.Y.), καθώς και σε κτίρια του Πανεπιστημίου Πατρών. Χρησιμοποιώντας το σύστημά μας, καταγράψαμε τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στα συγκεκριμένα κτίρια. Περιγράφουμε αναλυτικά την εγκατάσταση και υλοποίηση του συστήματός μας.

Ολοκληρώνουμε το κείμενο της διατριβής στο κεφάλαιο 7, παραθέτοντας τα συμπεράσματά μας και δίνοντας τις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις που σκοπεύουμε να ακολουθήσουμε.

2

Ενδιάμεσο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Καθώς τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετά δημοφιλή στους ερευνητικούς κύκλους που σχετίζονται με την πληροφορική και το κόστος απόκτησής τους σταθερά μειώνεται, έγινε εφικτό για αρκετούς επιστήμονες να δημιουργήσουν τα δικά τους πειραματικά δίκτυα αυτού του τύπου. Αυτό είχε ως επακόλουθο να δημιουργηθούν αρκετά νέα περιβάλλοντα λογισμικού και να προταθούν ακόμα περισσότερα, ενώ ο αριθμός τους συνεχίζει να αυξάνεται. Αν και ακόμη δεν έχουμε φτάσει στο αρχικό όραμα των κόμβων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που ο καθένας θα κοστίζει λίγα ευρώ (βλ. εισαγωγή της διατριβής), η κατάσταση σε ότι αφορά τις δυνατότητες που μας παρέχουν τέτοια περιβάλλοντα λογισμικού έχει βελτιωθεί αισθητά σε σχέση με την κατάσταση που επικρατούσε πριν από λίγα μόλις χρόνια.

Αυτό το φαινόμενο συνέπεσε χρονικά με ένα πλήθος από προτάσεις για εφαρμογές που βασίζονται στη χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων, στο οποίο συνεχώς προστίθενται νέες. Μολονότι πολλές από αυτές τις προτάσεις έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, μοιράζονται επίσης αρκετά από αυτά, και είναι ακόμα ενδιαφέρον να δούμε πώς έχει αλλάξει το πεδίο εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων τα τελευταία χρόνια.

Γενικά, μπορούμε να κάνουμε ένα διαχωρισμό των προτάσεων για εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε τρία 'κύματα':

1. Οι πρώτες εφαρμογές που εμφανίστηκαν για τα δίκτυα αυτά, όπως ανίχνευση εισβολέων, παρακολούθηση χώρων, παρακολούθηση βιοποικιλότητας, κτλ.) θεωρούσαν ότι έχουμε ένα μεγάλο πλήθος από κόμβους, οι οποίοι ανήκαν σε ένα μοναδικό δίκτυο αισθητήρων. Η έμφαση δινόταν στην εύρεση αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για αποδοτική διαχείριση της ενέργειας, δρομολόγησης, εντοπισμού θέσης, κτλ. Στα πρώτα αυτά δίκτυα υπήρχε μικρή ετερογένεια υλικού και λογισμικού, καθώς οι κόμβοι είχαν πανομοιότυπη σύνθεση υλικού και εκτελούσαν το ίδιο λογισμικό.
2. Κατά τη διάρκεια του (πρόσφατου) δεύτερου κύματος από προτάσεις και υλοποιήσεις, προστέθηκαν δυνατότητες και υπηρεσίες στις ήδη υπάρχουσες, και σε ένα βαθμό άρχισε

η χρήση πολλαπλών δικτυακών κέντρων ελέγχου (αντί του μοναδικού που υπήρχε στο πρώτο κύμα), θέτοντας νέα δεδομένα για το μέγεθος του δικτύου και την ετερογένειά του, και επιτρέποντας την παράλληλη χρήση πολλαπλών δικτύων στα πλαίσια μιας εφαρμογής.

3. Το τρίτο κύμα εφαρμογών και προτάσεων, το οποίο έχει αρχίσει ήδη να λαμβάνει χώρα, σχετίζεται με εφαρμογές που περιλαμβάνουν πολλά δίκτυα αισθητήρων με λίγους κόμβους που διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου (internet-scale sensing). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες εφαρμογές, η διασύνδεση με άλλες εφαρμογές και δίκτυα έχει γίνει πολύ σημαντική.

Αυτή η εξέλιξη στις εφαρμογές για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, σε συνδυασμό με κάποιους άλλους σημαντικούς παράγοντες, όπως η έλλειψη καθιερωμένων προτύπων σε υλικό και λογισμικό, οδήγησε στα εξής αποτελέσματα:

- *Μεγάλο πλήθος από προγραμματιστικά πρότυπα:* ένα πλήθος από διαφορετικές προσεγγίσεις σε σχέση με το ενδιάμεσο λογισμικό και τα περιβάλλοντα διαχείρισης αυτών των δικτύων έχει προταθεί τα τελευταία χρόνια. Η επιλογή μεταξύ αυτών των διαφορετικών προσεγγίσεων συνεπάγεται ένα ζύγισμα μεταξύ ευκολίας χρήσης, δυνατοτήτων διαχείρισης του δικτύου (εκφραστικότητας της συγκεκριμένης προσέγγισης σε σχέση με τις δυνατότητες αυτές) και χρήσης των πόρων των κόμβων του δικτύου (ενέργεια, μνήμη, κτλ.).
- *Μεγάλο πλήθος από λειτουργίες και υπηρεσίες που παρέχει το λογισμικό:* σταδιακά, το πλήθος των υπηρεσιών που προσφέρουν οι εφαρμογές που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αυξήθηκε, λόγω των πρόσθετων απαιτήσεων κάθε νέας εφαρμογής. Πλέον, είναι κοινός τόπος να μιλάει κανείς για υποστήριξη ετερογένειας, ποιότητα υπηρεσιών, ασφάλεια, εμπιστοσύνη, τυποποιημένες διεπαφές (standardized interfaces), εκτός από την αποδοτική διαχείριση πόρων, ποσοστά επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων, κτλ. Επιπλέον, έρχονται στα ήδη υπάρχοντα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών να προστεθούν και οι διάφοροι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (actuators) και τα one-wire δίκτυα αισθητήρων για τη δημιουργία νέων εφαρμογών.
- *Διαφορετικά επίπεδα στα οποία λειτουργούν αυτά τα περιβάλλοντα λογισμικού:* οι πιο πρόσφατες εφαρμογές για τα δίκτυα αυτά ακολουθούν διαφορετική αρχιτεκτονική από αυτές που είχαν αρχικά προταθεί και εφαρμοστεί. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται πολυεπίπεδα δίκτυα, με κόμβους με διαφορετικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες, τα οποία λειτουργούν ιεραρχικά, και τα οποία μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου. Επομένως, το λογισμικό της εφαρμογής χρειάζεται να λειτουργεί αναγκαστικά σε διαφορετικά επίπεδα και όχι μόνο σε ένα.

Παρ' όλη την εξέλιξη στους παραπάνω τομείς, το εξής γεγονός παραμένει σε ισχύ: *είναι ακόμα δύσκολο να υλοποιήσει κανείς μια εφαρμογή με ασύρματα δίκτυα αισθητήρων*, από προγραμματιστικής άποψης, και να τα χρησιμοποιήσει με τελικό στόχο ένα εμπορικό προϊόν. Επομένως, υπάρχει σαφώς ακόμα πεδίο έρευνας, σε ότι αφορά την πρακτική τους εφαρμογή. Η πεποίθησή μας είναι ότι αυτό είναι και ένα από τα βασικότερα στοιχεία που θα καθορίσουν την επιτυχία ή μη των δικτύων αυτών γενικότερα.

Καθώς το πεδίο εφαρμογής των δικτύων αυτών εξακολουθεί να διευρύνεται, προκειμένου να γίνουν μέρος της καθημερινότητάς μας είναι απαραίτητο να συνειδητοποιήσουμε ένα ευρύτερο όραμα, το οποίο υπερβαίνει αυτό των επιμέρους εφαρμογών και υλοποιήσεων, που αποτελούν

2.1. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ; 19

κατά κάποιον τρόπο ξεχωριστές νησίδες, λόγω ασυμβατότητας μεταξύ τους και περιορισμένων εύρους. Είναι πεποίθησή μας ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα παίξουν ρόλο σε αυτό που πρόσφατα έχουμε ξεκινήσει να ονομάζουμε global computing. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτό το νέο επιστημονικό όραμα, το λογισμικό για τα δίκτυα αυτά πρέπει να προσαρμοστεί στις νέες απαιτήσεις του πεδίου αυτού. Ο 'καθολικός υπολογιστής' θα αποτελείται από υπολογιστικές υποδομές τοποθετημένες και διαθέσιμες σε παγκόσμια κλίμακα, οι οποίες θα προσφέρουν ενοποιημένες υπηρεσίες με ποικίλες λειτουργίες, με έμφαση στην παγκόσμια διαθεσιμότητα και την δυνατότητα προγραμματισμού τους. Η ενοποίηση αυτού του οράματος με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή με τη χρήση ως παραδείγματος ενός Sensor-oogle ή ενός Google Earth Sense. Μπορεί κάποιος να φανταστεί μια μηχανή αναζήτησης που δίνει αποτελέσματα αναζήτησης για φυσικά μεγέθη όπως θερμοκρασία ή υγρασία ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ή μετρήσεις της μόλυνσης της ατμόσφαιρας, που με τη σειρά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χτιστούν νέες υπηρεσίες πάνω τους.

Τα μελλοντικά συστήματα που θα υλοποιήσουν ένα τέτοιο όραμα θα μπορούσαν να είναι κατανεμημένες μηχανές αναζήτησης ή δίκτυα ομοτίμων βασισμένα σε υποδομές ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Προφανώς, από ένα επίπεδο και πάνω, φεύγουμε πια από το επίπεδο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και δεν μας ενδιαφέρει πια το υλικό που υπάρχει από κάτω, και προκύπτουν νέα προβλήματα που έχουν σχέση με την διαχείριση όλης αυτής της εξειδικευμένης πληροφορίας. Μια πρόσφατη συζήτηση ακριβώς πάνω στο θέμα αυτό περιέχεται στο (31).

Υπάρχουν κάποιες εργασίες που ασχολούνται με την επισκόπηση του ενδιάμεσου λογισμικού που είναι διαθέσιμο για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και συγκεκριμένα τα (46),(44),(86),(61). Μια αρκετά αναλυτική παρουσίαση αρκετών συστημάτων περιέχεται στο (82), ενώ μια πρόσφατη παρουσίαση των προγραμματιστικών μοντέλων που υπάρχουν για τα δίκτυα αυτά περιέχεται στο (97). Η παρούσα ενότητα λειτουργεί συμπληρωματικά ως προς τις δουλειές αυτές, παρέχοντας μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση για το συγκεκριμένο λογισμικό, μαζί με μια εκτενή αναφορά σε σχετικά περιβάλλοντα λογισμικού.

2.1 Τι είναι το ενδιάμεσο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων;

Προτού μπούμε σε περισσότερες λεπτομέρειες και περιγράψουμε τις κατηγορίες και το state-of-the-art για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, πρέπει να δώσουμε έναν ορισμό για το τι είναι το ενδιάμεσο λογισμικό στην περίπτωση των δικτύων αυτών. Αυτό δεν είναι απλό, καθώς όπως αναφέραμε προηγουμένως το πεδίο εφαρμογής των δικτύων αυτών αλλάζει και διευρύνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια.

Ο όρος ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) από μόνος του είναι αμφίσημος, εξαρτώμενος από το πεδίο στο αναφερόμαστε και το ερευνητικό υπόβαθρο αυτού που το χρησιμοποιεί. Στο χώρο των κατανεμημένων συστημάτων το ενδιάμεσο λογισμικό ορίζεται ως το λογισμικό που βρίσκεται ανάμεσα στο λειτουργικό σύστημα και την εφαρμογή που εκτελεί κάθε κόμβος ενός τέτοιου συστήματος. Γενικά, το ενδιάμεσο λογισμικό κρύβει τις εσωτερικές διεργασίες και την ετερογένεια του συστήματος, παρέχοντας στον προγραμματιστή διεπαφές, λογικές αφαιρέσεις και ένα σύνολο από υπηρεσίες, τα οποία εξαρτώνται από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το λογισμικό. Αναφορικά με τις αφαιρέσεις που παρέχονται από το ενδιάμεσο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στο (86) αναφέρεται ότι 'το επίπεδο του ενδιάμεσου λογισμικού είναι το αντίστοιχο του επιπέδου παρουσίασης στο μοντέλο OSI', αν και αυτή η περιγραφή δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις.

Ένας ενδιαφέρων ορισμός του ενδιάμεσου λογισμικού για τα δίκτυα αυτά περιέχεται στο (86),

όπου, εν συντομία, αναφέρεται ότι το ενδιάμεσο λογισμικό πρέπει να παρέχει υποστήριξη για την ανάπτυξη, διαχείριση, εγκατάσταση και εκτέλεση μιας εφαρμογής για τα δίκτυα αυτά. Επίσης, η εμβέλεια του ενδιάμεσου λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν περιορίζεται στο δίκτυο αισθητήρων αυτό καθ' αυτό, αλλά καλύπτει επίσης συσκευές και δίκτυα που είναι συνδεδεμένα με αυτό. Αυτή η πλευρά του ενδιάμεσου λογισμικού συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στις περισσότερες εργασίες που ανασκοπούν τη συγκεκριμένη κατηγορία λογισμικού. Επιπλέον, καθώς τα δίκτυα αυτά είναι ουσιαστικά συστήματα ειδικού σκοπού, θα μπορούσε κάποιος να διατυπώσει την άποψη ότι το σύνολο του λογισμικού που χρησιμοποιείται ως διεπαφή για τα συστήματα αυτά με άλλα συστήματα και δίκτυα (π.χ. Διαδίκτυο), μπορεί να χαρακτηριστεί ως ενδιάμεσο λογισμικό, αφού χρησιμοποιείται ως μέσο για την ανάπτυξη εφαρμογών για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Για το λόγο αυτό, καθώς συμφωνούμε με τον ορισμό αυτό, στην παρούσα ενότητα επιλέξαμε να συμπεριλάβουμε στην παρούσα ενότητα και λογισμικό το οποίο δεν εκτελείται καθόλου στο επίπεδο δικτύων αισθητήρων (εκτελείται π.χ. σε συσκευές που είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο αισθητήρων αλλά δεν ανήκουν σε αυτό), και χρησιμοποιείται π.χ., ως μέσο για την μετανάστευση διαδικασιών από ένα δίκτυο αισθητήρων σε ένα άλλο. Επίσης, όταν αναφερόμαστε σε συστήματα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, συμπεριλαμβάνουμε λογισμικό το οποίο δρα ως μέσο για την ανάπτυξη εφαρμογών, με top-down τρόπο, ανεξάρτητα από τη λειτουργικότητα που προσφέρει στον τελικό χρήστη.

2.2 Θέματα σχεδιασμού και απαιτήσεις για το ενδιάμεσο λογισμικό

Σχετικά με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις και άλλα θέματα που διέπουν το σχεδιασμό και την υλοποίηση του ενδιάμεσου λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάσταση είναι σχετικά ρευστή ακόμη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Γενικά, δεν υπάρχει μια ευρέως αποδεκτή προτυποποίηση στο υλικό που χρησιμοποιείται στα δίκτυα αυτά, ούτε στα σχετικά λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούνται. Επίσης, όπως προαναφέραμε, αλλάζει συνεχώς το πεδίο εφαρμογής των δικτύων αυτών. Από το αρχικό όραμα των δικτύων με δεκάδες χιλιάδες κόμβων το καθένα περάσαμε σταδιακά στα δίκτυα με πιο ρεαλιστικό πλήθος κόμβων (εκατοντάδες) και στα πολλά δίκτυα με λίγες δεκάδες κόμβων το καθένα. Προφανώς, αυτό σχετίζεται άμεσα με τις πρακτικές δυσκολίες που συναντά κανείς κατά τη διάρκεια δημιουργίας μιας εφαρμογής για τα δίκτυα αυτά.

Έχοντας αυτές τις παραμέτρους στο μυαλό μας, υπάρχουν παρ' όλα αυτά θέματα και απαιτήσεις σχεδιασμού που είναι κοινός τόπος για τις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές. Αυτό που αλλάζει είναι οι λογικές αφαιρέσεις που παρέχει στον προγραμματιστή το ενδιάμεσο λογισμικό, ως αποτέλεσμα της διαφορετικής προγραμματιστικής οπτικής που ακολουθεί το κάθε λογισμικό. Η αποδοτική διαχείριση πόρων είναι ο καθοριστικός παράγοντας στο λογισμικό για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – οι περιορισμοί που τίθενται στον προγραμματιστή σε ότι αφορά αποθέματα ενέργειας, υπολογιστικών δυνατοτήτων και επικοινωνίας πολύ απλά δεν μπορούν να αγνοηθούν. Ακόμα, η ανοχή σε σφάλματα και η προσαρμοστικότητα είναι θέματα που θεωρούνται σημαντικά κατά τον σχεδιασμό μιας τέτοιας εφαρμογής. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η data-centric λογική που χρησιμοποιείται στα δίκτυα αυτά, η οποία όμως έχει αρχίσει να χάνει τη σημασία της ως μοντέλο, αφού οι κόμβοι των δικτύων αυτών αποκτούν μεγαλύτερη σημασία, και δεν είναι πλέον ασήμαντοι κόμβοι μέσα σε ένα αχανές δίκτυο. Η συνάθροιση πληροφορίας (data aggregation) είναι ένα άλλος σημαντικός παράγοντας, ο οποίος επίσης έχει εν μέρει χάσει την αρχική σημασία του, καθώς υπάρχει μια τάση να μεταφέρεται η πολυπλοκότητα από τους

κόμβους του δικτύου στα ανώτερα επίπεδα του συστήματος (δηλαδή σε κόμβους με μεγαλύτερες επεξεργαστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες). Η ασφάλεια και η εμπιστοσύνη, η ετερογένεια και η δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability) είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες, η σημασία των οποίων αυξάνεται στις πρόσφατες εφαρμογές.

Επιλέξαμε κάποιες από αυτές τις απαιτήσεις ως βάση για μια κατηγοριοποίηση του λογισμικού για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η οποία παρουσιάζεται ακολούθως αναλυτικότερα.

2.3 Ταξινομίες ενδιάμεσου λογισμικού

Μια συνήθης κατηγοριοποίηση του λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η ακόλουθη:

- *βάσεις δεδομένων αισθητήρων (sensor databases),*
- *εικονικές μηχανές,*
- *agent-based προσεγγίσεις,*
- *εφαρμογές διαχείρισης δικτύου,*
- *λοιπές προσεγγίσεις.*

Η κεντρική ιδέα στις βάσεις δεδομένων αισθητήρων (π.χ., (21), (102)) είναι η παροχή μιας SQL-like διεπαφής στον προγραμματιστή, η οποία κάνει το δίκτυο αισθητήρων να φαίνεται σαν μια βάση δεδομένων, οπότε ο προγραμματιστής θα την χειριστεί ανάλογα. Στις εικονικές μηχανές (π.χ. (68)) παρέχονται προγραμματιστικές αφαιρέσεις που αντιπροσωπεύουν βασικές λειτουργίες ενός τέτοιου δικτύου (π.χ. λήψη μέτρησης από κάποιον αισθητήρα) στη μορφή μιας assembly-like γλώσσας. Οι χρήστες συνθέτουν scripts τα οποία διαδίδονται στους κόμβους του δικτύου και εκτελούνται στις εικονικές μηχανές που τρέχουν στον καθένα από τους κόμβους του. Στις agent-based προσεγγίσεις το λογισμικό παρέχει αφαιρέσεις για την εκτέλεση βασικών λειτουργιών, όπως και στις εικονικές μηχανές, αλλά εδώ χρησιμοποιούνται για να προγραμματιστούν mobile agents, οι οποίοι μπορούν να μεταπηδήσουν από κόμβο σε κόμβο μέσα στο δίκτυο αισθητήρων. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να υλοποιηθούν εφαρμογές στις οποίες απαιτείται να εκτελείται διαφορετικό λογισμικό στους κόμβους του δικτύου, ανάλογα με τους σκοπούς της εφαρμογής. Τέλος, οι εφαρμογές διαχείρισης δικτύου (π.χ., (69), (88)) παρέχουν στο χρήστη ένα πλήθος από δυνατότητες διαχείρισης των δυνατοτήτων των κόμβων του δικτύου και οπτικοποίησης μετρήσεων από το δίκτυο, σε συνδυασμό με ένα data logger ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο ελέγχου του δικτύου. Αυτού του τύπου οι εφαρμογές παρέχουν μικρή ή καθόλου ευελιξία στο χρήστη, παρέχοντας συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι κόμβοι του δικτύου δειγματοληπτούν το περιβάλλον με τους αισθητήρες τους σε συχνότητες καθορισμένες από το χρήστη, χρησιμοποιώντας κάποιο multihop πρωτόκολλο για τη διάδοση πληροφορίας μέσα στο δίκτυο, η οποία αποθηκεύεται σε κάποια βάση δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτά τα περιβάλλοντα συνδυάζονται με εργαλεία για τον over-the-air επαναπρογραμματισμό των κόμβων του δικτύου. Υπάρχουν και κάποιες άλλες προσεγγίσεις, όπως η χρήση publish-subscribe ή tuple-based λογικής, όμως δεν είναι τόσο δημοφιλείς όσο οι υπόλοιπες, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση, η οποία περιέχεται στο (41), χωρίζει το ενδιάμεσο λογισμικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε δύο κατηγορίες, βάσει του τρόπου με τον οποίο βοηθούν τον προγραμματιστή να υλοποιήσει μια εφαρμογή:

- *Προγραμματιστικές αφαιρέσεις*: παρέχουν στον προγραμματιστή λογικές αφαιρέσεις για να μπορεί να βλέπει τους κόμβους του δικτύου και μετρήσεις από τους αισθητήρες ως οντότητες, ή το δίκτυο ως ένα σύνολο.
- *Προγραμματιστική υποστήριξη*: παρέχουν μηχανισμούς και υπηρεσίες για να γίνεται συνολικά ο προγραμματισμός των δικτύων αυτών ευκολότερος, όπως υψηλού επιπέδου σύνθεση εφαρμογών, remote code update, remote debugging, κ.α.

Καθεμία από αυτές τις κλάσεις μπορεί να διαιρεθεί σε άλλες υποκλάσεις, ανάλογα με τη συγκεκριμένη προσέγγιση που ακολουθείται. Π.χ., οι προγραμματιστικές αφαιρέσεις ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του δικτύου σε καθολικό ή τοπικό επίπεδο, μπορούν να χαρακτηριστούν ως καθολικές ή τοπικές προγραμματιστικές αφαιρέσεις αντίστοιχα. Άλλα κριτήρια όπως δικτυοκεντρική συμπεριφορά ή για κάθε κόμβο ξεχωριστά οδηγούν σε περαιτέρω υποδιαιρέσεις.

Μια συγκριτική προσέγγιση παρουσιάζεται στο (44), όπου οι κατηγορίες της πρώτης κατηγοριοποίησης (εικονικές μηχανές, κτλ.) χαρακτηρίζονται συνολικά ως ενδιάμεσο λογισμικό προγραμματιστικής υποστήριξης. Αντίθετα, στο (46) οι εικονικές μηχανές δεν χαρακτηρίζονται ως ενδιάμεσο λογισμικό, με την αιτιολογία ότι οι υπάρχουσες υλοποιήσεις δεν προσφέρουν αρκετές λειτουργίες. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει συμφωνία σε ότι αφορά την κατηγοριοποίηση του λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζουν αυτές οι ταξινομήσεις είναι ότι δεν ασχολούνται με το λογισμικό που εκτελείται, μερικώς ή εντελώς, 'πάνω' από το δίκτυο αισθητήρων, δηλαδή όχι στους κόμβους του δικτύου αισθητήρων. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι εύκολο να τοποθετήσει κάποιος ένα περιβάλλον λογισμικού σε μια μόνο από τις παραπάνω κατηγορίες. Επίσης, αυτές οι κατηγοριοποιήσεις δεν καλύπτουν θέματα όπως το αν η αρχιτεκτονική που ακολουθείται είναι κατανεμημένη ή κεντροποιημένη, ιεραρχική ή επίπεδη, θέματα που είναι σημαντικά σε κατανεμημένα συστήματα. Επομένως, η άποψή μας είναι ότι αν και είναι σχετικά γενικές και επιτυχημένες, δεν είναι επαρκείς για να περιγράψουν την τρέχουσα κατάσταση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

2.4 Μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση

Σε αυτή την ενότητα, κάνουμε μια απόπειρα κατηγοριοποίησης των υπαρχόντων συστημάτων, βασισμένοι σε διαφορετικά κριτήρια από αυτά που συζητήσαμε προηγουμένως. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ξανά ότι τελευταία υπάρχει μια διαφοροποίηση και μια τάση, κατά τη γνώμη μας, προς τη χρήση πολλαπλών δικτύων αισθητήρων με λίγους κόμβους το καθένα σε σχέση με το αρχικό μοντέλο του μοναδικού δικτύου με πολλούς κόμβους. Διαλέξαμε λοιπόν κριτήρια που να ταιριάζουν με αυτή τη φιλοσοφία. Παραθέτουμε ένα πλήθος από αντιπροσωπευτικές πλατφόρμες λογισμικού για τα δίκτυα αυτά, ως παραδείγματα σε σχέση με το κάθε κριτήριο. Αν και αυτή η παρουσίαση δεν είναι εξαντλητική, πιστεύουμε ότι είναι ενδεικτική της τρέχουσας κατάστασης στο λογισμικό για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κάνουμε μόνο μια μικρή αναφορά στο κάθε περιβάλλον.

2.4.1 Σκοπός – Χαρακτηριστικά ανάπτυξης εφαρμογών και επεκτασιμότητα

Το ερώτημα εδώ είναι κατά πόσον το λογισμικό παρέχει ένα πλήθος από έτοιμες λειτουργίες μέσω των οποίων μπορεί κάποιος να υλοποιήσει μια εφαρμογή για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (δηλαδή έχει περιορισμένη επεκτασιμότητα), ή παρέχει ένα σύνολο από εργαλεία και API για να υλοποιηθεί αυτή η εφαρμογή και να δημιουργηθούν διεπαφές προς άλλες εφαρμογές. Σε πολλές περιπτώσεις ακολουθείται η μέση οδός.

Θα μπορούσε κάποιος να χαρακτηρίσει πλατφόρμες όπως το Moteworks (70) ως περιορισμένης επεκτασιμότητας, τα οποία παρέχουν ένα σύνολο από λειτουργίες οι οποίες δεν μπορούν να επεκταθούν ή η αρχιτεκτονική τους είναι tightly-coupled, ενώ αντίθετα πλατφόρμες όπως οι SenseWeb (87), P2PBridge (49), Hourglass (95), GSN (1) βρίσκονται στο αντίθετο άκρο, των εργαλείων ανάπτυξης εφαρμογών, παρέχοντας γενικές λειτουργίες που βοηθούν στην ανάπτυξη εφαρμογών με πολλά υπο-δίκτυα αισθητήρων, το καθένα με τον τρόπο του. Τα SNACK (40) και D-SN (18) παρέχουν στους χρήστες λογικές αφαιρέσεις - γλώσσες προγραμματισμού προκειμένου να συνθέσουν νέες συνιστώσες λογισμικού, ουσιαστικά ως μια εναλλακτική επιλογή στη γλώσσα προγραμματισμού nesC, η οποία είναι η ευρέως χρησιμοποιούμενη στο χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Εν συντομία, παρέχουν προγραμματιστικές αφαιρέσεις υψηλού επιπέδου, αλλά όχι τόσο αφαιρετικές όσο π.χ. το TinyDB. Οι περισσότερες από τις υπόλοιπες πλατφόρμες ακολουθούν μια μέση οδό, καθώς προσφέρουν κάποιο βαθμό ευελιξίας για την ανάπτυξη custom λύσεων. Υπάρχουν ακόμα περιβάλλοντα όπως τα Abstract Regions (105), Hood (93) και Neldas (29), τα οποία παρέχουν λογικές αφαιρέσεις των γειτονιών του δικτύου για να διευκολύνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ κόμβων και το διαμοιρασμό πληροφορίας μεταξύ τους. Το Kairos (41) παρέχει προγραμματιστικές αφαιρέσεις, αλλά σε ένα καθολικό δικτυακό επίπεδο (σε σχέση με κόμβους που δεν βρίσκονται απαραίτητα στην ίδια περιοχή του δικτύου), υλοποιημένο ως επέκταση της γλώσσας Python. Το Tenet (33) ορίζει μια γλώσσα διαχείρισης αισθητήρων, παρέχοντας μια σχετική βιβλιοθήκη και μια ιεραρχική αρχιτεκτονική, όπου πιο σύνθετες εργασίες εκτελούνται σε κάποιους master κόμβους, οι οποίοι έχουν περισσότερες δυνατότητες από τους υπόλοιπους.

Μια πλήρης λύση ενδιάμεσου λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει σε κάποιο βαθμό να παρέχει ένα περιβάλλον ανάπτυξης, απλοποιώντας την ανάπτυξη συγκεκριμένων εφαρμογών, χωρίς όμως να χάνει τη γενικότητα της χρήσης. Αυτό σημαίνει ότι οι διαχειριστές τέτοιων δικτύων θα μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις υπάρχουσες λύσεις σε λογισμικό, σε συνδυασμό με τις μελλοντικές ανάλογες πλατφόρμες. Προφανώς, υπάρχει παράλληλα έδαφος για τη δημιουργία λογισμικού που προσφέρει υπηρεσίες στον προγραμματιστή για συγκεκριμένα πεδία εφαρμογών.

2.4.2 Προσαρμοστικότητα – Διαχείριση δικτύου ή αυτο-οργάνωση

Το επόμενο ερώτημα που εξετάζουμε είναι το κατά πόσον το λογισμικό παρέχει χαρακτηριστικά αυτο-οργάνωσης ή αν πρέπει ο διαχειριστής του δικτύου να καθορίζει ο ίδιος τις παραμέτρους του δικτύου. Π.χ., αν οι κόμβοι του δικτύου οργανώνονται σε πολλαπλά ιεραρχικά επίπεδα και προσαρμόζονται στις συνθήκες του δικτύου, αν ο διαχειριστής του δικτύου έχει έλεγχο πάνω σε μια τέτοια διαδικασία, αν πρέπει ο ίδιος να καθορίσει τέτοιες παραμέτρους αντί να βασίζεται στο λογισμικό που τρέχουν οι κόμβοι, κ.ο.κ.

Οι περισσότερες υπάρχουσες λύσεις σε λογισμικό παρέχουν κάποια χαρακτηριστικά αυτο-οργάνωσης και διαχείρισης δικτύου. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρόκειται για συγχρονισμό ρολογιών (time synchronization) όπως στο TinyDB (102), για ιεραρχικά επίπεδα δρομολόγησης, αλλά γενικά ο χρήστης δεν έχει μεγάλο έλεγχο σε τέτοιες διαδικασίες. Στο άλλο άκρο, κάποιες εφαρμογές απαιτούν την παρέμβαση του χρήστη ακόμα και για τις πιο απλές λειτουργίες. Υπάρχει επίσης το ζήτημα αν οι διαδικασίες που υλοποιούν αυτή τη δυναμική συμπεριφορά, μπορούν να αντικατασταθούν οι ίδιες δυναμικά. Το περιβάλλον RUNES (20) αντιμετωπίζει τέτοια ζητήματα επιτρέποντας στις συνιστώσες λογισμικού να ανανεώνονται δυναμικά κατά την εκτέλεση του λογισμικού. Επίσης, το Imrala (66) επιτρέπει στο λογισμικό να ανανεώνεται δυναμικά και να προσαρμόζεται στις συνθήκες του δικτύου και αστοχίες.

Πιστεύουμε ότι ένα περιβάλλον ανάπτυξης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να παρέχει χαρακτηριστικά αυτο-οργάνωσης αλλά και ευελιξία στον τρόπο χρήσης τους, επιτρέποντας στον προγραμματιστή ή στο χρήστη να τα αλλάζουν ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

2.4.3 Ανοχή σε σφάλματα

Η ανοχή σφαλμάτων στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ορίζεται διαφορετικά ανάλογα με το επίπεδο δικτύου για το οποίο μιλάμε. Σε επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού ερμηνεύεται επίσης με διάφορους τρόπους. Π.χ., σχετικά με τις διαδικασίες δειγματοληψίας από τους αισθητήρες των κόμβων του δικτύου, τι γίνεται στην περίπτωση όπου ένας κόμβος αντιμετωπίσει κάποιο σφάλμα λογισμικού και επανεκκινήσει; Θα πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος όταν επανεκκινήσει αυτός ο κόμβος να πληροφορηθεί αν θα πρέπει να εκτελέσει κάποια συγκεκριμένη λειτουργία. Σαν παράδειγμα αντιμετώπισης αυτού του θέματος, στο TASK (8) οι γειτονικοί κόμβοι αποθηκεύουν την σχετική πληροφορία με τις λειτουργίες που πρέπει να εκτελούν οι ίδιοι και οι γείτονές τους και με τον τρόπο αυτό κάθε κόμβος μπορεί να μάθει τις λειτουργίες που έχει να εκτελέσει από τους γείτονές του.

Υπάρχει επίσης το ζήτημα των αστοχιών ορισμένων κόμβων, οι οποίοι μεταδίδουν λανθασμένες μετρήσεις. Υπάρχει ακόμα το ενδεχόμενο μεμονωμένοι αισθητήρες, και όχι ολόκληροι κόμβοι, να έχουν παρουσιάσει κάποια βλάβη και να αρχίσουν να μεταδίδουν λανθασμένη πληροφορία. Υπάρχει τρόπος να συγκρίνουμε τις τιμές αυτές με τις αντίστοιχες που παίρνουν γειτονικοί κόμβοι προκειμένου να εξετάσουμε την ορθότητά τους; Αυτή η πλευρά της ανοχής σφαλμάτων σχετίζεται στενά με το data aggregation, αλλά μπορεί επίσης να ελεγχθεί και με κεντροποιημένο τρόπο. Υπάρχει ακόμα η αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και εκτελέσιμου κώδικα μέσα στο δίκτυο αισθητήρων.

2.4.4 Επίπεδο που εκτελείται το λογισμικό

Αυτό το κριτήριο σχετίζεται με το κατά πόσον το λογισμικό εκτελείται μόνο πάνω από το επίπεδο του δικτύου αισθητήρων (δηλαδή ξεχωριστά από αυτό), ή μέρος του συστήματος εκτελείται και στους

κόμβους του δικτύου αισθητήρων. Οι περισσότερες από τις υπάρχουσες υλοποιήσεις παρέχουν λογισμικό που εκτελείται στους κόμβους του δικτύου. Στο άλλο άκρο, περιβάλλοντα όπως το SenseWeb και το GSN χρησιμοποιούν κάποιες αφαιρέσεις για να επιτρέψουν την επικοινωνία εφαρμογών και χρηστών με τα κέντρα ελέγχου των δικτύων αισθητήρων, επομένως δεν βασίζονται στη χρήση κάποιου συγκεκριμένου λογισμικού για τους κόμβους του δικτύου αισθητήρων (προφανώς αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να γραφτούν drivers που επικοινωνούν με το λογισμικό αυτό για την υλοποίηση κάποιας εφαρμογής).

Πιστεύουμε ότι και οι δύο αυτές προσεγγίσεις είναι χρήσιμες: από τη μια πρέπει οπωσδήποτε να υλοποιηθεί κάποια λειτουργικότητα στο επίπεδο δικτύου αισθητήρων προκειμένου να υπάρχουν οι υπηρεσίες που θα χρησιμοποιηθούν από τις εφαρμογές, και από την άλλη πρέπει να υπάρχουν οι αφαιρέσεις ώστε να μπορούν εφαρμογές από άλλα επίπεδα να μπορούν να επικοινωνήσουν με το δίκτυο αισθητήρων μέσω ορισμένων διεπαφών και αντίστοιχων οδηγιών. Το ζήτημα της επέκτασης ήδη υλοποιημένων λογισμικών και της ανάπτυξης περιβαλλόντων ανάπτυξης λογισμικού πάνω σε αυτό είναι προφανώς πολύ σημαντικό.

2.4.5 Πλήθος ξεχωριστών δικτύων αισθητήρων και ετερογένεια

Ακόμα ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το πλήθος των διακριτών δικτύων αισθητήρων που υποστηρίζουν τα συστήματα λογισμικού για τα δίκτυα αυτά, και κατά πόσον τα δίκτυα αυτά φιλοξενούν διαφορετικό υλικό (ετερογένεια), σε ότι αφορά τους κόμβους (αρχιτεκτονική, αισθητήρες, δυνατότητες, κτλ.) και συνιστώσες λογισμικού. Η πλειοψηφία των συστημάτων που εμφανίστηκαν τα τελευταία χρόνια, έχουν αγγίξει επιδερμικά τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Πολλαπλές πηγές πληροφορίας, οι οποίες πιθανώς θα ανήκουν σε εντελώς διακριτά δίκτυα αισθητήρων, θα είναι το κλειδί για την υλοποίηση μεγάλων σε μέγεθος δικτύων αισθητήρων. Παραδείγματα λογισμικού που ακολουθούν την προσέγγιση του μοναδικού δικτύου αισθητήρων είναι τα TinyDB, Cougar, Moteworks, Maté, Agilla (35). Αυτές οι πλατφόρμες είναι επίσης περιορισμένες στο θέμα της ετερογένειας, εν μέρει επειδή προϋποθέτουν τη χρήση συγκεκριμένου υλικού και λογισμικού, αν και κάποιες από αυτές παρέχουν κάποιες δυνατότητες για τον ορισμό χρήσης νέου υλικού. Το Impraia αντίθετα, υποθέτει τη χρήση μόνο συγκεκριμένου υλικού, δηλαδή χρησιμοποιεί τελείως ομογενή δίκτυα αισθητήρων.

Η διαχείριση πολλαπλών δικτύων αισθητήρων συζητείται στο (13), στο οποίο προτείνεται η χρήση εικονικών δικτύων αισθητήρων, τα οποία αποτελούνται από πλήθος δικτύων αλλά ο χρήστης τα διαχειρίζεται ως ένα ενιαίο δίκτυο. Επεκτείνοντας αυτή την ιδέα με μια peer-to-peer λογική, το Hourglass και το Global Sensor Networks βασίζονται πάνω σε απλά δίκτυα αισθητήρων και παρέχουν ένα περιβάλλον ώστε να τα διασυνδέσουν μεταξύ τους και να προσφέρουν ένα πλήθος από υπηρεσίες στο χρήστη (π.χ. buffered, delay-tolerant επικοινωνία). Η κεντρική ιδέα είναι η δυνατότητα διασύνδεσης δικτύων αισθητήρων και εφαρμογών του χρήστη ώστε αυτές να δημοσιεύουν στο δίκτυο ομοτίμων τοπικά streams από πληροφορίες-μετρήσεις από το δίκτυο αισθητήρων ή να ζητούν πρόσβαση σε πληροφορία που προέρχεται από άλλες αντίστοιχες εφαρμογές, κτλ., χωρίς οι χρήστες να ενδιαφέρονται για την υποδομή και το υλικό που βρίσκεται σε καθένα από τα δίκτυα αισθητήρων που μετέχουν σε αυτό το δίκτυο ομοτίμων. Τα SenseWeb, GSN, MetroSense (26), CarTel (47) υποστηρίζουν σε κάποιο βαθμό την ετερογένεια, τουλάχιστον θεωρητικά. Ένα άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα αρχιτεκτονικής που στοχεύει στη χρήση πολλαπλών δικτύων αισθητήρων είναι το OGC Sensor Web Enablement (79).

Μία από τις βασικές κατευθύνσεις για τα μελλοντικά δίκτυα αισθητήρων θα είναι η υποστήριξη πολλαπλών δικτύων με ένα τρόπο παρόμοιο με αυτόν που οι χρήστες συνδέονται σε ένα

δίκτυο διαμοιρασμού αρχείων, έτσι ώστε να απλοποιηθεί η όλη διαδικασία και να επεκταθεί η λειτουργικότητα που παρέχουν οι υπάρχουσες πλατφόρμες, υποστηρίζοντας μεγάλης κλίμακας δίκτυα.

2.4.6 Κινητικότητα κόμβων και κέντρων ελέγχου δικτύου

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το κατά πόσον το σύστημα υποστηρίζει την κινητικότητα κόμβων και κέντρων ελέγχου του δικτύου. Προς το παρόν, υπάρχουν λίγα συστήματα που υποστηρίζουν εξαρχής τέτοια χαρακτηριστικά. Η κινητικότητα αναμένεται να παίξει κυρίαρχο ρόλο στις μελλοντικές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθώς το πεδίο εφαρμογής τους συνεχίζει να διευρύνεται. Η αρχιτεκτονική και η υλοποίηση ενός συστήματος θα πρέπει να προσαρμοστούν κατάλληλα στην περίπτωση που υιοθετούν τέτοια χαρακτηριστικά. Η ιδέα χρήσης κινητών συσκευών, όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι οποίες θα λειτουργούν ως κινητοί αισθητήρες είναι ένα παράδειγμα στο οποίο έχει εφαρμογή η κινητικότητα κόμβων αλλά και κέντρων ελέγχου (οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν ανάλογα και στις δύο περιπτώσεις). Τα συστήματα CarTel (47), Skylark (59), MetroSense χρησιμοποιούν σε κάποιον βαθμό την ιδέα της χρήσης κινητών αισθητήρων. Το TinyLIME (23) είναι ειδικά σχεδιασμένο για την περίπτωση όπου έχουμε κινητικότητα των κέντρων ελέγχου του δικτύου, αν και ο σχεδιασμός του είναι αρκετά εξειδικευμένος καθώς χρησιμοποιεί single-hop επικοινωνία. Το Imrala επίσης, σε ένα βαθμό, βασίζει την αρχιτεκτονική του στην κινητικότητα. Υπάρχουν και περιπτώσεις delay-tolerant δικτύων, στις οποίες η κινητικότητα κόμβων παίζει βασικό ρόλο, αλλά δεν υπάρχει ανάγκη άμεσης διάδοσης της πληροφορίας.

Πιστεύουμε ότι η έλλειψη υποστήριξης για την κινητικότητα κόμβων και κέντρων ελέγχου περιορίζει το πεδίο εφαρμογής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Καθώς το πεδίο εφαρμογής των δικτύων αυτών διευρύνεται και προκειμένου να γίνουν μέρος της καθημερινής μας ζωής, πρέπει να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στην έρευνα γύρω από αυτά τα θέματα.

2.4.7 Διαφάνεια

Αν υπάρχουν ξεχωριστά υπο-δίκτυα αισθητήρων μέσα στο ίδιο σύστημα, τότε μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, και αν ναι, πώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους; Στην περίπτωση αυτή, σε επίπεδο συστήματος, ενδιαφερόμαστε για τη διαφάνεια όπως ορίζεται στο (22). Στις περισσότερες περιπτώσεις, ακόμα και αν συνυπάρχουν πολλά υπο-δίκτυα στην εφαρμογή, δεν υπάρχει άμεση ή έμμεση επικοινωνία μεταξύ τους και όλες οι μετρήσεις από τα διάφορα υποδίκτυα αποθηκεύονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων – αυτό συμβαίνει γιατί σε αρκετές περιπτώσεις δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο νόημα να υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Όταν όμως χρησιμοποιούμε κάποιο περιβάλλον που βασίζεται σε mobile agents, τότε έχει άμεση εφαρμογή.

Το IrisNet (38) ήταν μια πρώτη απόπειρα προς μια τέτοια κατεύθυνση, χρησιμοποιώντας μια κατανεμημένη βάση δεδομένων και επιτρέποντας πολλαπλά στιγμιότυπα. Τα Hourglass, GSN, Skylark, P2PBridge, επιτρέπουν την επικοινωνία διακριτών δικτύων αισθητήρων μέσω της χρήσης P2P υπηρεσιών. Επίσης, το Agimone (43) είναι ένα παράδειγμα χρήσης mobile agents στο οποίο επιτρέπει η μετανάστευση αυτών των agents από το ένα δίκτυο στο άλλο, επιτρέποντας σε λειτουργικότητα και πληροφορία να διακινούνται μεταξύ διαφορετικών δικτύων. Οραματιζόμαστε στο μέλλον τα διάφορα δίκτυα αισθητήρων να είναι διασυνδεδεμένα με τη χρήση ενός δικτύου ομοτίμων, ανταλλάσσοντας δεδομένα και πόρους (λειτουργικότητα).

2.4.8 Διεπαφή με τον υπόλοιπο κόσμο

Οι πρώτες, χρονολογικά, πλατφόρμες λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρείχαν διεπαφές στον τελικό χρήστη και τον υπόλοιπο κόσμο κυρίως μέσω κάποιου custom interface ή μέσω μιας ιστοσελίδας. Υπάρχει τα τελευταία χρόνια μια τάση προς την παροχή διεπαφών μέσω XML, RMI, κτλ., προκειμένου να ενσωματωθούν σε άλλες εφαρμογές, όπως στην περίπτωση των ArchRock (85) και Octavex (78). Παρόμοιες προσεγγίσεις υπάρχουν στα Sensilink (89), SynapSense OneClick (98) και Moteworks (70). Προφανώς, όταν μία βάση δεδομένων είναι μέρος του συστήματος, μπορεί κάποιος να ορίσει εύκολα διεπαφές για να μπορούν να την χρησιμοποιήσουν και άλλες εφαρμογές. Το ζήτημα εδώ είναι πόσο καλά δουλεύουν οι προσεγγίσεις αυτές για την περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα διεπαφής μέσω της χρήσης spreadsheets περιέχεται στο (71).

Μία διαφορετική προσέγγιση είναι η παροχή διεπαφών στον υπόλοιπο κόσμο μέσω της χρήσης P2P πρωτοκόλλων, όπως στις περιπτώσεις των Hourglass, P2PBridge, Skylark. Αυτό γίνεται συνήθως με την χρήση κάποιου P2P υποστρώματος, όπως η JXTA (53). Επίσης, υπάρχει η προσέγγιση της χρήσης των κέντρων ελέγχου των δικτύων αισθητήρων ως proxy, οι οποίοι κάνουν την αντιστοίχιση από τις εσωτερικές διευθύνσεις των κόμβων του δικτύου αισθητήρων σε διευθύνσεις IPv4 ή IPv6, όπως στις περιπτώσεις των ArchRock και TinyREST. Ένα πρόσφατο πρότυπο για την διασύνδεση μεταξύ IEEE 802.15.4 δικτύων και IPv6 δικτύων είναι το 6LoWPAN, για το οποίο παρέχεται υλοποιημένη μια στοιβα ανοικτού κώδικα στο (90).

Τέλος, πιστεύουμε ότι η χρήση διεπαφών όπως αυτές που παρέχονται από το Google Maps και το Google Earth, παρόμοια με την προσέγγιση που ακολουθεί το SenseWeb (87) και το SensorScope, είναι ένα σημαντικό βήμα για την υλοποίηση εφαρμογών μεγάλης κλίμακας για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

2.4.9 Ασφάλεια και εμπιστοσύνη

Με τους όρους ασφάλεια και εμπιστοσύνη αναφερόμαστε στην κωδικοποιημένη επικοινωνία και στην ταυτοποίηση πρόσβασης αντίστοιχα. Εκτός από την χρήση ορισμένων βιβλιοθηκών για κωδικοποιημένη επικοινωνία, π.χ. TinySec (55), σε επίπεδο κόμβων δικτύου αισθητήρων δεν υπάρχει ακόμη μεγάλος όγκος δουλειάς σε ότι αφορά την εμπιστοσύνη μεταξύ κόμβων και εφαρμογών. Π.χ., το πρόβλημα της αποδοχής ενός νέου κόμβου στο δίκτυο ως έμπιστου μέλους, σε πολλές εφαρμογές είναι μεγάλης σημασίας (π.χ., στρατιωτικές). Επιπλέον, δεν είναι ξεκάθαρος ο τρόπος με τον οποίο ένας κόμβος ή ένας χρήστης από ένα άλλο δίκτυο ή εφαρμογή μπορεί ή θα πρέπει να έχει πρόσβαση στις λειτουργίες ενός δικτύου αισθητήρων. Κάποια από αυτά τα ζητήματα ερευνώνται στην αρχιτεκτονική που προτείνεται από το OGC Sensor Web Enablement (79), στο οποίο οι τελικοί χρήστες έχουν δυνητικά διαφορετικούς ρόλους και δικαιώματα πρόσβασης και χρήσης της λειτουργικότητας του δικτύου αισθητήρων.

Πιστεύουμε ότι οι ερευνητές πρέπει να ασχοληθούν σοβαρά με τα συγκεκριμένα ζητήματα, καθώς η αναγκαιότητά τους γίνεται συνεχώς περισσότερο εμφανής, λόγω της δημιουργίας δικτύων αισθητήρων και εφαρμογών με πολλούς χρήστες αλλά και της διαφαινόμενης χρήσης τους σε εμπορικές εφαρμογές, όπου το ζήτημα της ασφάλειας είναι κριτικής σημασίας. Γενικά, η ασφάλεια και η εμπιστοσύνη θα πρέπει να είναι ανάμεσα στις προτεραιότητες κάθε εφαρμογής για δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας.

2.5 Συζήτηση – Τρέχουσες και μελλοντικές τάσεις

Τα τελευταία χρόνια έχουμε δει να ανακύπτουν ένα μεγάλο πλήθος από διαφορετικές πλατφόρμες υλικού, testbed και προτάσεις για εφαρμογές για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Μια πληθώρα από προσεγγίσεις, σχετικά με το ενδιάμεσο λογισμικό για τα δίκτυα αυτά, έχει προταθεί για να αντιμετωπιστούν οι διαφορετικές απαιτήσεις που προέκυψαν ως αποτέλεσμα όλης αυτής της δραστηριότητας. Καθώς το όραμα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συνεχώς διευρύνεται προς νέες κατευθύνσεις, καινούριες απαιτήσεις προστίθενται στις ήδη υπάρχουσες. Παρουσιάσαμε στην παρούσα ενότητα ένα σεβαστό πλήθος από τέτοιες προτάσεις λογισμικού, μαζί με μια απλή και αρκετά γενική κατηγοριοποίηση. Το συμπέρασμα από αυτή την παρουσίαση είναι ότι αν και υπάρχει ένα πλήθος από έτοιμο λογισμικό για να βοηθήσει τον προγραμματιστή, τα υπάρχοντα συστήματα δεν υποστηρίζουν όλες τις σχεδιαστικές απαιτήσεις που προκύπτουν από την εξελικτική πορεία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Σημαντικές παράμετροι που δεν έχουν ερευνηθεί επαρκώς είναι η υποστήριξη για ασφάλεια και εμπιστοσύνη, διαφάνεια, οντολογίες και κινητικότητα κόμβων.

Καθώς τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι, προς το παρόν, ένα πολύ ενεργό ερευνητικό πεδίο, έχουμε παρακολουθήσει μια πληθώρα από διαφορετικές προτάσεις και προσεγγίσεις, όμως δεν υπάρχουν ακόμα πολλά πρότυπα υλικού και λογισμικού. Σε ότι αφορά την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών δικτύων αισθητήρων, υπάρχουν προτάσεις όπως η SensorML (91) ή η ιδέα των εικονικών αισθητήρων (virtual sensors) που προτείνεται στο GSN (1), που προορίζονται για ακριβώς αυτό τον σκοπό.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα, πέρα από την εισαγωγή των στάνταρ και ότι συνεπάγεται αυτό για το υλικό και λογισμικό των δικτύων αυτών, είναι ότι με τον τρόπο θα διευκολυνθεί και η σύγκριση διαφορετικών λύσεων στο λογισμικό. Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου ερευνητική δουλειά στη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων σε θέματα όπως απόδοση, κλιμάκωση, κτλ. Ένα μεγάλο μέρος της έρευνας σε αυτό τον χώρο επικεντρώνεται στην περιγραφή παραμέτρων όπως το μέγεθος που καταλαμβάνουν στη μνήμη οι συνιστώσες λογισμικού, η επιτυχία παράδοσης μετρήσεων από το δίκτυο, κτλ. Αν και όλα αυτά είναι χρήσιμα, συνήθως δεν χρησιμοποιείται κάποιο ρεαλιστικό σενάριο για την παραγωγή όλων αυτών των αποτελεσμάτων για τέτοιες παραμέτρους. Ίσως η δημιουργία κάποιων benchmarks θα ήταν μία λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αν και υπάρχουν διαφορές στο πεδίο εφαρμογής, τις απαιτήσεις και την πολυπλοκότητα, υπάρχουν κάποιες κοινές παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Μια αξιολόγηση ενός πλήθους από προτάσεις λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βασισμένη πάνω σε παραμέτρους όπως ενεργειακή αποδοτικότητα, ανοικτότητα, κλιμάκωση, κίνηση, ετερογένεια, ευκολία χρήσης, περιέχεται στο (44).

Επίσης, όπως τονίζεται στο (46), υπάρχει και το θέμα της χρήσης αποτελεσμάτων γειτονικών ερευνητικών πεδίων, όπως το context-aware computing, τα οποία χρησιμοποιούν συγκεκριμένες οντολογίες για να αντιμετωπίσουν τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Κατά μία έννοια, αυτή είναι μια top-down προσέγγιση, σε αντίθεση με την bottom-up που ακολουθείται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου το λογισμικό καλείται να αντιμετωπίσει της ανάγκες κάποιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Ακόμα, υπάρχει και το θέμα της ενοποίησης του λογισμικού για τέτοια δίκτυα με ένα expert system, όπως έγινε στην περίπτωση του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου GoodFood (39).

Ένα τελευταίο ερώτημα, έχοντας δει τόσες διαφορετικές προσεγγίσεις, είναι αν υπάρχει ένα ελάχιστο σύνολο κοινών παραμέτρων σε όλες αυτές τις λύσεις. Αν μπορούσαμε να συμφωνήσουμε σε ένα τέτοιο σύνολο υπηρεσιών και χαρακτηριστικών, θα μπορούσε να απλοποιηθεί κατά πολύ η διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Μέρος II

Διάδοση Πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

3

Το πρωτόκολλο VTRP για τη διάδοση πληροφορίας σε δίκτυα έξυπνης σκόνης

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί αναλυτικά το πρωτόκολλο VTRP (Variable Transmission Range Protocol)(2), το οποίο προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα του εντοπισμού και διάδοσης πολλαπλών γεγονότων (multiple event detection and propagation) στα δίκτυα έξυπνης σκόνης, μια υποκατηγορία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Το πρόβλημα αυτό συνίσταται στον εντοπισμό ενός πλήθους από καίρια συμβάντα μέσα στο δίκτυο (π.χ. ανίχνευση πυρκαγιάς σε κάποιο δάσος) και της διάδοσης των αναφορών για τα συμβάντα αυτά σε ένα κέντρο ελέγχου, με έναν αποδοτικό τρόπο όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στην ανοχή σε σφάλματα μετάδοσης. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί γενίκευση του προβλήματος διάδοσης ενός μοναδικού συμβάντος, όπως αυτό παρουσιάζεται στα (16), (17), (9).

Το στοιχείο που διαφοροποιεί το VTRP σε σχέση με την πλειοψηφία των συναφών πρωτοκόλλων είναι η μεταβολή της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων του δικτύου αισθητήρων, όταν αυτό επιβάλλεται από τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Αυτό συμβάλλει στην καλύτερη αντιμετώπιση, σε σχέση με τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν σταθερή εμβέλεια μετάδοσης, καταστάσεων όπως :

- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με χαμηλή πυκνότητα κόμβων (βλέπε ενότητα 3.2). Σε αυτή την περίπτωση, τα πρωτόκολλα με σταθερή εμβέλεια μετάδοσης μπορεί να αποτύχουν να βρουν το επόμενο βήμα προς την κατεύθυνση του κέντρου ελέγχου. Με την αύξηση της εμβέλειας μετάδοσης μπορεί να βρεθούν κόμβοι για να προωθηθεί η πληροφορία προς το κέντρο ελέγχου.
- Περιπτώσεις όπου εμπόδια δυσχεραίνουν την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ή κόμβοι οι οποίοι έχουν κλείσει τους πομποδέκτες τους (επομένως δε συμμετέχουν στη διαδικασία της διάδοσης της πληροφορίας). Επίσης, με την αύξηση της εμβέλειας μετάδοσης είναι πιθανόν να υπερπηδηθούν κόμβοι που αλλιώς θα είχαν πολύ μεγαλύτερο φόρτο επικοινωνίας γενικότερα και προώθησης μηνυμάτων ειδικότερα, όπως οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου του δικτύου.

Για να δείξουμε τη συμπεριφορά του VTRP σε τέτοιες περιπτώσεις, γίνεται μέσω εξομώ-σης η σύγκρισή του με το LTP ((17), (74)), ένα αντίστοιχο πρωτόκολλο. Το LTP χρησιμοποιεί μια πιθανοτική λογική για την προώθηση της πληροφορίας μέσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, και η λειτουργία του στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην πυκνότητα του δικτύου. Μεγάλη πυκνότη-τα δικτύου σημαίνει μεγάλο ποσοστό επιτυχών μεταδόσεων πληροφορίας στο κέντρο ελέγχου. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση του VTRP οδηγεί έως και σε 100% βελτίωση, σε σχέση με το LTP. Επίσης, παρουσιάζονται και αναλύονται πειραματικά τέσσερις διαφορετικοί μηχανισμοί μεταβολής της εμβέλειας μετάδοσης.

3.1 Το πρόβλημα – Διάδοση πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Στην ενότητα αυτή μελετούμε ουσιαστικά ένα υποσύνολο του γενικού προβλήματος της δρο-μολόγησης της πληροφορίας μέσα σε ένα δίκτυο έξυπνης σκόνης, μια ειδική περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στα δίκτυα έξυπνης σκόνης (smart dust) θεωρούμε ότι έχουμε ένα πολύ μεγάλο αριθμό από κόμβους (της τάξης των χιλιάδων), οι οποίοι έχουν πολύ περιορισ-μένους υπολογιστικούς πόρους, και επομένως επιθυμούμε τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιή-σουμε να έχουν όσο το δυνατόν απλούστερη δομή. Δίνουμε με άλλα λόγια βάρος στην απλότητα και την αποδοτικότητα, θεωρώντας ότι το πλήθος των κόμβων σε ένα βαθμό αντισταθμίζει την έλλειψη δυνατοτήτων τους. Στο σημείο αυτό πρέπει να ξεκαθαρίσουμε ότι μελετούμε μόνο τη διάδοση της πληροφορίας από τους κόμβους του δικτύου προς ένα μοναδικό κέντρο ελέγχου, και όχι την αντίστροφη φορά (δηλαδή από το κέντρο ελέγχου του δικτύου προς τους κόμβους), όπως διατυπώνεται στην ακόλουθη ενότητα, και στη μελέτη μας δεν λαμβάνουμε υπόψη την περίπτωση που έχουμε πολλαπλά κέντρα ελέγχου.

3.1.1 Το πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών γεγονότων

Έστω ότι μέσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συμβαίνει ένα πλήθος από k γεγονότα $\mathcal{E}_i$, $i = 1, \dots, k$, όπου κάθε γεγονός γίνεται αντιληπτό από ένα κόμβο p_i ($i = 1, 2, \dots, K$). Τότε, το πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών γεγονότων $\mathcal{P}$ ορίζεται ως εξής:

‘Πώς μπορεί κάθε κόμβος του δικτύου p_i ($i = 1, 2, \dots, K$), συνεργαζόμενος με τους υπόλοιπους κόμβους να μεταδώσει την πληροφορία $info(\mathcal{E}_i)$ σχετικά με την εμφάνιση κάποιου γεγονότος $\mathcal{E}_i$ πίσω στο κέντρο ελέγχου $\mathcal{S}$ με έναν αποδοτικό τρόπο, σε ότι αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και τον χρόνο μετάδοσης από το p_i ως το $\mathcal{S}$;

Με άλλα λόγια, το πρόβλημα με το οποίο επιλέξαμε να ασχοληθούμε αφορά τη δρομολόγηση μηνυμάτων από τους κόμβους του δικτύου αισθητήρων προς ένα μοναδικό κέντρο ελέγχου, προκειμένου αυτό να ενημερωθεί για τα διάφορα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα μέσα στην περιοχή του δικτύου αισθητήρων.

Από τη μια μεριά σε περιπτώσεις δικτύων με μεγάλη πυκνότητα, στα οποία οι κόμβοι βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλο, η επικοινωνία σε μικρές αποστάσεις είναι πιο αποδοτική από την απευ-θείας μετάδοση στο $\mathcal{S}$ (η οποία λόγω απόστασης ενδέχεται να είναι και ανέφικτη). Επίσης, από τη μικρή εμβέλεια μετάδοσης μπορεί να ωφεληθεί η ασφάλεια των πληροφοριών που κινούνται μέσα στο δίκτυο. Η μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, από την άλλη μεριά, σχετίζεται με τη συμμετοχή μικρού πλήθους κόμβων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς της πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου. Ως αποτέλεσμα αυτού, υπάρχει λιγότερο overhead στους κόμβους και μείωση του συνολικού χρόνου μετάδοσης της πληροφορίας. Επίσης, με τον τρόπο αυτό μπορούν να

χρησιμοποιηθούν τεχνικές clustering για την οργάνωση του δικτύου και τη διάδοση της πληροφορίας. Παρ' όλα αυτά μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις αυξάνουν την πιθανότητα συγκρούσεων πάνω στο ασύρματο μέσο, εισάγοντας έμμεσα πρόσθετη πολυπλοκότητα.

Έχουν προταθεί πολλές λύσεις για το παραπάνω πρόβλημα τα τελευταία χρόνια, μπορούμε όμως γενικά να τις χωρίσουμε σε τρεις βασικές κατηγορίες: σε αυτές που χρησιμοποιούν ιεραρχικά επίπεδα για τη δρομολόγηση της πληροφορίας (δημιουργούν δηλαδή clusters και βάσει αυτών γίνεται η δρομολόγηση), σε αυτές που χρησιμοποιούν επίπεδη δρομολόγηση (flat routing), και αυτές που χρησιμοποιούν κάποιου είδους γεωγραφική πληροφορία (geographic routing). Γενικά, μπορούν να υπάρξουν πάρα πολλές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών γεγονότων $\mathcal{P}$, ανάλογα με τα κριτήρια που θεωρούνται κάθε φορά σημαντικά για τη λειτουργία του δικτύου. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο (54) για μια αρκετά πλήρη και αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Επιπλέον, υπάρχουν κάποιες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν στη διαδικασία σχεδίασης ενός πρωτοκόλλου για το πρόβλημα $\mathcal{P}$, και οι οποίες είναι οι εξής:

- (α) *Υπερπήδηση εμποδίων*: Μία τεχνική για την αντιμετώπιση εμποδίων είναι η αύξηση της εμβέλειας μετάδοσης.
- (β) *Ανοχή σε λάθη*: Η αυξημένη εμβέλεια μετάδοσης βοηθά στο να ανακαλύπτονται κόμβοι με τους οποίους δεν είναι δυνατόν να γίνει επικοινωνία χρησιμοποιώντας μια σταθερή μικρή εμβέλεια μετάδοσης. Η αδυναμία εύρεσης κόμβων για επικοινωνία και προώθηση της πληροφορίας μπορεί να οφείλεται σε ελαττωματικούς ή ανενεργούς κόμβους (που έχουν κλείσει τους πομποδέκτες τους δηλαδή) ή στην περίπτωση δικτύων με πολύ χαμηλή πυκνότητα.
- (γ) *Διάρκεια ζωής του δικτύου*: Με τον όρο αυτό εννοούμε τον συνολικό χρόνο στον οποίο οι κόμβοι του δικτύου είναι ενεργοί (active), αφού αυτό επηρεάζει την ικανότητα μεταφοράς της πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου. Όσο πιο μεγάλο πλήθος κόμβων εξαντλούν τα αποθέματα ενέργειάς τους, τόσο μειώνονται οι πιθανές δίοδοι προς το κέντρο ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει το πρόβλημα με τους κόμβους κοντά στην περιοχή του κέντρου ελέγχου, των οποίων η ενέργεια εξαντλείται με γρήγορους ρυθμούς, καθώς είναι επιφορτισμένοι με την διάδοση προς το κέντρο ελέγχου της πληροφορίας από το υπόλοιπο δίκτυο.

3.1.2 Σχετικό τεχνολογικό υπόβαθρο

Βασική ιδέα στο πρωτόκολλο που περιγράφουμε στο κεφάλαιο αυτό είναι ότι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να μεταβάλλουν την εμβέλεια μετάδοσής τους. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι αρκετοί από τους κόμβους για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που είναι εμπορικά διαθέσιμοι, χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα για ασύρματη επικοινωνία στα οποία η ισχύς που παρέχουν είναι προγραμματιζόμενη. Παράλληλα, το λογισμικό που χρησιμοποιείται σε τέτοιους κόμβους (όπως π.χ., το λειτουργικό σύστημα TinyOS) παρέχει συνήθως δυνατότητα έλεγχου της ισχύος μετάδοσης μέσω κάποιας διεπαφής λογισμικού. Στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται άμεσα από τέτοιου είδους ρυθμίσεις, καθιστώντας τον έλεγχο της εμβέλειας μετάδοσης ένα χρήσιμο εργαλείο για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους του δικτύου. Η μεταβολή της εμβέλειας μετάδοσης βέβαια δεν είναι γραμμική,

Τύπος κόμβου	Mica2	IRIS	TelosB	TinyNode
Radio Chip	CC1000	Atmel RF230	CC2420	XE1205
Συχνότητα	916MHz	2.4GHz	2.4GHz	869MHz
Data rate	76.8 – 4.8 kbps	250kbps	250kbps	76.8 – 4.8 kbps
Εμβέλεια μετάδοσης	160 – 300m	300m	80m	600 – 1800m

Πίνακας 3.1: Διάφοροι τύποι κόμβων και οι εμβέλειες μετάδοσής τους (στο ύπαιθρο και με line-of-sight).

δηλαδή διπλασιάζοντας την ισχύ που παρέχουμε δεν σημαίνει ότι έχουμε διπλασιασμό της εμβέλειας μετάδοσης. Επιπλέον, σε συνδυασμό με τις κατάλληλες κεραίες η εμβέλεια μετάδοσης μπορεί να κυμανθεί από μερικά εκατοστά έως αρκετές εκατοντάδες μέτρα (σε ανοιχτό χώρο).

Στον πίνακα 3.1 δίνουμε μερικά παραδείγματα εμπορικά διαθέσιμων κόμβων, στους οποίους μπορούμε να μεταβάλλουμε την εμβέλεια μετάδοσης και τα σχετικά μεγέθη.

3.1.3 Σχετική έρευνα αιχμής

Ο έλεγχος της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων του δικτύου είναι σημαντικός για διάφορους λόγους. Ενδεικτικά, μπορούμε να αναφέρουμε την διασφάλιση της συνεκτικότητας του δικτύου. Επιπλέον, είναι ένας τρόπος να ελέγξουμε την σωστή χρήση του ασύρματου μέσου, περιορίζοντας τις συγκρούσεις και βοηθώντας στην επαναχρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων. Ακόμα, με την ελαχιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης προφανώς μπορούμε να περιορίσουμε την κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους του δικτύου, μειώνοντας παράλληλα τις συγκρούσεις στο ασύρματο μέσο και επομένως, τις επαναμεταδόσεις (μειώνουμε δηλαδή έμμεσα τις μεταδόσεις μηνυμάτων).

Η εξασφάλιση της συνεκτικότητας του δικτύου είναι ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, και υπάρχει μεγάλος όγκος έρευνας στο συγκεκριμένο θέμα, και ένας τρόπος αντιμετώπισής του είναι ο έλεγχος της εμβέλειας μετάδοσης του ασύρματου δικτύου. Άλλωστε η επίτευξη του θεωρητικού ορίου στη χωρητικότητα ενός ασύρματου δικτύου, όπως έχουν αποδείξει οι Gupta και Kumar (42) επιτυγχάνεται μόνο με τη βέλτιστη χρήση της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα που έχει μελετηθεί αρκετά στην περίπτωση των κινητών αδόμητων δικτύων.

Σε ότι αφορά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, υπάρχουν κάποιες εργασίες πάνω στο θέμα, όπως οι (65), (52) και (96). Σε όλες αυτές τις εργασίες η βασική ιδέα πίσω από τους αλγόριθμους που προτείνονται είναι ότι οι κόμβοι του δικτύου παρατηρούν το πλήθος των γειτόνων τους, και αν υπερβαίνει κάποια σταθερά μειώνουν την εμβέλεια μετάδοσής τους, ενώ στην αντίθετη περίπτωση την αυξάνουν. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιείται παράλληλα κάποιο κριτήριο για την ποιότητα των συνδέσεων μέσα στο δίκτυο και να λαμβάνονται υπόψη μόνο οι κόμβοι με 'καλές' συνδέσεις. Στο (52) περιγράφονται πειράματα με πραγματικούς κόμβους χρησιμοποιώντας μια τέτοια λογική, στα οποία σημειώνεται έως και 37% μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση χωρίς τον έλεγχο της εμβέλειας μετάδοσης. Υπάρχουν βέβαια και πρωτόκολλα όπως το LEACH (45), στο οποίο χρησιμοποιούνται clusters (έχουμε δηλαδή κόμβους με αυξημένη εμβέλεια μετάδοσης για να επικοινωνούν απευθείας με το κέντρο ελέγχου), με τους κόμβους του δικτύου να εναλλάσσουν ρόλους μεταξύ cluster-heads και κανονικών κόμβων, για να γίνεται ισοκατανομή της κατανάλωσης ενέργειας.

Στο δικό μας πρωτόκολλο χρησιμοποιούμε μια ακόμα πιο μινιμαλιστική λογική σε σχέση με τα παραπάνω πρωτόκολλα, καθώς κάνουμε τη βασική υπόθεση ότι προορίζεται για δίκτυα έξυπνης σκόνης, και επιπλέον μας ενδιαφέρει μόνο η μετάδοση της πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου. Επίσης, χρησιμοποιεί σε ένα βαθμό γεωγραφική πληροφορία για να εντοπίσει στον κάθε κόμβο τους γείτονες που θεωρούνται 'καλοί' για τη διάδοση της πληροφορίας παραπέρα προς την κατεύθυνση του κέντρου ελέγχου του δικτύου (περισσότερες λεπτομέρειες στην ακόλουθη ενότητα του κειμένου). Προφανώς, το πρωτόκολλό μας μπορεί να συνδυαστεί με κάποιο άλλο αντίστοιχο, για να προκύψει μια πιο ολοκληρωμένη λύση στο πρόβλημα αυτό, π.χ. με ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί γεωγραφική πληροφορία.

3.2 Το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιείται στο VTRP

Για τις ανάγκες της παρουσίασης του VTRP, υποθέτουμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, του οποίου οι κόμβοι είναι σταθεροί (και όχι κινητοί), ο καθένας εκ των οποίων φέρει ένα πλήθος αισθητήρων μέσω των οποίων αντιλαμβάνονται συμβάντα σε ένα δισδιάστατο επίπεδο στο οποίο έχουν τοποθετηθεί με κάποιο τρόπο, και χαρακτηρίζονται από το ενεργειακό κόστος μετάδοσης και λήψης πληροφορίας.

Ορίζουμε ως *πυκνότητα* d (density) ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων τον λόγο του πλήθους n των κόμβων του δικτύου προς την επιφάνειά του. Επίσης, ονομάζουμε S ένα σημείο στην επιφάνεια που βρίσκεται το δίκτυο, το οποίο σημείο αντιπροσωπεύει το κέντρο ελέγχου στο οποίο θα πρέπει να προωθηθεί με κάποιο τρόπο η πληροφορία από κάθε κόμβο του δικτύου. Υποθέτουμε ακόμα, ότι υπάρχει μια φάση αρχικοποίησης, στη διάρκεια της οποίας οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους και μαθαίνουν την γενική κατεύθυνση (και όχι την ακριβή γεωγραφική θέση) προς την οποία βρίσκεται το σημείο S (υποθέτουμε ότι οι κόμβοι έχουν γενικά αίσθηση προσανατολισμού).

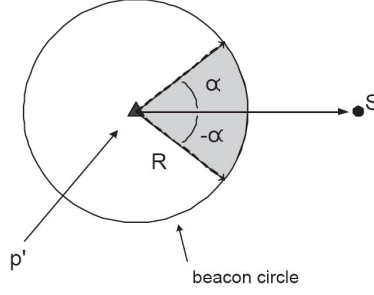
Οι κόμβοι του δικτύου είναι εφοδιασμένοι με πλήθος αισθητήρων για φως, υγρασία, θερμοκρασία, κτλ., και διαθέτουν δύο τρόπους μετάδοσης πληροφορίας:

1. *Broadcast beacon* μετάδοση, η οποία είναι κατευθυνόμενη μετάδοση γύρω από μια γωνία α , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, χρησιμοποιώντας κάποια ειδική για το σκοπό αυτό κεραία.
2. *Κατευθυνόμενη προς σημείο* (directed-to-a-point) μετάδοση, πιθανώς μέσω οπτικής επικοινωνίας (π.χ. laser), η οποία καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από τον Broadcast beacon τρόπο μετάδοσης.

Στο μοντέλο του VTRP, γίνεται η υπόθεση πως η εμβέλεια μετάδοσης R των κόμβων του δικτύου μπορεί να μεταβληθεί, όπως μπορεί να γίνει στα παραδείγματα κόμβων που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, στα οποία μπορούμε να μεταβάλλουμε μέσω του λογισμικού την τιμή της ισχύος του πομποδέκτη της συσκευής. Η γωνία α αντίθετα θεωρείται σταθερή και δε μπορεί να αλλάξει. Προφανώς, η γωνία α μπορεί να είναι ίση με π , οπότε δεν υπάρχει πλέον κατευθυνόμενη μετάδοση.

Κάθε κόμβος του δικτύου, καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του, μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις παρακάτω καταστάσεις:

- *Μετάδοση μηνύματος*
- *Λήψη μηνύματος*



Σχήμα 3.1: Κατευθυνόμενη μετάδοση γωνίας α

- Χρήση των αισθητήρων για έλεγχο του περιβάλλοντος πεδίου

Όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας ακολουθούμε το παρακάτω μοντέλο. Έστω E_{elec} η ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσει ο πομποδέκτης και ϵ_{amp} η ενέργεια για την ενίσχυση του σήματος προκειμένου να επιτευχθεί αξιοπρεπές signal-to-noise ratio (SNR). Επίσης, υποθέτουμε ότι η ενέργεια για τη μετάδοση σε απόσταση r αυξάνεται με το τετράγωνο της απόστασης (r^2). Επομένως, για τη μετάδοση ενός μηνύματος μεγέθους k -bit σε απόσταση r , η ενέργεια που καταναλώνεται είναι:

$$E_T(k, r) = E_{T-elec}(k) + E_{T-amp}(k, r)$$

$$E_T(k, r) = E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot r^2$$

ενώ για τη λήψη του ίδιου μηνύματος η ενέργεια που καταναλώνεται είναι:

$$E_R(k) = E_{R-elec}(k)$$

$$E_R(k, r) = E_{elec} \cdot k$$

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές πηγές κατανάλωσης ενέργειας:

1. E_T : ενέργεια για τη μετάδοση μηνύματος.
2. E_R : ενέργεια για τη λήψη μηνύματος.
3. E_{idle} : ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση όπου ο πομποδέκτης είναι κλειστός. Υποθέτουμε ότι η ενέργεια στην κατάσταση είναι σταθερή για κάποια μονάδα χρόνου και ισούται με E_{elec} .

Στα πειράματα που έγιναν μέσω εξομοίωσης και περιγράφονται στη σύγκριση μεταξύ VTRP και LTP, χρησιμοποιείται αυτό το μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας. Αν και απλό, το μοντέλο αυτό θεωρείται επαρκές για να περιγράψει εποπτικά τι συμβαίνει στην πράξη στον τομέα αυτό σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

3.3 Το πρωτόκολλο VTRP αναλυτικά

Στο VTRP (Varying Transmission Range Protocol) κάθε κόμβος p' του δικτύου ο οποίος έχει λάβει μια πληροφορία $info(\mathcal{E})$ από κάποιον άλλο κόμβο p (πιθανώς με τη συνδρομή ενδιάμεσων κόμβων), κάνει τα παρακάτω:

1. Φάση αναζήτησης (Search phase): Ο p' περιοδικά εκπέμπει ένα broadcast beacon σήμα για να ανακαλύψει άλλους κόμβους στην κατεύθυνση του $\mathcal{S}$ (οι οποίοι βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου). Δημιουργεί μια λίστα με τους κόμβους που ανακαλύπτει και από αυτήν διαλέγει κάποιο κόμβο p'' , ο οποίος είναι ο κόμβος που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο ελέγχου από τους κόμβους της λίστας (σχήμα 3.1).

2. Φάση μετάδοσης (Direct transmission phase): Ο p' στέλνει την πληροφορία $info(\mathcal{E})$ στον p'' και έπειτα στέλνει ένα μήνυμα επιτυχίας (success message) πίσω στον κόμβο από τον οποίο έλαβε την πληροφορία αυτή.

3. Φάση μεταβολής της εμβέλειας μετάδοσης (Transmission Range Variation phase): Αν η φάση αναζήτησης δε βρει κάποιον κόμβο πιο κοντά στο $\mathcal{S}$, ο κόμβος p' μπαίνει στην τρίτη φάση του πρωτοκόλλου. Κάθε κόμβος διατηρεί ένα μετρητή τ , ο οποίος αρχικοποιείται στην τιμή $\tau = 0$. Κάθε φορά που αποτυγχάνει η φάση αναζήτησης, η τιμή του τ αυξάνεται κατά 1. Ο κάθε κόμβος αποφασίζει αν θα μεταβάλλει την εμβέλεια μετάδοσής του $\mathcal{R}$ με βάση την τιμή του τ . Η συνάρτηση μεταβολής $\mathcal{F}(\tau)$ της εμβέλειας μετάδοσης μπορεί να είναι μια από τις εξής:

- (α) *Σταθερή αύξηση.* Αυτή η συνάρτηση μεταβολής είναι κατάλληλη για περιπτώσεις δικτύων με μεγάλο πλήθος κόμβων, στα οποία μικρή μεταβολή στην εμβέλεια μετάδοσης σημαίνει μεγάλη πιθανότητα εύρεσης νέων γειτονικών κόμβων. Η συνάρτηση μεταβολής $\mathcal{F}(\tau)$ ορίζεται ως εξής:

$$\mathcal{F}(\tau) = \mathcal{R}_{new} = \mathcal{R}_{init} + c \cdot \tau,$$

όπου c είναι μία σταθερά με μικρή τιμή, π.χ. $c = 10$.

Αυτή θεωρείται η βασική εκδοχή του VTRP και συμβολίζεται ως $VTRP_c$.

- (β) *Πολλαπλασιαστική αύξηση.* Με αυτή τη συνάρτηση μεταβολής, η εμβέλεια μετάδοσης αυξάνεται πιο δραστηρικά. Αυτή η παραλλαγή του πρωτοκόλλου συμβολίζεται ως $VTRP_m$. Η συνάρτηση μεταβολής $\mathcal{F}(\tau)$ ορίζεται ως εξής:

$$\mathcal{F}(\tau) = \mathcal{R}_{new} = \mathcal{R}_{init} + \mathcal{R}_{init} \cdot m \cdot \tau,$$

όπου m είναι μία σταθερά με μικρή τιμή, π.χ. $m = 3$.

Προφανώς, μεγαλύτερη αύξηση στην εμβέλεια μετάδοσης σημαίνει μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης νέων γειτόνων αλλά και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

- (γ) *Εκθετική αύξηση.* Η αύξηση στην εμβέλεια μετάδοσης εδώ γίνεται με εκθετικό τρόπο. Η συνάρτηση μεταβολής $\mathcal{F}(\tau)$ ορίζεται ως εξής:

$$\mathcal{F}(\tau) = \mathcal{R}_{new} = \mathcal{R}_{init} + \mathcal{R}_{init}^{\sqrt{(\tau+1)}}$$

Αυτή η παραλλαγή του πρωτοκόλλου συμβολίζεται ως $VTRP_p$.

- (δ) *Τυχαιοποιημένη αύξηση.* Όταν δεν υπάρχει εκ των προτέρων κάποια πληροφόρηση για την πυκνότητα του δικτύου, εφαρμόζουμε μια τυχαιοποιημένη αύξηση στην εμβέλεια μετάδοσης του κόμβου για να αντιμετωπίσουμε όλες τις πιθανές περιπτώσεις πυκνότητας δικτύου. Αυτή η παραλλαγή του πρωτοκόλλου συμβολίζεται ως $VTRP_r$ και η συνάρτηση μεταβολής $\mathcal{F}(\tau)$ ορίζεται ως εξής:

$$\mathcal{F}(0) = \mathcal{R}_{init}$$

$$\mathcal{F}(\tau) = \mathcal{F}(\tau - 1) + \mathcal{R}_{init} \cdot r ,$$

όπου $r \in (0, 8]$ είναι μία τυχαία μεταβλητή.

Ανά πάσα χρονική στιγμή μέσα στο δίκτυο αισθητήρων μπορούν να συμβαίνουν πολλά γεγονότα παράλληλα. Προκειμένου να αποφευχθούν επαναμεταδόσεις μηνυμάτων για το ίδιο γεγονός κτλ., κάθε γεγονός σχετίζεται με ένα event ID και κάθε κόμβος διατηρεί μια ποσότητα cache μνήμης. Τα event ID είναι μοναδικά για το κάθε γεγονός και αποτελούνται από το timestamp του γεγονότος (δηλαδή το πότε ανιχνεύθηκε από τον κόμβο το συγκεκριμένο γεγονός) και το ID του κόμβου ο οποίος ανίχνευσε το γεγονός. Κατά τη λήψη ενός μηνύματος, ο κόμβος ελέγχει την cache του για το αν έχει προωθήσει ξανά κάποιο μήνυμα για το ίδιο γεγονός. Αν όχι, ακολουθεί η καθιερωμένη διαδικασία προώθησης του μηνύματος. Αν έχει ήδη προωθηθεί, το μήνυμα αγνοείται. Το μέγεθος της cache μνήμης δεν χρειάζεται να είναι μεγάλο.

3.4 Το πρωτόκολλο LTP

Το πρωτόκολλο LTP (Local Target Protocol) είναι παρόμοιο με το VTRP, εκτός της τρίτης φάσης, δηλαδή της μεταβολής της εμβέλειας μετάδοσης. Όταν λοιπόν δε βρεθεί κανένας κόμβος στην κατεύθυνση του κέντρου ελέγχου, στο LTP χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός οπισθοδρόμησης. Έστω η πληροφορία $info(\mathcal{E})$, η οποία μεταδόθηκε από τον κόμβο p στον κόμβο p' . Ο p' γνωρίζει από ποιον κόμβο δέχθηκε το μήνυμα αυτό και έστω ότι στη συνέχεια δεν βρίσκει κάποιον κόμβο στην κατεύθυνση του $\mathcal{S}$. Τότε, η τρίτη φάση του LTP είναι η ακόλουθη.

Η φάση οπισθοδρόμησης στο LTP: Αν η φάση αναζήτησης αποτύχει για έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων, τότε ο κόμβος p' θα στείλει πίσω στον p ένα μήνυμα αποτυχίας προώθησης και την πληροφορία $info(\mathcal{E})$. Αν ο p είναι η πηγή της $info(\mathcal{E})$, θα αποφασίσει ότι δεν είναι δυνατή η προώθηση πληροφορίας προς το παρόν και θα διαγράψει την $info(\mathcal{E})$ από την cache μνήμη του.

3.5 Ο εξομοιωτής simDust – Μεταφορά του VTRP στον εξομοιωτή

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση μεταξύ VTRP και LTP, έγινε η σχετική υλοποίηση και επέκταση στον εξομοιωτή simDust. Ο συγκεκριμένος εξομοιωτής σχεδιάστηκε για τη διεξαγωγή εξομοιώσεων ασύρματων δικτύων αισθητήρων και ένας από τους βασικούς στόχους κατά τη σχεδιάσή του ήταν η ικανότητα να εξομοιώνονται δίκτυα με χιλιάδες κόμβων. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενοι εξομοιωτές όπως ο ns-2 δεν μπορούν να χειριστούν εύκολα τόσο μεγάλο πλήθος κόμβων. Η σχεδίαση και υλοποίηση του simDust αναλύεται στο (99). Η υλοποίηση του εξομοιωτή αυτού έγινε σε συνεργασία με τους συνάδελφους Θανάση Αντωνίου και Ιωάννη Χατζηγιαννάκη.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του simDust είναι τα εξής:

- 1. Λειτουργία σε γύρους:** Η λειτουργία του simDust γίνεται σε διακριτούς γύρους. Ένας γύρος αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα στο οποίο κάποιος κόμβος μπορεί να λάβει ή να μεταδώσει κάποιο μήνυμα και να το επεξεργαστεί.
- 2. MAC layer:** Δε γίνεται χρήση κάποιου συγκεκριμένου μοντέλου για το χειρισμό των συγκρούσεων στο επίπεδο MAC. Γίνεται η υπόθεση ότι με κάποιο τρόπο γίνεται η διευθέτησή τους.

3. Μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας: Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας είναι αυτό που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2. Θεωρούμε ότι οι κόμβοι μπορούν να μεταβούν περιοδικά σε μια κατάσταση αδράνειας (sleep) στην οποία ουσιαστικά δεν καταναλώνεται ενέργεια.

4. Μέγεθος μηνυμάτων: Γίνεται η υπόθεση ότι τα μηνύματα έχουν μέγεθος 1 KB συν 40 bit ως header (ένα πεδίο 32 bit για το ID του κόμβου και 8 bit για τον τύπο του μηνύματος).

Εκτός από την εξομοίωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων, ο simDust περιλαμβάνει και ένα εξίσου σημαντικό μέρος που αφορά στην οπτικοποίηση της λειτουργίας τέτοιων δικτύων. Μέσω της οπτικοποίησης αυτής, μπορεί κάποιος εύκολα και γρήγορα να δει πώς θα λειτουργήσει ένα δίκτυο αισθητήρων σε συνθήκες οι οποίες είναι παράμετροι εισόδου για το σύστημα. Στιγμιότυπα από το γραφικό περιβάλλον του εξομοιωτή περιέχονται στο σχήμα 3.2.

Ως πλατφόρμα υλοποίησης επιλέχθηκε το λειτουργικό σύστημα Linux και η αλγοριθμική βιβλιοθήκη LEDA. Η LEDA παρέχει πλήθος αλγορίθμων και δομών δεδομένων με απλό και ενοποιημένο interface, κάνοντας εύκολη τη χρήση και κατανόησή τους, αφετέρου η υλοποίηση τους έχει γίνει με εξαιρετικά αποδοτικό τρόπο. Έτσι, δίνει τη δυνατότητα να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί μια εφαρμογή που θα έχει εγγυημένα καλή απόδοση. Καθώς η LEDA είναι γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού C++, η C++ ήταν η προφανής επιλογή για την υλοποίηση του εξομοιωτή. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των βασικών κλάσεων που χρησιμοποιούνται στον εξομοιωτή.

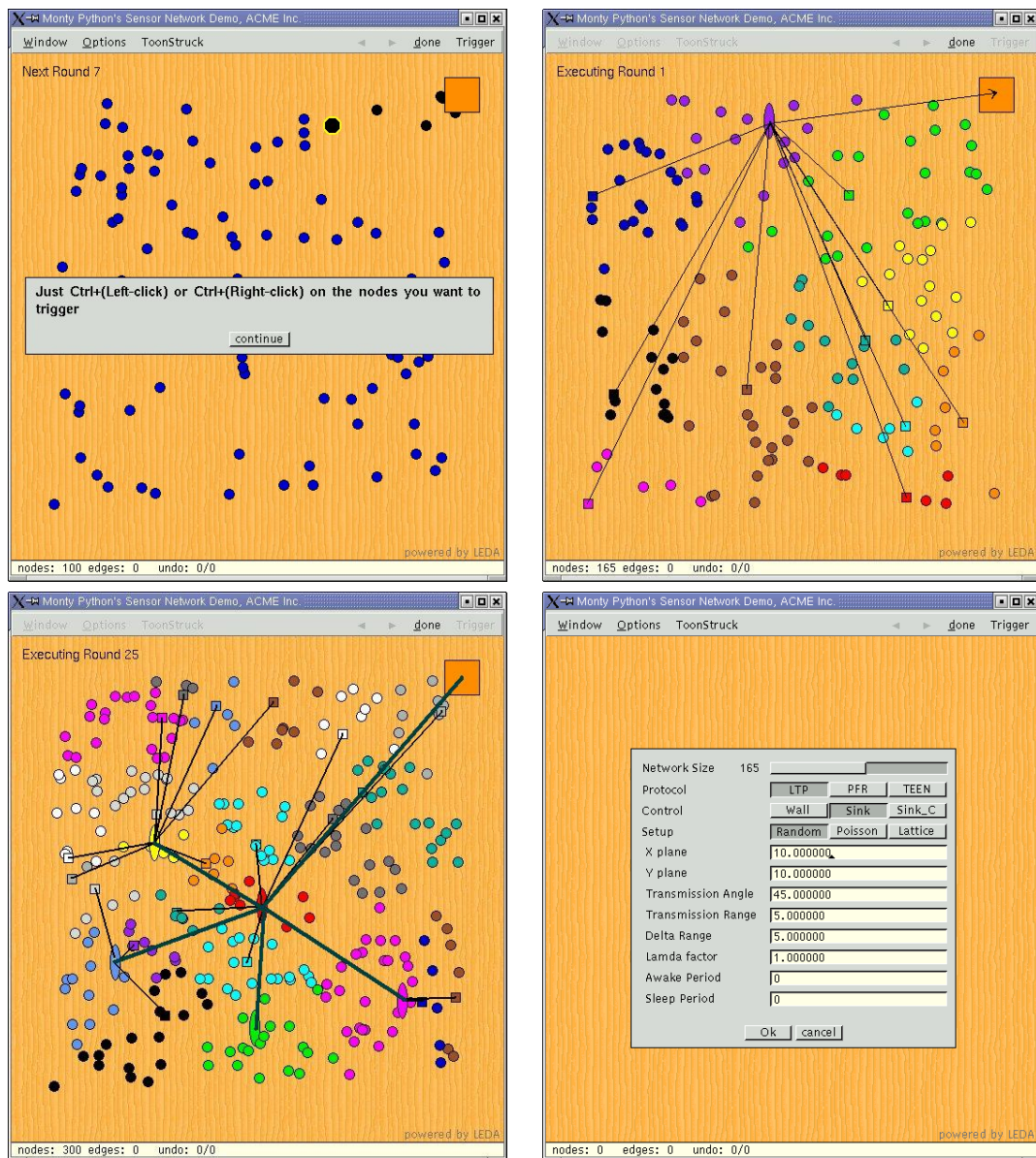
Η κλάση Experiment είναι ουσιαστικά μία εκτέλεση του εξομοιωτή. Με τη δημιουργία του αντικειμένου αυτού και με την κλήση της συνάρτησης μέλους του execute, ουσιαστικά αρχίζει η λειτουργία του симулятор, γίνεται αρχικοποίηση του δικτύου, κτλ. Χρησιμοποιείται ένας βρόχος που επαναλαμβάνεται για όσους γύρους καθορίσουμε εμείς ή όταν φτάσουν τα μηνύματα που έχουμε δημιουργήσει σε διάφορους κόμβους στο κέντρο ελέγχου.

Η κλάση Execution είναι μια αρκετά αφαιρετική αναπαράσταση του πεδίου που βρίσκεται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Περιέχει πληροφορίες όπως οι διαστάσεις του πεδίου, δείκτες στους κόμβους που βρίσκονται στο πεδίο, τον αριθμό του γύρου στον οποίο βρισκόμαστε ανά πάση στιγμή, μια λίστα με τα γεγονότα που συμβαίνουν στον κάθε γύρο και θα εκτελεστούν στον τρέχοντα γύρο. Η κλάση αυτή είναι βασική για τη λειτουργία του δικτύου, αφού κατά την δημιουργία της αρχικοποιείται το δίκτυο, δηλαδή ανάλογα με την κατανομή που έχουμε δώσει ως παράμετρο τοποθετούνται οι κόμβοι στο δίκτυο και έπειτα δημιουργείται ένα γράφημα με αυτούς τους κόμβους. Επιπλέον, κάθε κόμβος χτίζει μια λίστα με τους γείτονές του, δηλαδή τους κόμβους που βρίσκονται σε μια ορισμένη απόσταση από αυτόν (ακτίνα μετάδοσης).

Η κλάση Network είναι μια αφαίρεση που χρησιμοποιούμε για να αναπαραστήσουμε το δίκτυο μεταξύ των κόμβων. Όταν λέμε δίκτυο εννοούμε τις δυνατότητες επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και όχι χαρακτηριστικά του στυλ διαστάσεις, που βρίσκονται στην τάξη Execution ή στην τάξη Particle. Έτσι, εδώ υπάρχουν συναρτήσεις που διεκπεραιώνουν την επικοινωνία μεταξύ κόμβων, όπως αποστολή μηνύματος σε γείτονα, broadcast σε όλους τους γείτονες, παραλαβή μηνύματος, κτλ.

Η κλάση Particle αντιπροσωπεύει στην ουσία έναν κόμβο του δικτύου αισθητήρων. Η κλάση αυτή κληρονομεί από την τάξη point της LEDA, η οποία συμβολίζει ένα σημείο στο επίπεδο με συντεταγμένες (x, y) . Προσθέτουμε πληροφορία όπως το ID του κόμβου, λίστα με γείτονες, διαθέσιμη ενέργεια, μεταβλητές που δείχνουν την κατάσταση του κόμβου (αν περιμένει να δεχθεί μήνυμα, αν είναι ενεργός), κτλ. Η κλάση αυτή είναι εικονική καθώς είναι πολύ γενική και χρησιμοποιείται για την παραγωγή τάξεων κόμβων που έχουν ειδικό ρόλο, όπως ο κόμβος-σταθμός ελέγχου του δικτύου και οι κόμβοι για καθένα από τα πρωτόκολλα που εξομοιώνουμε, οι οποίοι έχουν τα εξειδικευμένα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για το κάθε πρωτόκολλο.

Η κλάση info χρησιμοποιείται στα αντικείμενα της τάξης Message, η οποία αναλύεται αμέσως μετά. Ουσιαστικά αναπαριστά την πληροφορία που μεταφέρει ένα υποτιθέμενο μήνυμα και είναι



Σχήμα 3.2: Στιγμιότυπα της γραφικής διεπαφής του εξομοιωτή και της λειτουργίας του

απαραίτητη για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει το ID του κόμβου που δημιούργησε την πληροφορία αυτή, τις συντεταγμένες του, τη χρονική στιγμή κατά την οποία δημιουργήθηκε και άλλες πληροφορίες που έχουν σχέση με το κάθε πρωτόκολλο, όπως αριθμός hops στο δίκτυο από τα οποία έχει περάσει μέχρι στιγμής, αριθμός backtracks, κ.α.

Η κλάση Message αναπαριστά τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ κόμβων. Όταν δημιουργείται ένα μήνυμα του αναθέτουμε κάποια πληροφορία και από κει και πέρα το μήνυμα μπορεί να είναι διαφόρων τύπων και να εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς ανάλογα με το πρωτόκολλο που εξετάζεται κάθε φορά. Μπορεί να είναι π.χ ένα μήνυμα για να ενημερώνει τους γείτονες ότι θέλει να στείλει ένα μήνυμα προς το κέντρο ελέγχου, με τη σειρά τους να απαντούν ότι είναι πρόθυμοι να το μεταφέρουν με ένα άλλου τύπου μήνυμα, κ.ο.κ.

Η κλάση Event χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα γεγονός, το οποίο συμβαίνει σε κάποιο κόμβο του δικτύου αισθητήρων σε κάποια χρονική στιγμή και επηρεάζει τη λειτουργία του. Αυτό το γεγονός μπορεί να περιλαμβάνει το triggering ενός κόμβου, που προσομοιώνει την κατάσταση που έχουμε κάποιο συμβάν στο πεδίο που επιβάλλει μέτρηση της αντίστοιχης ποσότητας από τον κόμβο και αποστολή μηνύματος προς το base station, ή λήψη μηνύματος από κάποιο γειτονικό κόμβο.

Παραθέτουμε στη συνέχεια κάποια αποσπάσματα από την υλοποίηση του πρωτοκόλλου στον εξομοιωτή, για να δώσουμε μια εικόνα για τον τρόπο υλοποίησης του πρωτοκόλλου. Βασική προσθήκη είναι ο ορισμός μιας κλάσης VTRPParticle, η οποία είναι μια επέκταση του γενικού κόμβου που υπάρχει στον εξομοιωτή, προσθέτοντας την λειτουργικότητα που απαιτείται για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο.

```
class VTRPParticle : public Particle {

public:

    VTRPParticle(long id, double x, double y,
                 double maxRange,
                 long periodA, long periodS,
                 long totParticles);

    VTRPParticle();

    void doSetup(point* pWall);

protected:
    bool      m_searched, m_waited;
    particleList* m_neighbours_sorted;
    double      m_tau;

    void doExecute();

    // Functions needed by doExecute
    Particle* SenseNeighbours(Cache_Info_Obj *);

    void doForward(Particle *p, Cache_Info_Obj *);

    void handleSenseEvent(Event* thisEvent);
    void handleMessageEvent(Event* thisEvent);
```



```
// Functions needed by Event Handlers
void doReceiveInfo(Message *m, double EventTimeStamp);
void doReceiveSuccess(Message *m);
void doReceiveBacktrack(Message *m, double EventTimeStamp);
void doReceiveSearch(Message *m);
void doReceiveSearchReply(Message *m);

void insertionSort(Particle* target, point* wall);
virtual double calculateRangeChangeAndSetRange() = 0;

};
```

Βασική προσθήκη είναι η επέκταση της μεθόδου doSetup, με την οποία γίνεται η αρχικοποίηση του κάθε κόμβου.

```
void VTRPParticle::doSetup(point* pWall)
{
    m_neighbours_sorted->clear();

    // Sort neighbours based on distance from Wall
    list_item item;

    forall_items(item, *(m_neighbours_angle)) {
        Particle *p = m_neighbours_angle->inf(item);

        insertionSort(p, pWall);
    }

    ...

    // Do basic stuff
    Particle::doSetup();
}
```

Η μέθοδος doExecute χρησιμοποιείται σε κάθε γύρο για να εκτελέσει το κύριο μέρος του πρωτοκόλλου.

```
void VTRPParticle::doExecute()
{
    // If we do not hold any event-info
    if (!exist_NewInfos())
        return;

    if (this->isNextToWall())
    {
        // LOOP ON ALL NEW UNSENT INFOS.
        Cache_Info_Obj *newInfoObj;
        while(exist_NewInfos())
        {
            newInfoObj = getFirstNewInfoObj();
            doForward(nil, newInfoObj);
        }
        return;
    }

    if (m_searched != true) {
        // Search for Neighbours
        Message* ms = new Message(MESSAGE_LTP_LS1, this);
        broadcastAngle(ms);
        delete (ms);
    }
}
```

```

        m_searched = true;
        m_waited = false;
    }
    else
    {
        if (m_waited != true) {
            // Wait an extra round to get all replies
            m_waited = true;
        }
        else {
            // LOOP ON ALL NEW UNSENT INFOS.
            Cache_Info_Obj *newInfoObj;

            while(exist_NewInfos())
            {
                newInfoObj = getFirstNewInfoObj();
                // Select next target
                Particle *next = SenseNeighbours(newInfoObj);

                // Check if we have found any!
                if (next == nil)
                    // Failure ! - Increase range
                {
                    m_searched = false;

                    m_tau++; // o counter gia to poses fores aykshsame to range

                    calculateRangeChangeAndSetRange();
                    break;
                }
                else {
                    // Success ! - Pass message to next

                    doForward(next,newInfoObj);
                }
            }
        }
    }
}

```

Η μέθοδος SenseNeighbours επιστρέφει τον γείτονα που θα χρησιμοποιηθεί για την προώθηση της πληροφορίας.

```

Particle* VTRPParticle::SenseNeighbours(Cache_Info_Obj *newInfoObj)
{
    Particle *nextP = nil;

    list_item item;
    forall_items(item, *(m_neighbours_sorted)) {
        Particle *p = m_neighbours_sorted->inf(item);
        // AN to p einai Awake kai AN den to breis (to p) mesa sthn blacklist
        // tote NextP = p
        if ( (p->isAwake())

```

```

        && (!newInfoObj->existsInBlackList(p->getID())) {
            nextP = p;
            break;
        }
    }
    return nextP;
}

```

Η μέθοδος doForward υλοποιεί την προώθηση της πληροφορίας προς την κατεύθυνση του κέντρου ελέγχου.

```

void VTRPParticle::doForward(Particle *p, Cache_Info_Obj *newInfoObj)
{
    // Transmit info(E) to next particle
    Info* infoE = newInfoObj->getInfo();
    Message* minfo = new Message(MESSAGE_INFO, this, new Info(infoE));

    transmitAngle(minfo, p);

    delete(minfo);

    // Add host to blacklist (so that we do not enter a loop)
    if(p != nil)    newInfoObj->putInBlackList(p->getID());

    // Transmit SUCCESS to previous particle
    if (newInfoObj->getPrevious() != nil) {
        Message* ms = new Message(MESSAGE_LTP_S, this);
        transmit(ms, newInfoObj->getPrevious());
        delete(ms);
    }

    newInfoObj->setSend(true);
}

```

3.6 Μέτρα εκτίμησης απόδοσης

Έστω τώρα ότι σε μια εκτέλεση του εξομοιωτή συμβαίνουν συνολικά K γεγονότα ($\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_K$) μέσα στο δίκτυο και τελικά k από αυτά αναφέρονται επιτυχώς στο κέντρο ελέγχου (δηλαδή φτάνει σε αυτό η πληροφορία). Ορίζουμε το ποσοστό επιτυχίας (success rate) ως εξής:

Το ποσοστό επιτυχίας $\mathcal{P}_S$ είναι ο λόγος του πλήθους k των γεγονότων που αναφέρθηκαν επιτυχώς στο κέντρο ελέγχου προς το συνολικό πλήθος K γεγονότων μέσα στο δίκτυο.

Επίσης, μας ενδιαφέρει η συνολική ενέργεια που υπάρχει στο δίκτυο ανά πάσα χρονική στιγμή. Έστω E_i η διαθέσιμη ενέργεια στον κόμβο i . Τότε, η συνολική ενέργεια που περιέχεται στο δίκτυο είναι $E_{tot} = \sum_i^n E_i$, όπου n το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Η συνολική ενέργεια

του δικτύου είναι χρήσιμη για την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων, αν και από μόνη της δεν μπορεί να δώσει σαφή εικόνα για το τι συμβαίνει στο δίκτυο.

Ακόμα, ένα μέτρο για την εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου είναι το πλήθος των ενεργών κόμβων, δηλαδή των κόμβων που δεν έχουν εξαντλήσει ακόμα τα αποθέματα ενέργειάς τους. Εκτός από το πλήθος τους, μας ενδιαφέρει επίσης και η γεωγραφική κατανομή τους και ο χρόνος που εξαντλούνται τα αποθέματα ενέργειάς τους. Συμβολίζουμε το πλήθος των ενεργών κόμβων με h_A .

3.7 Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυσή τους

Θέτουμε ως παραμέτρους στον εξομοιωτή ότι έχουμε ένα πεδίο 2000 επί 2000 μέτρα και ότι το πλήθος των κόμβων του δικτύου κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 8000 κόμβων. Θέλουμε να μελετήσουμε την επίδραση της πυκνότητας του δικτύου στο ποσοστό επιτυχίας για τα δύο πρωτόκολλα. Οι κόμβοι τοποθετούνται με μια ομοιόμορφη κατανομή στο επίπεδο. Σε κάθε εκτέλεση του πειράματος δημιουργούμε ένα μοναδικό γεγονός διαλέγοντας έναν τυχαίο κόμβο για να το ανιχνεύσει και να μεταδώσει τη σχετική πληροφορία. Θεωρούμε ότι η μέγιστη εμβέλεια μετάδοσης στο VTRP είναι μεγαλύτερη από τη σταθερή εμβέλεια μετάδοσης που χρησιμοποιείται στο LTP, ενώ αρχικά έχουν την ίδια ακριβώς εμβέλεια μετάδοσης.

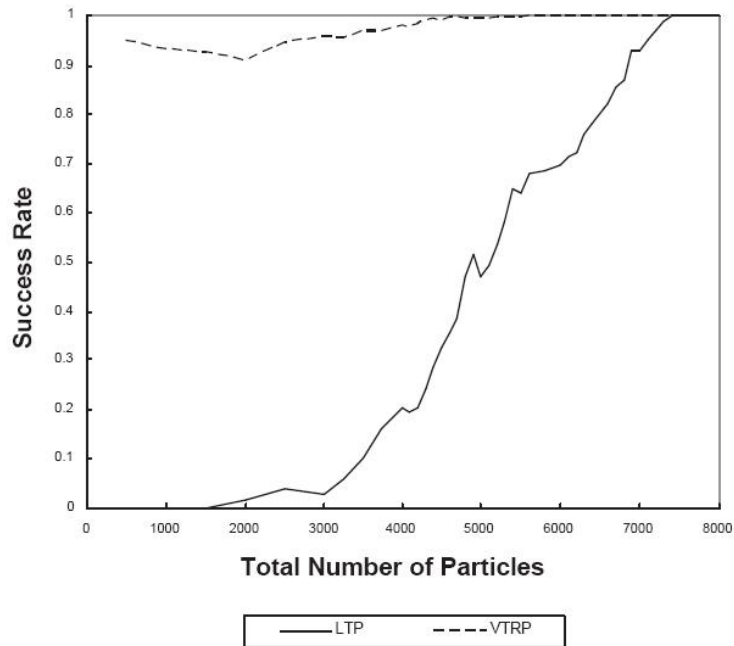
Τα αποτελέσματα του πρώτου σετ πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα 3.3, από τα οποία μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Η πυκνότητα του δικτύου έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη λειτουργία του LTP. Πιο συγκεκριμένα, για να αρχίσει το πρωτόκολλο να παραδίδει επιτυχώς την πληροφορία στο κέντρο ελέγχου πρέπει το πλήθος των κόμβων να ξεπεράσει τις 3000.
- Το VTRP αντίθετα, ακόμα και για μικρό, σχετικά, πλήθος κόμβων έχει ποσοστό επιτυχίας κοντά στο 1, αφού ο μηχανισμός μεταβολής της εμβέλειας μετάδοσης ξεπερνά τις δυσκολίες στην προώθηση της πληροφορίας.

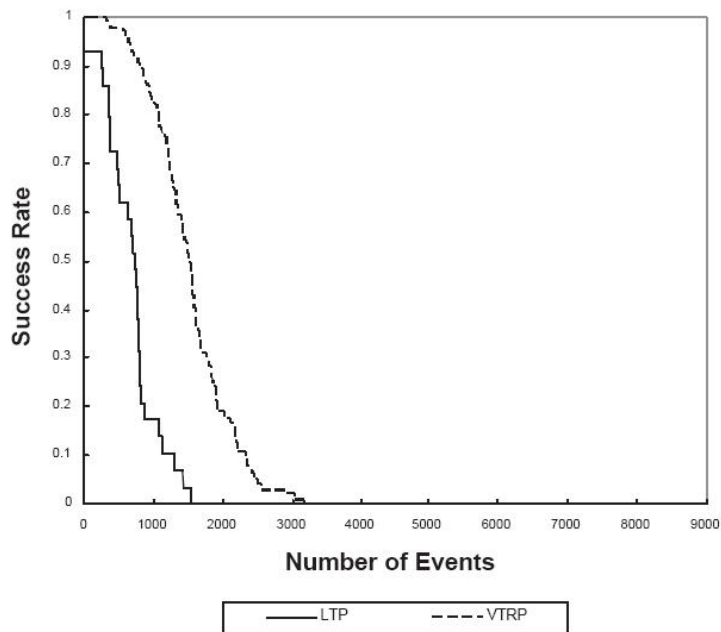
Προχωρώντας στο δεύτερο σετ πειραμάτων, προκαλούνται πολλαπλά γεγονότα σε κάθε εκτέλεση του εξομοιωτή. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα πεδίο διαστάσεων 2000 επί 2000 μέτρων υπάρχουν $n = 5000$ κόμβοι και σε κάθε γύρο του εξομοιωτή με κάποια πιθανότητα συμβαίνει ένα μοναδικό γεγονός, το οποίο γίνεται αντιληπτό από κάποιο συγκεκριμένο κόμβο. Αυτό γίνεται μέχρι να έχει δημιουργηθεί ένα σύνολο από 9000 τέτοια γεγονότα. Τα ποσοστά επιτυχίας για αυτό το σετ πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα 3.4.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι και πάλι το VTRP υπερέχει έναντι του LTP. Τα πειράματα έδειξαν ότι μπορεί να αναφέρει συνολικά μέχρι και 2 φορές περισσότερα γεγονότα σε σχέση με το LTP. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου αναγκαστικά εξαντλούν τα αποθέματα ενέργειάς τους γρηγορότερα από τους υπόλοιπους κόμβους. Αυτό γίνεται γιατί μεταφέρουν την πληροφορία από όλο το υπόλοιπο δίκτυο στο κέντρο ελέγχου, οπότε τους αναλογεί πολύ μεγαλύτερος φόρτος επικοινωνίας από τον μέσο όρο. Στο LTP όταν 'πεθάνουν' αυτοί οι κόμβοι δεν υπάρχουν άλλοι που να μπορούν να μεταδώσουν απ' ευθείας στο κέντρο ελέγχου οπότε, μοιραία, όλα τα μηνύματα από το δίκτυο χάνονται.

Στο VTRP αντίθετα, ο μηχανισμός μεταβολής της εμβέλειας μετάδοσης μπορεί να προσφέρει λύση, έστω και προσωρινά, στο πρόβλημα αυτό. Το κέντρο θα εξακολουθήσει να λαμβάνει

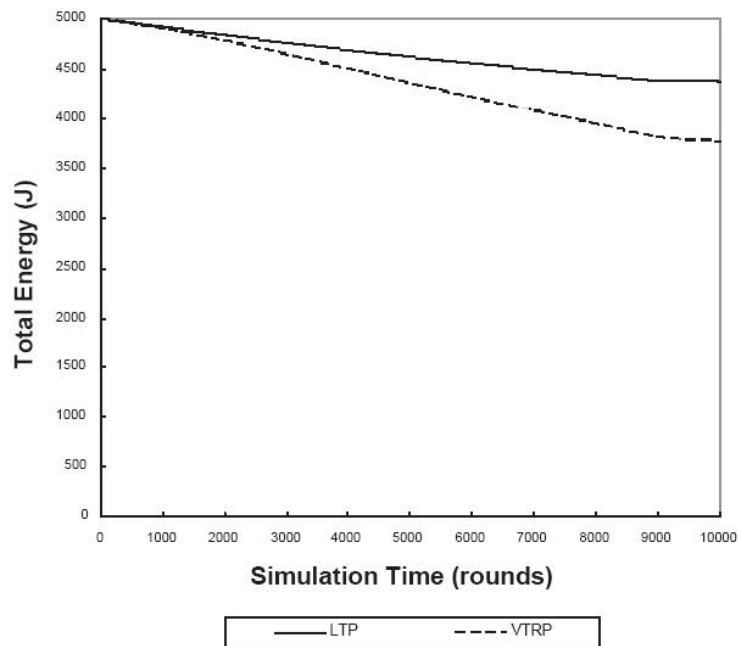


Σχήμα 3.3: Ποσοστό επιτυχίας (Pr_s) για το LTP και το VTRP για διάφορες πυκνότητες δικτύου ($n \in [1000, 8000]$).



Σχήμα 3.4: Ποσοστό επιτυχίας (Pr_s) για το LTP και το VTRP για πολλαπλά γεγονότα ($n = 5000$).

πληροφορία από το δίκτυο μέχρι να εξαντλήσουν τα αποθέματα ενέργειάς τους, με τη σειρά τους, οι κόμβοι που φτάνουν το κέντρο ελέγχου με τη μέγιστη εμβέλεια μετάδοσης.



Σχήμα 3.5: Συνολική ενέργεια (E_{tot}) για το LTP και το VTRP για πολλαπλά γεγονότα ($n = 5000$).

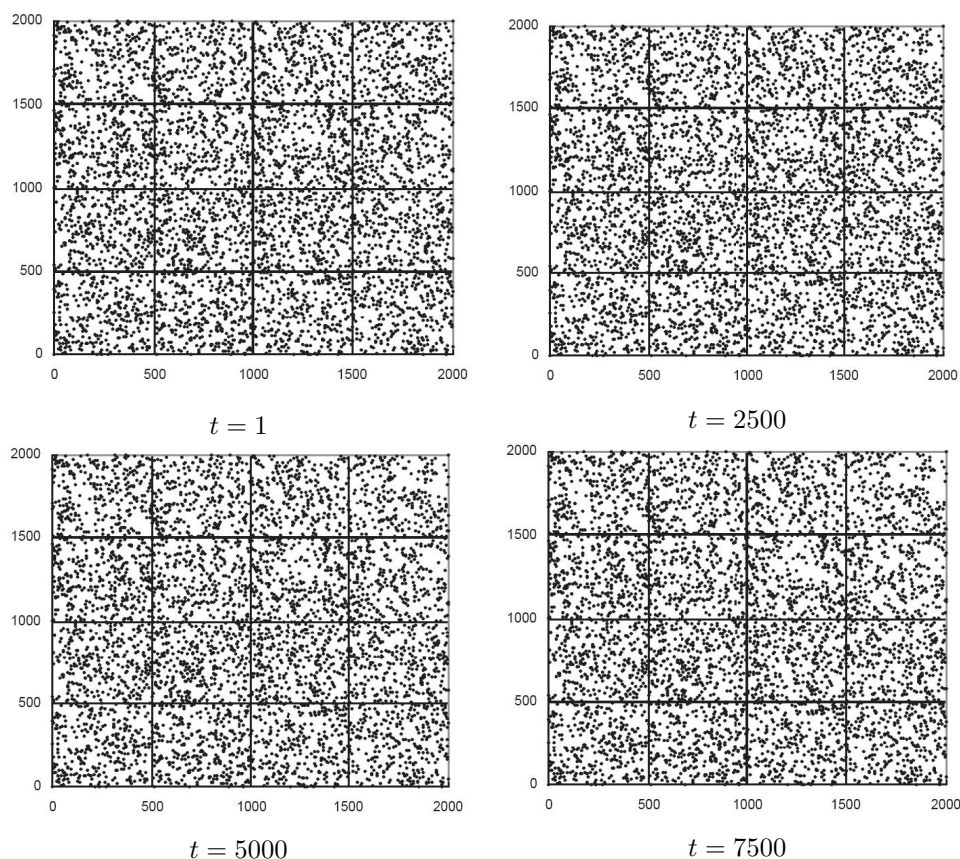
Ο τρόπος που 'πεθαίνουν' πρόωρα οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου στο LTP, φαίνεται στο σχήμα 3.6. Όσο προχωρούμε στο πεδίο του χρόνου, βλέπουμε ότι η πυκνότητα του δικτύου αρχίζει να αραιώνει γύρω από το κέντρο ελέγχου. Όταν πλέον δεν υπάρχει κόμβος με το κέντρο ελέγχου μέσα στην εμβέλεια μετάδοσής του, το κέντρο ελέγχου σταμάτα να λαμβάνει μηνύματα. Παράλληλα, το VTRP επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα καταναλώνοντας λίγη παραπάνω ενέργεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τον αριθμό και τη γεωγραφική θέση δίνουν τα σχήματα 3.8 και 3.9, στα οποία φαίνεται το πλήθος των ενεργών κόμβων σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο ελέγχου. Στα σχήματα αυτά, οι κόμβοι του δικτύου έχουν χωριστεί σε 32 ομάδες, βάση του διαχωρισμού του επιπέδου σε 32 τμήματα πάνω στη γραμμή που ενώνει το σημείο (0, 0) με το σημείο (2000, 2000). Παρατηρούμε ότι οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο ελέγχου σταδιακά πεθαίνουν, αλλά μόνο στο VTRP συνεχίζουν να πεθαίνουν κόμβοι μέχρι το τέλος του πειράματος ενώ στο LTP το πλήθος των κόμβων μετά από κάποια στιγμή παραμένει πρακτικά το ίδιο.

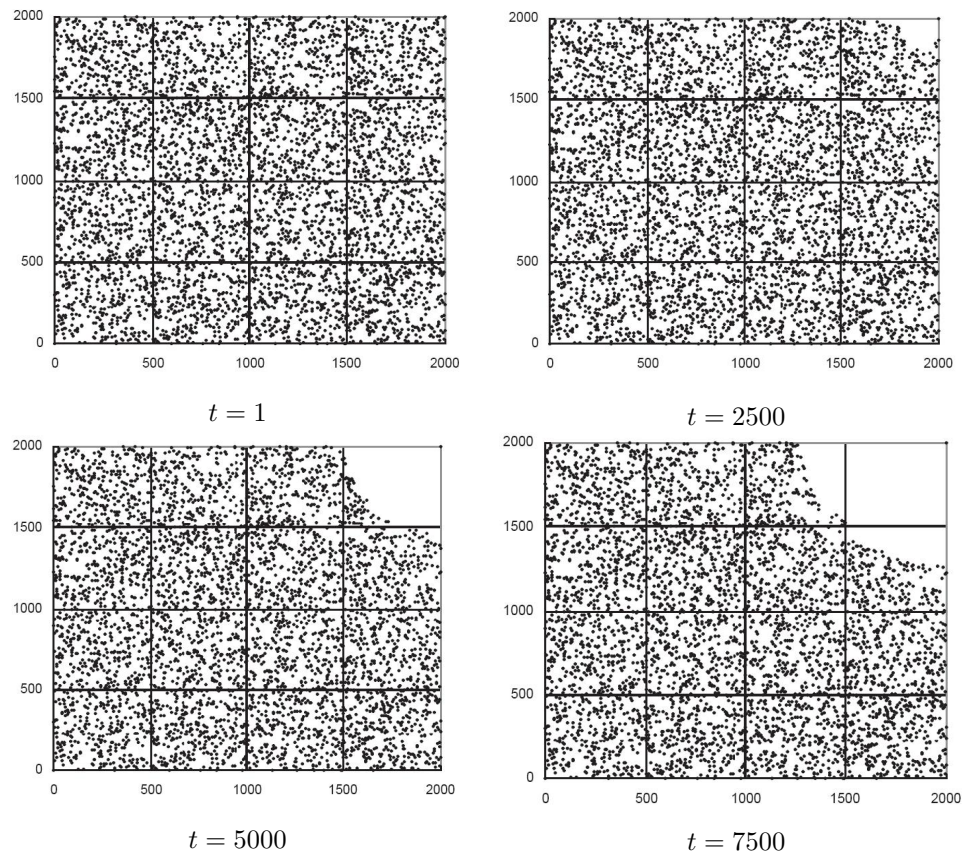
Στο τελευταίο σετ πειραμάτων, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων παραλλαγών του VTRP. Τα αποτελέσματα αυτού του σετ φαίνονται στα σχήματα 3.10-3.15. Χρησιμοποιούνται πάλι 5000 κόμβοι και ένα πεδίο 2000 επί 2000 μέτρα στο οποίο προκαλούνται 9000 γεγονότα. Όσον αφορά στο ποσοστό επιτυχίας, από το σχήμα 3.10 φαίνεται ότι η βασική παραλλαγή του VTRP είναι η λιγότερο αποδοτική. Αυτό μάλλον συμβαίνει γιατί απαιτούνται αρκετά βήματα μέχρι να αλλάξει σε ικανοποιητικό βαθμό η εμβέλεια μετάδοσης και να βρεθούν νέοι κόμβοι-γείτονες, σε σχέση με τις άλλες τρεις παραλλαγές, οι οποίες εμφανίζουν παρόμοια μεταξύ τους συμπεριφορά. Τέλος, στα σχήματα 3.12-3.15 φαίνεται η κατανομή των ενεργών κόμβων σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο ελέγχου.

3.8 Συμπεράσματα

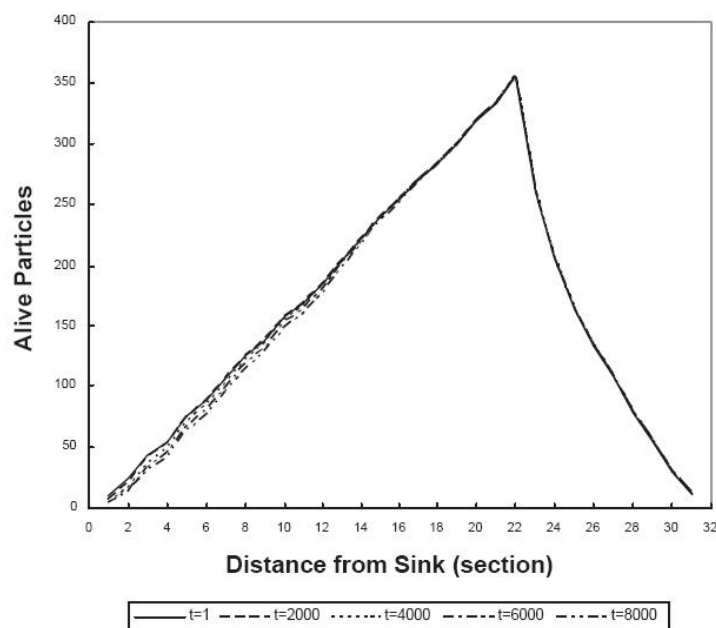
Παρουσιάσαμε ένα πρωτόκολλο για το πρόβλημα του εντοπισμού και διάδοσης πληροφορίας μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο χρησιμοποιεί μεταβολές της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων για να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες στην προώθηση της πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου του δικτύου. Μελετήσαμε την απόδοση του πρωτοκόλλου αυτού χρησιμοποιώντας τον εξομοιωτή simDust και συγκρίνοντάς το με ένα πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιεί άλλου είδους κριτήρια. Σκοπός και των δύο πρωτοκόλλων είναι η προώθηση της πληροφορίας χρησιμοποιώντας ελάχιστη πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου. Στα πειράματα που πραγματοποιήσαμε χρησιμοποιήσαμε δίκτυα με μεταβαλλόμενο πλήθος κόμβων και πυκνότητας κόμβων. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι το νέο πρωτόκολλο αντιμετωπίζει καλύτερα την κατάσταση που δημιουργείται στα δίκτυα αισθητήρων σε περιοχές όπως αυτή που βρίσκεται κοντά στο κέντρο ελέγχου του δικτύου, όπου η πυκνότητα κόμβων πέφτει απότομα, και επεκτείνει τη χρονική διάρκεια της σωστής λειτουργίας του δικτύου.



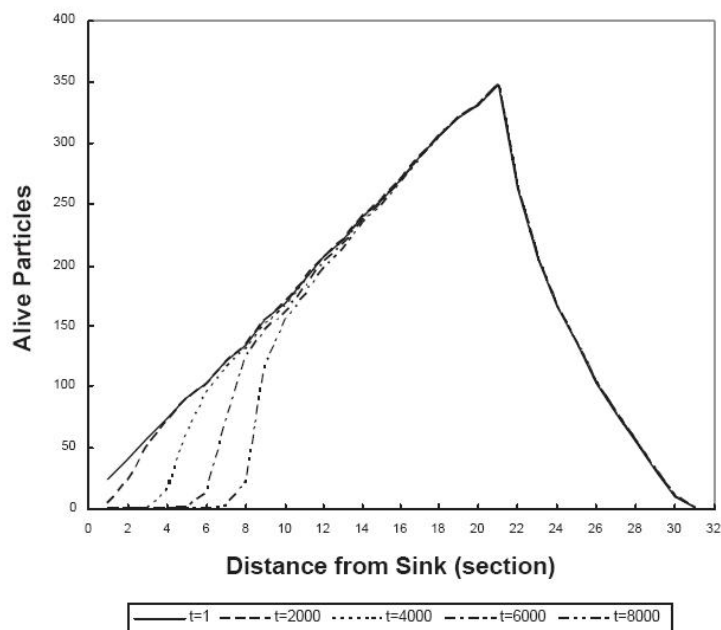
Σχήμα 3.6: Στιγμιότυπο του δικτύου που δείχνει το πλήθος των ενεργών κόμβων κατά την εκτέλεση του LTP σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



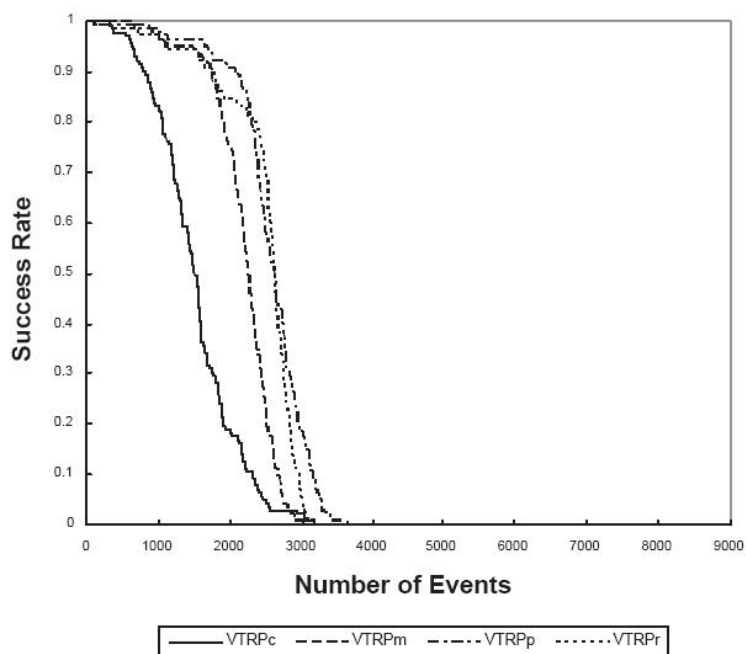
Σχήμα 3.7: Στιγμιότυπο του δικτύου που δείχνει το πλήθος των ενεργών κόμβων κατά την εκτέλεση του VTRP σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



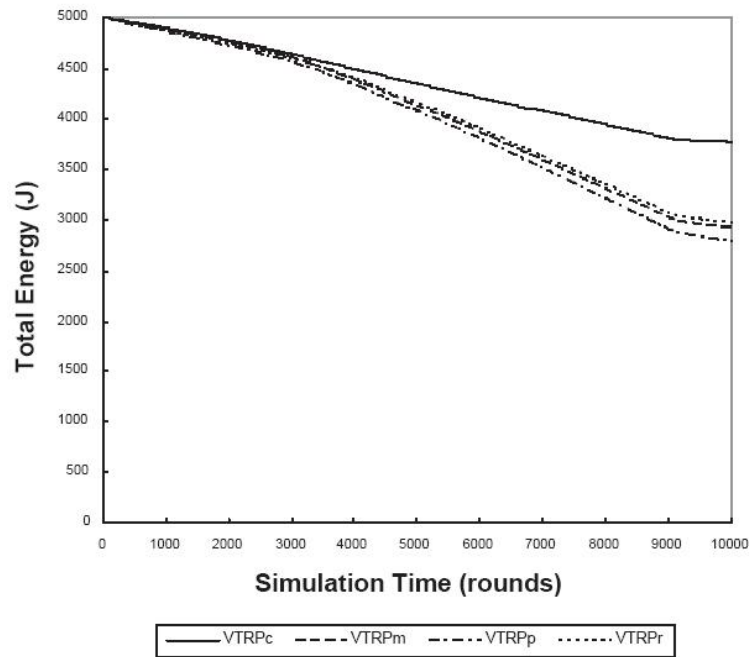
Σχήμα 3.8: Πλήθος ενεργών κόμβων (h_A) για το LTP σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



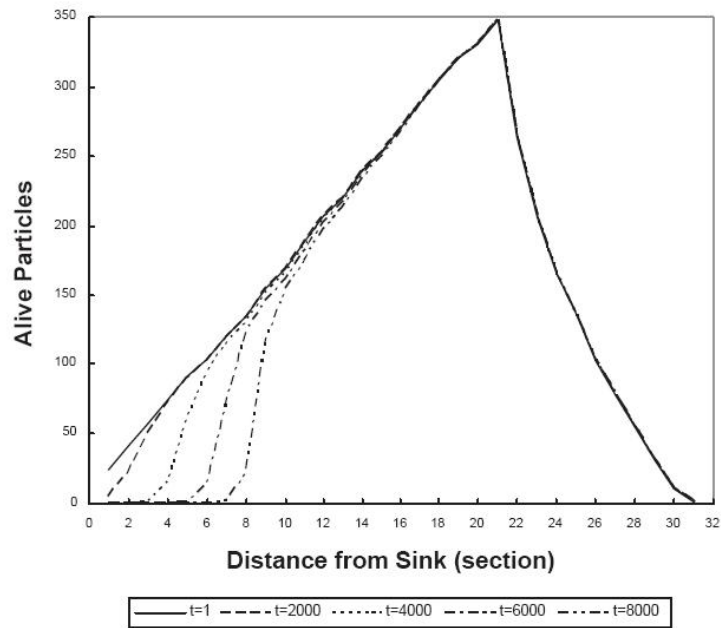
Σχήμα 3.9: Πλήθος ενεργών κόμβων (h_A) για το VTRP σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



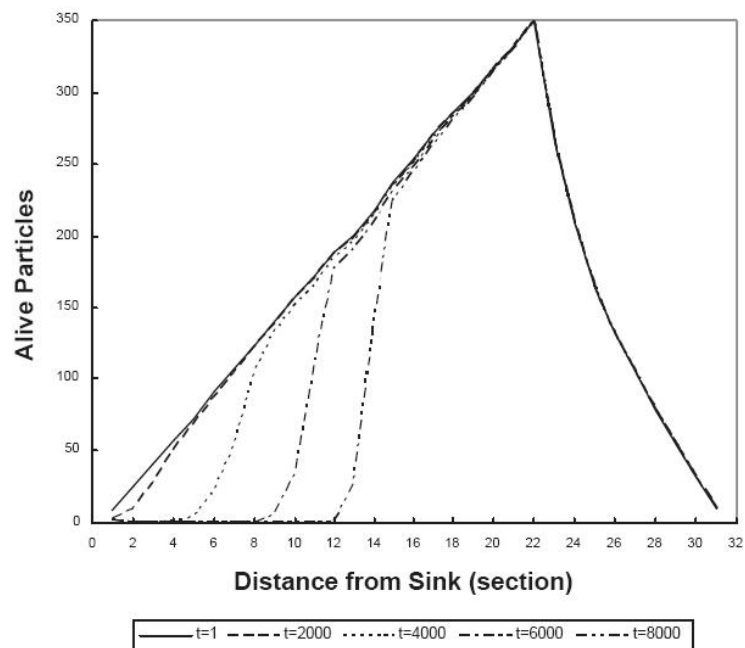
Σχήμα 3.10: Ποσοστό επιτυχίας (Pr_s) για τις παραλλαγές του VTRP για πολλαπλά γεγονότα ($n = 5000$).



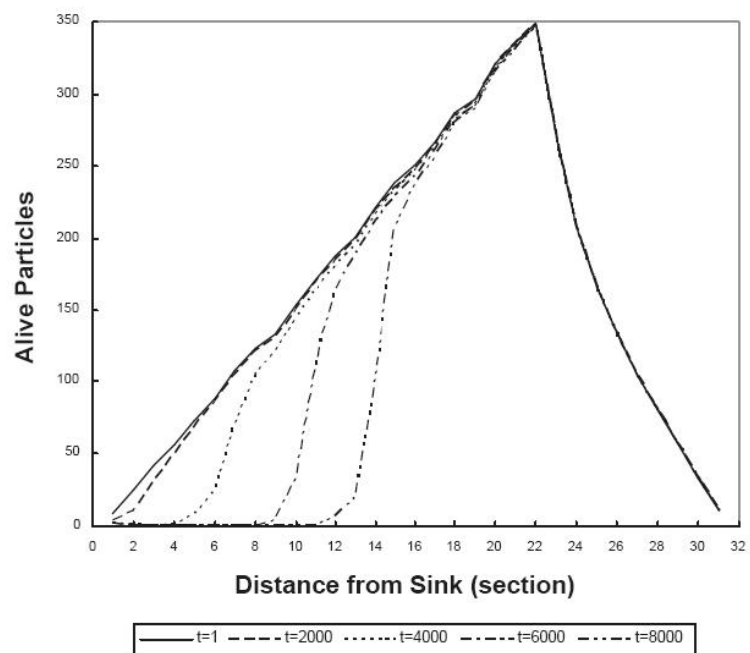
Σχήμα 3.11: Συνολική ενέργεια (E_{tot}) για τις διάφορες παραλλαγές του VTRP με πολλαπλά γεγονότα ($n = 5000$).



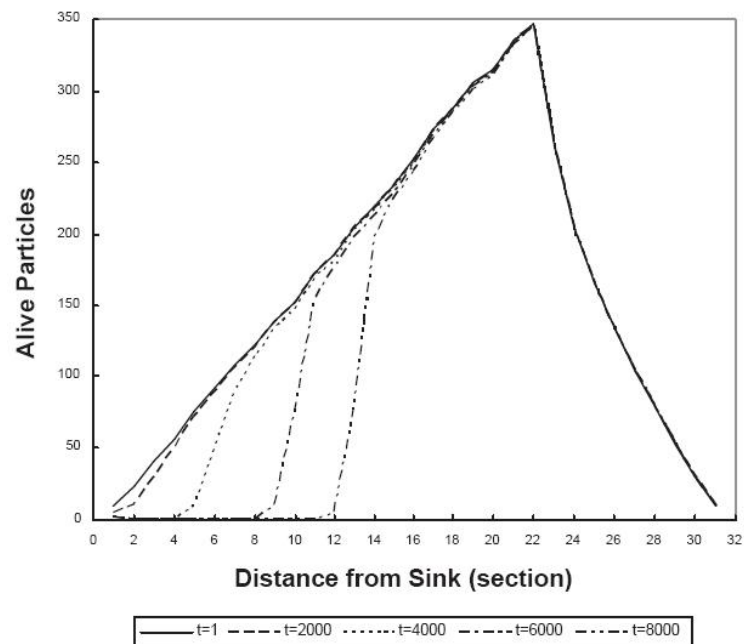
Σχήμα 3.12: Πλήθος ενεργών κόμβων (h_A) για το VTRP_c σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



Σχήμα 3.13: Πλήθος ενεργών κόμβων (h_A) για το $VTRP_m$ σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



Σχήμα 3.14: Πλήθος ενεργών κόμβων (h_A) για το $VTRP_p$ σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).



Σχήμα 3.15: Πλήθος ενεργών κόμβων (h_A) για το $VTRP_r$ σε συνάρτηση με το χρόνο ($n = 5000$).

Μέρος ΙΙΙ

Ρεαλιστική εξομοίωση δικτύων

4

Ρεαλιστική εξομοίωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων

4.1 Περιγραφή του προβλήματος – Ανάλυση της σημασίας του

Εξαιτίας του σχετικά υψηλού κόστους και της έλλειψης κατάλληλου λογισμικού, στην παρούσα φάση δεν υπάρχουν ακόμα πολλά σε αριθμό και με μεγάλο πλήθος κόμβων πραγματικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αν και η ύπαρξη και πειραματική λειτουργία τέτοιων δικτύων είναι κομβική για την ακριβή μέτρηση και αξιολόγηση της λειτουργίας των πολυάριθμων πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας που έχουν προταθεί ως τώρα, η πραγματοποίηση εξομοιώσεων για τα πρωτόκολλα αυτά προσφέρει έναν αριθμό από πλεονεκτήματα σε σχέση με τα πραγματικά πειραματικά δίκτυα. Π.χ. είναι ευκολότερο να εξετάσουμε με αυτόν τον τρόπο πολλά πρωτόκολλα χρησιμοποιώντας πλήθος διαφορετικών παραμέτρων, παρά σε ένα πραγματικό δίκτυο. Η εξομοίωση σε λογισμικό επίσης επιτρέπει πλεονεκτήματα όπως ελεγχόμενες παράμετροι, απομόνωση παραμέτρων, μεγάλο πλήθος κόμβων, κ.α. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι σε ένα πραγματικό δίκτυο δεν είναι εφικτό να πειραματιστούμε εξίσου εύκολα με μεγάλο πλήθος πρωτοκόλλων και παραμέτρων, παρά ίσως μόνο σε βάθος χρόνου.

Συνήθως στις θεωρητικές εργασίες που αφορούν πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνονται απλοποιήσεις στο θεωρητικό μοντέλο στο οποίο βασίζονται, σε σχέση με την πραγματικότητα, για να κάνουν πιο εύκολη την ανάλυσή τους. Σημαντικές παράμετροι στα πραγματικά δίκτυα, όπως π.χ. οι συγκρούσεις στο MAC επίπεδο, σε πολλές θεωρητικές εργασίες αγνοούνται προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν πιο απλό το μοντέλο του δικτύου (και συνεπώς και η μετέπειτα ανάλυση σε μαθηματικό επίπεδο).

Επίσης, η εξομοίωση είναι ένας τρόπος επιβεβαίωσης θεωρητικών αποτελεσμάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις ασυμπτωτικής ανάλυσης, υπολογιστικής πολυπλοκότητας, κτλ. Αρκετές φορές οι απλοποιήσεις που γίνονται στη μαθηματική ανάλυση μεταφέρονται σε ένα βαθμό και στις εξομοιώσεις. Επομένως, υπάρχει το πρόβλημα της ρεαλιστικής εξομοίωσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων, τα οποία θέλουμε να μην είναι πολύπλοκα, αλλά ούτε και ξεκομμένα από την πραγματικότητα.

Κατά την άποψή μας, ένα κριτήριο που συμβάλλει σε αυτή την κατεύθυνση, με διάφορους τρόπους (που θα εξηγήσουμε παρακάτω), είναι η χρήση εμποδίων στις εξομοιώσεις για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αν και υπάρχει μεγάλος όγκος έρευνας γενικά στον τομέα των δικτύων αυτών και στην εξομοίωσή τους, στην πλειοψηφία τους οι ερευνητικές εργασίες αυτές υποθέτουν ότι δεν υπάρχουν εμπόδια στο χώρο ανάπτυξης του δικτύου. Σε κάποιες εργασίες πάλι έχουν χρησιμοποιηθεί έμμεσες αναφορές σε εμπόδια, με τη χρήση διαφορετικών πυκνοτήτων κόμβων στις διάφορες περιοχές του δικτύου, αλλά τέτοιες υποθέσεις είναι ανεπαρκείς για να δώσουν μια σχετικά ρεαλιστική απόδοση των συνθηκών που δημιουργεί η παρουσία εμποδίων σε ένα τέτοιο δίκτυο. Από την άλλη, είναι σαφές ότι η προσθήκη εμποδίων στα μοντέλα εξομοίωσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας, θα επηρεάσει σε μικρό ή μεγάλο βαθμό την απόδοσή τους.

Πιο συγκεκριμένα, πολλές από τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που έχουν προταθεί ως τώρα από την ερευνητική κοινότητα, όπως οι περιπτώσεις φυσικών καταστροφών (π.χ. πλημμύρες, πυρκαγιές), υποτίθεται πως λαμβάνουν χώρα σε εχθρικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, είναι πιθανό να δημιουργηθούν 'εικονικά' εμπόδια λόγω της απουσίας κόμβων σε επιμέρους περιοχές του δικτύου, η οποία λειτουργεί και αυτή σε ένα βαθμό ενάντια στην ομαλή λειτουργία των δικτύων αυτών. Γίνεται φανερό ότι προκειμένου να είμαστε πιο κοντά στην πραγματικότητα, πρέπει κατά τη διάρκεια της σχεδίασης ενός πρωτοκόλλου διάδοσης πληροφορίας για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και της αξιολόγησής του μέσω εξομοίωσης, να λαμβάνουμε υπόψιν τον παράγοντα των εμποδίων στο χώρο ανάπτυξης ενός τέτοιου δικτύου.

Εκτός από τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο ανάπτυξης των δικτύων αυτών, ένας ακόμη σημαντικός λόγος που εξηγεί τη σημασία της χρήσης εμποδίων στην εξομοίωσή τους είναι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων για τα δίκτυα αυτά. Η έμφυτη τοπικότητα και απλότητα είναι ο κανόνας στη σχεδίαση τέτοιων πρωτοκόλλων. Οι περιορισμένοι πόροι σε υλικό και λογισμικό και η έλλειψη γνώσης της τοπολογίας ολόκληρου του δικτύου, σε συνδυασμό με την ύπαρξη εμποδίων δημιουργούν ένα πλήθος επιπλοκών στη λειτουργία του δικτύου.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα που έχει άμεση εφαρμογή η συμπερίληψη εμποδίων στα σενάρια εξομοίωσης, στα πλαίσια μιας πειραματικής ανάλυσης, είναι στα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας που χαρακτηρίζονται γενικά ως *geographic routing* πρωτόκολλα (ή αλλιώς και *geographic forwarding* ή *geometric routing* πρωτόκολλα). Τα πρωτόκολλα αυτά, εν συντομία, εκμεταλλεύονται κάποιου είδους γεωγραφική πληροφορία (π.χ. GPS πληροφορία) για να προωθήσουν πληροφορία μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Απλουστευτικά, θα λέγαμε ότι αν ο κόμβος A θέλει να στείλει πληροφορία στον κόμβο B, και δεν μπορεί να τη στείλει απευθείας, επιλέγει ως ενδιάμεσο κόμβο κάποιον που να απέχει μικρότερη απόσταση από τον B (σε σχέση με τον A). Αντί να διατηρούν μεγάλους πίνακες δρομολόγησης, όπως στα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης για συμβατικά δίκτυα, χρησιμοποιούν γεωγραφική πληροφορία η οποία όμως έχει τοπικό χαρακτήρα (δεν αφορά δηλαδή σε όλο το δίκτυο).

Έτσι, είναι απλά στη λειτουργία τους, είναι όμως πιθανό να αντιμετωπίσουν δυσκολίες σε δίκτυα που περιέχουν εμπόδια, αν δεν μπορούν να προβλέψουν σωστά την πορεία που πρέπει να ακολουθήσει η πληροφορία μέσα στο δίκτυο. Π.χ., υπό κάποιες συνθήκες μπορεί να δημιουργηθεί ένας στενός 'διάδρομος' από κόμβους, ο οποίος καταλήγει σε αδιέξοδο. Αν το πρωτόκολλο επιλέξει να χρησιμοποιήσει τους κόμβους που ανήκουν στην ομάδα αυτή, μπορεί η πληροφορία να εγκλωβιστεί και να μην φτάσει στον προορισμό της αν το πρωτόκολλο δεν έχει σχεδιαστεί κατάλληλα.

4.1.1 Μοντέλα εμποδίων για χρήση σε εξομοιώσεις ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε συνοπτικά κάποια μοντέλα εμποδίων που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειραματικές εξομοιώσεις για την αξιολόγηση της λειτουργίας πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας σε τέτοια δίκτυα, μαζί με κάποια σύντομη κριτική για το καθένα από αυτά.

Χρήση πολυγωνικών αντικειμένων ως εμπόδια

Υπάρχουν προτάσεις σχετικά με την τοποθέτηση εμποδίων μέσα στην περιοχή ενός κινητού ad hoc δικτύου. Ένα μοντέλο κίνησης μέσα σε κινητά ad hoc δίκτυα προτείνεται στο (51) και (50), αντί του καθιερωμένου random waypoint μοντέλου που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε εξομοιώσεις τέτοιων δικτύων. Σε αυτό το μοντέλο προτείνεται η τοποθέτηση εμποδίων πολυγωνικού σχήματος, τα οποία παρεμβάλλονται στην κίνηση των κόμβων μέσα στο δίκτυο, καθώς και στην επικοινωνία μεταξύ τους. Τα εμπόδια αυτά αναπαριστούν κτήρια και άλλες κατασκευές, προκειμένου να είναι πιο ρεαλιστική η εξομοίωση της κίνησης των κόμβων. Επίσης, τα εμπόδια αυτά έχουν επίδραση στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, το μέγεθος της οποίας κυμαίνεται ανάλογα με το μοντέλο καναλιού που χρησιμοποιείται στην εξομοίωση (από το απλουστευτικό line-of-sight μέχρι πιο πολύπλοκα μοντέλα μετάδοσης σήματος).

Αυτή η προσέγγιση έχει πρακτικό ενδιαφέρον, άλλα είναι κάπως γενική, και δεν προσφέρει συγκεκριμένα πρότυπα και διαδικασίες για να χρησιμοποιηθούν σε εξομοιώσεις. Ακόμα, είναι κατάλληλη για κινητά ad hoc δίκτυα, αλλά δεν ασχολείται με την περίπτωση απουσίας κόμβων από επιμέρους περιοχές του δικτύου, που είναι συχνή στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Επίσης, δεν υπάρχει καθόλου αναφορά σε εμπόδια που έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής ή εμφανίζονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Αντίθετα, όλα τα εμπόδια θεωρούνται στατικά και ντετερμινιστικά όσον αφορά στην παρουσία τους.

Τοποθέτηση τετραγώνων με τυχαίο τρόπο ως εμπόδια

Μια άλλη προσέγγιση είναι να χωριστεί το πεδίο ανάπτυξης του δικτύου σε ισομεγέθη κελιά. Κάθε τέτοιο κελί αντιστοιχεί σε ένα εμπόδιο ή όχι με βάση κάποια πιθανότητα. Τα εμπόδια αυτά είναι στατικά και δεν μετακινούνται. Η πυκνότητα των εμποδίων στο χώρο είναι συγκεκριμένη. Μια επιλογή είναι η πιθανότητα κάθε κελί να καταλαμβάνεται από εμπόδιο να είναι ανεξάρτητη από τα γειτονικά του κελιά. Η άλλη επιλογή είναι η πιθανότητα αυτή να είναι εξαρτημένη με κάποιο τρόπο, έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν clusters από εμπόδια σε κάποιες τυχαίες περιοχές του δικτύου (έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν σχετικά μεγάλα εμπόδια).

Αυτή η προσέγγιση έχει ενδιαφέρον και είναι χρήσιμη, αλλά σε αυτήν την απλή μορφή δεν είναι ιδιαίτερα ρεαλιστική. Το σχήμα και το μέγεθος των εμποδίων, γενικά, μπορεί να έχει επίσης επίδραση στη λειτουργία του δικτύου. Επίσης, αν και υπάρχει κάποια τυχαιοποιημένη λογική στο μοντέλο αυτό, όλα τα εμπόδια δημιουργούνται στην αρχή του πειράματος και δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκειά του.

Χρήση routing holes ως εμπόδια

Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος περιγράφεται στο (34), όπου όλα τα μοντέλα κατατάσσονται σαν routing holes, δηλαδή περιοχές που δεν έχουν αρκετούς κόμβους για να προωθήσουν παραπέρα στο δίκτυο κάποια πληροφορία. Γενικά, τα routing holes ορίζονται ως περιοχές που περικλείονται από ένα πολυγωνικό σχήμα, που περιέχει όλους τους κόμβους

στους οποίους είναι πιθανό να 'κολλήσει' η πληροφορία. Είναι κατά κάποιο τρόπο μια περιοχή του δικτύου στην οποία η συνεκτικότητα του εμφανίζει ένα τοπικό ελάχιστο.

Αυτός ο ορισμός των εμποδίων είναι αρκετά αφαιρετικός και μπορεί να αντιστοιχεί σε πολλά διαφορετικά πράγματα. Εκτός από την περίπτωση των περιοχών με λίγους ή καθόλου κόμβους, η ερμηνεία μπορεί να καθοριστεί από τις ανάγκες της εφαρμογής ή από τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο ανάπτυξης του δικτύου. Π.χ σε μια εφαρμογή ανίχνευσης πυρκαγιών, οι κόμβοι που βρίσκονται στο μέτωπο της φωτιάς καταστρέφονται και δημιουργούν ένα routing hole στο δίκτυο. Ο καθορισμός της περιοχής αυτής ισοδυναμεί με την ανίχνευση των περιοχών που έχουν επηρεαστεί από τη φωτιά. Μπορεί κάποιος να θεωρήσει ως routing hole μια περιοχή με κόμβους με λίγα αποθέματα ενέργειας και να θελήσει να εντοπίσει την περιοχή αυτή για να καθορίσει που θα επέμβει για να βελτιώσει τη λειτουργία του δικτύου.

Αν και αυτή η προσέγγιση βοηθά στο να γίνει αντιληπτή η σημασία της ύπαρξης των εμποδίων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και επίσης το τι μπορεί να εκληφθεί ως εμπόδιο, δεν ορίζει συγκεκριμένα πρότυπα για χρήση σε εξομοιώσεις. Αυτό είναι βασικό, καθώς γενικά στις εξομοιώσεις υπάρχει πάντοτε η ανάγκη για δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένων παραμέτρων, δυνατότητα επανάληψης συνθηκών των εξομοιώσεων, κτλ.

Χρήση ευθύγραμμων 'τοιχών' ως εμπόδια

Μια ακόμα πρόταση για τη συμπερίληψη εμποδίων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνεται στα (83),(36). Τα εμπόδια ορίζονται ως ευθύγραμμα τμήματα (χαρακτηρίζονται 'τοιχοί'), τα οποία είναι παράλληλα στον άξονα x ή y του πεδίου ανάπτυξης του δικτύου (το οποίο είναι στην ουσία ένα ορθογώνιο), με διάφορα μήκη. Όσον αφορά το πλάτος τους θεωρείται πολύ μικρό και είναι το ίδιο για όλα τα εμπόδια. Η ύπαρξη περιοχών στο δίκτυο με απουσία κόμβων περιλαμβάνεται επίσης στο μοντέλο αυτό. Παρ' όλα αυτά, τα εμπόδια τοποθετούνται στο δίκτυο πριν την έναρξη λειτουργίας του δικτύου, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα που αναφέραμε, και επίσης δεν μπορούν να καθοριστούν 'εικονικά' εμπόδια κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου.

Μια παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται και στο (56), όπου τα εμπόδια (τοιχοί) είναι σταθερού μήκους, το κέντρο των οποίων τοποθετείται τυχαία στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου και τα ενδεχόμενα κάποιο εμπόδιο να είναι παράλληλο με τον άξονα x ή τον άξονα y του πεδίου είναι ισοπίθανα. Στο (92) χρησιμοποιείται ένα μοναδικό εμπόδιο (τοίχος) στο κέντρο της περιοχής ανάπτυξης του δικτύου, το μήκος του οποίου τίθεται ίσο με 0.5, 1 και 2 φορές την εμβέλεια μετάδοσης των κόμβων του δικτύου.

Αυτή η προσέγγιση είναι επίσης πρακτική, ειδικά στην περίπτωση όπου έχουμε ένα κέντρο ελέγχου στο δίκτυο και χρησιμοποιείται geographic routing πρωτόκολλο διάδοσης πληροφορίας. Όμως, είναι απλουστευτικό αφού δεν αναφέρεται σε παραμέτρους όπως το σχήμα των εμποδίων, η εξέλιξή τους στο χρόνο, κτλ. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς όπως δείχνουμε στη συνέχεια, τα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας μπορεί να αποδίδουν διαφορετικά ανάλογα με τους διαφορετικούς τύπους εμποδίων που τοποθετούνται στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου.

Στατιστικά μοντέλα

Εκτός από τη συμπερίληψη εμποδίων στην περιοχή ανάπτυξης του δικτύου, υπάρχει προφανώς ένας τεράστιος όγκος έρευνας σε σχέση με την ασύρματη μετάδοση πληροφορίας και τα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτή (84). Σε ένα ασύρματο δίκτυο δύο κόμβοι προφανώς μπορούν να επικοινωνήσουν παρόλο που είναι πιθανό να υπάρχουν εμπόδια μεταξύ τους, λόγω multi-path

φαινομένων, κτλ. Φαινόμενα όπως η ανάκλαση και η διασπορά σημάτων έχουν μελετηθεί σε βάθος, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Είναι όμως αρκετά δύσκολο να υπολογίσουμε ακριβώς πώς επιδρούν τα φαινόμενα αυτά στη λειτουργία ενός δικτύου, λόγω του πλήθους των παραμέτρων που εμπλέκονται σε έναν τέτοιο υπολογισμό. Έχει προταθεί ένας αριθμός από μοντέλα τα οποία επιτρέπουν τον υπολογισμό της ισχύος των λαμβανομένων σημάτων από μια πηγή εκπομπής σε κάποιο σημείο του δικτύου.

Η προσέγγιση που υιοθετείται συνήθως είναι να γίνονται κάποια πειράματα υπό 'τυπικές' συνθήκες, π.χ. σε ένα κτήριο με γραφεία, και μέσω της αναλυτικής παρακολούθησης της λειτουργίας του δικτύου και της καταγραφής πειραματικών δεδομένων σχετικών με την ισχύ των εκπεμπόμενων σημάτων να εξαχθούν κάποια στατιστικά συμπεράσματα. Σε κάποιους εξομοιωτές είναι διαθέσιμα τέτοια στατιστικά μοντέλα για να υπολογίζεται η πιθανότητα σωστής μετάδοσης πληροφορίας μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων του δικτύου. Στον εξομοιωτή TOSSIM (64), μπορεί κάποιος να περιγράψει εμπόδια με έμμεσο τρόπο, καθορίζοντας την πιθανότητα επικοινωνίας ανάμεσα σε δύο κόμβους (π.χ., να είναι 0), αλλά δεν παρέχεται κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο στον τελικό χρήστη για να καθορίσει σαφώς εμπόδια μέσα στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου.

Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι αυτά τα μοντέλα δεν καλύπτουν σαφώς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που μπορεί να έχει ένα εμπόδιο που βρίσκεται στο χώρο ανάπτυξης του δικτύου. Έτσι, μπορεί τα μοντέλα αυτά να δίνουν σχετικά ρεαλιστικά αποτελέσματα στη μέση περίπτωση, αλλά όταν θέλουμε να ελέγξουμε περιπτώσεις κακής συμπεριφοράς των πρωτοκόλλων σε 'δύσκολες' για τα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας συνθήκες, δεν είναι αρκούντως κατάλληλα. Επίσης, εισάγουν επιπρόσθετη υπολογιστική πολυπλοκότητα στις εξομοιώσεις, η οποία σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι έως και απαγορευτική για την εκτέλεση εξομοιώσεων, ειδικά στην περίπτωση που έχουμε χιλιάδες κόμβων στο δίκτυο που εξομοιώνουμε.

4.1.2 Λύσεις στο πρόβλημα της αποφυγής εμποδίων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – Σχετικές μελέτες με χρήση εξομοιώσεων

Προκειμένου να εξομοιωθεί η επίδραση των εμποδίων στην επικοινωνία μεταξύ κόμβων στην περιοχή ανάπτυξης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, στο [51] αναφέρεται η ανάπτυξη επεκτάσεων στον εξομοιωτή δικτύων ns-2. Με τις επεκτάσεις αυτές προσφέρεται ένας μηχανισμός τοποθέτησης εμποδίων μέσα στην περιοχή του δικτύου, με τον οποίο οι χρήστες καθορίζουν τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος των εμποδίων αυτών. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογισμός των περιοχών που δεν υπάρχει line-of-sight μεταξύ κόμβων του δικτύου και μπλοκάρεται η ασύρματη επικοινωνία, και αργότερα [50] χρησιμοποιήθηκε ένας πιο ρεαλιστικός μηχανισμός που μοντελοποιεί την εξασθένιση του σήματος καθώς διέρχεται μέσα από ένα εμπόδιο που βρίσκεται μεταξύ δύο κόμβων. Μια σειρά από πειράματα επιβεβαίωσε ότι η συμπερίληψη εμποδίων στο μοντέλο δικτύου μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία των ad hoc πρωτοκόλλων που μελέτησαν, εν μέρει γιατί το μοντέλο κίνησης των κόμβων του δικτύου λαμβάνει υπόψιν του τα εμπόδια που βρίσκονται στην περιοχή.

Μια παρόμοια λύση υλοποιήθηκε στον εξομοιωτή δικτύων Shawn [60], [94], στον οποίο μπορούν να οριστούν πολυγωνικές περιοχές στις οποίες δεν μπορούν να τοποθετηθούν κόμβοι του δικτύου. Και πάλι δεν υπάρχει συγκεκριμένο μοντέλο εμποδίων, και τα εμπόδια είναι επίσης ντετερμινιστικά, δεν αλλάζουν δηλαδή με την πάροδο του χρόνου.

Γενικά, οι λύσεις που έχουν προταθεί συγκεκριμένα για την αποφυγή εμποδίων σε

ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έχουν κάποια αρχική φάση που εντοπίζονται τα εμπόδια μέσα στο χώρο ανάπτυξης του δικτύου και βάσει αυτής της πληροφορίας, με στόχο τη βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου, επιλέγονται οι κατάλληλοι κόμβοι για την προώθηση της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο. Οι face routing αλγόριθμοι είναι μια οικογένεια τέτοιων αλγορίθμων, οι οποίοι δημιουργούν με κάποια βήματα ένα επίπεδο γράφημα που περιγράφει συνδέσεις μεταξύ κόμβων μέσα στο δίκτυο, όπως π.χ. στα [7] και [56]. Ανάλογα με τον αλγόριθμο, αυτός ο υπολογισμός μπορεί να γίνεται πριν την έναρξη λειτουργίας του δικτύου ή κατά τη διάρκειά της.

Στο [34] παρουσιάζεται ένας greedy αλγόριθμος για την ανίχνευση των routing holes, ο οποίος ονομάζεται BoundHole. Η ιδέα εδώ είναι ότι όταν κάποιος κόμβος καταλάβει ότι δεν μπορεί να προωθήσει κάποια πληροφορία πιο κοντά στον προορισμό της χρησιμοποιώντας greedy forwarding, ξεκινά μια διαδικασία για την 'περιχάραξη' του routing hole που ευθύνεται για αυτή την κατάσταση. Υπολογίζεται ένα μονοπάτι το οποίο ξεκινά από τον κόμβο που κόλλησε η πληροφορία, διατρέχει την περιφέρεια του routing hole, και αν όλα πάνε καλά επιστρέφει στον αρχικό κόμβο. Αν είναι διαθέσιμες πληροφορίες τύπου GPS, ο αλγόριθμος αυτός είναι απλός και κάθε κόμβος χρειάζεται να γνωρίζει μόνο τους 1-hop γείτονές του στο δίκτυο.

Μετά την ταυτοποίηση των routing holes μέσα στο δίκτυο, και ενώ έχει προωθηθεί κάποια πληροφορία μέσα στο δίκτυο με greedy τρόπο και έχει 'κολλήσει' σε κάποιον κόμβο, η λογική δρομολόγησης αλλάζει και επιλέγεται η περιφέρεια του routing hole ως το μονοπάτι δρομολόγησης της πληροφορίας. Όταν βρεθεί κάποιος κόμβος ο οποίος είναι πιο κοντά στον προορισμό της πληροφορίας σε σχέση με τον κόμβο στον οποίο 'κόλλησε' με την προηγούμενη διαδικασία, τότε πάλι αλλάζει η διαδικασία δρομολόγησης και ακολουθείται μια greedy λογική εκ νέου.

Μία ακόμα λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το οποίο μάλιστα δεν προϋποθέτει δυνατότητες GPS, είναι οι εικονικές συντεταγμένες (virtual coordinates) [83]. Οι συγγραφείς περιγράφουν ένα πρωτόκολλο για την ανάθεση εικονικών συντεταγμένων (σε αντίθεση με τις πραγματικές), οι οποίες σε ένα μεγάλο βαθμό αντικατοπτρίζουν την τοπολογία του δικτύου με σκοπό να χρησιμοποιηθεί μια λογική greedy forwarding. Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό των συντεταγμένων είναι επαναληπτικός και συγκλίνει μετά από σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Διαφορετικές συνθήκες και ικανότητες γεωεντοπισμού οδηγούν σε διαφορετική πολυπλοκότητα και αριθμό επαναλήψεων ώσπου να συγκλίνει ο αλγόριθμος (περισσότεροι κόμβοι με GPS, λιγότερες επαναλήψεις μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος σε ικανοποιητικό βαθμό και λιγότερα μηνύματα συνολικά). Μια απλοποιημένη έκδοση του αλγορίθμου αυτού (επειδή ο αρχικός αλγόριθμος είναι αρκετά πολύπλοκος) υλοποιήθηκε σε πραγματικές συσκευές και εξετάστηκε η λειτουργία απέναντι σε κάποια πραγματικά, σχετικά μικρά, εμπόδια στο [24].

Επίσης, στο [12] προτείνεται ένα trade-off ανάμεσα στο κόστος της απόκτησης κάποιας περιορισμένης τοπικής γνώσης της τοπολογίας του δικτύου και της μετέπειτα βελτιστοποίησης της δρομολόγησης κάποιας πληροφορίας μέσα στο δίκτυο, με τη χρήση της γνώσης αυτής. Αυτή η ιδέα, αν και γενική, μπορεί να είναι χρήσιμη για τον έγκαιρο εντοπισμό εμποδίων στο δίκτυο και την ανάλογη αλλαγή της δρομολόγησης στις περιοχές κοντά στα εμπόδια.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι το μοντέλο που περιγράφουμε στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός geographic routing πρωτοκόλλου, κάτω από σχετικά 'δύσκολες' συνθήκες [75].

4.1.3 Η συνεισφορά μας

Προτείνουμε ένα συστηματικό και γενικό μοντέλο εμποδίων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και παρέχουμε μια κατηγοριοποίηση κάποιων βασικών τύπων εμποδίων, βασιζόμενοι σε ένα πλήθος από κριτήρια. Είναι πεποίθησή μας ότι η συμπερίληψη εμποδίων στην έρευνα σχετικά με τα δίκτυα αυτά που γίνεται μέσω εξομοίωσης θα δώσει σε αρκετές περιπτώσεις ενδιαφέροντα αποτελέσματα και ότι η κατηγοριοποίηση των εμποδίων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εξομοιώσεις είναι απαραίτητη. Αυτό γιατί η μελέτη της συμπεριφοράς των διαφόρων πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας και της επίδρασης των διαφορετικών τύπων εμποδίων πάνω στη λειτουργία τους δίνει ενδιαφέροντα αποτελέσματα, όπως περιγράφουμε αναλυτικότερα στη συνέχεια του κεφαλαίου. Επιπλέον, το μοντέλο μας εμπειρεύει εμπόδια ποικίλων σχημάτων τα οποία σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό μπορούν να αντιστοιχιστούν σε συνθήκες που συναντούμε σε πραγματικές εφαρμογές (και ιδιαίτερα σε εφαρμογές σε εξωτερικά περιβάλλοντα, π.χ. δάση). Τα διάφορα σχήματα που περιγράφουμε μπορούν να συνδυαστούν για να προκύψουν περισσότερο πολύπλοκα εμπόδια.

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου εμποδίων μας, συνοπτικά, είναι τα ακόλουθα:

- ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να υλοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί εύκολα.
- καλύπτει ένα εύρος από διαφορετικούς τύπους εμποδίων.
- μπορεί να παραμετροποιηθεί εύκολα και να χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή ή παραγωγή τυχαίων δικτυακών στιγμιotypών σε έναν εξομοιωτή δικτύων, ο οποίος δεν υποστηρίζει εγγενώς το μοντέλο μας.
- ‘στοχαστικά’ εμπόδια (δηλαδή εμπόδια στα οποία υπεισέρχεται η έννοια της πιθανότητας) μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να είναι πιο ρεαλιστικές οι εξομοιώσεις μας και επίσης είναι χρήσιμα σε ειδικές κατηγορίες δικτύων όπως τα delay-tolerant δίκτυα.
- το μοντέλο μας παράγει περισσότερο ρεαλιστικές τοπολογίες δικτύου, σε αντίθεση με το τυχαία ομογενοποιημένο μοντέλο που ακολουθεί η συντριπτική πλειοψηφία των εξομοιωτών δικτύων.

Υλοποιήσαμε το μοντέλο που προτείνουμε στον εξομοιωτή δικτύων simDust [9], [10], [16], [17], [2], [74], ο οποίος περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της διατριβής μας. Δημιουργήσαμε με τον τρόπο αυτό ένα περιβάλλον εξομοίωσης το οποίο παρέχει ένα σχετικά σεβαστό πλήθος δυνατοτήτων στο χρήστη. Με βάση την υλοποίηση αυτή, παρέχουμε κάποια πειραματικά αποτελέσματα από μερικά πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας, τα οποία είναι σε ένα βαθμό αντιπροσωπευτικά των βασικών κατηγοριών τέτοιων πρωτοκόλλων όπως αναφέρονται στη σχετική ενότητα της διατριβής. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε πειραματικές μελέτες και συγκρίσεις της απόδοσης των πρωτοκόλλων αυτών σε συνδυασμό με ένα πλήθος από διαφορετικές συνθήκες στο εξομοιούμενο δίκτυο. Προφανώς θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε άλλα πρωτόκολλα για τα πειράματά μας, αλλά πιστεύουμε ότι η επιλογή που κάναμε είναι αρκετά αντιπροσωπευτική. Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι τα εμπόδια μέσα στο δίκτυο ενδέχεται να έχουν καθοριστική επίδραση στην απόδοση τέτοιων πρωτοκόλλων, αλλά και ότι οι διαφορετικοί τύποι εμποδίων επιδρούν διαφορετικά πάνω στο δίκτυο.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ο στόχος μας ήταν να προτείνουμε και να υλοποιήσουμε ένα νέο μοντέλο για εμπόδια και να διερευνήσουμε τη δυνατότητα εφαρμογής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και φυσικά το κατά πόσον έχει ουσιαστικό νόημα ένα τέτοιο εγχείρημα. Εστιάσαμε στο πρόβλημα της διάδοσης πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, επειδή είναι βασικότατο για όλες τις λειτουργίες του δικτύου που βρίσκονται πάνω από αυτό και προκειμένου να διερευνήσουμε το βαθμό που η παρουσία εμποδίων επηρεάζει τη λειτουργία των πρωτοκόλλων αυτών. Σχετικές δημοσιεύσεις που προέκυψαν από την έρευνα γύρω από το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι [14] και [15].

4.1.4 Ένα νέο συστηματικό και γενικό μοντέλο εμποδίων

Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε το μοντέλο εμποδίων που προτείνουμε. Σχετικά με το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιούμε, είναι το ίδιο που περιγράφεται στην ενότητα 3.2 και επομένως ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει εκεί για περισσότερες λεπτομέρειες.

‘Φυσικά’ και ‘Επικοινωνιακά’ εμπόδια

Αρχικά, ορίζουμε δύο κλάσεις εμποδίων: τα ‘φυσικά’ και τα ‘επικοινωνιακά’ εμπόδια.

Ορισμός 1 (Φυσικά εμπόδια $\mathcal{O}^{phy}$) Ένα φυσικό εμπόδιο αντιστοιχεί σε ένα εμπόδιο το οποίο αποτρέπει την φυσική παρουσία των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων – θεωρούμε ότι οι κόμβοι που τοποθετούνται στην περιοχή που καταλαμβάνει ένα τέτοιο εμπόδιο είναι ανενεργοί. Υπό αυτή την έννοια, η περιοχή του δικτύου που καταλαμβάνει ένα τέτοιο εμπόδιο είναι άδεια από κόμβους του δικτύου.

Ορισμός 2 (Επικοινωνιακά εμπόδια $\mathcal{O}^{com}$) Ένα επικοινωνιακό εμπόδιο αντιστοιχεί σε ένα εμπόδιο το οποίο προκαλεί παρεμβολές στο ασύρματο επικοινωνιακό μέσο. Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι αν υπάρχει line-of-sight μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου και το οποίο διέρχεται από ένα τέτοιο εμπόδιο, τότε οι δύο κόμβοι δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους. Επιπλέον, οι κόμβοι που είναι τοποθετημένοι πάνω από ένα τέτοιο εμπόδιο δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, ούτε με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.

Ουσιαστικά, η κλάση των φυσικών εμποδίων αντιστοιχεί σε περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχουν καθόλου κόμβοι στην περιοχή ανάπτυξης του δικτύου, δηλαδή η τοπική πυκνότητα κόμβων του δικτύου είναι μηδέν. Οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά σε τέτοια εμπόδια μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους αν το επιτρέπει η εμβέλεια μετάδοσής τους. Αντίθετα, τα επικοινωνιακά εμπόδια δεν επιτρέπουν σε κόμβους που βρίσκονται ο ένας στην εμβέλεια μετάδοσης του άλλου να επικοινωνήσουν. Προφανώς, ένα εμπόδιο μπορεί να ανήκει και στις δύο κλάσεις, εμποδίζοντας την φυσική παρουσία των κόμβων και την επικοινωνία με άλλους κόμβους στην περιοχή εκτός του εμποδίου.

Το σχήμα των εμποδίων

Δίνουμε στη συνέχεια μια συλλογή από βασικά γεωμετρικά σχήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το σχήμα του εμποδίου. Τα απλά αυτά σχήματα, με τη σειρά τους, μπορούν να συνδυαστούν για να περιγράψουν περισσότερο πολύπλοκα εμπόδια (βλ. σχήμα 4.5).

Τετραγωνικά (Ορθογώνια) εμπόδια: αυτός ο τύπος εμποδίων χοντρικά αντιστοιχεί σε κτίρια και ογκώδη οχήματα. Τα εμπόδια αυτού του τύπου γενικά δεν θα πρέπει να είναι μεγάλα σε σχέση με τις συνολικές διαστάσεις του δικτύου γιατί χωρίζουν εύκολα το δίκτυο σε διακριτές περιοχές. Εμπόδια αυτού του τύπου βρίσκονται συνήθως σε αστικά περιβάλλοντα.

Ορισμός 3 (Τετραγωνικά εμπόδια $\mathcal{O}_{rect}(p, l, w)$) Ένα τετραγωνικό εμπόδιο τοποθετείται σε ένα σημείο p της περιοχής ανάπτυξης του δικτύου, με διαστάσεις $l \times w$ (όπου l το μήκος και w το πλάτος του εμποδίου). Η τοποθέτηση του εμποδίου ορίζεται σχετικά με την πάνω αριστερή γωνία του.

Κυκλικά εμπόδια: αυτός ο τύπος εμποδίων χονδρικά αντιστοιχεί σε λίμνες, μεγάλους βράχους, κρατήρες από εκρήξεις, κ.α. Αντικείμενα αυτού του τύπου μπορούν να βρεθούν ως επί το πλείστον σε εξωτερικά περιβάλλοντα, δάση, πεδία μαχών, κτλ.

Ορισμός 4 (Κυκλικά εμπόδια $\mathcal{O}_{circ}(p, r)$) Ένα κυκλικό εμπόδιο έχει ως κέντρο ένα σημείο p της περιοχής ανάπτυξης του δικτύου και ακτίνα r .

Εκλειψοειδή (Μπούμερανγκ) Εμπόδια: τα εμπόδια αυτού του τύπου χονδρικά αντιστοιχούν σε αντικείμενα όπως π.χ., λίμνες, με σχήμα που μοιάζει με έλλειψη (μπούμερανγκ). Τέτοια εμπόδια ορίζονται με τη βοήθεια ενός κύκλου και μιας έλλειψης, όπως φαίνεται στο σχετικό σχήμα. Παρότι εμπόδια αυτού του τύπου είναι δύσκολο να τα συναντήσει κανείς στην πραγματικότητα, παρουσιάζουν ενδιαφέρον γιατί συνιστούν ουσιαστική πρόκληση για κάποια από τα πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως θα δούμε και παρακάτω. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δημιουργούν ένα τρόπον τινά ‘χαλαρό’ τοπικό αδιέξοδο, δηλαδή η πληροφορία τείνει να παγιδεύεται τοπικά σε αυτό το αδιέξοδο χωρίς να μπορεί να διαδοθεί παραπέρα.

Ορισμός 5 (Εκλειψοειδή εμπόδια $\mathcal{O}_{cres}(p, r, s)$) Ένα εκλειψοειδές εμπόδιο είναι τοποθετημένο με κέντρο ένα σημείο p του πεδίου ανάπτυξης ενός δικτύου, ο εγγεγραμμένος στο εμπόδιο κύκλος έχει ακτίνα r και η περιεχόμενη έλλειψη έχει πλάτος s .

Εμπόδια δακτυλίου: αυτός ο τύπος εμποδίων αντιπροσωπεύει περιοχές του δικτύου που είναι σχετικά απομονωμένες από τους υπόλοιπους κόμβους. Οι κόμβοι που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή του δακτυλίου δυσκολεύονται στην επικοινωνία με τους κόμβους έξω από τον δακτύλιο.

Ορισμός 6 (Εμπόδια δακτυλίου $\mathcal{O}_{ring}(p, r, m)$) Ένα εμπόδιο δακτυλίου έχει ως κέντρο ένα σημείο p του πεδίου ανάπτυξης του δικτύου και περιγράφεται από την ακτίνα r του εξωτερικού κύκλου και την ακτίνα m του εσωτερικού κύκλου που σχηματίζουν έναν δακτύλιο.

Εμπόδια ζώνης: τα εμπόδια αυτά χοντρικά αντιστοιχούν π.χ., σε ένα ποτάμι, το οποίο μπορεί να διατρέχει κάθετα την περιοχή ανάπτυξης του δικτύου, ή σε ένα τείχος (το οποίο επιπλέον εμποδίζει και την επικοινωνία). Η βασική διαφορά με τα τετραγωνικά εμπόδια είναι το μέγεθός τους, δηλαδή είναι αρκετά μεγαλύτερο το μήκος τους καθώς διατρέχουν το πεδίο ανάπτυξης του δικτύου, καθώς και ο τρόπος που ορίζονται.

Ορισμός 7 (Εμπόδια ζώνης $\mathcal{O}_{stripe}(p, w, a)$) Ένα εμπόδιο ζώνης τοποθετείται στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου σε ένα σημείο p με πλάτος w και γωνιά a ως προς την οριζόντια κατεύθυνση του πεδίου ανάπτυξης. Η θέση του σημείου p είναι η πάνω αριστερή γωνία του εμποδίου.

Στοχαστική παρουσία των εμποδίων

Το τρίτο κριτήριο στο μοντέλο μας είναι το αν η τυχαιότητα χαρακτηρίζει την ύπαρξη των εμποδίων.

Ντετερμινιστικά εμπόδια: αυτή η κατηγορία αναφέρεται σε εμπόδια τα οποία είναι παρόντα καθ' όλη τη διάρκεια ενός πειράματος εξομοίωσης και δεν μεταβάλλονται υπό καμία έννοια κατά την περίοδο αυτή. Ορίζονται από τον χρήστη πριν την έναρξη του πειράματος. Τα ντετερμινιστικά εμπόδια μπορούν να ανήκουν σε οποιαδήποτε από τις κατηγορίες εμποδίων και σχημάτων που περιγράφηκαν προηγουμένως.

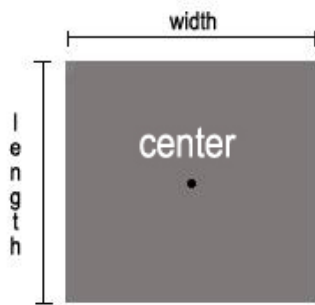
Στοχαστικά εμπόδια: αυτή η κατηγορία αναφέρεται σε εμπόδια τα οποία δεν είναι παρόντα καθ' όλη τη διάρκεια ενός πειράματος εξομοίωσης, αλλά αντίθετα εμφανίζονται τυχαία για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και μπορούν ακόμα και να εξαφανίζονται από το πεδίο ανάπτυξης του δικτύου. Π.χ., ο αναγνώστης μπορεί να αναλογιστεί ένα τρένο το οποίο διασχίζει κάθετα την περιοχή του δικτύου και το χωρίζει στα δύο μην επιτρέποντας την επικοινωνία του ενός μέρους με το άλλο, ή το παράδειγμα ενός δρόμου τον οποίο διασχίζουν μεγάλα οχήματα. Επιπλέον, τα εμπόδια αυτού του τύπου έχουν ένα προσωρινό αποτέλεσμα πάνω στους κόμβους του δικτύου που βρίσκονται μέσα στην περιοχή που καλύπτουν τα εμπόδια αυτά, κατά τη διάρκεια της ύπαρξης των συγκεκριμένων εμποδίων. Ακόμα, τέτοια στοχαστικά εμπόδια μπορούν να αντιστοιχιστούν σε περιοχές στις οποίες η τοπική πυκνότητα κόμβων πέφτει ραγδαία λόγω φυσικών φαινομένων, παροδικών ή μονίμων, ή και λόγω της λειτουργίας των διαφόρων πρωτοκόλλων που εκτελούνται στους κόμβους του δικτύου. Μπορεί λ.χ., οι κόμβοι του δικτύου να κλείνουν τους πομποδέκτες τους για να εξοικονομήσουν ενέργεια. Τα στοχαστικά εμπόδια μπορούν να ανήκουν σε οποιονδήποτε τύπο εμποδίων από αυτούς που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Προκειμένου να οριστεί ένα στοχαστικό εμπόδιο, μια απλή διαδικασία ορισμού είναι η ακόλουθη: ο χρήστης αρχικά ορίζει τον τύπο και το σχήμα του εμποδίου, και κατόπιν ορίζει ένα χρόνο έναρξης και τη χρονική διάρκεια του εμποδίου. Η διάρκεια αυτή μπορεί να είναι συγκεκριμένη ή έως το τέλος της εξομοίωσης.

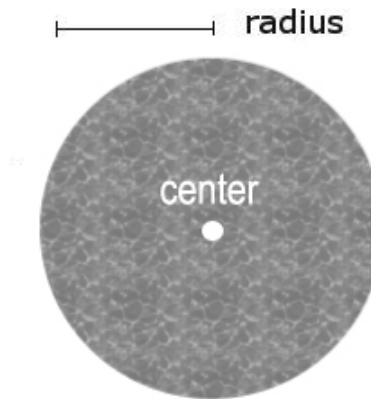
4.1.5 Το περιβάλλον εξομοίωσης – Υλοποίηση και μετρικές

Αυτή η ενότητα περιγράφει την μεταφορά στον εξομοιωτή δικτύων simDust (βλ. ενότητα 3.5) ενός μέρους του προτεινόμενου μοντέλου εμποδίων, που υλοποιήσαμε προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση των διαφόρων τύπων εμποδίων στην λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Δίνουμε επίσης μια περιγραφή των μετρικών που χρησιμοποιούμε στη συνέχεια για τα πειράματά μας, τα οποία περιγράφονται στην επόμενη ενότητα του κειμένου.

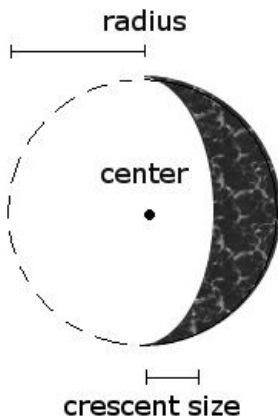
Υπενθυμίζουμε ότι μια βασική ιδέα στον συγκεκριμένο εξομοιωτή είναι ότι υπάρχει μια σειρά από βασικές κλάσεις οι οποίες παρέχουν κάποιες βασικές υπηρεσίες και τις οποίες ο προγραμματιστής μπορεί να επεκτείνει προκειμένου να υλοποιήσει κάποιο πρωτόκολλο



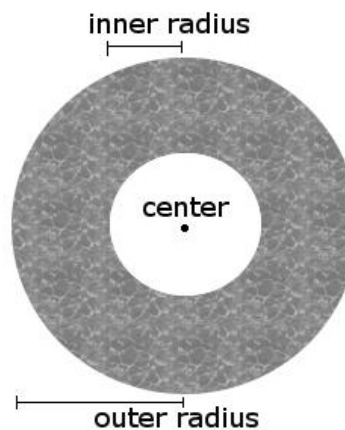
Σχήμα 4.1: Ένα τετραγωνικό εμπόδιο



Σχήμα 4.2: Ένα κυκλικό εμπόδιο



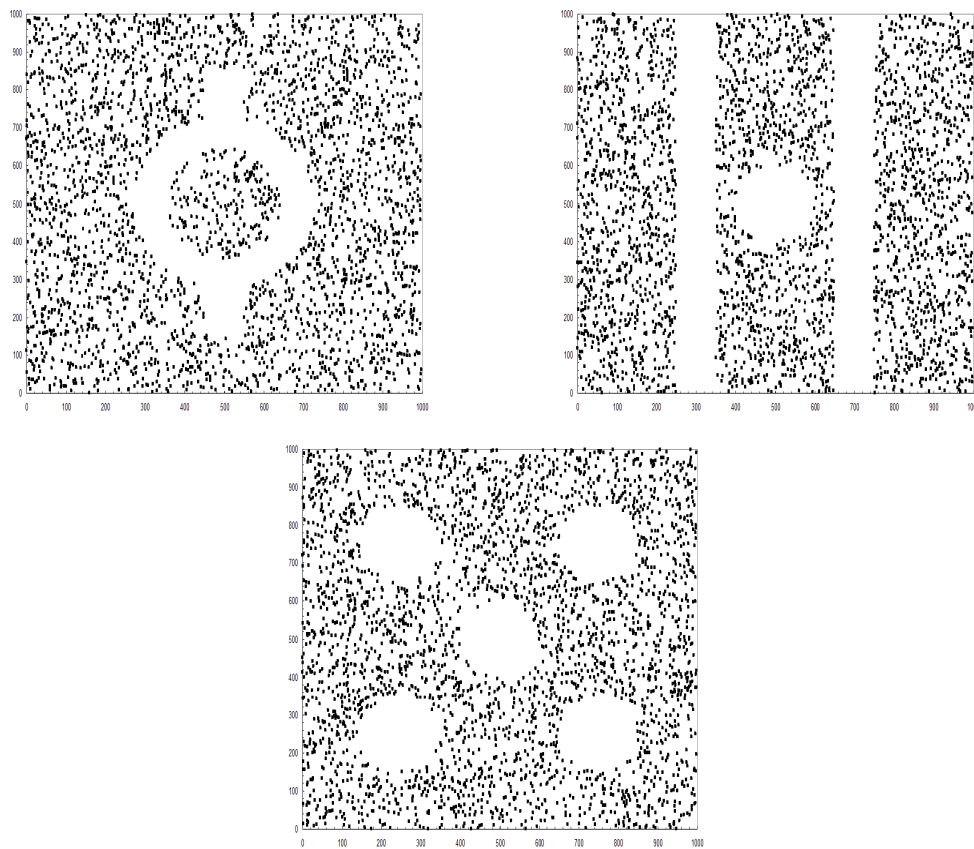
Σχήμα 4.3: Ένα εκλειψοειδές εμπόδιο



Σχήμα 4.4: Ένα εμπόδιο δακτυλίου

διάδοσης πληροφορίας. Το εξομοιούμενο δίκτυο συνολικά λειτουργεί με ένα συγχρονισμένο τρόπο, πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας αυτό που ονομάζουμε 'γύρους'. Σε κάθε τέτοιο γύρο, κάθε κόμβος του δικτύου μπορεί να εκτελέσει κάποιες λειτουργίες (π.χ. επεξεργασία για τους σκοπούς του πρωτοκόλλου διάδοσης πληροφορίας). Ο προγραμματιστής καθορίζει τι πρέπει να κάνει κάθε κόμβος στη διάρκεια ενός γύρου, π.χ., πώς θα αντιδράσει ένας κόμβος όταν ανιχνεύσει κάποιο γεγονός.

Σε ότι αφορά τα θέματα συνεκτικότητας του δικτύου, κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί μια λίστα από γείτονες, δηλαδή τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε ένα δίσκο ο οποίος ορίζεται με κέντρο το σημείο που αντιπροσωπεύει την τοποθεσία κάθε κόμβου, και με ακτίνα την εμβέλεια μετάδοσης του κόμβου. Κάνουμε την υπόθεση, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ότι αν κάποιος κόμβος είναι μέσα σε ένα τέτοιο δίσκο κάποιου άλλου κόμβου, τότε μπορεί να λάβει μηνύματα από αυτόν τον κόμβο. Θεωρούμε επίσης ότι η εμβέλεια μετάδοσης του κάθε κόμβου μπορεί να αλλάξει ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους. Αυτές οι λίστες γειτνίασης υπολογίζονται μια φορά στην αρχή της εξομοίωσης. Κατόπιν, κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης μπορεί να επαναληφθεί αυτή η διαδικασία εύρεσης γειτόνων για κάθε κόμβο του δικτύου όταν συμβεί κάποιο γεγονός, το οποίο θα



Σχήμα 4.5: Συνδυασμοί βασικών σχημάτων για να προκύψουν πιο σύνθετοι τύποι εμποδίων

σηματοδοτηθεί από τον εξομοιωτή. Ένα τέτοιο γεγονός μπορεί να είναι η αλλαγή της εμβέλειας μετάδοσης κάποιου κόμβου ή η εισαγωγή ή αλλαγή της κατάστασης κάποιου εμποδίου μέσα στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου.

Σχετικά τώρα με την μεταφορά του προτεινόμενου μοντέλου εμποδίων, υλοποιήθηκαν μόνο ντετερμινιστικά εμπόδια, για τις κατηγορίες σχημάτων που αναφέρονται μέσα στο μοντέλο. Βασιστήκαμε εν μέρει σε κάποιες δομές δεδομένων που προσφέρει η αλγοριθμική βιβλιοθήκη LEDA, πιο συγκεκριμένα τους τύπους Circle και Segment, οι οποίοι αντιστοιχούν σε κύκλους και ευθύγραμμα τμήματα, αντίστοιχα. Αυτές οι δομές δεδομένων απλοποιούν την διαδικασία ανάθεσης επιφάνειας για κάθε εμπόδιο και τοποθέτησης των κόμβων του δικτύου μέσα στην περιοχή ανάπτυξής του. Απλοποιούν επίσης την διαδικασία με την οποία διαπιστώνουμε αν ένα εμπόδιο μπλοκάρει το line-of-sight μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου.

Προκειμένου να ελέγξουμε την ύπαρξη ή όχι line-of-sight μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων, ορίζουμε ένα ευθύγραμμο τμήμα για αυτούς τους δυο κόμβους και ελέγχουμε κατά πόσον αυτό διασχίζει ή όχι κάποιο εμπόδιο. Αν ναι, τότε θεωρούμε ότι αν το εμπόδιο είναι επικοινωνιακό δεν υπάρχει line-of-sight μεταξύ αυτών των δύο κόμβων και δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους απ' ευθείας. Αυτός ο έλεγχος γίνεται αρχικά για κάθε κόμβο και εμπόδιο μέσα στο εξομοιούμενο πεδίο, προκειμένου να υπολογίζουμε τις λίστες γειτνίασης για κάθε κόμβο (τους κόμβους με τους οποίους μπορεί ο κάθε κόμβος

να επικοινωνήσει).

Κάνουμε την υπόθεση ότι το κέντρο ελέγχου του δικτύου είναι τοποθετημένο στο μέσο της δεξιάς πλευράς του πεδίου ανάπτυξης του δικτύου. Εξαιτίας αυτής της υπόθεσης, κάνουμε την επιπρόσθετη υπόθεση ότι ο προσανατολισμός των εκλειψοειδών εμποδίων μέσα στο πεδίο είναι πάντα ο ίδιος.

Η μεταφορά του μοντέλου στον εξομοιωτή βασίζεται στον ορισμό μιας κλάσης `Obstacle`, την οποία χρησιμοποιούμε για να δημιουργήσουμε τις κλάσεις που ορίζονται στο μοντέλο. Η κλάση αυτή περιέχει την βασική περιγραφή, και ορίζει τη βασική λειτουργικότητα που πρέπει να έχει ένα εμπόδιο στον εξομοιωτή: πρώτον, να ελέγχει αν το εμπόδιο παρεμβάλλεται στην επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου, και, δεύτερον, αν κάποιος κόμβος βρίσκεται πάνω από το συγκεκριμένο εμπόδιο.

```
class Obstacle {  
    int m_obstacleType; //physical or communication obstacle  
    int m_startRound; // creation round of obstacle  
    int m_endRound; // ending round of obstacle  
  
    public:  
  
    virtual bool isBlockingCommunication(point p1, point p2);  
    virtual bool isOverObstacle(point p);  
  
    Obstacle(int n1, int n2, int n3 );  
    virtual Obstacle();  
  
    int getObstacleType() { return m_obstacleType; }  
};
```

Παράδειγμα επέκτασης του βασικού τύπου εμποδίου είναι ο τύπος εμποδίων δακτυλίου (RingObstacle).

```
RingObstacle::RingObstacle(point center, int innerRadius, int outerRadius,
                             int isCom = PHYSICAL_OBSTACLE, int startR = 0,
                             int endR = 0)
    :Obstacle( isCom, startR, endR ) {
    m_center = center;
    m_outerCircle = circle(center, outerRadius);
    m_innerRadius = innerRadius;
    m_outerRadius = outerRadius;
}

bool RingObstacle::isBlockingCommunication(point p1, point p2 ) {
    if ( getObstacleType() == PHYSICAL_OBSTACLE ) {
        segment s = segment(p1, p2);
        list<point> l = this->m_outerCircle.intersection(s);

        if ( l.empty() ) return false;

        else return true;
    }

    else return false;
}

bool RingObstacle::isOverObstacle( point p){
    double k = p.distance(this->m_center);

    if ( k >= this->m_innerRadius && k <= this->m_outerRadius )
        return true;
    else return false;
}
```

Χρησιμοποιούμε έναν αριθμό από συναρτήσεις για να συνδέσουμε την υπάρχουσα λειτουργικότητα του εξομοιωτή με το μοντέλο μας:

- *makeObstacleSetup*: η συνάρτηση αυτή καλείται στην έναρξη της λειτουργίας του εξομοιωτή για να ‘διαβάσει’ τους ορισμούς των εμποδίων που κάνουμε ξεχωριστά σε ένα αρχείο κειμένου, και να δημιουργήσει τα αντίστοιχα αντικείμενα. Όλα τα εμπόδια που βρίσκονται στο πεδίο του δικτύου καταχωρούνται σε μία λίστα.
- *particleOverObstacle*: η συνάρτηση αυτή διατρέχει τη λίστα που είναι δηλωμένα όλα τα εμπόδια, και ελέγχει αν κάποιος συγκεκριμένος κόμβος βρίσκεται πάνω από κάποιο εμπόδιο.
- *communicationIsBlocked*: παρομοίως, η συνάρτηση αυτή ελέγχει αν κάποιο εμπόδιο παρεμβάλλεται μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων.
- *makeNeighbourhoodsPoint*: η συνάρτηση αυτή καλείται για να φτιάξει τις λίστες γειτνίασης για όλους τους κόμβους του δικτύου, στην αρχή της εκτέλεσης του εξομοιωτή.

- *recalculateNeighbourhoodsPoint*: η συνάρτηση αυτή καλείται να επαναυπολογίσει τη λίστα γειτνίασης για έναν κόμβο ο οποίος έχει αλλάξει την εμβέλεια μετάδοσής του, σε κάποια προηγούμενη χρονική στιγμή του πειράματος.

Τα εμπόδια δηλώνονται σε ένα απλό αρχείο κειμένου, στο οποίο δηλώνεται ο τύπος του κάθε εμποδίου, οι συντεταγμένες και οι διαστάσεις του. Κάθε τέτοιο αρχείο μπορεί να περιέχει πολλαπλές δηλώσεις εμποδίων.

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο της διατριβής (βλ. ενότητα 3.1), στο πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών γεγονότων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων έχουμε ένα πλήθος από K κρίσιμα γεγονότα $(E_1, E_2, \dots, E_K)$, η πληροφορία για τα οποία πρέπει με κάποιον τρόπο να φτάσει στο κέντρο ελέγχου του δικτύου. Έστω l το πλήθος των γεγονότων για τα οποία ενημερώθηκε το κέντρο ελέγχου του δικτύου. Τότε, ορίζουμε τις ακόλουθες μετρικές (τις οποίες χρησιμοποιούμε στα πειράματα που περιγράφονται στην ενότητα που ακολουθεί):

Ποσοστό επιτυχίας: Το ποσοστό επιτυχίας P_S ορίζεται ως το πλήθος των συμβάντων για τα οποία ενημερώθηκε επιτυχώς το κέντρο ελέγχου του δικτύου προς το συνολικό πλήθος των συμβάντων μέσα στο δίκτυο, δηλαδή $P_S = l/K$.

Διαθέσιμη συνολική ενέργεια: Ένας άμεσος τρόπος να συγκρίνουμε την απόδοση διαφορετικών πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας είναι να μελετήσουμε την διαθέσιμη ενέργεια στην πορεία του χρόνου, τόσο για κάθε κόμβο όσο και συνολικά για το δίκτυο. Έστω E_i η διαθέσιμη ενέργεια που απομένει στον κόμβο i . Τότε ορίζουμε ως συνολική διαθέσιμη ενέργεια στο δίκτυο το άθροισμα της διαθέσιμης ενέργειας των κόμβων του δικτύου, δηλαδή $E_{tot} = \sum_i^n E_i$, όπου n είναι το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Προφανώς όσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνει ένα πρωτόκολλο διάδοσης πληροφορίας, τόσο το καλύτερο.

Πλήθος και κατανομή ‘ζωντανών’ κόμβων: Μία ακόμα μετρική της αποτελεσματικότητας ενός πρωτοκόλλου διάδοσης πληροφορίας είναι το συνολικό πλήθος των ‘ζωντανών’ κόμβων στο δίκτυο, και η κατανομή τους σε αυτό. Με τον όρο ‘ζωντανός’ κόμβος εννοούμε τους κόμβους οι οποίοι ακόμα δεν έχουν εξαντλήσει τα αποθέματα ενέργειάς τους. Όσο περισσότεροι είναι αυτοί οι κόμβοι, τόσο το καλύτερο. Επιπλέον, η κατανομή τους είναι εξίσου σημαντική με το πλήθος τους, καθώς υπάρχουν κόμβοι σε περιοχές κριτικής σημασίας για την συνεκτικότητα του δικτύου.

4.1.6 Πειραματική αξιολόγηση – Σενάρια και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, περιγράφουμε αναλυτικά το setup που χρησιμοποιούμε στα πειράματά μας, σχετικά με την πυκνότητα κόμβων στα εξομοιούμενα δίκτυα και την κατανομή των κόμβων, των συμβάντων που ανιχνεύονται από τους κόμβους μέσα στο δίκτυο και την δημιουργία εμποδίων μέσα στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου. Θεωρούμε ότι όταν ο εξομοιωτής παράγει ένα συμβάν, αυτό ανιχνεύεται από ένα μόνο κόμβο και ο κόμβος αυτός παράγει ένα μήνυμα το οποίο πρέπει να φτάσει στο κέντρο ελέγχου του δικτύου. Παρέχουμε μια σύντομη περιγραφή των πειραμάτων που διεξαγάγαμε και μια ανάλυση των αποτελεσμάτων που πήραμε από αυτά. Όλα τα πειράματα έγιναν σε ένα πεδίο με διαστάσεις 1000×1000 με τη χρήση ντετερμινιστικών εμποδίων (δηλαδή δεν χρησιμοποιήσαμε στοχαστικά εμπόδια). Κάνουμε την υπόθεση ότι το κάτω δεξί άκρο του πεδίου ανάπτυξης

του δικτύου έχει συντεταγμένες $(0, 0)$ και ότι το κέντρο ελέγχου του δικτύου είναι σταθερό και βρίσκεται στο σημείο $(999, 499)$. Κάνουμε ακόμα την παραδοχή ότι χρησιμοποιούμε μόνο ‘φυσικά’ εμπόδια στα πειράματά μας, εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρουμε ότι χρησιμοποιούμε επικοινωνιακά εμπόδια. Τέλος, οι κόμβοι του δικτύου τοποθετήθηκαν με έναν τυχαίο ομογενή τρόπο στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου. Θεωρούμε ότι οι κόμβοι του δικτύου έχουν μια αρχική εμβέλεια μετάδοσης (50 μέτρα), η οποία μπορεί να αλλάξει (στο VTRP) και να αυξηθεί. Η παραδοχή μας αυτή, όπως αναφέρθηκε και στη ενότητα που περιγράφεται το VTRP (βλ. ενότητα 3.3), είναι αρκετά δόκιμη, καθώς οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν την εμβέλεια μετάδοσής τους από τη μια, και από την άλλη συνήθως οι προγραμματιστές θέτουν την εμβέλεια αυτή σχετικά χαμηλά, προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια.

Σε ότι αφορά τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας, χρησιμοποιήσαμε τρία πρωτόκολλα διάδοσης πληροφορίας, τα οποία είναι σχετικά αντιπροσωπευτικά των βασικών στρατηγικών που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε τα πρωτόκολλα LTP και VTRP , τα οποία περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.3, και το πρωτόκολλο PFR , το οποίο περιγράφεται ακολούθως.

Το πρωτόκολλο PFR

Το PFR (Probabilistic Forwarding Protocol [10]) χρησιμοποιεί μια πιθανοτική λογική, η οποία είναι εμπνευσμένη από το Directed Diffusion [48]. Η βασική του ιδέα είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω της χρήσης ορισμένων μονοπατιών για τη διάδοση της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο, τα οποία επιλέγονται με μία πιθανοτική λογική.

Το πρωτόκολλο αποφεύγει το flooding ευνοώντας με πιθανοτικό τρόπο τη διάδοση της πληροφορίας μέσω των κόμβων που βρίσκονται κοντά στη βέλτιστη ευθεία ES , η οποία ενώνει το σημείο στο οποίο βρίσκεται ο κόμβος του δικτύου που ανιχνεύει το γεγονός E και το κέντρο ελέγχου του δικτύου S . Αυτό γίνεται υπολογίζοντας σε κάθε βήμα της διάδοσης της πληροφορίας την γωνία $\phi = (\widehat{EPS})$, στην οποία το σημείο P αντιπροσωπεύει τον κόμβο του δικτύου που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο στο συγκεκριμένο βήμα, ο οποίος έχει λάβει προηγουμένως από κάποιον άλλο κόμβο την πληροφορία για το συγκεκριμένο συμβάν. Αν η ϕ είναι μεγαλύτερη ή ίση από ένα προκαθορισμένο κατώφλι ($\phi_{threshold}$), τότε ο P θα μεταδώσει την πληροφορία παραπέρα. Στην αντίθετη περίπτωση, αποφασίζει αν θα μεταδώσει ή όχι την πληροφορία με μια πιθανότητα ίση με ϕ/π . Εξαιτίας της πιθανοτικής φύσης αυτών των αποφάσεων για τη διάδοση της πληροφορίας και προκειμένου να περιορίσουμε τις ενδεχόμενες αποτυχίες παράδοσης της πληροφορίας, χρησιμοποιείται αρχικά ένα ‘περιορισμένο’ flooding το οποίο δημιουργεί ένα ‘μέτωπο’ από κόμβους που έχουν την πληροφορία που πρέπει να παραδοθεί στο κέντρο ελέγχου. Αφού δημιουργηθεί αυτό το μέτωπο, χρησιμοποιείται στη συνέχεια η πιθανοτική προώθηση.

Ουσιαστικά, το PFR χρησιμοποιεί τη διαισθητική, ντετερμινιστική ιδέα ‘αν η απόσταση από την ευθεία ES είναι μικρή τότε προώθησε την πληροφορία, αλλιώς μην το κάνεις’. Αυτή η βασική ιδέα εμπλουτίστηκε με τυχαίες αποφάσεις (πάνω από ένα κατώφλι) για να γίνει ένα μικρό, τοπικό, flooding και να αντιμετωπιστούν τοπικές αποτυχίες προώθησης της πληροφορίας.

Πειράματα χωρίς τη χρήση εμποδίων στην εξομοίωση

Για το πρώτο σει πειραμάτων που κάναμε, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε δίκτυα με μεταβλητό μέγεθος (πλήθος κόμβων) και χωρίς εμπόδια (για να μπορούμε στη συνέχεια να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα με τη χρήση εμποδίων). Πιο συγκεκριμένα, τοποθετούμε (500, 3500) κόμβους στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου σε βήματα των 500 κόμβων, και δημιουργούμε 250 συμβάντα τα οποία πρέπει να διαδοθούν προς το κέντρο ελέγχου του δικτύου. Ένας στόχος των αρχικών αυτών πειραμάτων ήταν να βρούμε ένα μέγεθος δικτύου στο οποίο και τα τρία πρωτόκολλα που χρησιμοποιούμε στις εξομοιώσεις να αποδίδουν καλά, έτσι ώστε να είναι 'δίκαια' η σύγκριση της απόδοσής τους υπό την παρουσία εμποδίων. Το μοναδικό κριτήριό μας για αυτή την απόφαση ήταν το *ποσοστό επιτυχίας* του κάθε πρωτοκόλλου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6, η απόδοση των τριών πρωτοκόλλων αυξάνεται παράλληλα με την πυκνότητα του δικτύου και το VTRP επιτυγχάνει ένα ψηλό ποσοστό επιτυχίας νωρίτερα από τα άλλα δύο πρωτόκολλα. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όταν ο αριθμός των κόμβων του δικτύου φτάσει τους 2500 και τα τρία πρωτόκολλα έχουν πολύ υψηλό ποσοστό επιτυχίας (σχεδόν 100%). Για το λόγο αυτό, επιλέγουμε να κάνουμε τα υπόλοιπα πειράματά μας με αυτό τον αριθμό κόμβων ($n = 2500$).

Πειράματα με κυκλικά εμπόδια

Για αυτό το σει πειραμάτων δημιουργήσαμε δίκτυα με μεταβλητό μέγεθος, τα οποία περιείχαν ένα κυκλικό εμπόδιο στο κέντρο του πεδίου, δηλαδή στο σημείο (499, 499). Η επιφάνεια που καταλαμβάνει το εμπόδιο κυμαίνεται από 5% έως 70%, σε βήματα του 5%. Το μέγεθος του δικτύου μεταβαλλόταν, προκειμένου να διατηρήσουμε την πυκνότητα του δικτύου ίδια με αυτήν στην περίπτωση που δεν έχουμε καθόλου εμπόδια. Επίσης, διεξάγαμε πειράματα για τις δύο περιπτώσεις που έχουμε φυσικά και επικοινωνιακά εμπόδια.

Για το συγκεκριμένο σει εξομοιώσεων, μόνο ένα συμβάν παραγόταν για κάθε εκτέλεση του πειράματος, συγκεκριμένα στον κόμβο με συντεταγμένες (0, 499), προκειμένου να μελετήσουμε την περίπτωση που πρέπει να διαδοθεί η πληροφορία για ένα συμβάν το οποίο δημιουργήθηκε σε κόμβο που βρίσκεται αντιδιαμετρικά με το κέντρο ελέγχου του δικτύου, σε σχέση με το κυκλικό εμπόδιο. Ακόμα, κάθε εκτέλεση του εξομοιωτή διαρκεί ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, δηλαδή δεν περιμένουμε επ' άπειρο να μας έρθει η πληροφορία, αλλά θεωρούμε ότι από ένα χρονικό διάστημα και μετά ότι η πληροφορία δεν έχει φτάσει στο κέντρο ελέγχου και ούτε πρόκειται. Χρησιμοποιήσαμε αυτές τις συνθήκες και επαναλάβαμε το πείραμα 100 φορές, στις οποίες κάθε φορά οι κόμβοι του δικτύου άλλαζαν θέση (εκτός από το κέντρο ελέγχου και τον κόμβο που παράγει το συμβάν).

Τα αποτελέσματα για αυτό το σει πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα 4.7. Είναι προφανές ότι το LTP δεν συμπεριφέρεται τόσο καλά όσο τα άλλα δύο πρωτόκολλα, ενώ το VTRP συμπεριφέρεται καλά ανεξάρτητα από το μέγεθος του εμποδίου. Το PFR επιτυγχάνει καλή απόδοση ακόμα και για σχετικά μεγάλα μεγέθη εμποδίου, αλλά από ένα σημείο και μετά ουσιαστικά παύει να μεταδίδει σωστά την πληροφορία στο κέντρο ελέγχου. Αυτό μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι το εμπόδιο σταματά την δημιουργία του μετώπου διάδοσης του πρωτοκόλλου (βλ. περιγραφή του PFR), και δεν μπορεί να υπερπηδήσει το εμπόδιο από ένα σημείο και μετά. Επιπλέον, τα επικοινωνιακά εμπόδια είναι δυσκολότερο να ξεπεραστούν από τα φυσικά, όπως αναμενόταν. Παρατηρούμε επίσης ότι αν και διατηρούμε ίδια

την πυκνότητα του δικτύου, δηλαδή η συνεκτικότητα του δικτύου παραμένει περίπου η ίδια, τα εμπόδια έχουν εμφανή επίδραση στη λειτουργία του δικτύου.

Πειράματα με τετραγωνικά εμπόδια

Χρησιμοποιήσαμε δίκτυα διαφόρων μεγεθών σε αυτό το σει πειραμάτων, τα οποία περιείχαν ένα τετραγωνικό εμπόδιο στο κέντρο του πεδίου ανάπτυξης του δικτύου, με συντεταγμένες (499,499). Λάβαμε υπόψιν τετραγωνικά εμπόδια δύο ειδών στα πειράματά μας. Στην πρώτη περίπτωση το μήκος του εμποδίου είναι 1.5 φορές το πλάτος του και η επιφάνεια που αυτό καλύπτει κυμαίνεται από 5% έως 50% της συνολικής επιφάνειας του πεδίου. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιήσαμε ένα 'λεπτό' τετραγωνικό εμπόδιο με πλάτος 50 (δηλαδή 5% του συνολικού πλάτους του πεδίου) και μεταβλητό μήκος, το οποίο κυμαίνεται από 5% έως 70% του συνολικού μήκους του πεδίου, σε βήματα του 5%. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το setup ήταν ίδιο με αυτό των κυκλικών εμποδίων.

Τα αποτελέσματα από το συγκεκριμένο σει πειραμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 4.9. Παρατηρούμε από τη μια ότι το LTP αρχίζει γρήγορα να έχει προβλήματα στη διάδοση της πληροφορίας, λόγω του ότι όταν προσεγγίζει το εμπόδιο δεν βρίσκει κόμβους για να προωθήσει την πληροφορία, τόσο για τα φυσικά όσο και για τα επικοινωνιακά εμπόδια. Από την άλλη, το PFR και το VTRP, ειδικά στην περίπτωση των φυσικών εμποδίων, τα πηγαίνουν πολύ καλύτερα από το LTP. Συμπεραίνουμε λοιπόν, και πάλι, ότι η παρουσία εμποδίων στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία του.

Πειράματα με εμπόδια δακτυλίου

Για αυτό το σει πειραμάτων, δημιουργήσαμε ένα εμπόδιο δακτυλίου με το κέντρο του τοποθετημένο στο κεντρικό σημείο ανάπτυξης του δικτύου, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Μελετήσαμε τρεις περιπτώσεις σε σχέση με το πάχος του δακτυλίου, θέτοντάς το σε 25%, 33% και 50% του μήκους της ακτίνας του εσωτερικού κύκλου του εμποδίου. Και στις τρεις περιπτώσεις χρησιμοποιήσαμε το ίδιο setup με τα προηγούμενα σει πειραμάτων. Εξετάσαμε μόνο την περίπτωση φυσικών εμποδίων δακτυλίου, μια και τα επικοινωνιακά εμπόδια δακτυλίου είναι στην ουσία η ίδια περίπτωση με τα κυκλικά επικοινωνιακά εμπόδια.

Τα αποτελέσματα από το συγκεκριμένο σει πειραμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 4.10. Παρατηρούμε ότι η γενική εικόνα και για τα τρία μήκη δακτυλίου: το LTP σταματά να λειτουργεί σωστά αρκετά νωρίς, το PFR τα πηγαίνει καλύτερα και το VTRP τα πηγαίνει καλά για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Έπειτα από το σημείο όπου το πάχος του δακτυλίου είναι μεγαλύτερο από την αρχική εμβέλεια μετάδοσης των κόμβων, τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με την περίπτωση των κυκλικών εμποδίων.

Πειράματα με εμπόδια ζώνης

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως στον ορισμό των εμποδίων ζώνης, ένα εμπόδιο αυτού του τύπου θα μπορούσε να είναι ένας ποταμός που διασχίζει το πεδίο ανάπτυξης του δικτύου. Τοποθετήσαμε ένα τέτοιο εμπόδιο με το κέντρο του να βρίσκεται στο κεντρικό σημείο του δικτύου, το μήκος του να είναι ίσο με το μήκος του πεδίου, και το πλάτος να είναι μεταβλητό, και να κυμαίνεται από 5% έως 45% (αρκετά ακραία περίπτωση) του πλάτους του πεδίου του δικτύου, σε βήματα του 5%. Χρησιμοποιήσαμε το ίδιο setup

με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Το συγκεκριμένο σεντ πειραμάτων περιλαμβάνει μόνο φυσικά εμπόδια (τα επικοινωνιακά εμπόδια σε αυτή την περίπτωση έχουν νόημα μόνο αν είναι στοχαστικά, εμείς ασχολούμαστε στα πειράματά με ντετερμινιστικά εμπόδια).

Τα αποτελέσματα από το συγκεκριμένο σεντ πειραμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 4.8. Παρατηρούμε ότι, όπως αναμενόταν, το PFR και το LTP δεν συμπεριφέρονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά απέναντι σε εμπόδια ζώνης, επειδή η σταθερή εμβέλεια μετάδοσής τους είναι μεγάλο μειονέκτημα απέναντι στα εμπόδια αυτά. Ένα άλλο ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ότι ούτε το VTRP συμπεριφέρεται σωστά μετά από ένα ορισμένο μέγεθος εμποδίου. Αυτό οφείλεται μάλλον στο γεγονός ότι το πρωτόκολλο χρειάζεται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρι να ρυθμίσει την εμβέλεια μετάδοσης των κόμβων, το οποίο κατά τα φαινόμενα είναι μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα που θέσαμε ως διάρκεια κάθε πειράματος.

Πειράματα με εκλειψοειδή εμπόδια

Με παρόμοιο τρόπο με την περίπτωση των εμποδίων δακτυλίου, τοποθετήσαμε ένα εκλειψοειδές εμπόδιο στο κέντρο του πεδίου ανάπτυξης του δικτύου, και εξετάσαμε δύο περιπτώσεις: μία στην οποία το εμπόδιο είχε πάχος 75% της ακτίνας του εμποδίου και μία στην οποία είχε πάχος 50%. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήσαμε το ίδιο setup με τα προηγούμενα σεντ πειραμάτων. Στο συγκεκριμένο σεντ πειραμάτων συμπεριλάβαμε μόνο φυσικά εμπόδια.

Τα αποτελέσματα από το συγκεκριμένο σεντ πειραμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 4.12. Είναι προφανές πως ο συγκεκριμένος τύπος εμποδίων είναι ο πιο δύσκολος από όλους να υπερπηδηθεί, αφού δημιουργεί ουσιαστικά ένα 'χαλαρό' αδιέξοδο. Το LTP, όπως αναμένεται, δεν συμπεριφέρεται καθόλου καλά στο συγκεκριμένο πείραμα, ενώ η απόδοση του PFR πέφτει κάθετα μετά από λίγο. Το VTRP συμπεριφέρεται αρκετά καλά στην περίπτωση όπου το εμπόδιο είναι σχετικά λεπτό, αλλά στην άλλη περίπτωση και αυτό μετά από κάποια στιγμή αποτυγχάνει και η απόδοσή του πέφτει κατακόρυφα.

Πειράματα με πολλαπλά κυκλικά εμπόδια

Διεξάγαμε επίσης πειράματα στα οποία τοποθετήσαμε πολλαπλά κυκλικά εμπόδια στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου, προκειμένου να εξετάσουμε κατά πόσον μεταβάλλεται η συμπεριφορά των πρωτοκόλλων σε σύγκριση με την περίπτωση που έχουμε ένα μόνο (μεγάλο) εμπόδιο. Εξετάσαμε δύο περιπτώσεις, στην πρώτη είχαμε 2 κυκλικά εμπόδια και στη δεύτερη περίπτωση είχαμε 3. Χρησιμοποιήσαμε το ίδιο setup με τα προηγούμενα σεντ πειραμάτων. Τα εμπόδια αυτά τοποθετήθηκαν πάνω στην ευθεία που ενώνει το κέντρο ελέγχου του δικτύου με τον κόμβο ο οποίος ανιχνεύει το μοναδικό γεγονός στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των δύο κυκλικών εμποδίων τα κέντρα τους ήταν στα σημεία (333, 500) και (667, 500), ενώ στην περίπτωση των τριών κυκλικών εμποδίων τα κέντρα τους ήταν στα σημεία (250, 500), (500, 500) και (750, 500).

Τα αποτελέσματα από το συγκεκριμένο σεντ πειραμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 4.11. Είναι εμφανές ότι το LTP και πάλι δεν μπορεί να παράξει κάποιο θετικό αποτέλεσμα, ενώ η συμπεριφορά του PFR είναι παρόμοια με αυτή της περίπτωσης ενός κυκλικού εμποδίου. Το VTRP συμπεριφέρεται παρόμοια την περίπτωση του ενός κυκλικού εμποδίου. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι αλλάζοντας τον αριθμό των εμποδίων αλλά διατηρώντας ίδια την πυκνότητα του δικτύου και τον τύπο εμποδίου, παράγονται διαφορετικά αποτελέσματα.

Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας το σχήμα 4.13, βλέπουμε συνολικά την επίδοση του LTP και του PFR για τους διάφορους τύπους εμποδίων. Ο τύπος και το πλήθος των εμποδίων επηρεάζουν την συμπεριφορά των πρωτοκόλλων και επίσης παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του δικτύου δεν σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό επιτυχίας τους, όταν υπάρχουν εμπόδια παρόντα στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου.

4.1.7 Συμπεράσματα

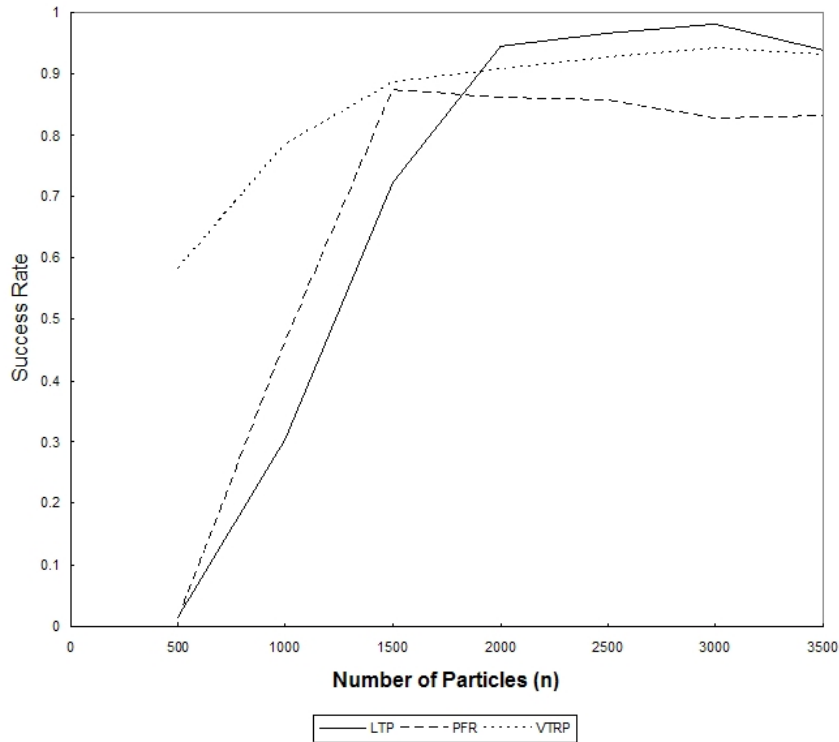
Ανακεφαλαιώνοντας:

- Παρουσιάσαμε ένα γενικό και συστηματικό μοντέλο εμποδίων για την χρήση κατά τη διάρκεια εξομοίωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων.
- Το μοντέλο αυτό αποσκοπεί περισσότερο στην ανάδειξη των αδυναμιών των πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας κάτω από ‘δύσκολες συνθήκες’ και λιγότερο στη ρεαλιστική εξομοίωση.
- Υλοποιήσαμε μέρος του μοντέλου μας στον εξομοιωτή δικτύων simDust και διεξαγάγαμε πειράματα προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση της εισαγωγής εμποδίων κατά τη διάρκεια εξομοίωσης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.
- Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι η εισαγωγή εμποδίων στα πειράματά μας είχε, σε αρκετές περιπτώσεις, σημαντική επίδραση στην απόδοση των πρωτοκόλλων που εξετάσαμε.
- Ένα ακόμα σημαντικό εύρημα είναι ότι η μορφή και το σχήμα των εμποδίων έχει διαφορετική επίδραση ανάλογα με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται.
- Τέλος, τα αποτελέσματά μας αποδεικνύουν ότι η επίδραση των εμποδίων δεν είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πυκνότητα του εξομοιούμενου δικτύου, επομένως η επίδραση των εμποδίων στο πεδίο του δικτύου δεν μπορεί να εξομοιωθεί με την αλλαγή της πυκνότητας του δικτύου.

4.2 Το περιβάλλον εξομοίωσης TRAILS

Η έρευνα στα αδόμητα κινητά δίκτυα (mobile ad hoc networks, MANET), τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τα αδόμητα δίκτυα οχημάτων (vehicular ad hoc networks, VANET), έχει μεγαλώσει σε όγκο και σημασία τα τελευταία χρόνια, επικουρούμενη από το γεγονός ότι έχουν αρχίσει να εμφανίζονται κάποιες πιλοτικές εφαρμογές που βασίζονται στα δίκτυα αυτά, ειδικά για την περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί νέοι εξομοιωτές ή έχουν αναπτυχθεί επεκτάσεις για ήδη υπάρχοντες, που να επιτρέπουν τη μοντελοποίηση και εξομοίωση τέτοιων δικτύων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ns-2 [76], OMNeT++ [80], OPNET Modeler [81].

Αν και αυτοί οι εξομοιωτές παρέχουν ένα βασικό περιβάλλον προκειμένου να μπορεί να εξομοιωθεί ένα τέτοιο δίκτυο στην ‘γενική’ περίπτωση, δεν διαθέτουν τις δυνατότητες ώστε να επιτρέψουν ρεαλιστικές εξομοιώσεις οι οποίες να ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες και εφαρμογές που αφορούν στα δίκτυα αυτά. Π.χ., σε αρκετές εφαρμογές



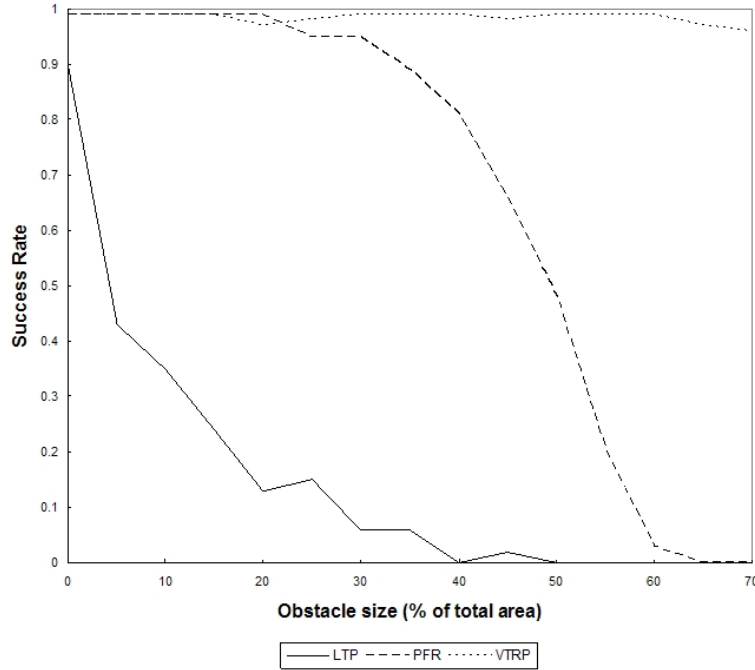
Σχήμα 4.6: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP για διάφορα πλήθη κόμβων ($n \in [500, 3500]$), με αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.

που χρησιμοποιούν κάποια κατηγορία από τα δίκτυα αυτά, οι κόμβοι κινούνται με πολύπλοκους τρόπους, μπορεί να χρειάζεται να υπερπηδήσουν ή να αποφύγουν εμπόδια, ή μπορεί οι κόμβοι του δικτύου να σταματήσουν να λειτουργούν λόγω των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου. Επιπλέον, οι ερευνητές κάνουν *αρκετές* υπερ-απλουστεύσεις στα μοντέλα που χρησιμοποιούν για τις εξομοιώσεις για δύο λόγους:

- Προκειμένου να ελαττώσουν την πολυπλοκότητα της εξομοίωσης ενός τέτοιου δικτύου και να μπορέσουν με τον τρόπο να κάνουν εξομοιώσεις που να περιλαμβάνουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο πλήθος κόμβων σε λογικό (πολυωνυμικό) χρόνο, και
- συχνότερα επειδή οι εξομοιωτές που χρησιμοποιούνται από την πλειοψηφία των ερευνητών *δεν παρέχουν λειτουργικότητα πέρα από την πολύ βασική, γενική περίπτωση* για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες δικτύων.

Με τον τρόπο αυτό προφανώς ένα μεγάλο μέρος της δουλειάς που γίνεται στο συγκεκριμένο ερευνητικό τομέα *στερείται ρεαλιστικότητας και εγκυρότητας αποτελεσμάτων*. Αναλυτική συζήτηση πάνω στις αδυναμίες της έρευνας μέσω εξομοίωσης και σε συχνές παρανοήσεις περιέχεται στα [57] και [62].

Ένας από τους πιο δημοφιλείς εξομοιωτές δικτύων είναι ο ns-2, ίσως ο πιο δημοφιλής σύμφωνα με το [62]. Παρ' όλη τη δημοτικότητά του όμως, υστερεί σε περισσότερο 'προχωρημένες' δυνατότητες σε σχέση με τις παραπάνω κατηγορίες δικτύων, οι οποίες να επιτρέπουν τη λεπτομερή και ρεαλιστική εξομοίωση των δικτύων αυτών. Οι χρήστες

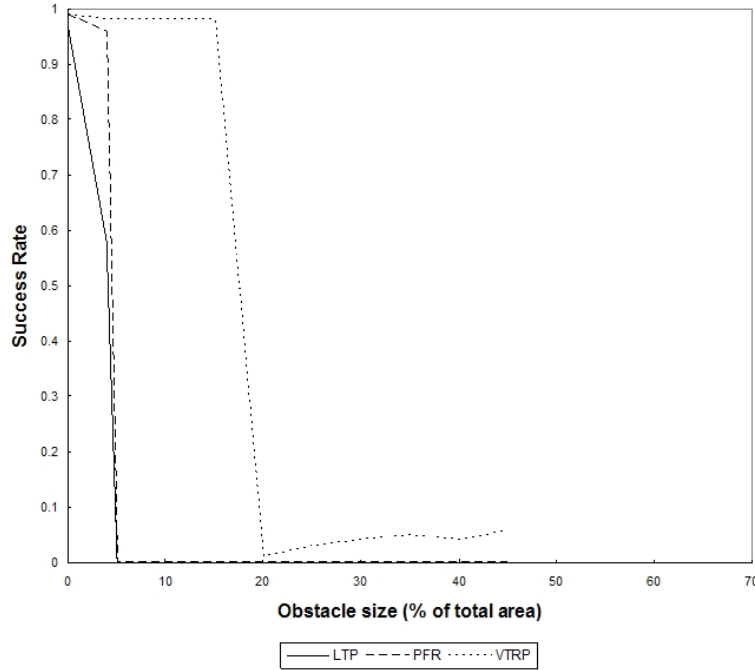


Σχήμα 4.7: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP υπό την παρουσία κυκλικών εμποδίων ($\mathcal{O}_{circ}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda)$) όπου $\lambda \in [126, 488]$ είναι η ακτίνα του εμποδίου, για μεταβλητό μέγεθος εμποδίων, σταθερή πυκνότητα κόμβων και αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.

του συγκεκριμένου εξομοιωτή συνήθως πρέπει να υλοποιήσουν από μόνοι τους την λειτουργικότητα που επιθυμούν να προσθέσουν στις εξομοιώσεις τους, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό στην αύξηση της πολυπλοκότητας για την υλοποίηση ενός πρωτοκόλλου στον εξομοιωτή, και κατόπιν για την αξιολόγηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου. Αυτό έχει ένα επιπρόσθετο ανεπιθύμητο αποτέλεσμα: παρόλο που οι ερευνητές χρησιμοποιούν τον ίδιο εξομοιωτή δικτύων, είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη η απευθείας σύγκριση μεταξύ πρωτοκόλλων που προσπαθούν να λύσουν το ίδιο πρόβλημα (π.χ., διάδοση πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) αφού οι εξομοιώσεις για το καθένα από αυτά έχουν βασιστεί στην υλοποίηση που έχει κάνει κάθε ερευνητική ομάδα ξεχωριστά (και η οποία πολλές φορές δεν είναι διαθέσιμη δημόσια).

Είναι πεποίθησή μας ότι είναι απαραίτητο οι εξομοιωτές δικτύων να διαθέτουν υλοποιημένη την ακόλουθη λίστα χαρακτηριστικών:

- *Ρεαλιστικά μοντέλα*
- *Δυναμική κινητικότητα κόμβων*
- *Δυναμικά εμπόδια*
- *Δυνατότητα παροχής αναλυτικών στατιστικών στοιχείων*
- *Ευκολία χρήσης και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης κώδικα*



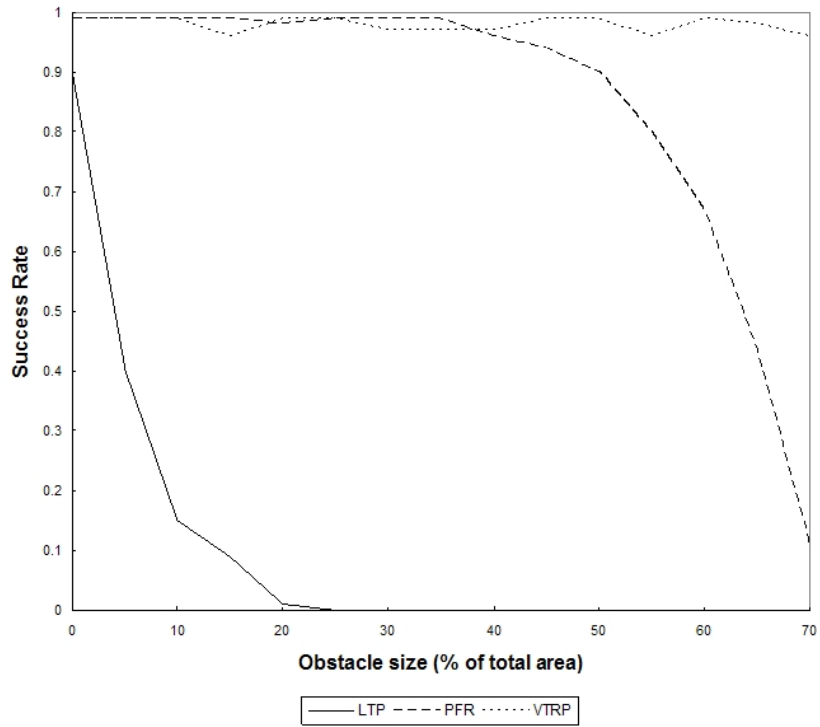
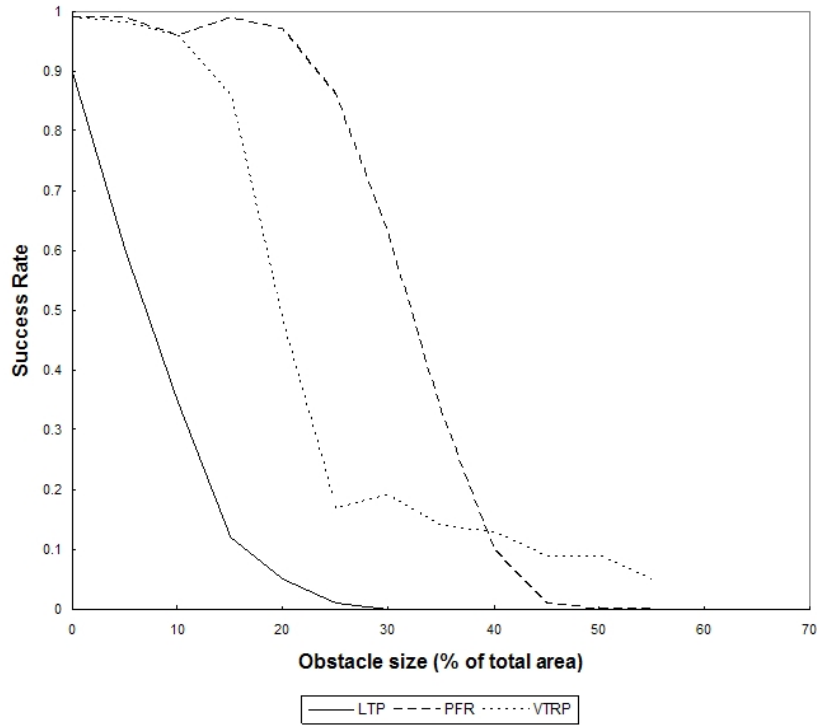
Σχήμα 4.8: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP υπό την παρουσία εμποδίων ζώνης ($\mathcal{O}_{strp}^{phy}(\{1000, 500\}, \lambda, -\pi)$) όπου $\lambda \in [50, 450]$ είναι το πλάτος του εμποδίου, για μεταβλητό μέγεθος εμποδίων, σταθερή πυκνότητα κόμβων και αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.

- Αποδοτική εξομοίωση δικτύων με μεγάλο πλήθος κόμβων

Ρεαλιστικά μοντέλα: πολλοί ερευνητές συνήθως χρησιμοποιούν ομοιόμορφες κατανομές για την κατανομή των κόμβων του δικτύου, απλούς τυχαίους περιπάτους, αγνοούν την πιθανότητα σφαλμάτων, κτλ., εξ' αιτίας της έλλειψης παροχής τέτοιων δυνατοτήτων από τους εξομοιωτές. Οι εξομοιωτές δικτύων θα πρέπει να παρέχουν περισσότερο σύνθετα μοντέλα σε σχέση με τα απλά που καλύπτουν πολύ γενικές περιπτώσεις.

Δυναμική κινητικότητα κόμβων: η χρήση προκαθορισμένων ή τελείως στοχαστικών σεναρίων κινητικότητας των κόμβων του δικτύου πολλές φορές δεν είναι αρκετή, για τον απλό λόγο ότι οι κόμβοι του δικτύου σε αρκετές περιπτώσεις χρειάζεται να αλληλεπιδρούν και να επηρεάζει ο ένας την κίνηση του άλλου. Στον ns-2 οι χρήστες χρησιμοποιούν προκαθορισμένα σενάρια κίνησης, παρ' όλα αυτά σε μια πραγματική εφαρμογή οι κόμβοι μπορεί να χρειάζεται να μεταβάλλουν την κίνησή τους εξ' αιτίας κάποιου γεγονότος, π.χ., συμφόρηση σε κάποιο μέρος του δικτύου. Αν δεχτούμε ότι τα γεγονότα αυτά δημιουργούνται με κάποια τυχαιότητα κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης (λόγω της χρήσης ρεαλιστικών μοντέλων που συμπεριλαμβάνουν την έννοια της τυχαιότητας), τότε οι κόμβοι του δικτύου πρέπει να αντιδρούν δυναμικά σε τέτοιες περιπτώσεις, οπότε είναι απαραίτητος ο on-line υπολογισμός της κίνησής τους.

Δυναμικά εμπόδια: συνεχίζοντας στο ίδιο πνεύμα, οι εξομοιωτές δικτύων πρέπει να δίνουν τη δυνατότητα για εισαγωγή δυναμικών φαινομένων στις εξομοιώσεις. Πολλές



Σχήμα 4.9: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP υπό την παρουσία τετραγωνικών εμποδίων, $\mathcal{O}_{rect}^{com}(\{500, 500\}, \lambda, \frac{2}{3}\lambda)$ (επάνω) και $\mathcal{O}_{rect}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda, 50)$ (κάτω), όπου $\lambda \in [274, 822]$ είναι το μήκος του εμποδίου, για μεταβλητό μέγεθος εμποδίων, σταθερή πυκνότητα κόμβων και αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.

εφαρμογές στις οποίες απευθύνονται τα κινητά αδόμητα δίκτυα και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αφορούν σε εξωτερικά περιβάλλοντα (δάση, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, βλ. σχετική ενότητα στην εισαγωγή του κειμένου) ή έχουν σχέση με έκτακτες καταστάσεις που προκαλούνται από φυσικές καταστροφές (πυρκαγιές, πλημμύρες, κ.α.). Τέτοια περιβάλλοντα περιέχουν συνιστώσες που μεταβάλλονται δυναμικά (π.χ., εμπόδια, πυρκαγιές σε εξέλιξη, κ.α.) και οι εξομοιωτές δικτύων πρέπει να υποστηρίζουν τέτοιου είδους δυναμικότητα.

Δυνατότητα παροχής αναλυτικών στατιστικών στοιχείων: μας ενδιαφέρει ο εξομοιωτής να παρέχει ένα πλήθος από στατιστικά στοιχεία για την αναλυτική λειτουργία των πρωτοκόλλων και των κόμβων του δικτύου. Τα στοιχεία αυτά εκτός από πληροφορίες και μετρικές για τα πρωτόκολλα, πρέπει να περιλαμβάνουν και πιο απλά στοιχεία για το εξομοιούμενο περιβάλλον, π.χ., λίστες γειτνίασης των κόμβων του δικτύου, αποθέματα ενέργειας στους κόμβους, διαστάσεις και θέσεις εμποδίων, κτλ.

Ευκολία χρήσης και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης κώδικα: εξ αιτίας της οργάνωσης του κώδικα του ns-2, είναι σχετικά δύσκολο κάποιος να εισάγει νέα λειτουργικότητα στον εξομοιωτή, καθώς η λειτουργικότητα του εξομοιωτή είναι διασπασμένη σε διάφορα μέρη. Επιπλέον, ο κώδικας αρκετές φορές δεν ακολουθεί τις αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού και έτσι δεν υπάρχει ομοιογένεια, κάνοντας πιο δύσκολα τα πράγματα. Ο εξομοιωτής δικτύων πρέπει να προσφέρει δυνατότητες στον προγραμματιστή έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να κάνει τις επεκτάσεις που επιθυμεί χωρίς να χρειάζεται να επεμβεί στον ήδη υπάρχοντα κώδικα (όσο αυτό βέβαια είναι δυνατόν).

Αποδοτική εξομοίωση δικτύων με μεγάλο πλήθος κόμβων: ένα ακόμα χαρακτηριστικό που πρέπει να χαρακτηρίζει τον εξομοιωτή δικτύων είναι η αποδοτική υλοποίηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του ns-2, ο εξομοιωτής είναι αρκετά 'βαρύς' και τα πειράματα με δίκτυα που έχουν πολλούς κόμβους απαιτούν αρκετό χρόνο για να εκτελεστούν, και αυτό σε ένα βαθμό οφείλεται στη μη αποδοτική υλοποίηση βασικών μερών του εξομοιωτή αυτού.

Η συνεισφορά μας: παρουσιάζουμε ένα περιβάλλον εξομοίωσης, το οποίο ονομάζουμε TRAILS, και το οποίο αποτελεί επέκταση του εξομοιωτή δικτύων ns-2. Η αρχιτεκτονική του, την οποία παρουσιάζουμε στην παρούσα διατριβή, στοχεύει στην εκπλήρωση των παραπάνω στόχων, και επιπλέον επιτρέπει την σχετικά εύκολη μεταφορά του σε άλλα περιβάλλοντα εξομοίωσης δικτύων. Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής συνίσταται στον καθορισμό της αρχιτεκτονικής του, και ιδιαίτερα σε ότι έχει να κάνει με δυναμικά εμπόδια (dynamic obstacles) και δυναμικά μοντέλα αστοχιών (dynamic failures). Μια πιο ολοκληρωμένη περιγραφή του περιβάλλοντος TRAILS και της υλοποίησής του περιέχεται στο [11]. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να τονίσω ότι η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του TRAILS έγινε σε συνεργασία με τους συνάδελφους Ι. Χατζηγιαννάκη, Α. Κίναλη και Γ. Πράσινο.

4.2.1 Σχετική έρευνα αιχμής

Μια αναλυτικότερη περιγραφή της σχετικής έρευνας αιχμής στο θέμα της κίνησης των κόμβων του δικτύου κατά τη διάρκεια μιας εξομοίωσης βρίσκεται στο [11]. Συνοπτικά σε ότι αφορά την κίνηση των κόμβων του δικτύου, μπορούμε να αναφέρουμε κάποιες περιπτώσεις επεκτάσεων του ns-2, όπως οι [103], [6], [77] και [67], οι οποίες προσφέρουν

κάποιες πρόσθετες δυνατότητες όπως. Το κοινό χαρακτηριστικό τους, σε αντίθεση με το TRAILS, είναι ότι η κίνηση των κόμβων του δικτύου γίνεται βάσει προϋπολογισμένων σεναρίων κίνησης, δηλαδή δεν υπάρχει δυναμικότητα στην κίνηση των κόμβων. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί ένα συμβάν κατά την διάρκεια της εξομοίωσης να επηρεάσει τον τρόπο που κινούνται οι κόμβοι (σε αντίθεση με το TRAILS).

Σχετικά με τη μοντελοποίηση σεναρίων που σχετίζονται με φυσικές καταστροφές, υπάρχουν δύο γενικές κατευθύνσεις:

- μοντελοποίηση συνθηκών *κατά τη διάρκεια του φαινομένου* (π.χ. πυρκαγιά, πλημμύρα) – αφορά σε εφαρμογές που μετρούν π.χ., την στάθμη του νερού σε μια μεγάλη έκταση ή την παρακολούθηση της εξέλιξης μιας πυρκαγιάς. Μας ενδιαφέρει λοιπόν ο τρόπος που εξελίσσεται το φαινόμενο.
- μοντελοποίηση συνθηκών *αφού* συμβεί η φυσική καταστροφή – αφορά σε εφαρμογές όπου το ζητούμενο είναι να γίνει π.χ., συντονισμός επίγειων δυνάμεων μετά από κάποια φυσική καταστροφή όπου έχουν πληγεί και οι υποδομές επικοινωνιών.

Γενικά, στην πρώτη περίπτωση η πλειονότητα της σχετικής έρευνας εστιάζει στη μοντελοποίηση του φυσικού φαινομένου αυτού καθ' αυτού, και δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλές περιπτώσεις στις οποίες να γίνεται εξομοίωση δικτύων υπό τέτοιες συνθήκες (μολονότι οι έκτακτες συνθήκες λόγω φυσικών καταστροφών χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως παραδείγματα εφαρμογών π.χ. των αδόμητων κινητών δικτύων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται cellular automata για να μοντελοποιήσουν την εξάπλωση του φαινομένου, στα οποία χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις που προσπαθούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του περιβάλλοντος. Π.χ., για την περίπτωση μιας πυρκαγιάς, εξετάζονται παράμετροι όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, ο τύπος της βλάστησης στο έδαφος, η ατμοσφαιρική υγρασία και θερμότητα, κ.α.

Στη δεύτερη περίπτωση, ο στόχος συνήθως είναι να μοντελοποιηθεί η κίνηση των επίγειων μονάδων για την αντιμετώπιση μιας κρίσης, οι οποίες αποτελούν τους κόμβους ενός αδόμητου δικτύου. Το [3] είναι παράδειγμα τέτοιας μοντελοποίησης, όπου μελετάται η κίνηση των ιατρικών μονάδων μετά από μια φυσική καταστροφή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο απλό μοντέλο, όπως το μοντέλο τυχαίων περιπάτων, για να περιγραφεί η συμπεριφορά των κόμβων του δικτύου (δεν έχει νόημα μια τέτοια περιγραφή). Μας ενδιαφέρουν επίσης οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόμβων του συστήματος, μπορεί π.χ., η μια μονάδα να δει ότι κάποια άλλη μονάδα κατευθύνεται προς κάποιο σημείο όπου η ίδια θα κατευθυνθεί προς κάποιο άλλο γειτονικό σημείο, οπότε το σύστημα πρέπει να είναι δυναμικό για να μπορούν να περιγραφούν και να χρησιμοποιηθούν τέτοιες συνθήκες στα πειράματά μας.

Η εισαγωγή σφαλμάτων είναι από μόνη της ένα πολύ σημαντικό θέμα όταν συζητάμε για καταναμημένα συστήματα γενικά, και ειδικά για καταναμημένα δίκτυα τα οποία υποτίθεται πρέπει να είναι ανθεκτικά σε σφάλματα υλικού και λογισμικού, κτλ. Αντίθετα όμως από ότι θα περίμενε κανείς, δεν έχει δοθεί η ανάλογη σημασία στο συγκεκριμένο ζήτημα. Σημαντικές πλευρές στην παρουσία σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, όπως το πότε συμβαίνει ένα σφάλμα, το είδος του σφάλματος (ντετερμινιστικό / τυχαίο / στοχαστικό, παροδικό / μόνιμο), η πιθανότητα κακόβουλων επιθέσεων λόγω εισβολών, κτλ.,

δεν έχουν μελετηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, τουλάχιστον στη μεγάλη πλειοψηφία της έρευνας που χρησιμοποιεί την εξομοίωση ως μέσο μελέτης τέτοιων συστημάτων.

Επιπλέον, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται η εισαγωγή σφαλμάτων κατά την εξομοίωση, ακολουθώντας την ίδια λογική για την τοποθέτηση και την κίνηση των κόμβων του δικτύου, οι ερευνητές επιλέγουν απλές μεθόδους όπως η τυχαία ομοιόμορφη εισαγωγή σφαλμάτων, σε σχέση με την τοποθεσία των κόμβων μέσα στο δίκτυο. Επίσης, σε αντίθεση με τη μοντελοποίηση που έχει γίνει για την κίνηση και τοποθέτηση των κόμβων μέσα στο δίκτυο, καθώς και την περίπτωση της εισαγωγής εμποδίων, δεν έχει γίνει αντίστοιχη μελέτη γενικότερης μοντελοποίησης της εισαγωγής σφαλμάτων ώστε να χρησιμοποιηθεί κατά τη λειτουργία ενός εξομοιωτή δικτύων. Για την ειδική περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων υπάρχει κάποιος όγκος δουλειάς στη μοντελοποίηση σφαλμάτων στους αισθητήρες που φέρουν οι κόμβοι του δικτύου, και οι οποίοι παράγουν λανθασμένες τιμές και μοιάζουν σε ένα βαθμό με την εισαγωγή βυζαντινών σφαλμάτων.

4.2.2 Αρχιτεκτονική και υλοποίηση του TRAILS

Η αρχιτεκτονική του TRAILS διαχωρίζει το σύστημα σε τέσσερις βασικές συνιστώσες (πεδία):

1. το *πεδίο κίνησης* (mobility domain)
2. το *πεδίο εμποδίων* (obstacles domain)
3. το *πεδίο σφαλμάτων* (failures domain)
4. το *πεδίο στατιστικών και καταγραφής* (statistics and auditing)

Συνοπτικά, αυτές οι τέσσερις συνιστώσες είναι χαλαρά συνδεδεμένες μεταξύ τους και με το κύριο μέρος του εξομοιωτή, έτσι ώστε μπορεί κάθε μία από αυτές να αλλαχθεί ή να αφαιρεθεί χωρίς να μεταβάλλεται η λειτουργικότητα που προσφέρεται από τις υπόλοιπες, ή η ήδη υπάρχουσα λειτουργικότητα του εξομοιωτή. Μια συνοπτική εικόνα της αρχιτεκτονικής του συστήματος περιέχεται στο σχήμα 4.14, όπου δίνεται οπτικά ο τρόπος που 'κάθεται' το TRAILS πάνω από ένα 'γενικό' εξομοιωτή δικτύων, δηλαδή το πώς συνδέονται με τον εξομοιωτή τα τέσσερα πεδία του TRAILS. Χρησιμοποιούμε τέσσερις κλάσεις (ChannelConnector, MobilityNodeEx, TopologyConnector, EventConnector) για τη διασύνδεση με τα αντίστοιχα μέρη του εξομοιωτή (ασύρματο κανάλι, κίνηση κόμβων, τοπολογία, δημιουργία συμβάντων). Εμείς στην παρούσα ενότητα θα εστιάσουμε στα πεδία σφαλμάτων και εμποδίων, στα οποία συνίσταται η συνεισφορά της παρούσας διατριβής.

Σε ότι αφορά στην υλοποίηση του TRAILS και την ενοποίηση με τον ns-2, βασικές αλλαγές είναι η επέκταση της κλάσης MobileNode με τη χρήση της νέας κλάσης MobileNodeEx, η οποία προσφέρει την ίδια λειτουργικότητα με τη βασική του εξομοιωτή μαζί με τις αλλαγές που προτείνουμε. Μια άλλη βασική αλλαγή είναι η συνένωση της κλάσης MotionSpace με το Topography του ns-2, ενσωματώνοντας την πληροφορία για την περιγραφή του εξομοιούμενου πεδίου με υποστήριξη για σημείωση περιοχών του δικτύου ως 'απροσπέλαστες', προκειμένου να δημιουργήσουμε εμπόδια στο πεδίο του δικτύου. Σε ότι αφορά τον υπολογισμό της δυσκολίας που προσθέτουν τυχόν εμπόδια μέσα στο πεδίο του

δικτύου στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων (όπου στην ουσία χρησιμοποιούμε γεωμετρία), χρησιμοποιούμε τη γεωμετρική βιβλιοθήκη CGAL. Η ενοποίηση των επεκτάσεών μας με τον εξομοιωτή φαίνεται επιγραμματικά στο σχήμα 4.17.

Πεδίο εμποδίων

Στο πεδίο εμποδίων υλοποιείται η λειτουργικότητα του περιβάλλοντος που έχει να κάνει με την εξομοίωση εμποδίων, τα οποία επηρεάζουν τον τρόπο που κινούνται οι κόμβοι του δικτύου και την επικοινωνία μεταξύ τους. Ακολουθώντας τη λογική του μοντέλου εμποδίων που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη ενότητα, το TRAILS υποστηρίζει δύο τύπους εμποδίων: τα φυσικά και τα επικοινωνιακά εμπόδια. Υπενθυμίζουμε ότι τα φυσικά εμπόδια επιδρούν στην κατανομή των κόμβων στο πεδίο του δικτύου, ενώ τα επικοινωνιακά εμπόδια έχουν επίδραση στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Υπάρχει μια κλάση `ObstacleRegistry`, η οποία λειτουργεί ως ευρετήριο για όλα τα εμπόδια τα οποία περιέχονται μέσα στο εξομοιούμενο δίκτυο και μέσω αυτού συντονίζεται η χρήση διαφορετικών μοντέλων εμποδίων. Προφανώς επειδή τα εμπόδια αυτά επηρεάζουν και την κίνηση των κόμβων του δικτύου, η `ObstacleRegistry` επικοινωνεί με το αντίστοιχο υπεύθυνο μέρος του εξομοιωτή για να τον ενημερώσει σε ποια μέρη του δικτύου μπορούν να κινηθούν οι κόμβοι και σε ποια όχι.

Η κύρια λειτουργικότητα ενός μοντέλου εμποδίων υλοποιείται σε μια κλάση `ObstacleModel`, η οποία αντιπροσωπεύει ένα εμπόδιο και διατηρεί την κατάστασή του. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή η ταυτόχρονη εξομοίωση πολλών διαφορετικών ειδών εμποδίων. Επιπλέον, καθώς σύμφωνα με το μοντέλο της προηγούμενης ενότητας ένα εμπόδιο μπορεί να αλλάζει την κατάστασή του με την πάροδο του χρόνου, πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με τον εξομοιωτή (μέσω του `EventConnector` όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14), και να ειδοποιείται για νέα συμβάντα. Αυτό εμμέσως σημαίνει ότι τα εμπόδια δεν είναι απαραίτητο να είναι ‘ενεργά’ καθ’όλη τη διάρκεια της εξομοίωσης, αλλά μπορούν να εμφανίζονται με τυχαίο ή ντετερμινιστικό τρόπο. Η προσθήκη νέων μοντέλων εμποδίων, εκτός των υπαρχόντων είναι εύκολη και είναι πιθανό να υλοποιήσει κάποιος ένα διαφορετικό μοντέλο εμποδίων, το οποίο να συνυπάρχει με το δικό μας στην ίδια εξομοίωση. Η διασύνδεση των διαφόρων οντοτήτων του πεδίου εμποδίων που μόλις περιγράψαμε, φαίνεται στο σχήμα 4.15.

Ουσιαστικά, κάθε αντικείμενο `ObstacleModel` περιγράφει ένα γεωμετρικό σχήμα (αυτό του εμποδίου) και είναι υπεύθυνο για την ενημέρωση της κατάστασης του εμποδίου (δημιουργία, μεταβολές, τερματισμός). Όπως αναφέραμε προηγουμένως, κάθε εμπόδιο δηλώνεται στην `ObstacleRegistry` (singleton), η οποία είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των μεταβολών στην κατάσταση των διαφόρων εμποδίων, και ενημερώνει κατάλληλα το `MotionSpace`.

Λόγω της απλότητάς τους, τα αντικείμενα `ObstacleModel` μπορούν να υλοποιηθούν απλά και αποδοτικά, και μπορούμε να συνδυάσουμε κλάσεις για να προκύψουν πιο σύνθετα εμπόδια. Παράδειγμα τέτοιας προσέγγισης είναι η μοντελοποίηση φυσικών καταστροφών, π.χ. μιας πυρκαγιάς σε εξέλιξη. Όπως αναφέραμε πριν, τέτοια φαινόμενα μοντελοποιούνται με τη χρήση αυτομάτων. Το πεδίο εξομοίωσης χωρίζεται σε ισομεγέθη τετράγωνα και χρησιμοποιώντας γνωστές μαθηματικές εξισώσεις (συνήθως το μοντέλο του Rothermel), ένα σύνολο από αρχικά σημεία και μερικές άλλες παραμέτρους, υπολογίζεται ο τρόπος που μεταδίδεται από τετράγωνο σε τετράγωνο η φωτιά και συνεπώς η πορεία

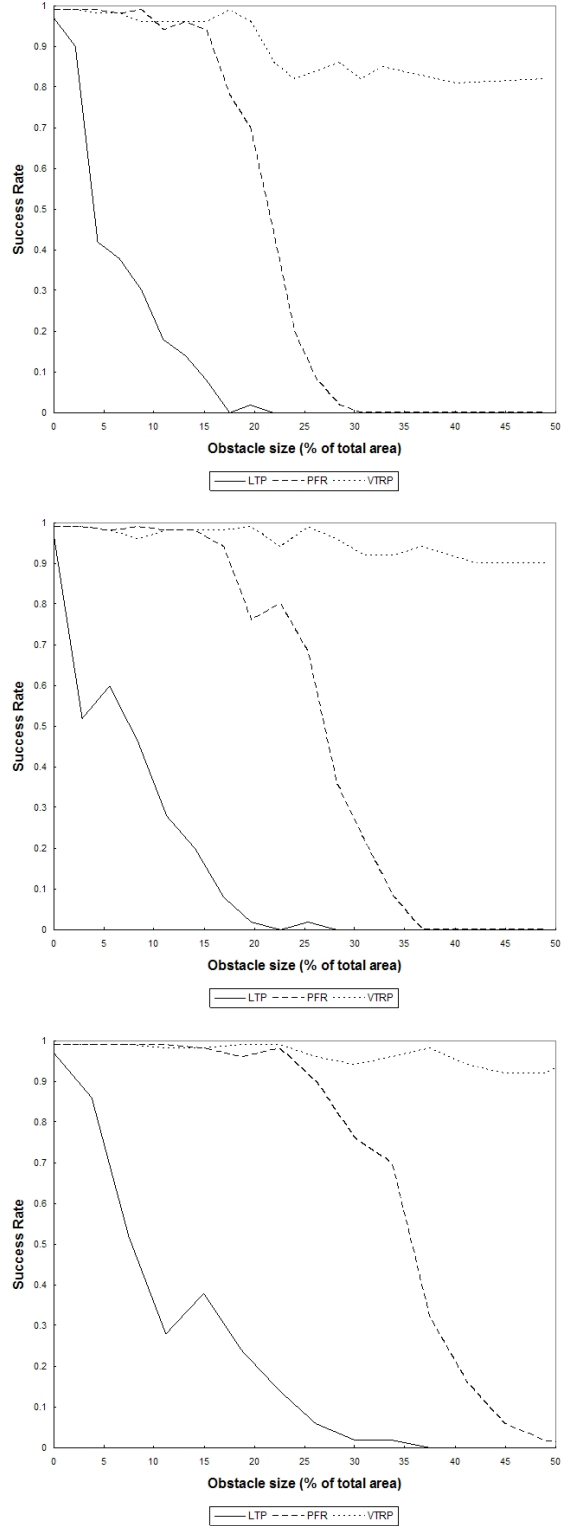
της. Χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική μας, μπορούμε να ορίσουμε ένα εμπόδιο που να υλοποιεί ένα τέτοιο τετράγωνο-αυτόματο. Όταν έρθει η ώρα να διαδοθεί η φωτιά, αυτό δημιουργεί νέα αντικείμενα-εμπόδια που αντιπροσωπεύουν τις γειτονικές περιοχές στις οποίες διαδίδεται η πυρκαγιά. Επιπλέον, όταν παρέλθει ο χρόνος που η πυρκαγιά μπορεί να κάψει κάτι στην περιοχή ενός εμποδίου, τερματίζουμε το συγκεκριμένο εμπόδιο και αυτό αφαιρείται από την `ObstacleRegistry`.

Σε ότι αφορά την παρεμβολή στην επικοινωνία μεταξύ των εμποδίων που προκαλείται από την παρουσία εμποδίων, αυτή υπολογίζεται δυναμικά, όταν κάθε κόμβος υπολογίζει τη λίστα γειτνιάσής του. Επίσης, αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όταν κάποιο εμπόδιο μεταβληθεί, οπότε οι γειτονικοί κόμβοι ειδοποιούνται για αυτή την αλλαγή.

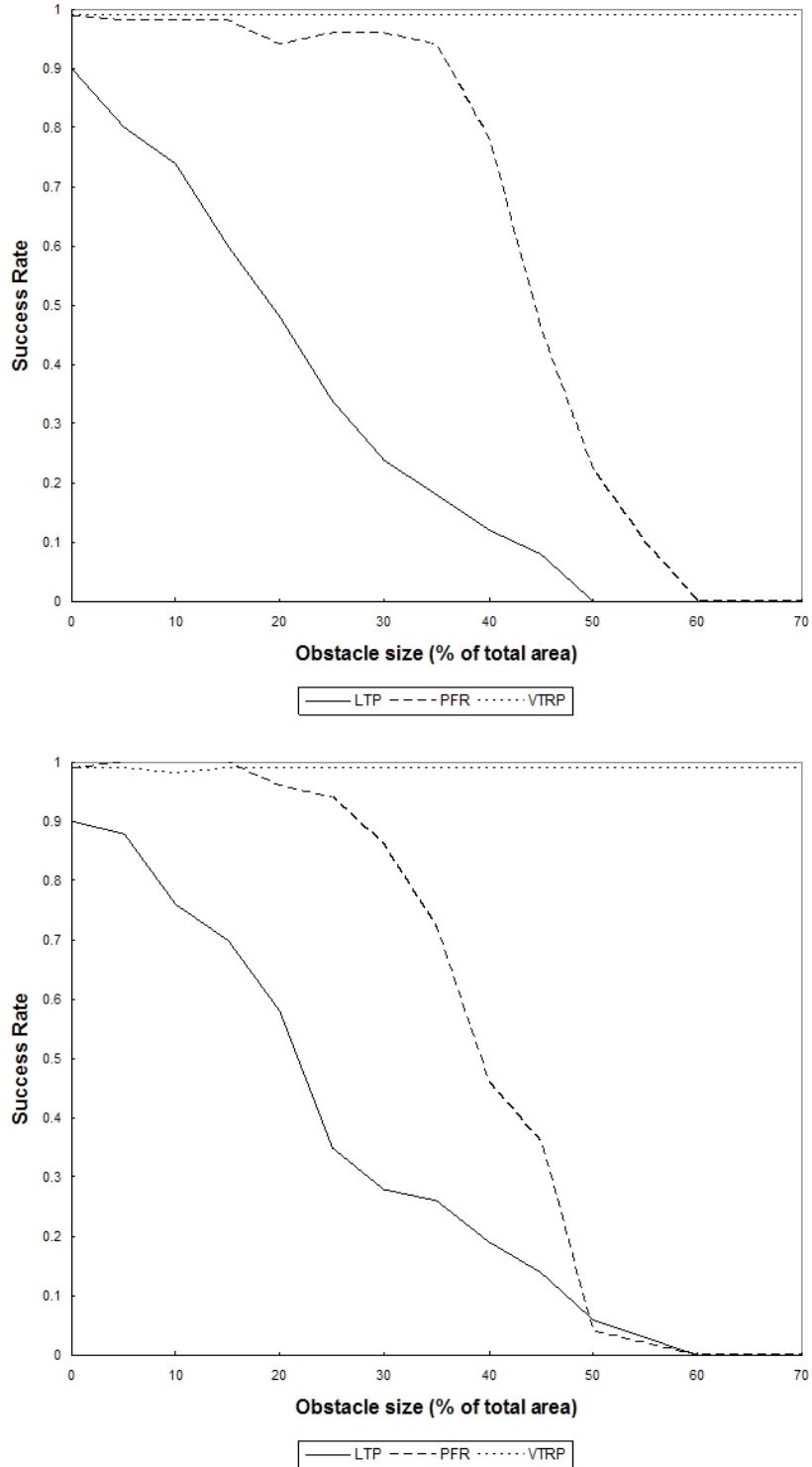
Πεδίο σφαλμάτων

Το πεδίο σφαλμάτων προσφέρει ένα περιβάλλον για την εξομοίωση σφαλμάτων που επηρεάζουν την λειτουργία των κόμβων του εξομοιούμενου δικτύου. Το TRAILS υποστηρίζει δύο τύπους σφαλμάτων, σφάλματα που εντοπίζονται σε μεμονωμένους κόμβους και σφάλματα που εντοπίζονται σε μια περιοχή του δικτύου. Στην πρώτη περίπτωση, τα σφάλματα που εισάγουμε στον εξομοιωτή επηρεάζουν μόνο επιλεγμένους κόμβους, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, επηρεάζονται όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται μέσα στην επιλεγμένη περιοχή. Τα σφάλματα αυτά αντιστοιχούν σε παύση (προσωρινή ή μόνιμη) της λειτουργίας των κόμβων, και όχι σε βυζαντινά σφάλματα. Στη δεύτερη περίπτωση γίνεται μετάφραση σε μεμονωμένα σφάλματα κόμβων, ανιχνεύοντας τους κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή του δικτύου που μας ενδιαφέρει. Παρόμοια με το πεδίο εμποδίων, υπάρχει μία `FailureRegistry` οντότητα, η οποία έχει καταχωρημένα όλα τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης. Η `FailureRegistry` παρακολουθεί την `ObstacleRegistry` για την εμφάνιση νέων εμποδίων, τα οποία μπορεί να αχρηστεύσουν τους κόμβους που περιέχονται μέσα στην περιοχή που καλύπτουν τα ίδια τα εμπόδια. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πεδίων πιστεύουμε ότι αυξάνει ακόμα περισσότερο την ρεαλιστικότητα του εξομοιωτή. Η διασύνδεση των διαφόρων οντοτήτων του πεδίου σφαλμάτων φαίνεται στο σχήμα 4.15.

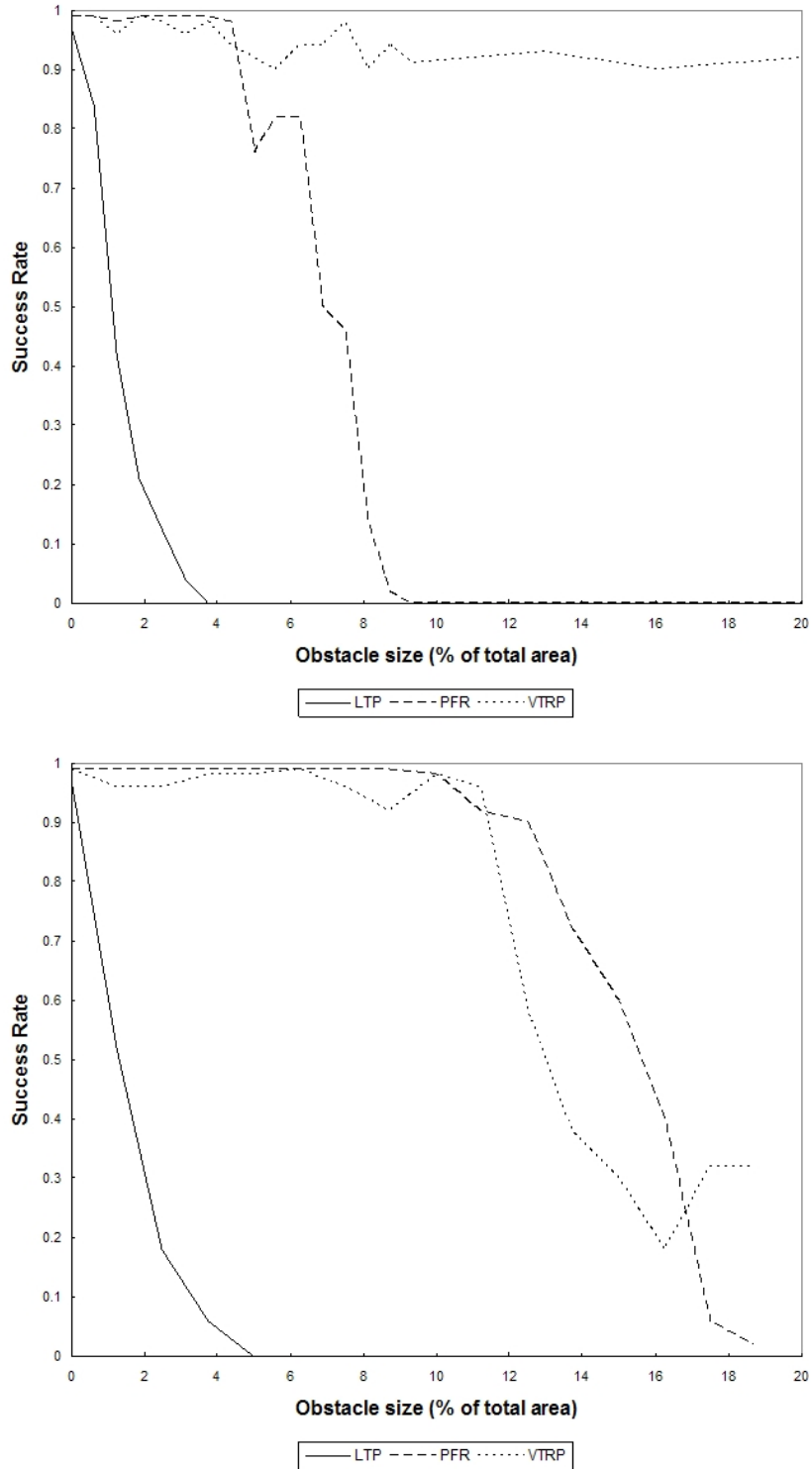
Επίσης, παρόμοια με την περίπτωση πεδίου εμποδίων, υπάρχει μια κλάση `FailureModel`, στην οποία υλοποιείται η λειτουργικότητα ενός μοντέλου σφαλμάτων. Το TRAILS περιέχει ήδη υλοποιημένα κάποια μοντέλα εισαγωγής σφαλμάτων (π.χ., τυχαία ομογενή σφάλματα) και είναι εύκολο να επεκταθεί με τον ορισμό και την υλοποίηση επιπρόσθετων μοντέλων. Ακόμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, όπως και με τα μοντέλα εμποδίων.



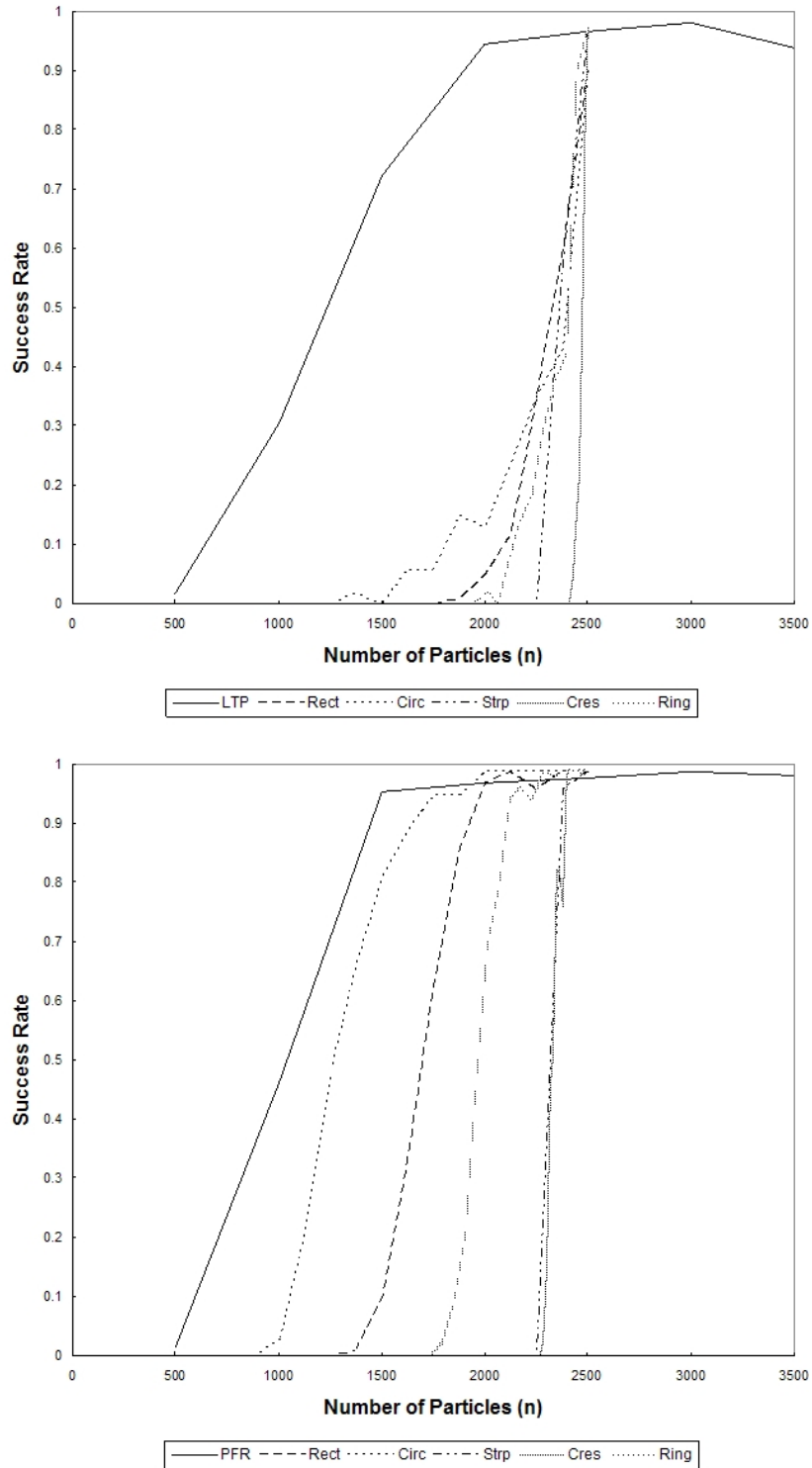
Σχήμα 4.10: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP υπό την παρουσία εμποδίων δακτυλίου ($\mathcal{O}_{ring}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda, \frac{1}{4}\lambda)$ επάνω, $\mathcal{O}_{ring}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda, \frac{1}{3}\lambda)$ στη μέση, $\mathcal{O}_{ring}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda, \frac{1}{2}\lambda)$ κάτω) όπου $\lambda \in [126, 488]$ είναι η ακτίνα του κύκλου που εμπεριέχει το εμπόδιο, για μεταβλητό μέγεθος εμποδίων, σταθερή πυκνότητα κόμβων και αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.



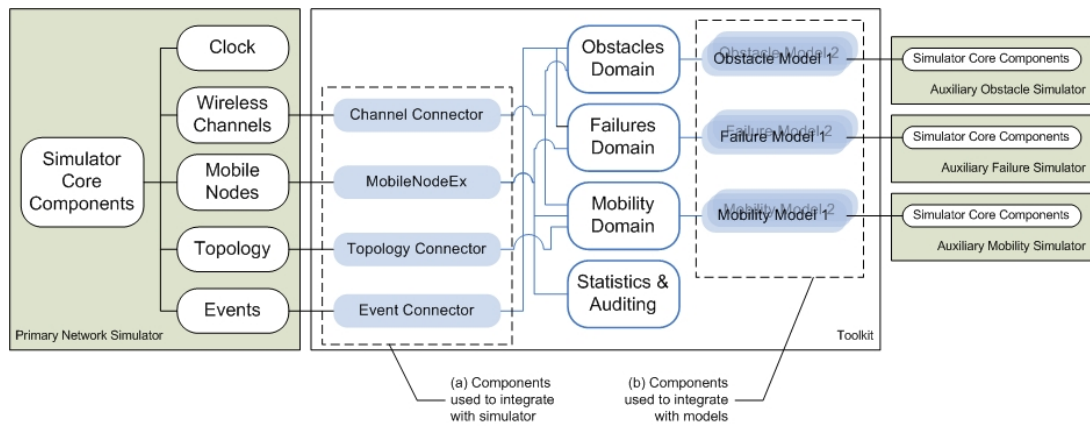
Σχήμα 4.11: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP υπό την παρουσία πολλαπλών κυκλικών εμποδίων, (δύο εμπόδια $\mathcal{O}_{circ}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda_1)$ επάνω, τρία εμπόδια $\mathcal{O}_{circ}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda_2)$ κάτω) όπου $\lambda_1 \in [89, 309]$ και $\lambda_2 \in [73, 230]$ είναι οι ακτίνες των κύκλων στο πεδίο ανάπτυξης του δικτύου, για μεταβλητό μέγεθος εμποδίων, σταθερή πυκνότητα κόμβων και αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.



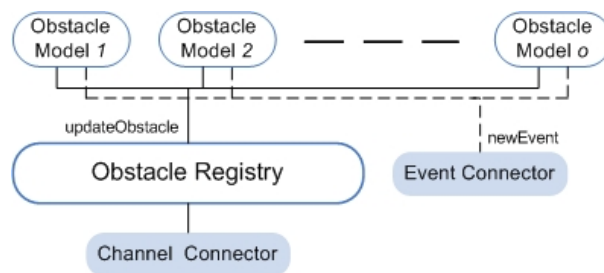
Σχήμα 4.12: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP , PFR και VTRP υπό την παρουσία εκλειψοειδών εμποδίων ($O_{cres}^{phy}(\{1000, 500\}, \lambda, \frac{3}{4}\lambda)$ επάνω και $O_{cres}^{phy}(\{500, 500\}, \lambda, \frac{1}{2}\lambda)$ κάτω) όπου $\lambda \in [126, 488]$ είναι η ακτίνα του κύκλου που εμπεριέχει το εμπόδιο, για μεταβλητό μέγεθος εμποδίων, σταθερή πυκνότητα κόμβων και αρχική εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.



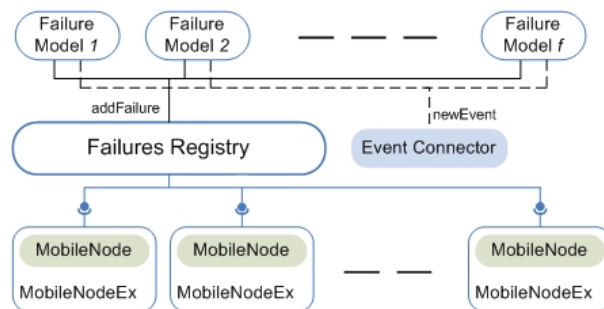
Σχήμα 4.13: Βαθμός επιτυχίας των πρωτοκόλλων LTP (επάνω) και PFR (κάτω) για μεταβλητό πλήθος κόμβων ($n \in [500, 3500]$) όταν δεν υπάρχουν καθόλου εμπόδια και υπό την παρουσία διαφόρων τύπων εμποδίων, αντίστοιχα, για σταθερή εμβέλεια μετάδοσης $\mathcal{R} = 50m$.



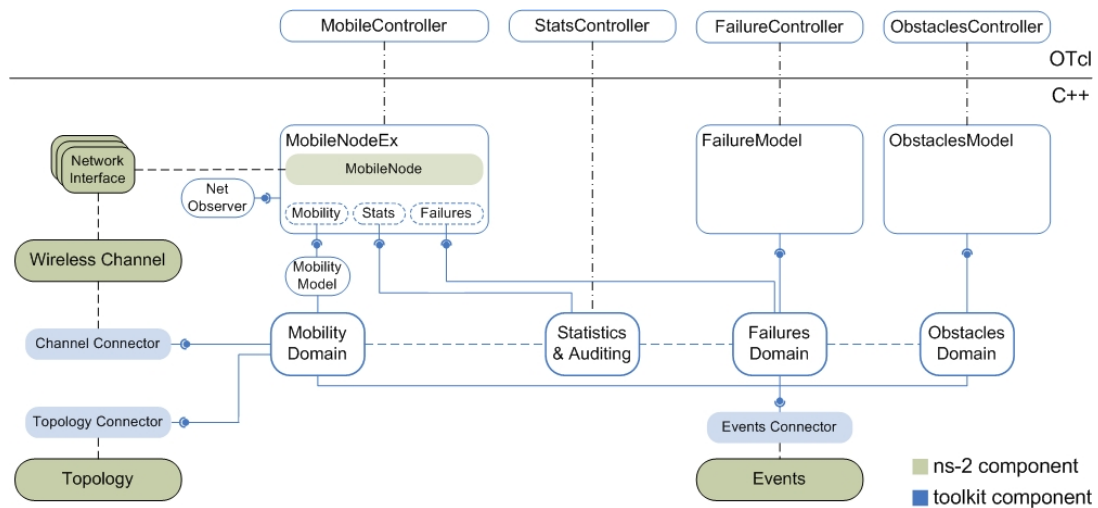
Σχήμα 4.14: Η αρχιτεκτονική του TRAILS και ο τρόπος που σχετίζεται με ένα 'γενικό' εξομοιωτή δικτύων



Σχήμα 4.15: Οι οντότητες μέσα στο Obstacle Domain και οι διασυνδέσεις μεταξύ τους



Σχήμα 4.16: Οι οντότητες μέσα στο Failure Domain και οι διασυνδέσεις μεταξύ τους



Σχήμα 4.17: Οι οντότητες του NS-2 και ο τρόπος που το TRAILS διασυνδέεται με αυτές

Μέρος IV

Το περιβάλλον WebDust

5

Αρχιτεκτονική του WebDust

5.1 Εισαγωγή στο πρόβλημα

Όπως αναφέρθηκε στα εισαγωγικά κεφάλαια της παρούσας διατριβής, η έρευνα γύρω από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε μεγάλο μέρος (ως σήμερα τουλάχιστον) έχει επικεντρωθεί στην επίλυση ενός αριθμού από σύνθετα προβλήματα που εντοπίζονται στο 'κατώτερο' επίπεδο τέτοιων συστημάτων, με άλλα λόγια τεχνικές οργάνωσης του δικτύου, πρωτόκολλα δρομολόγησης, αλγόριθμους για εντοπισμό θέσης και εξοικονόμησης ενέργειας, κ.α. Όμως, όπως τονίσαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, τα πρωτόκολλα και οι αρχιτεκτονικές αυτές στην πλειοψηφία τους υποθέτουν μοναδικά, μεμονωμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία προορίζονται για την παρακολούθηση μιας μοναδικής περιοχής, και τα οποία δεν συνδέονται μεταξύ τους ούτε καν σε λογικό επίπεδο. Εκτός των κλασικών μοντέλων δικτύου και αρχιτεκτονικών, εξίσου σημαντικό είναι το μοντέλο δικτύου που περιλαμβάνει πλήθος σχετικά μικρών σε μέγεθος δικτύων, τα οποία διασυνδέονται μεταξύ τους ή με άλλα δίκτυα, το οποίο μοντέλο διαφέρει ξεκάθαρα από το κλασικό μοντέλο δικτύου για τα δίκτυα αισθητήρων, δηλαδή μεγάλα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με χιλιάδες κόμβων και πολύπλοκους αλγόριθμους που συνοδεύουν (θεωρητικά συνήθως, γιατί πρακτικά μέχρι στιγμής υπάρχουν λιγοστά δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας) την λειτουργία τους.

Καθώς υπάρχει ήδη μεγάλος όγκος έρευνας σε ότι αφορά τα κατώτερα επίπεδα των δικτύων αυτών, αναδύονται δύο προκλήσεις:

1. Η δημιουργία συστημάτων λογισμικού που να ενσωματώνουν, σε ένα βαθμό τουλάχιστον, τα αποτελέσματα της έρευνας που έχει διεξαχθεί ως σήμερα, αλλά με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών που να χρησιμοποιούν ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, με τρόπο απλό και αποτελεσματικό – τα περισσότερα από τα συστήματα που έχουν παρουσιαστεί ως σήμερα είναι ιδιαίτερα περίπλοκα στη χρήση τους και ο προγραμματισμός με τα καθιερωμένα εργαλεία για τα δίκτυα αυτά (π.χ. περιβάλλον TinyOS/nesc) μόνο απλός δεν μπορεί να χαρακτηριστεί, σε συνδυασμό

με το γεγονός ότι αυτά τα εργαλεία δεν έχουν φτάσει σε ένα σημείο ωριμότητας ακόμη.

2. Καθώς το μοντέλο δικτύου όπου χρησιμοποιούνται πολλά δίκτυα αισθητήρων με μικρό πλήθος κόμβων, ή ακόμα και με κινητούς κόμβους και gateways έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται περισσότερο, χρειάζεται να ερευνηθεί ο τρόπος που όλα αυτά τα δίκτυα θα συνδέονται μεταξύ τους ή με κάποια εφαρμογή διαχείρισης, ώστε να μπορέσει να αναπτυχθεί κάποια εφαρμογή στα επίπεδα που βρίσκονται πιο πάνω.

Και τα δύο θέματα είναι αρκετά σύνθετα, εξαιτίας των παραγόντων που περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 της διατριβής. Το γεγονός ότι ακόμα δεν υπάρχει ένα περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με τη βοήθεια του οποίου θα μπορεί κάποιος ερευνητής να αναπτύξει τη δική του εφαρμογή για το δίκτυό του εύκολα και γρήγορα, είναι μάλλον η καλύτερη απόδειξη για αυτό. Ακόμα, η δημιουργία περιβαλλόντων λογισμικού για την διασύνδεση διακριτών ασύρματων δικτύων αισθητήρων θα πρέπει να συνοδεύεται από προσεκτικό σχεδιασμό, καθώς το να ξεπερνά το τελικό αποτέλεσμα τα τετριμμένα δεν είναι απλή υπόθεση. Στην προκειμένη περίπτωση μιλάμε για μια κατηγορία δικτύων με πολύ διαφορετικές δυνατότητες και περιορισμούς σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες δικτύων.

Κάποια από τα θέματα-προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπίσει ένα τέτοιο περιβάλλον λογισμικού, είναι τα ακόλουθα:

- διαχείριση της ετερογένειας που θα υπάρχει μέσα στο δίκτυο αισθητήρων.
- διαχείριση της μη συνεχούς σύνδεσης μεμονωμένων κόμβων ή και ολόκληρων δικτύων με τον υπόλοιπο κόσμο.
- υποστήριξη δυνατότητας κλιμάκωσης της εφαρμογής σε ότι αφορά πλήθος κόμβων και δικτύων.
- απλοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης μιας εφαρμογής για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική του συστήματος WebDust, το οποίο προσπαθεί να αντιμετωπίσει κάποια από αυτά τα βασικά προβλήματα. Το σύστημα αυτό 'ενοποιεί' πολλά διακριτά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιώντας μια peer-to-peer λογική, και παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές έτσι ώστε ο προγραμματιστής ή ο απλός χρήστης να μην χρειάζεται να γνωρίζει πολλές λεπτομέρειες για την υλοποίηση που υπάρχει στα κατώτερα επίπεδα του συστήματος.

Μια αρχική μορφή του συστήματος παρουσιάστηκε στο [100], η οποία είχε βασιστεί σε μια αρκετά πιο κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική, και η οποία είχε αρκετά πιο περιορισμένο ορίζοντα για την εφαρμογή της, αν και είχε και αυτή ως βασικό χαρακτηριστικό της την υποστήριξη πολλαπλών δικτύων αισθητήρων στην ίδια εφαρμογή. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθούσε μια πιο κλασική N-tier αρχιτεκτονική, η οποία μετεξελίχθηκε και απέκτησε μια peer-to-peer διάσταση, σε συνδυασμό με ένα πλήθος πρόσθετων αλλαγών στην αρχιτεκτονική του συστήματος και την υλοποίησή του.

Το WebDust χρησιμοποιεί την JXTA, ένα 'υπόστρωμα' (ένα σύνολο από πρωτόκολλα και προδιαγραφές-διεπαφές) το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη και χρήση peer-to-peer υπηρεσιών. Η κεντρική ιδέα είναι ότι υπάρχει ένα πλήθος από ασύρματα δίκτυα

αισθητήρων, τα οποία μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικό μέρος το καθένα και να είναι εντελώς διακριτά μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτό, μπορεί κάποιος ερευνητής που διαθέτει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων να γίνει μέλος ενός δικτύου ομοτίμων εταίρων, στο οποίο θα συμμετέχουν και άλλοι χρήστες με τα δικά τους δίκτυα. Το σύστημα του δίνει τη δυνατότητα να δημοσιεύει τις μετρήσεις που παίρνει από το δίκτυό του, και αντίστοιχα να μπορεί να ενημερώνεται για τις μετρήσεις που παίρνουν οι υπόλοιποι χρήστες από τα δικά τους δίκτυα.

Το σύστημα έχει δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλα περιβάλλοντα διαχείρισης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στην περίπτωση αυτή, ο προγραμματιστής μπορεί με μικρές προσθήκες να συνδέσει το δικό του σύστημα με το WebDust. Σε κάθε περίπτωση παρέχουμε μια υλοποίηση για τη διαχείριση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, η οποία δίνει κάποιες βασικές δυνατότητες στον προγραμματιστή για να μπορέσει να εκτελέσει απλές λειτουργίες διαχείρισης στο δίκτυό του.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει το WebDust από άλλα αντίστοιχα συστήματα είναι η δυνατότητα επιλογής της χρήσης του Google Earth και του Google Maps ως διεπαφής με τον τελικό χρήστη. Πιστεύουμε ότι η συγκεκριμένη επιλογή αυξάνει την ευκολία χρήσης του συστήματος από τους τελικούς χρήστες αλλά και δείχνει ξεκάθαρα ποιες είναι οι δυνατότητες και οι προοπτικές ενός τέτοιου συστήματος, σε ότι αφορά τη χρήση του για την υλοποίηση μιας εφαρμογής.

5.2 Σχετική έρευνα αιχμής

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε εν τάχει τη σχετική με το WebDust έρευνα αιχμής. Θα εστιάσουμε σε δύο συστήματα, το SenseWeb της Microsoft και το Sensor Web Enablement του Open Geospatial Consortium. Θεωρούμε ότι αυτά τα συστήματα σε μεγάλο βαθμό έχουν παρόμοια φιλοσοφία με το σύστημά μας, αν και οι αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούν διαφέρουν από τη δική μας σε αρκετά σημεία. Εκτός από παρόμοια φιλοσοφία, τα συστήματα αυτά υιοθετούν παρόμοιες λύσεις και στη διεπαφή με τον τελικό χρήστη, γεγονός το οποίο πιστεύουμε ότι ισχυροποιεί την προσέγγισή πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα. Η γενικότερη προσέγγιση είναι η προσπάθεια διασύνδεσης απομονωμένων ασύρματων δικτύων αισθητήρων και η διευκόλυνση της ανάπτυξης εφαρμογών που να αξιοποιούν την πληροφορία από δίκτυα αισθητήρων τα οποία ήδη υπάρχουν και λειτουργούν σε διάφορα μέρη του πλανήτη.

Εκτός από τα δύο αυτά συστήματα, κάνουμε και μια σύντομη αναφορά στις γλώσσες περιγραφής ασύρματων δικτύων αισθητήρων και τα σχετικά πρότυπα, δηλαδή XML διάλεκτοι που περιγράφουν τις δυνατότητες ενός τέτοιου δικτύου, οι οποίες λειτουργούν ως πρότυπα για την διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Τα πρότυπα με τα οποία ασχολούμαστε στην ενότητα αυτή είναι η SensorML και το πρότυπο IEEE 1451.

5.2.1 Τα συστήματα SenseWeb και SensorMap

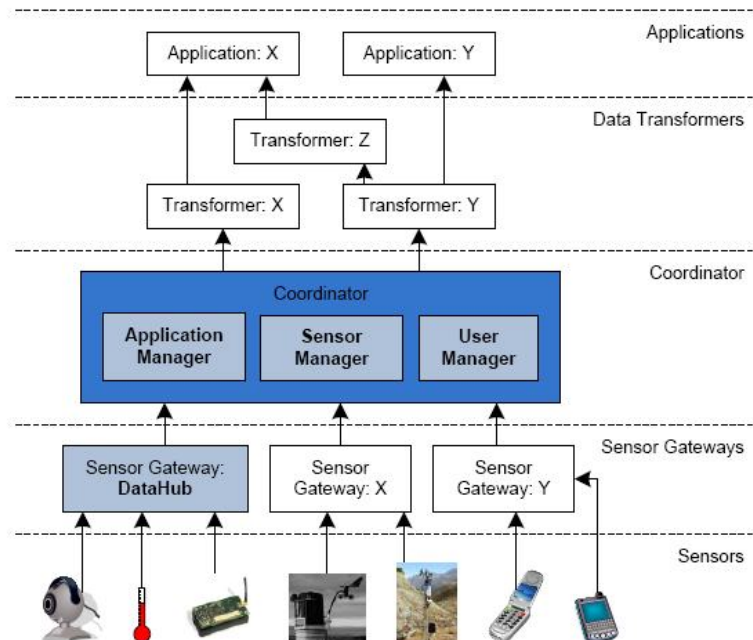
Το σύστημα SenseWeb [58],[73] αναπτύσσεται από τη ερευνητικό τμήμα της Microsoft, και σταδιακά αρχίζει να χρησιμοποιείται από αρκετές ερευνητικές ομάδες, προκειμένου αυτές να εξάγουν στον υπόλοιπο κόσμο τις μετρήσεις που παίρνουν από τα δίκτυα

αισθητήρων τα οποία διαθέτουν. Βασίζεται στην ιδέα ότι τα συστήματα που χρησιμοποιούν peer-produced πληροφορία (δηλαδή από χρήστες που προσφέρουν ο καθένας από ένα μικρό μέρος πληροφορίας) επιτυγχάνουν αποτελέσματα τα οποία θα ήταν αδύνατο να επιτευχθούν από μόνο μια οντότητα-αρχή.

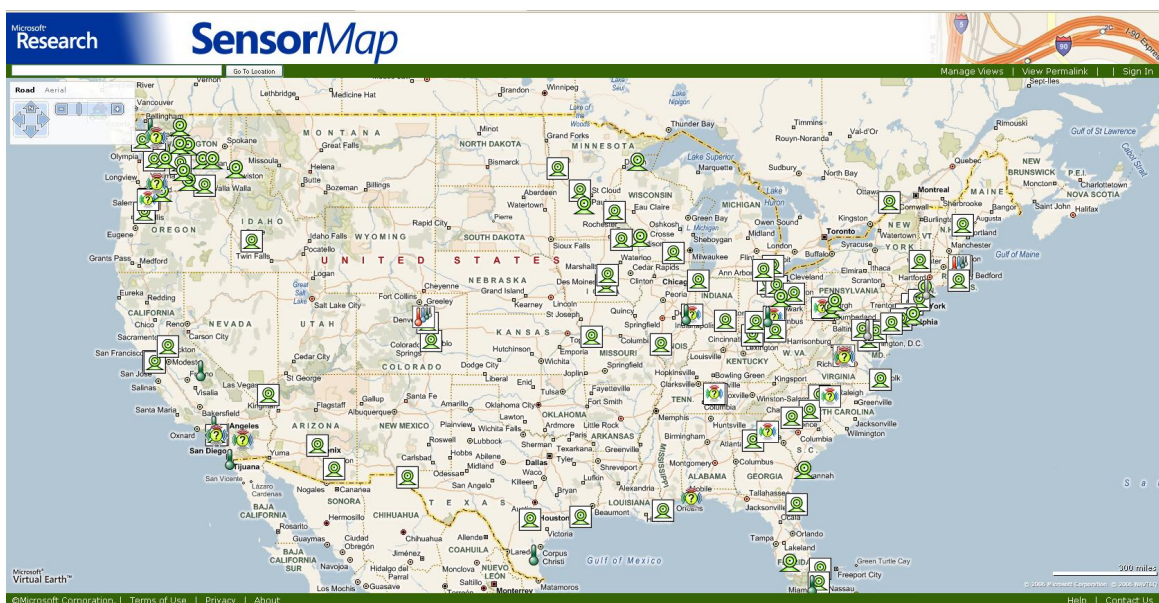
Ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του συστήματος αποσκοπεί στο διαμοιρασμό πληροφορίας από πολλαπλά δίκτυα αισθητήρων, δηλαδή των δεδομένων που εξάγονται από τα διάφορα συστήματα που διαχειρίζονται το καθένα από τα δίκτυα αυτά, και τα οποία πιθανότατα είναι εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους. Τα βασικά μέλη της αρχιτεκτονικής είναι:

- *ο coordinator*: είναι το κεντρικό σημείο πρόσβασης στο σύστημα των διάφορων δικτύων αισθητήρων, αλλά και των εφαρμογών που χρησιμοποιούν τα δεδομένα από τους αισθητήρες. Βασικά μέρη του είναι η SenseDB, η οποία αποτελεί τη βάση δεδομένων του συστήματος και διάφοροι managers, οι οποίοι υλοποιούν τη λειτουργικότητα που απαιτείται από τα κατώτερα στρώματα του συστήματος (δίκτυα αισθητήρων) και τα ανώτερα (εφαρμογές). Η SenseDB επιτελεί σημαντικές λειτουργίες ειδικά για τα δίκτυα αισθητήρων, π.χ., κάνει aggregations για τα δεδομένα που έρχονται από τα δίκτυα αισθητήρων και τις ενέργειες που αυτά πρέπει να κάνουν. Π.χ., εφόσον το σύστημα επιτρέπει την διαχείρισή του από το SenseWeb, αν διάφοροι χρήστες έχουν επικαλυπτόμενες αιτήσεις για δεδομένα από ένα δίκτυο, το σύστημα λύνει αυτόματα τέτοια ζητήματα. Οι διαχειριστές προσφέρουν διεπαφές για τη λειτουργικότητά τους μέσω web services, που προσφέρουν οι εξυπηρέτες της Microsoft.
- *οι αισθητήρες, οι σταθμοί ελέγχου των δικτύων αισθητήρων και οι κινητοί proxy σταθμοί που είναι πιθανόν να υπάρχουν μέσα στα δίκτυα αυτά*: το σύστημα της Microsoft προσφέρει όπως αναφέρθηκε κάποια web services, πάνω στα οποία μπορούν να συνδεθούν οι διάφοροι χρήστες. Επιπλέον, υπάρχουν υλοποιημένες κάποιες διεπαφές για συστήματα και υλικό που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.
- *οι μετατροπείς/επεξεργαστές πληροφορίας*: ο ρόλος ενός μετατροπέα είναι η εξαγωγή πληροφορίας από τις μετρήσεις των δικτύων αισθητήρων που συμμετέχουν στο σύστημα. Π.χ., ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί εξάγει να πληροφορία από εικόνες από κάμερες μετέχουν στο σύστημα και να μετρά πόσες θέσεις παρκαρίσματος είναι ελεύθερες στην περιοχή του. Άλλο παράδειγμα, υλοποιημένο στο σύστημα, είναι η δημιουργία δισδιάστατων απεικονίσεων σε σχέση με τις μετρήσεις σε μια ορισμένη περιοχή, π.χ., δημιουργία contour χάρτη.
- *οι εφαρμογές*: οι εφαρμογές χρησιμοποιούν τους μετατροπείς και τις υπηρεσίες του coordinator προκειμένου να δώσουν αποτελέσματα.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.2.1. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής που χρησιμοποιεί το SenseWeb, είναι το SensorMap το οποίο είναι στην ουσία μια mashup δικτυακή πύλη, η οποία χρησιμοποιεί την υπηρεσία Live Earth της Microsoft για να απεικονίσει δισδιάστατους και τρισδιάστατους χάρτες με δεδομένα από τα δίκτυα αισθητήρων. Στο σχήμα 5.2.1 φαίνεται ένα στιγμιότυπο του συστήματος, και μάλιστα μπορεί κάποιος να δει το πλήθος των δικτύων που συμμετέχουν στο σύστημα.



Σχήμα 5.1: Η αρχιτεκτονική του SenseWeb



Σχήμα 5.2: Στιγμιότυπο από το SensorMap

Αν και το σύστημα στηρίζεται στην εισροή πληροφορίας από τα διάφορα ερευνητικά δίκτυα αισθητήρων, χρησιμοποιεί μια κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική. Με άλλα λόγια, οι ερευνητές χρησιμοποιούν τα web services της Microsoft για να λειτουργήσει το σύστημα. Σε αντίθεση, το δικό μας σύστημα χρησιμοποιεί μια peer-to-peer λογική, η οποία επιτρέπει παράλληλα την ανάπτυξη μιας εφαρμογής χωρίς να εμπλέκονται τρίτοι φορείς (σε περίπτωση που εξάγονται κρίσιμα δεδομένα). Από την άλλη, το SenseWeb είναι μια σχετικά ώριμη πρόταση, η οποία χρησιμοποιείται από αρκετές ερευνητικές ομάδες, και αντιμετωπίζει σε κάποιο βαθμό σημαντικά ζητήματα όπως η ασφάλεια και η ετερογένεια του συστήματος.

5.2.2 Πρότυπα διασύνδεσης δικτύων αισθητήρων

Το *Open Geospatial Consortium (OGC)* είναι μία διεθνής κοινοπραξία αποτελούμενη από εκατοντάδες φορείς (εταιρίες, πανεπιστήμια, κ.α.), με σκοπό τον καθορισμό και την ανοιχτή δημοσιοποίηση προδιαγραφών για πρωτόκολλα και διεπαφές, που σχετίζονται με την ανάπτυξη εφαρμογών που χρησιμοποιούν γεωγραφική πληροφορία και το Διαδίκτυο. Πρόσφατα, ξεκίνησε τη δράση της η πρωτοβουλία OGC Sensor Web Enablement (SWE), η οποία σχετίζεται με την ανάπτυξη προτύπων και διεπαφών σε σχέση με τα δίκτυα αισθητήρων. Στο SWE χρησιμοποιείται γενικά ο όρος *sensor web*, ο οποίος αναφέρεται σε δίκτυα αισθητήρων (ασύρματα και ενσύρματα) τα οποία είναι προσβάσιμα από το διαδίκτυο, και τα οποία συνδέονται και αλληλεπιδρούν με άλλα δίκτυα χρησιμοποιώντας προκαθορισμένα πρωτόκολλα και διεπαφές. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων αισθητήρων, κατά τον OGC, είναι τα εξής:

- όλοι οι αισθητήρες γνωρίζουν τη θέση τους,
- όλοι είναι προσβάσιμοι από το διαδίκτυο,
- έχουν κάνει register βασικές μετα-πληροφορίες ως περιγραφή,
- οι μετρήσεις από όλα τα δίκτυα είναι προσβάσιμες,
- κάποιοι από όλους αυτούς τους αισθητήρες προσφέρουν δυνατότητες απομακρυσμένης διαχείρισης.

Κάποια βασικά θέματα στα οποία εστιάζει το SWE, σε σχέση με τη λειτουργικότητα που θα μπορεί να προσφέρεται από τα δίκτυα αισθητήρων, είναι τα ακόλουθα:

- Κοινοποίηση ύπαρξης και λειτουργίας δικτύων αισθητήρων μέσω διαδικτύου.
- Κοινοποίηση των αντίστοιχων δυνατοτήτων μέτρησης που προσφέρουν τα δίκτυα αυτά, καθώς και της ποιότητας των μετρήσεων αυτών.
- Λήψη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
- Διαχείριση των λειτουργιών των δικτύων αισθητήρων.
- Εγγραφές σε υπηρεσίες και ειδοποιήσεις (publish/subscribe) για συμβάντα βάσει κριτηρίων.

Από τις παραπάνω θεματικές περιοχές, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μοντελοποίηση της περιγραφής των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα δίκτυα αισθητήρων που είναι συνδεδεμένα με το Διαδίκτυο. Συγκεκριμένα, το αντίστοιχο πρότυπο που έχει αναπτυχθεί ονομάζεται SensorML. Η SensorML (Sensor Model Language) στοχεύει στην κοινοποίηση και διαχείριση των διάφορων Sensor Web. Η βασική ιδέα είναι ότι τα πάντα σε ένα δίκτυο αισθητήρων μοντελοποιούνται μέσα από διαδικασίες (procedures). Η γλώσσα αυτή στην ουσία ορίζει μοντέλα και ένα XML schema για την διατύπωση τέτοιων διαδικασιών. Μία διαδικασία ορίζεται από ένα σύνολο εισόδων, εξόδων, παραμέτρων, μιας μεθόδου, μαζί με κάποια μετα-δεδομένα (ID, περιορισμοί, χαρακτηριστικά αισθητήρα, τοποθεσία, κ.α.). Περιγράφει ένα μοντέλο λειτουργίας του αισθητήρα, αντί να δίνει μια αναλυτική περιγραφή του υλικού του δικτύου.

Ένα άλλο πρότυπο, σε 'χαμηλότερο' επίπεδο, είναι το IEEE 1451, το οποίο περιγράφει το πρωτόκολλο επικοινωνίας με ενσύρματους αισθητήρες που συνδέονται όλοι με το ίδιο καλώδιο. Σε ότι αφορά την περιγραφή του δικτύου αισθητήρων, στην ουσία περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο αισθητήρες (που είναι συμβατοί με το πρότυπο αυτό) κοινοποιούν τις δυνατότητές τους και παρέχει επίσης ένα πρωτόκολλο ώστε να μπορούν να ελεγχθούν οι αισθητήρες αυτοί (δηλαδή να πάρουν μετρήσεις ή και να εκτελέσουν ενέργειες εφόσον έχουν τέτοιες δυνατότητες). Υπάρχει μια επέκταση του πρωτοκόλλου που αφορά σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (1451.5).

Στο δικό μας σύστημα δεν έχουμε συμπεριλάβει υποστήριξη για τη SensorML, καθώς θεωρήσαμε ότι για τους σκοπούς του συστήματός μας είναι κάπως σύνθετη, και δεν χρειαζόμαστε, προς το παρόν, τόσο αναλυτικές περιγραφές των αισθητήρων που μετέχουν στο σύστημα. Αντίθετα, χρησιμοποιούμε μια πιο απλή κωδικοποίηση για την κοινοποίηση των χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων που μετέχουν στο σύστημα, παρόμοιο με τον τρόπο που περιγράφεται στο [59] (XMLSens). Από την άλλη, θεωρούμε ότι το πρότυπο IEEE 1451 προσφέρει αρκετή ευελιξία στη υλοποίηση κάποιων εφαρμογών για δίκτυα αισθητήρων (π.χ. εφαρμογή 'έξυπνης' γεωργίας) και σκοπεύουμε να ερευνήσουμε ανάλογες μελλοντικές επεκτάσεις στο σύστημά μας.

5.3 Η αρχιτεκτονική του WebDust

Ένας από τους βασικότερους στόχους του συστήματός μας είναι η διαχείριση πολλαπλών ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στόχος μας ήταν ο τελικός χρήστης να βλέπει το σύνολο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που μετέχουν στο σύστημα ως ένα ενιαίο 'εικονικό' δίκτυο αισθητήρων (virtual sensor network), έχοντας έτσι ενιαία πρόσβαση στην πληροφορία που έρχεται από τους αισθητήρες του δικτύου, καθώς και στη διαχείρισή του μέσω μιας μοναδικής διεπαφής χρήστη. Μία αρχική επιλογή που έγινε, σε ότι αφορά στη σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του WebDust, ήταν να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο εφαρμογών **N-επιπέδων** (*N-tier application model*). Με τον όρο αυτό εννοούμε το μοντέλο στο οποίο χωρίζουμε μια εφαρμογή σε επιμέρους επίπεδα (*tiers*), τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους με έναν καλά ορισμένο τρόπο και τους έχουν ανατεθεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Στην περίπτωση του WebDust χρησιμοποιήσαμε αρχικά μια αρχιτεκτονική 5 επιπέδων. Τα επίπεδα από τα οποία αποτελείται η συγκεκριμένη εκδοχή της αρχιτεκτονικής του συστήματος φαίνονται στο σχήμα 5.3, και είναι:

1. **Το επίπεδο αισθητήρων (Sensor Tier)**, το οποίο αποτελείται από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία διαχειρίζεται το WebDust.

2. **Το επίπεδο ελέγχου (Control Tier)**, το οποίο αποτελείται από τα κέντρα ελέγχου για κάθε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.
3. **Το επίπεδο πληροφορίας (Data Tier)**, το οποίο αποτελείται από μια βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται όλες οι πληροφορίες του συστήματος.
4. **Το ενδιάμεσο επίπεδο (Middle Tier)**, το οποίο χρησιμεύει για την επεξεργασία της πληροφορίας που περιέχεται στη βάση δεδομένων και παράλληλα παρέχει ένα interface στα υπόλοιπα επίπεδα, ώστε να έχουν πρόσβαση στη βάση δεδομένων.
5. **Το επίπεδο παρουσίασης (Presentation Tier)**, το οποίο είναι το interface του συστήματος με τον τελικό χρήστη.

Η πρώτη έκδοση του συστήματος έκανε έναν πρόσθετο διαχωρισμό ανάμεσα στο επίπεδο αισθητήρων και στα υπόλοιπα επίπεδα του συστήματος, καθώς στο επίπεδο αισθητήρων ο κώδικας της εφαρμογής είχε γραφτεί στη γλώσσα nesc και χρησιμοποιούσε τις βιβλιοθήκες του λειτουργικού συστήματος Tinyos (έκδοση 1.1), ενώ τα υπόλοιπα επίπεδα ήταν γραμμένα εξ ολοκλήρου σε Java. Η αρχιτεκτονική αυτή μαζί με την οργάνωση του κώδικα περιγράφεται αναλυτικά στα [100] και [13], οπότε δε θα μπορούμε σε περισσότερες λεπτομέρειες για το συγκεκριμένο θέμα. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται εποπτικά η οργάνωση σε επίπεδα και η ιδέα του εικονικού δικτύου αισθητήρων.

Αποφασίσαμε την αναθεώρηση και επέκταση της αρχικής αρχιτεκτονικής του συστήματος, προκειμένου να προσφέρουμε ένα σύστημα με ακόμα μεγαλύτερη *ευελιξία, επεκτασιμότητα και δυνατότητα κλιμάκωσης*. Το βασικό μειονέκτημά της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής ήταν η σχετικά στενή σύνδεση στην πράξη μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων του συστήματος, κυρίως λόγω της αυστηρά καθορισμένης διεπαφής μεταξύ τους καθώς και της εξάρτησης του ενός από τα υπόλοιπα. Ακόμα, η αρχιτεκτονική του συστήματος έκανε σχετικά δύσκολη την υποστήριξη πλήθους από διαφορετικά λογισμικά στο επίπεδο των δικτύων αισθητήρων, δηλαδή η διαδικασία σύνδεσης με ένα ήδη υπάρχον λογισμικό για τα δίκτυα αισθητήρων είχε κάποια δυσκολία.

Στην αναθεωρημένη εκδοχή της αρχιτεκτονικής του συστήματος γίνεται η βασική υπόθεση ότι πλέον μιλάμε όχι απλώς για μια πλατφόρμα λογισμικού που υποστηρίζει τη διαχείριση πολλαπλών δικτύων αισθητήρων, αλλά για ένα δίκτυο ομοτίμων εταίρων (peer-to-peer, P2P), ακόμα και σε παγκόσμια κλίμακα, στο οποίο συμμετέχει μεγάλος αριθμός δικτύων αισθητήρων, τα οποία είναι γεωγραφικά διεσπαρμένα, ανήκουν σε διαφορετικούς φορείς και η διαχείρισή τους γίνεται από διαφορετικούς χρήστες, ενώ παράλληλα δημοσιοποιούν το σύνολο ή μέρος των δεδομένων που λαμβάνουν από τους κόμβους-αισθητήρες που περιέχουν. Μιλάμε επομένως για ένα πιο ευρύ πεδίο εφαρμογής, το οποίο επιβάλλει μεγαλύτερη γενικότητα στην προσέγγιση που θα ακολουθήσουμε. Γενικά, κάνουμε τον εξής αφαιρετικό διαχωρισμό τριών επιπέδων:

- Έχουμε καταρχήν ένα P2P δίκτυο μέσω του οποίου διάφορες υπολογιστικές οντότητες και χρήστες επικοινωνούν για να ανταλλάξουν δεδομένα.
- Έχουμε κατόπιν τις οντότητες που επικοινωνούν μέσω του δικτύου αυτού και χρησιμεύουν ως γέφυρες μεταξύ των διάφορων ασύρματων δικτύων αισθητήρων και του υπόλοιπου κόσμου. Καλούμε τις οντότητες αυτές *gateway peers*.

- Έχουμε τέλος τους κόμβους που σχηματίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία στέλνουν τις μετρήσεις που λαμβάνουν από τον φυσικό κόσμο προς τα παραπάνω επίπεδα. Καλούμε αυτές τις οντότητες *nano peers*.

Σε αντίθεση με την πρώτη εκδοχή του συστήματος, στην οποία είχαμε απλά μια ιεραρχική αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων που επικοινωνούσαν μεταξύ τους με αυστηρά καθορισμένους τρόπους και συνδέσεις, στην αναθεωρημένη εκδοχή του συστήματος ακολουθούμε μια λιγότερο αυστηρή προσέγγιση, με την έννοια ότι αυτά τα επίπεδα μπορούν να υπάρχουν μέσα στο σύστημα αλλά η παρουσία και οι συνδέσεις μεταξύ τους δεν είναι απαραίτητες ή μονοσήμαντα καθορισμένες. Βασική αρχή λοιπόν, είναι ότι οι *peer* που μετέχουν στο σύστημα, σε οποιοδήποτε επίπεδο, *προσφέρουν* ή *χρησιμοποιούν* ένα σύνολο από υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν στην πράξη να υλοποιούνται σε παραπάνω από ένα επίπεδα (π.χ., μια υπηρεσία δημοσιοποίησης μετρήσεων διατρέχει όλα τα επίπεδα που αναφέραμε προηγουμένως) ή και διαφορετικούς *peers* (π.χ., μια υπηρεσία δημοσιοποίησης *aggregated* πληροφορίας μπορεί να χρησιμοποιεί παραπάνω από ένα δίκτυα αισθητήρων ως πηγές πληροφορίας), αλλά αυτό θα γίνεται πάντα με τρόπο διάφανο στο χρήστη. Οι υπηρεσίες αυτές στην περίπτωση μας μπορούν να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργικότητας. Έτσι, μπορούμε να έχουμε υπηρεσίες που σχετίζονται με τη διαχείριση ενός δικτύου αισθητήρων, υπηρεσίες που κάνουν *buffering* σε προβληματικές συνδέσεις με το δίκτυο ομοτίμων εταίρων, υπηρεσίες *publish/subscribe*, υπηρεσίες που διαχειρίζονται σφάλματα στους κόμβους ή στα δίκτυα αισθητήρων, κτλ. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό το χαρακτηριστικό, η λογική σύνδεσης μεταξύ των διαφορετικών μερών του συστήματος γίνεται πλέον με τη χρήση μηνυμάτων που περιγράφουν υπηρεσίες (βασισμένες σε XML δηλαδή), αντί να χρησιμοποιούμε εξειδικευμένα πρωτόκολλα (όπως στην πρώτη έκδοση του συστήματος).

Η γενική ιδέα λοιπόν στο σύστημά μας είναι ότι για να προσφέρουμε αυτό το σύνολο υπηρεσιών, έχουμε καταρχήν ένα σύνολο από διακριτά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το καθένα από τα οποία συνδέεται με κάποιο κέντρο ελέγχου δικτύου. Αυτά τα κέντρα ελέγχου είναι παράλληλα *Gateway Peers* σε ένα δίκτυο ομοτίμων εταίρων και φροντίζουν έτσι ώστε να δημοσιοποιούν πληροφορία μέσα από αυτό το δίκτυο στους υπόλοιπους *peer* του συστήματος. Οι ανακοινώσεις αυτές περιγράφουν ‘υπηρεσίες’ που σχετίζονται με τις δυνατότητες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που ‘αντιπροσωπεύουν’, καθώς και με τον γεωγραφικό χώρο τον οποίο καλύπτουν με την λειτουργία τους. Καθώς το σύστημά μας υποστηρίζει εγγενώς ετερογενή συστήματα, κάθε *peer* μπορεί να παρέχει ένα διαφορετικό σύνολο από υπηρεσίες:

- αφενός κάθε δίκτυο αισθητήρων μπορεί να παρατηρεί διαφορετικά φυσικά φαινόμενα,
- αφετέρου οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση του ίδιου φαινομένου να διαθέτουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (ακρίβεια, κτλ.).

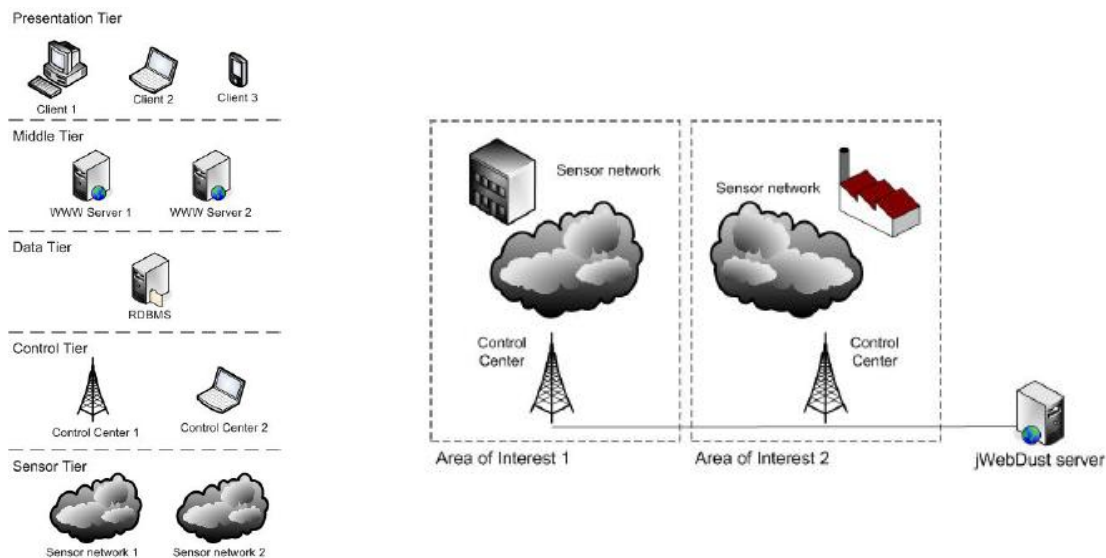
Επίσης, στο δίκτυο ομοτίμων εταίρων είναι δυνατόν να συμμετέχουν κόμβοι οι οποίοι είναι μόνο καταναλωτές υπηρεσιών, και όχι παραγωγοί (με άλλα λόγια δεν συνδέονται άμεσα με κάποιο δίκτυο αισθητήρων). Στο σχήμα 5.4 φαίνεται ένα διάγραμμα της συνολικής αρχιτεκτονικής του συστήματος. Γενικά, κάνουμε ένα διαχωρισμό στις υπηρεσίες που προσφέρει ο κάθε *peer* του συστήματος σε δύο βασικές κατηγορίες, τις *υπηρεσίες*

πυρήνα (core) και τις πρόσθετες υπηρεσίες. Οι πρώτες, όπως φαίνεται από το όνομά τους, είναι το ελάχιστο σύνολο υπηρεσιών που χρησιμοποιεί κάθε μέλος του δικτύου ομοτίμων εταίρων προκειμένου να μπορεί να συμμετέχει στο σύστημα, ενώ οι δεύτερες δεν είναι απαραίτητο να υπάρχουν στο σύνολό τους σε κάθε μέλος του δικτύου, και συνεργάζονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες πυρήνα.

Οι υπηρεσίες πυρήνα στην ουσία προσφέρουν στα υπόλοιπα μέρη του συστήματος τη βάση για να μπορέσουν να χρησιμοποιήσουν κάθε μορφή πληροφορίας που διακινείται μέσα στο σύστημα (μετρήσεις από το σύστημα, χαρακτηριστικά κόμβων, πληροφορία από άλλα δίκτυα, κτλ.). Η οργάνωση της πληροφορίας γενικά στο σύστημά μας, καθώς και το σχήμα της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιούμε αναλύονται στην επόμενη ενότητα. Οι πρόσθετες υπηρεσίες όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 χωρίζονται σε 4 βασικές κατηγορίες: υπηρεσίες σχετικές με τη διασύνδεση του δικτύου ομοτίμων εταίρων (P2P), με τη διατήρηση δεδομένων στο σύστημα (persistence), με την διεπαφή με διάφορες τεχνολογίες λογισμικού και υλικού στο επίπεδο του δικτύου αισθητήρων (hardware), και με την παροχή υπηρεσιών διεπαφής στον τελικό χρήστη ή σε άλλες εφαρμογές (Web Services). Όλες οι υπηρεσίες που προσφέρονται από το σύστημα έχουν υλοποιηθεί με τη χρήση της Java.

Σε ότι αφορά το δίκτυο ομοτίμων εταίρων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το Web-Dust χρησιμοποιεί την JXTA για να 'χτίσει' επάνω της το P2P δίκτυο πάνω στο οποίο βασίζεται η ενοποίηση των διαφορετικών δικτύων αισθητήρων. Εν συντομία, η JXTA είναι ένα σύνολο από πρωτόκολλα και προδιαγραφές, για την ανάπτυξη συστημάτων που επικοινωνούν μέσω δικτύων ομοτίμων εταίρων. Αν και η JXTA ξεκίνησε από την Sun, υπάρχουν διαθέσιμες πολλές υλοποιήσεις, σε Java Standard και Micro Edition, C/C++/C#, οι οποίες είναι συμβατές μεταξύ τους. Αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη πλατφόρμα ανεξάρτητη λειτουργικού συστήματος και γλώσσας υλοποίησης. Οι εταίροι δημιουργούν ένα overlay δίκτυο, μέσω του οποίου κάθε εταίρος του δικτύου μπορεί να αλληλεπιδράσει με κάποιον άλλο. Με τη βοήθεια της JXTA οι εταίροι του δικτύου ανταλλάσσουν μηνύματα που περιγράφουν τις δυνατότητές τους σε σχέση με τους αισθητήρες που περιέχουν, δεδομένα σε μορφή κειμένου ή δυαδική, μηνύματα με τα οποία διατυπώνουν κριτήρια για την αναζήτηση πληροφορίας μέσα στο δίκτυο, μηνύματα ανακοίνωσης διαθέσιμων δεδομένων, κτλ. Στο σχήμα 5.6 φαίνεται η μορφή του μηνύματος που στέλνει ο κάθε εταίρος στους υπόλοιπους προκειμένου να 'διαφημίσει' τις δυνατότητές του. Τα περιεχόμενα αυτού του μηνύματος μπορούν να γίνουν πιο σαφή με βάση τον ορισμό των οντοτήτων των υπηρεσιών πυρήνα, όπως περιγράφονται στη συνέχεια του κειμένου.

Σε ότι αφορά την διατήρηση δεδομένων στο σύστημα (persistence), επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την Hibernate η οποία αποτελεί μια υλοποίηση του Java Persistence API. Ο σκοπός μιας τέτοιας υλοποίησης είναι η δημιουργία μίας διεπαφής μεταξύ μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων και μίας εφαρμογής που είναι γραμμένη σε Java, έτσι ώστε ο προγραμματιστής να μπορεί να χειριστεί τους πίνακες της βάσης δεδομένων ως αντικείμενα. Δημιουργούνται αντιστοιχίες μεταξύ των εννοιών του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, όπως οι συσχετίσεις, η κληρονομικότητα και ο πολυμορφισμός (τα οποία δεν υπάρχουν σε μία σχεσιακή βάση δεδομένων), και των πινάκων και σχέσεων μεταξύ αυτών μίας σχεσιακής βάσης. Έτσι ο προγραμματιστής μπορεί να χρησιμοποιήσει τα αντικείμενα της εφαρμογής του, να τα τροποποιήσει και να τα αποθηκεύσει στη βάση ουσιαστικά ως αντικείμενα. Η Hibernate αναλαμβάνει να παράξει αυτόματα τον αντίστοιχο κώδικα για τη δημιουργία αυτής της διεπαφής καθώς και τη σύνδεση με αυτή. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ της εφαρμογής και της βάσης δεδομένων, το

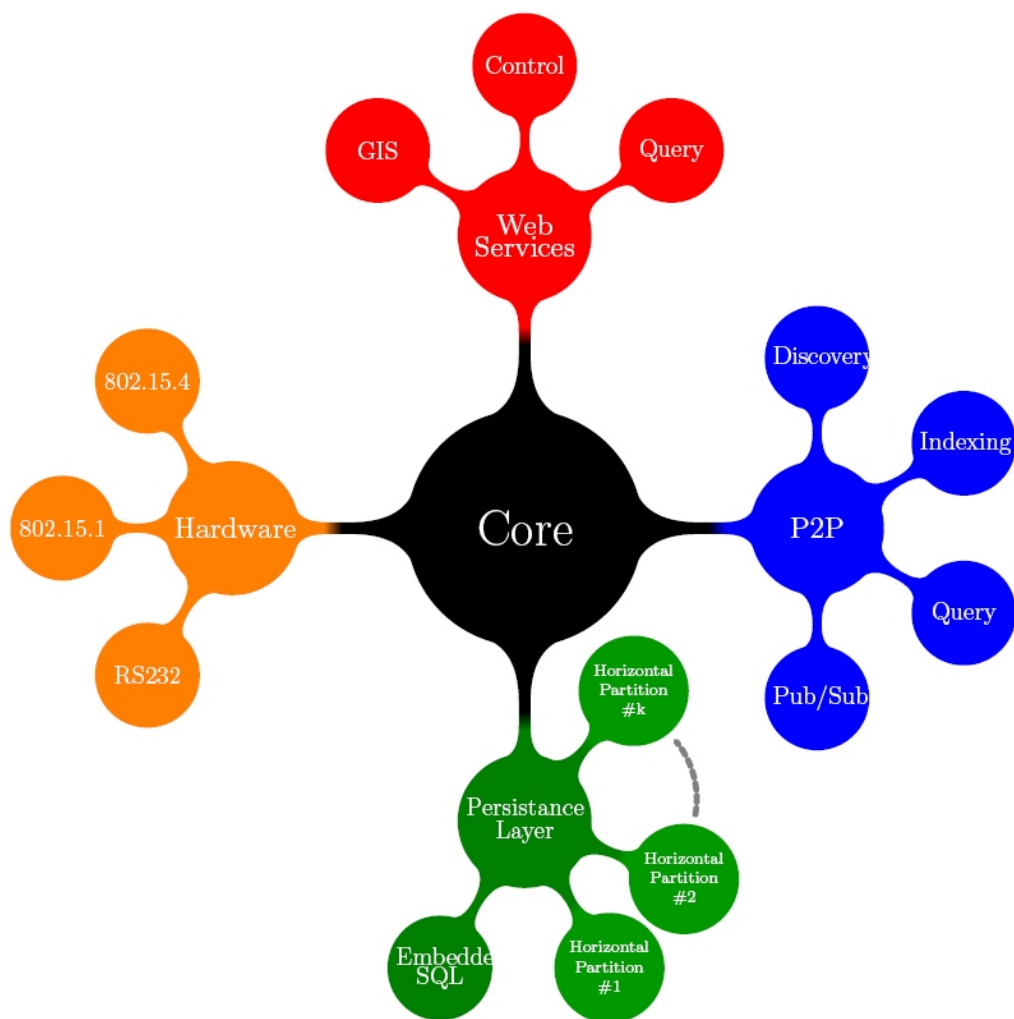


Σχήμα 5.3: Διάγραμμα της αρχικής αρχιτεκτονικής του συστήματος - ιεραρχική οργάνωση επιπέδων (στα αριστερά) και η ιδέα του εικονικού δικτύου αισθητήρων (στα δεξιά)

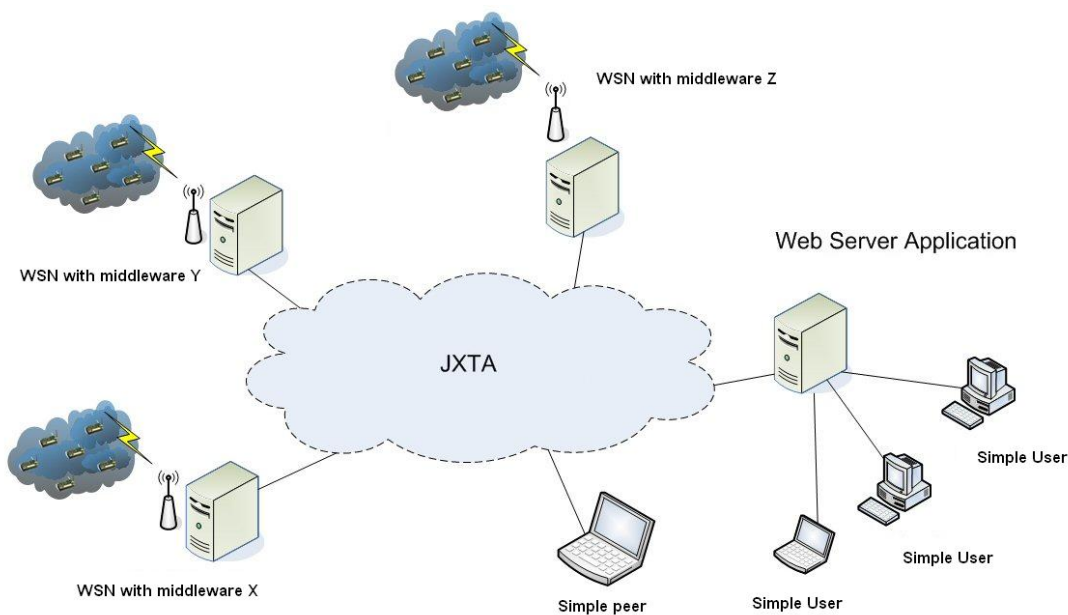
οποίο απομακρύνει την πολυπλοκότητα της σύνδεσης και ενημέρωσης μεταξύ αυτών των δύο οντοτήτων.

Στο σχήμα 5.3 φαίνεται ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνονται οι βασικές ιδέες πίσω από τη σχεδίαση του συστήματος. Υπάρχουν διάφοροι peers στο σύστημα, από τους οποίους άλλοι συνδέονται με κάποιο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και κάποιοι άλλοι όχι (είναι απλοί παρατηρητές δηλαδή), ενώ κάθε peer του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικό ενδιαμέσο λογισμικό για τη διαχείριση του δικτύου αισθητήρων με το οποίο συνδέεται χωρίς αυτό να γίνεται αντιληπτό από τα υπόλοιπα μέρη του δικτύου ομοτίμων εταιρών. Υπάρχει επίσης ένας ειδικός peer στο σύστημα, ο οποίος παρακολουθεί την κατάσταση του δικτύου και τις μετρήσεις από όλους τους συμμετέχοντες, ενώ παράλληλα προσφέρει μια διεπαφή σε τρίτους τελικούς χρήστες για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και της κατάστασης όλων των δικτύων αισθητήρων και την παρουσίασή τους ως ένα ενιαίο δίκτυο.

Η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής και η υλοποίηση της δεύτερης εκδοχής του συστήματος έγινε σε συνεργασία με τον Δρ. Ι. Χατζηγιαννάκη, ο οποίος οφείλουμε να αναφέρουμε ότι είχε τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην επέκταση της αρχικής αρχιτεκτονικής του συστήματος καθώς και στο refactoring του αρχικού κώδικα για να ικανοποιεί τη νέα σχεδίαση, και τους συνάδελφους Α. Αντωνίου και Α. Παπαγεωργίου, οι οποίοι ασχολήθηκαν με τα θέματα της διασύνδεσης μέσω του δικτύου ομοτίμων εταιρών. Στις ενότητες που ακολουθούν, δίνουμε τις γενικές αρχές που διέπουν την υλοποίηση του συστήματος, καθώς και μια σχετικά αναλυτική παρουσίαση του σχήματος της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιεί το σύστημα.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα της αρχιτεκτονικής του WebDust – Υπηρεσίες πυρήνα και πρόσθετες υπηρεσίες



Σχήμα 5.5: Σχηματική απεικόνιση ενός δικτύου ομοτίμων εταίρων ασύρματων δικτύων αισθητήρων, τα οποία ενώνονται μέσω του υποστρώματος JXTA που χρησιμοποιεί το σύστημά μας

5.4 Υλοποίηση του συστήματος

5.4.1 Υπηρεσίες πυρήνα – σχετικές οντότητες

Στην παρούσα ενότητα δίνουμε μια σύντομη περιγραφή για τις οντότητες που σχετίζονται με τις υπηρεσίες πυρήνα του WebDust. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, στόχος του συστήματος είναι η επεκτασιμότητα, η κλιμάκωση και η ευελιξία. Είναι σημαντικό λοιπόν να μπορούμε εύκολα να επεκτείνουμε το σύστημα με απλούς τρόπους, να δηλώνουμε δηλαδή νέους αισθητήρες που μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιο δίκτυο αισθητήρων ή να μπορούμε να χρησιμοποιούμε χιλιάδες κόμβων που δημιουργούν τεράστιο όγκο δεδομένων, και ο χρήστης να μπορεί να χρησιμοποιεί όλο αυτό τον όγκο πληροφορίας με τρόπο απλό και αποδοτικό. Τονίζουμε ότι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχει μεγάλη σημασία η προέλευση της γεωγραφικής πληροφορίας, και για το λόγο αυτό υπάρχουν αρκετές σχετικές οντότητες που οργανώνουν τη σχετική πληροφορία, βασιζόμενες στην έννοια της ‘τοποθεσίας ενδιαφέροντος’ (point of interest).

Σε ότι αφορά την επεκτασιμότητα του συστήματος, υπάρχει μεγάλη λεπτομέρεια σε ότι αφορά τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιούμε σε κάθε περίπτωση, αλλά και σε ότι αφορά την οργάνωση του συνολικού συστήματος και το ποιος κόμβος ανήκει σε ποιο δίκτυο αισθητήρων. Βασική έννοια αποτελεί η ‘ικανότητα’ (capability), την οποία χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τις δυνατότητες του κάθε κόμβου σε ότι αφορά τους αισθητήρες και τις μονάδες ελέγχου που διαθέτει, τις οποίες ομαδοποιούμε γενικά ως ικανότητες. Οι ικανότητες αυτές με τη σειρά τους ομαδοποιούνται σε γενικές κατηγορίες, όπως ‘θερμοκρασία’, ‘υγρασία’, κτλ. Υπάρχει επίσης η οργάνωση σε ότι αφορά τα δίκτυα αισθητήρων και τους αντίστοιχους κόμβους. Θεωρούμε ότι κάθε κόμβος ανήκει σε

```

<peer>
<type>Gateway</type>
<name>Prefab Offices CEID</name>
<description> ...</description>
<location>
<longitude>38.17.01.12</longitude>
<latitude>21.47.19.74</latitude>
<altitude>60</altitude>
</location>
<coverageArea>
<leftBottom>
<location> ... </location>
</leftBottom>
<rightUpper>
<location> ... </location>
</rightUpper>
</coverageArea>
<capabilities>
<capability>
<id> 1000 </id>
<type>Temperature</type>
</capability>
....
</capabilities>

<sensors>
<sensor>
<id>8080</id>
<name>Temperature sensor - MTS310CA</name>
<capabilityID>1000</capabilityID>
<accuracy>0.1</accuracy>
<units>Celcius</units>
</sensor>
....
</sensors>
<nodes>
<node>
<location> ... </location>
<description>Mica node 4</description>
<longitude> ... </longitude>
<latitude> ... </latitude>
<altitude> ... </altitude>
<status> alive </status>
<sensorsList>
<entry>
<sensor-id>8080</sensor-id>
<samplingInterval>00:00:30:00</samplingInterval>
<historySize>00:01:00:00</historySize>
</entry>
...
</sensorsList>
</node>
....
</nodes>
</peer>

```

Σχήμα 5.6: Παράδειγμα μηνύματος με το οποίο ένας εταίρος ανακοινώνει στο δίκτυο τις δυνατότητές του

ένα συγκεκριμένο δίκτυο αισθητήρων, και έχει μια μοναδική ταυτότητα από την οποία διακρίνεται από όλους τους κόμβους του συστήματος.

Το σχήμα οντοτήτων είναι λογική επέκταση του αντίστοιχου που παρουσιάστηκε στο [100]. Υπενθυμίζουμε ότι χρησιμοποιούμε τη γλώσσα Java για την υλοποίηση του συστήματος. Για κάθε οντότητα που περιγράφουμε δίνουμε έναν πίνακα ο οποίος περιέχει τα πεδία της συγκεκριμένης οντότητας, και στην επόμενη ενότητα δίνουμε την αντιστοίχιση των οντοτήτων αυτών στη βάση δεδομένων του συστήματος.

DataType Οντότητα: αναπαριστά τον τύπο δεδομένων που χρησιμοποιείται στη βάση για να αποθηκευτούν οι μετρήσεις από αισθητήρες (αριθμητικό, boolean, κείμενο, raw). Χρησιμεύει για να μπορούμε να επεξεργαστούμε την πληροφορία που βρίσκεται αποθηκευμένη στο σύστημα από συγκεκριμένους αισθητήρες, και η οποία μπορεί να βρίσκεται σε δυαδική μορφή (οπότε πρέπει να είμαστε σε θέση να διακρίνουμε σε τι μορφή μας έρχεται η μέτρηση από το δίκτυο).

Device Οντότητα: αναπαριστά έναν κόμβο (συσκευή) ο οποίος ανήκει σε κάποιο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Κάθε κόμβος διαθέτει μια ταυτότητα στο δίκτυο στο οποίο ανήκει, και η οποία δεν είναι ίδια με την ταυτότητα που χρησιμοποιείται για την αναγνώρισή του συνολικά στο σύστημα. Διαθέτει επίσης συγκεκριμένη γεωγραφική θέση και ένα πλήθος από χαρακτηριστικά όπως αριθμός hop από το κέντρο ελέγχου του δικτύου που καταγράφονται.

DeviceType Οντότητα: αναπαριστά τον τύπο υλικού κάποιου συγκεκριμένου κόμβου,

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID της εγγραφής
Name	String	Όνομα
JavaClassType	class	Η Java κλάση που αντιστοιχεί σε αυτό τον τύπο
isNumeric	boolean	Αν είναι αριθμητικό

Πίνακας 5.1: Η οντότητα DataType

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID της συσκευής (στο σύστημα)
deviceType	DeviceType	Τύπος υλικού της συσκευής
deviceNetwork	DeviceNetwork	Το δίκτυο στο οποίο περιέχεται
deviceAddr	int	Η διεύθυνση της συσκευής μέσα στο δίκτυο
Name	String	Όνομα της συσκευής
LastUpdate	Timestamp	Τελευταία ανανέωση στο σύστημα
deviceCoordinate	Coordinate	Θέση της συσκευής
capabilities	Set	Οι αισθητήρες που διαθέτει η συσκευή
params	Set	Τα χαρακτηριστικά της συσκευής
readings	Set	Οι μετρήσεις που έχουν έρθει από τη συσκευή

Πίνακας 5.2: Η οντότητα Device

καθώς στο σύστημα μας υποστηρίζουμε διάφορες πλατφόρμες κόμβων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID του τύπου
Name	String	Όνομα
Description	String	Περιγραφή
URL	String	Διεύθυνση για περαιτέρω πληροφορίες

Πίνακας 5.3: Η οντότητα DeviceType

Capability Οντότητα: κάποιος συγκεκριμένος αισθητήρας που μπορεί να φέρει μια συσκευή για να παρακολουθεί κάποιο φυσικό μέγεθος. Υπάρχει ο διαχωρισμός Capability (ικανότητας) και CapabilityType (βλ. παρακάτω) επειδή είναι πιθανό να έχουμε παραπάνω από ένα τύπο αισθητήρων που μετρούν το ίδιο φυσικό μέγεθος.

CapabilityType Οντότητα: ο αφαιρετικός τύπος μετρήσεων που λαμβάνονται από τους κόμβους του δικτύου (δηλαδή θερμοκρασία, φως, υγρασία, κτλ.). Υπάρχει ο διαχωρισμός

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID της ικανότητας
capabilityType	CapabilityType	Ο τύπος της συγκεκριμένης ικανότητας
Name	String	Όνομα
Accuracy	String	Ακρίβεια μέτρησης
Units	String	Μονάδα μέτρησης
dataType	DataType	Τύπος δεδομένων (δυναμικός, εικόνα, κτλ)

Πίνακας 5.4: Η οντότητα Capability

Capability (ικανότητας) και CapabilityType (τύπος ικανότητας) επειδή είναι πιθανό να έχουμε παραπάνω από ένα τύπο αισθητήρων που μετρούν το ίδιο φυσικό μέγεθος.

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	integer	ID του τύπου ικανότητας
Name	String	Όνομα του τύπου ικανότητας

Πίνακας 5.5: Η οντότητα CapabilityType

DeviceNetwork Οντότητα: αναπαριστά ένα διακριτό δίκτυο αισθητήρων, από αυτά που συμμετέχουν στο σύστημα. Το σύστημα υποστηρίζει πολλαπλά δίκτυα αισθητήρων, τα οποία μπορούν το καθένα να έχει πολλούς κόμβους, και πρέπει να γίνεται η διάκριση μεταξύ τους.

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID του δικτύου στο σύστημα
Name	String	Όνομα
Description	String	Περιγραφή
EnclosingCoordinateTopLeft	Coordinate	Περιγραφή του ορθογώνιου που περικλείει το δίκτυο
EnclosingCoordinateBottomRight	Coordinate	Περιγραφή του ορθογώνιου που περικλείει το δίκτυο
devices	Set	Κόμβοι οι οποίοι ανήκουν στο δίκτυο

Πίνακας 5.6: Η οντότητα DeviceNetwork

Coordinate Οντότητα: περιγράφει απλά μια γεωγραφική θέση στον πλανήτη. Ο διαχωρισμός απόλυτου ύψους και ύψους από το έδαφος είναι χρήσιμος για την απεικόνιση και τη δημιουργία διεπαφής μέσω του Google Earth, όπως περιγράφεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID της θέσης
X	double	Γεωγραφικό μήκος
Y	double	Γεωγραφικό πλάτος
AbsAltitude	double	Ύψος από το επίπεδο της θάλασσας)
FromGroundAltitude	double	Ύψος από το έδαφος
Description	String	Περιγραφή

Πίνακας 5.7: Η οντότητα Coordinate

PointOfInterest Οντότητα: περιγράφει μια τοποθεσία ενδιαφέροντος στο σύστημά μας. Μπορεί να είναι ένα απλό σημείο (με μία coordinate) ή να περιγράφει μια περιοχή που μας ενδιαφέρει (το περίγραμμα της οποίας καθορίζεται από ένα σύνολο από συσυντεταγμένες, π.χ., η πανεπιστημιούπολη Πατρών).

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID της
Name	double	Ονομασία σημείου ενδιαφέροντος
Description	String	Περιγραφή

Πίνακας 5.8: Η οντότητα PointOfInterest

Reading Οντότητα: περιγράφει μια μέτρηση από έναν μοναδικό αισθητήρα, ο οποίος ανήκει σε ένα συγκεκριμένο κόμβο από αυτούς που έχουν καταχωρηθεί στο σύστημα από ένα μοναδικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Η διάκριση της μορφής της μέτρησης σε δυαδική ή αριθμητική επιβάλλεται καθώς μπορούμε να έχουμε αισθητήρες που δίνουν ως αποτέλεσμα π.χ., μια εικόνα, η οποία δεν μπορεί να περιγραφεί από μια απλή τιμή.

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID της μέτρησης
readingDevice	Device	Κόμβος που έστειλε τη μέτρηση
readingCapability	Capability	Σχετική ικανότητα
Date	Date	Ημερομηνία λήψης μέτρησης
ValueBinary	double	Μέτρηση – Δυαδική μορφή
ValueNumeric	double	Μέτρηση – Μεταφρασμένη μορφή

Πίνακας 5.9: Η οντότητα Reading

DeviceQuery Οντότητα: περιγράφει ένα ερώτημα που υποβάλλουμε σε ένα σύνολο από κόμβους που ανήκουν σε κάποιο συγκεκριμένο δίκτυο αισθητήρων. Κάθε τέτοιο ερώτημα είναι ενεργό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και περιγράφεται με μία μαθηματική έκφραση. Επίσης, ανήκει σε μία συγκεκριμένη κατηγορία ερωτημάτων.

QueryType Οντότητα: περιγράφει τις κατηγορίες ερωτημάτων που μπορούμε να απευθύνουμε στους κόμβους ενός δικτύου αισθητήρων:

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID του ερωτήματος
Name	double	Ονομασία του ερωτήματος
Description	String	Περιγραφή του ερωτήματος
Start	Timestamp	Ημερομηνία έναρξης
Stop	Timestamp	Ημερομηνία λήξης
Expression	String	Έκφραση (μαθηματική)
Period	double	Περίοδος
IsActive	Boolean	Κατάσταση
Result	String	Αποτέλεσμα
queryType	QueryType	Τύπος ερωτήματος
deviceNetwork	DeviceNetwork	Το δίκτυο στο οποίο απευθύνεται το ερώτημα
devices	Set	Οι κόμβοι στους οποίους απευθύνεται το ερώτημα
capabilities	Set	Ικανότητες για τις οποίες θέλουμε μετρήσεις

Πίνακας 5.10: Η οντότητα DeviceQuery

- “One Shot”, για ερωτήματα που γίνονται μόνο μια φορά.
- “Event”, για ερωτήματα που απαντώνται από τους κόμβους μόνο αν ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες.
- “Periodic”, για ερωτήματα τα οποία απαντώνται από τους κόμβους με κάποια περιοδικότητα.

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
ID	int	ID του τύπου ερωτήματος
Name	double	Ονομασία
Queries	Set	Σύνολο απο ερωτήματα που ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία

Πίνακας 5.11: Η οντότητα QueryType

5.4.2 Βάση δεδομένων

Το σχήμα της βάσης του συστήματος χρησιμοποιεί συνολικά 16 πίνακες και φαίνεται στο σχήμα 5.4.3. Αποτελεί στην ουσία αντιστοίχιση των οντοτήτων που περιγράψαμε προηγουμένως και των σχέσεων μεταξύ τους. Χρησιμοποιούμε τα ακόλουθα πεδία για να περιγράψουμε τους πίνακες που χρησιμοποιούνται στη βάση του συστήματος (μέχρι στιγμής χρησιμοποιούμε την MySQL:

Όνομα – Το όνομα του πεδίου.

Τύπος – Ο τύπος δεδομένων του πεδίου. Πιθανές τιμές: *I* - integer, *D* - decimal, *T* - text, *B* - 1-bit, *D* - date/time, *C* - character.

R – Αν το πεδίο είναι απαραίτητο. Πιθανές τιμές: *N* - ναι, *O* - όχι.

U – Αν το πεδίο πρέπει να έχει μοναδικές τιμές. Πιθανές τιμές: *N* - ναι, *O* - όχι.

ID – Αν το πεδίο είναι τιμή που αυξάνεται αυτόματα από τη βάση. Πιθανές τιμές: *N* - ναι, *O* - όχι.

K – Αν το πεδίο είναι κλειδί. Πιθανές τιμές: *Π* - πρωτεύον, *Δ* - δευτερεύον, *Ξ* - ξένο κλειδί.

Περιγραφή – Σύντομη περιγραφή.

Πίνακας DataType: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας DataType και στην ουσία περιέχει απλά τον τρόπο να ερμηνεύσουμε τη μορφή των μετρήσεων που βρίσκονται αποθηκευμένες στη βάση δεδομένων (double, boolean, text, raw).

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
Name	C, 40	N	O	O		Όνομα τύπου δεδομένων
JavaClassType	C, 40	O	O	O		Κλάση που αντιστοιχεί στον τύπο
isNumeric	B	O	O	O		Αριθμητικός ή όχι

Πίνακας 5.12: Ο πίνακας DataType

Πίνακας Coordinate: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας Coordinate και είναι μια λίστα με γεωγραφικές θέσεις, οι οποίες αντιστοιχίζονται αλλού με κόμβους ή σημεία ενδιαφέροντος.

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
X	D	N	O	O		Γεωγραφικό μήκος
Y	D	N	O	O		Γεωγραφικό πλάτος
AbsAltitude	D	O	O	O		Απόλυτο υψόμετρο
FromGroundAltitude	D	O	O	O		Υψόμετρο από το έδαφος
Description	T	O	O	O		Περιγραφή

Πίνακας 5.13: Ο πίνακας Coordinate

Πίνακας Device: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας Device και αποτελεί μια λίστα με τις συσκευές που υπάρχουν στο καθένα από τα δίκτυα αισθητήρων που μετέχουν στο σύστημά μας.

Πίνακας DeviceType: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας DeviceType και είναι μία λίστα με τις πλατφόρμες κόμβων δικτύων αισθητήρων που υποστηρίζονται από το σύστημα. Στην παρούσα φάση υποστηρίζονται οι εξής πλατφόρμες:

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
DeviceType	I	N	O	O	Ξ	Τύπος κόμβου
DeviceNetwork	I	N	O	O	Ξ	Δίκτυο στο οποίο ανήκει ο κόμβος
Name	C, 40	N	O	O		Όνομα συσκευής
LastUpdate	D	O	N	O		Τελευταία ανανέωση
DeviceCoordinate	I	N	N	O	Ξ	Συντεταγμένες κόμβου

Πίνακας 5.14: Ο πίνακας Device

- mica2,
- telosb,
- micaz,
- camera,
- sunspot,
- tmotesky,
- moteiv,
- isense.

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
Name	C, 40	N	O	O		Όνομα τύπου κόμβου
Description	T	O	N	O		Περιγραφή τύπου κόμβου
URL	T	O	N	N		Περιγραφή τύπου κόμβου

Πίνακας 5.15: Ο πίνακας DeviceType

Πίνακας Capability: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας Capability, και στην ουσία είναι ένας κατάλογος των αισθητήρων και μονάδων ελέγχου που υποστηρίζονται ανά πάσα στιγμή από το σύστημα. Στην παρούσα φάση οι αισθητήρες που υποστηρίζονται από το σύστημα είναι:

- MTS101CA Light sensor
- MTS101CA Thermistor
- MTS300-310CA Microphone
- MTS300-310CA Thermistor
- MTS300-310CA Accelerometer

- MTS300-310CA Magnetometer
- MTS300-310CA Light sensor
- Mica2 Voltage Level sensor
- TelosB Light sensor (PAR)
- TelosB Light sensor (TSR)
- TelosB Humidity sensor
- TelosB Temperature sensor
- TelosB Voltage Level sensor
- Web Camera
- SunSPOT Light sensor
- SunSPOT Temperature sensor
- SunSPOT Accelerometer
- SunSPOT Voltage Level sensor

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
CapabilityType	I	N	O	O	Ξ	Τύπος αισθητήρα
Name	C, 40	N	O	O		Όνομα τύπου αισθητήρα
Accuracy	D	O	O	O		Ακρίβεια
Units	I	O	O	O		Μονάδα μέτρησης
DataType	I	N	O	O	Ξ	Τύπος δεδομένων

Πίνακας 5.16: Ο πίνακας Capability

Πίνακας CapabilityType: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας CapabilityType, και περιέχει τις δηλώσεις των διαφορετικών τύπων δυνατοτήτων που υπάρχουν κάθε στιγμή στους κόμβους των δικτύων που απαρτίζουν το σύστημα και υποστηρίζονται από το λογισμικό. Στην παρούσα φάση, οι υποστηριζόμενες δυνατότητες είναι *Θερμοκρασία, Φως, Υγρασία, Τιμή τάσης, Επιτάχυνση, Ισχύς μαγνητικού πεδίου, Ήχος, Εικόνα*.

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
Name	C, 40	N	O	O		Όνομα τύπου δυνατότητας

Πίνακας 5.17: Ο πίνακας CapabilityType

Πίνακας DeviceCapability: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας DeviceCapability, και περιέχει την αντιστοίχιση κόμβων-δυνατοτήτων που υπάρχει στο σύστημα, δηλαδή ποιος αισθητήρας/μονάδα ελέγχου ανήκει σε ποιον κόμβο.

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός εγγραφής
DeviceID	I	N	O	O	Ξ	Κωδικός κόμβου στον οποίο ανήκει ο αισθητήρας
CapabilityID	I	N	O	O	Ξ	Κωδικός τύπου αισθητήρα

Πίνακας 5.18: Ο πίνακας DeviceCapability

Πίνακας DeviceNetwork: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας deviceNetwork, και περιέχει περιγραφές και χαρακτηριστικά για όλα τα δίκτυα αισθητήρων που συμμετέχουν στο σύστημα.

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Κωδικός Δικτύου
Name	C, 40	N	O	O		Όνομα δικτύου
Description	T	O	O	O		Περιγραφή δικτύου
EnclosingCoordinateTopLeft	D	N	O	O		Συντεταγμένη περιγεγραμμένου ορθογώνιου
EnclosingCoordinateBottomRight	D	N	O	O		Συντεταγμένη περιγεγραμμένου ορθογώνιου

Πίνακας 5.19: Ο πίνακας DeviceNetwork

Πίνακας Readings: ο συγκεκριμένος πίνακας αποτελεί αντιστοίχιση της οντότητας Reading. Στον πίνακα αυτό περιέχονται όλες οι μετρήσεις που έρχονται από τα διάφορα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που συμμετέχουν στο σύστημα.

Όνομα	Τύπος	R	U	ID	K	Περιγραφή
ID	I	N	N	N	Π	Ταυτότητα της μέτρησης
Device	I	N	O	O	Ξ	Προέλευση της μέτρησης
Capability	I	N	O	O	Ξ	Τύπος Αισθητήρα
Date	D	N	N	O		Ημερομηνία λήψης μέτρησης
ValueBinary	D	O	O	O		Μέτρηση - Δυαδική μορφή
ValueNumeric	D	O	O	O		Μέτρηση - Αριθμός

Πίνακας 5.20: Ο πίνακας Reading

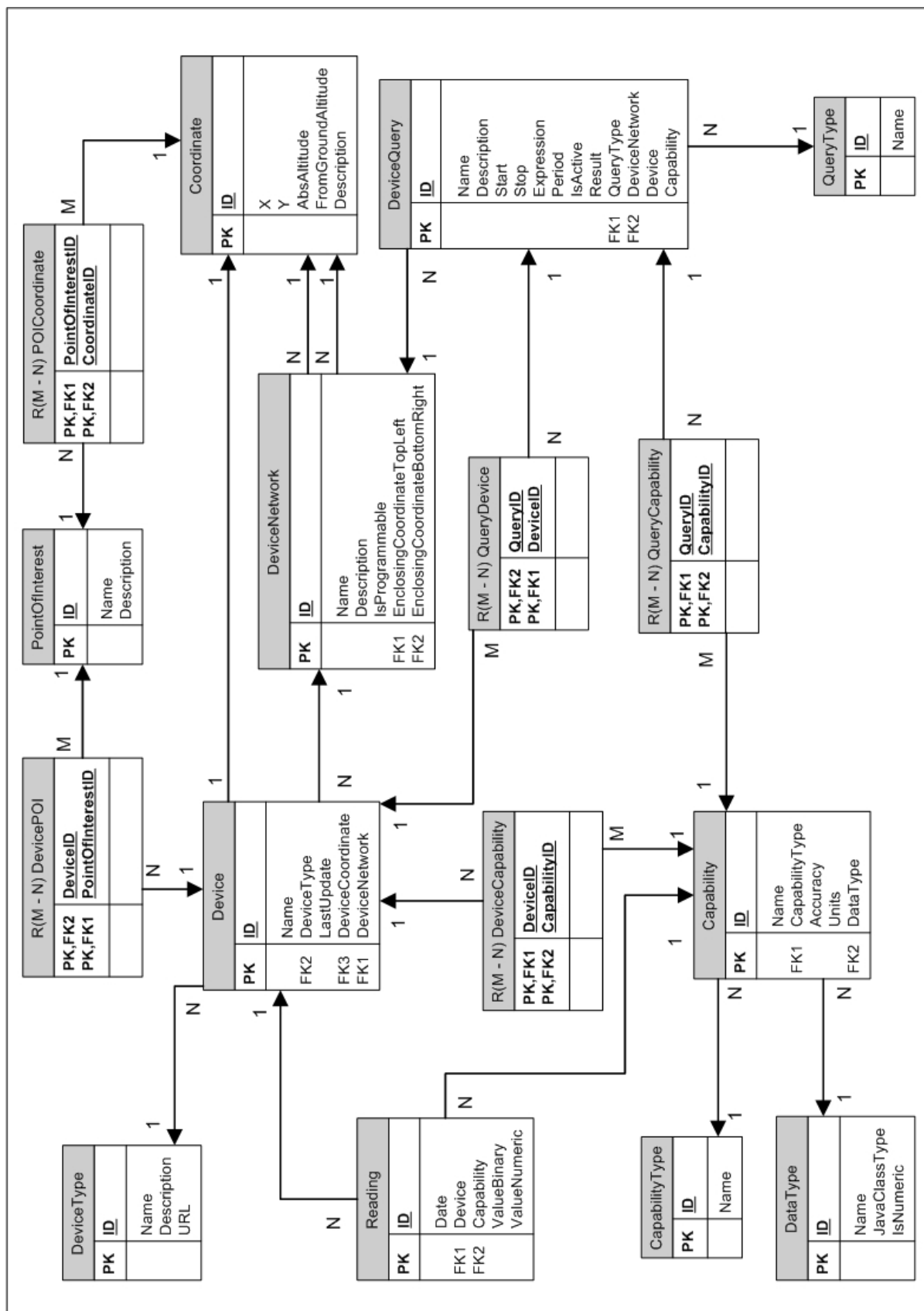
5.4.3 Διαχειριστές Πληροφορίας

Οι διαχειριστές πληροφορίας (data managers) που αναφέρουμε στην ενότητα αυτή παρέχουν ένα σύνολο από μεθόδους για τη διαχείριση των οντοτήτων των υπηρεσιών πυρήνα

που περιγράψαμε προηγουμένως. Οι διαχειριστές αυτοί υλοποιούνται ως singletons, δηλαδή υπάρχει ένα μοναδικό στιγμιότυπο που χρησιμοποιείται κατά την εκτέλεση της εφαρμογής, και το οποίο δημιουργείται κατά την πρώτη κλήση για την επιστροφή του κατάλληλου στιγμιότυπου για το διαχειριστή. Υπάρχει μια βασική abstract κλάση, η *AbstractManager*, την οποία κληρονομούν οι υπόλοιποι διαχειριστές, και η οποία παρέχει κάποιες βασικές λειτουργίες προσθαφαίρεσης και επεξεργασίας, οι οποίες εκτελούν τις αντίστοιχες ενέργειες και ανανεώνουν τη βάση δεδομένων του συστήματος.

- **CapabilityManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *Capability*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τύπων αισθητήρων στο σύστημα.
- **CapabilityTypeManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *CapabilityType*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τύπων μετρούμενων φυσικών μεγεθών στο σύστημα.
- **CoordinateManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *Coordinate*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία γεωγραφικών τοποθεσιών στο σύστημα.
- **DataTypeManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *DataType*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τύπων δεδομένων στο σύστημα.
- **DeviceManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *Device*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία κόμβων δικτύων αισθητήρων στο σύστημα.
- **DeviceNetworkManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *DeviceNetwork*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία οντοτήτων δικτύων αισθητήρων στο σύστημα.
- **DeviceParamManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *DeviceParam*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία χαρακτηριστικών για κόμβους δικτύων αισθητήρων στο σύστημα.
- **DeviceQueryManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *DeviceQuery*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία ερωτημάτων προς τα δίκτυα αισθητήρων.
- **DeviceTypeManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *DeviceType*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τύπων κόμβων δικτύων αισθητήρων στο σύστημα.
- **PointOfInterestManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *PointOfInterest*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τοποθεσιών ενδιαφέροντος στο σύστημα.
- **QueryTypeManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου *QueryType*, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τύπων ερωτημάτων προς δίκτυα αισθητήρων στο σύστημα.

- **ReadingManager:** αυτή η κλάση διαχειρίζεται τις οντότητες τύπου Reading, δηλαδή επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία τύπων μετρήσεων από τα δίκτυα αισθητήρων στο σύστημα.



Σχήμα 5.7: Το διάγραμμα οντοτήτων-σχέσεων της βάσης δεδομένων του συστήματος

5.5 Διεπαφή χρήστη με το σύστημα

Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε εν συντομία τη διεπαφή χρήστη και την οπτικοποίηση αποτελεσμάτων από το σύστημά μας μέσω της εφαρμογής Google Earth. Το Google Earth είναι μια εφαρμογή η οποία παρέχει τρισδιάστατες απεικονίσεις γεωγραφικής και άλλων ειδών πληροφορίας, μέσω μιας απεικόνισης του πλανήτη μας. Η επιφάνεια του πλανήτη απεικονίζεται με τη χρήση δορυφορικών φωτογραφιών και η μορφολογία του εδάφους μέσω GIS τρισδιάστατης γεωγραφικής πληροφορίας. Είναι μια εφαρμογή η οποία είναι διαθέσιμη δωρεάν για πληθώρα λειτουργικών συστημάτων, ενώ πρόσφατα παρουσιάστηκε μια επέκταση για δημοφιλείς browsers (Firefox, Internet Explorer, Safari), η οποία επιτρέπει την εκτέλεση της συγκεκριμένης εφαρμογής μέσω του browser, επιτρέποντας ουσιαστικά την ενοποίηση του Google Earth με μια διεπαφή χρήστη που βασίζεται στη χρήση browser.

Εκτός από τις αυξημένες δυνατότητες τρισδιάστατης απεικόνισης που διαθέτει η εφαρμογή αυτή, χρησιμοποιεί ένα απλό και έξυπνο μοντέλο αναπαράστασης της πληροφορίας που απεικονίζεται μέσω της εφαρμογής, το οποίο μπορεί κάποιος τρίτος να εκμεταλλευτεί προκειμένου να επεκτείνει ένα άλλο σύστημα λογισμικού και να προσφέρει μια νέα διεπαφή χρήστη μέσω του Google Earth, αξιοποιώντας τα εντυπωσιακά χαρακτηριστικά του. Αυτός ακριβώς ήταν ο σκοπός της διασύνδεσης του WebDust με το Google Earth, δηλαδή να δημιουργηθεί μια διεπαφή χρήστη βασισμένη στις δυνατότητες απεικόνισης γεωγραφικής πληροφορίας που προσφέρει το Google Earth.

Πιο συγκεκριμένα, το σύνολο της πληροφορίας που απεικονίζεται μέσω της συγκεκριμένης εφαρμογής διατυπώνεται στη γλώσσα KML. Η KML (Keyhole Markup Language) είναι μια XML διάλεκτος για την διατύπωση γεωγραφικής πληροφορίας και απεικόνισή της σε τρισδιάστατα εικονικά περιβάλλοντα (όπως είναι στην προκειμένη περίπτωση το Google Earth) ή το Google Maps. Χρησιμοποιεί μια tag-based δομή με εμφωλευμένα στοιχεία και χαρακτηριστικά, βασισμένη σε ένα αυστηρό πρότυπο (η τρέχουσα έκδοση του οποίου είναι η KML 2.2). Μέσω της KML μπορούμε να περιγράψουμε γεωγραφική πληροφορία, τρισδιάστατες οντότητες (π.χ., κτίρια), πληροφορία που εξελίσσεται στο χρόνο, και άλλα πολλά (ο κατάλογος είναι μακρύς). Ένα πολύ απλό παράδειγμα δήλωσης ενός σημείου στην επιφάνεια της γης μαζί με μια σύντομη περιγραφή φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2">
  <Placemark>
    <name>Simple placemark</name>
    <description>Attached to the ground. Intelligently places itself
      at the height of the underlying terrain.</description>
    <Point>
      <coordinates>-122.0822035425683,37.42228990140251,0</coordinates>
    </Point>
  </Placemark>
</kml>
```

Χρησιμοποιώντας την KML λοιπόν, μπορούμε να αναπαραστήσουμε αρκετές διαφορετικές οντότητες οι οποίες σχετίζονται με την εφαρμογή μας:

- Τους κόμβους των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που συμμετέχουν στο σύστημα.

- Τα κτίρια μέσα στα οποία ενδεχομένως βρίσκονται οι κόμβοι των δικτύων αυτών.
- Τα δεδομένα των μετρήσεων που παίρνουμε από τους κόμβους αυτούς.
- Τις επικοινωνιακές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων αυτών.
- Να οργανώσουμε όλες τις παραπάνω πληροφορίες και να τις παρουσιάσουμε στον τελικό χρήστη ως ένα ενιαίο σύνολο κόμβων, μετρήσεων και λοιπών χαρακτηριστικών.

Η γενική ιδέα πίσω από τη διεπαφή χρήστη που έχουμε υλοποιήσει είναι ότι θα μπορεί ο οποιοσδήποτε συμμετέχει ως χρήστης του συστήματος να ζητήσει την απεικόνιση μέρους ή του συνόλου της πληροφορίας που διαχειρίζεται το σύστημα μέσω του Google Earth. Όπως αναφέραμε στις προηγούμενες ενότητες, τα δίκτυα και οι κόμβοι που μετέχουν στο σύστημα συνδέονται με κάποια γεωγραφική πληροφορία που περιγράφει την ακριβή θέση τους είτε την γενικότερη περιοχή στην οποία βρίσκονται. Η πληροφορία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με τρισδιάστατες απεικονίσεις των κτιρίων μέσα στα οποία βρίσκονται τα συγκεκριμένα δίκτυα, ώστε να δώσουν μια τρισδιάστατη απεικόνιση στο χώρο του συστήματος. Οι απεικονίσεις των κτιρίων, προς το παρόν, δεν γίνονται αυτοματοποιημένα αλλά πρέπει να παρέχονται από το χρήστη του συστήματος.

Η συγκεκριμένη δυνατότητα, δηλαδή της απεικόνισης των δικτύων αισθητήρων σε συνδυασμό με τρισδιάστατα μοντέλα κτιρίων είναι ένα στοιχείο που διαφοροποιεί τη διεπαφή χρήστη που χρησιμοποιούμε σε σχέση με αντίστοιχες υλοποιήσεις (οι οποίες στην πλειοψηφία τους χρησιμοποιούν δισδιάστατες απεικονίσεις). Προσφέρει το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης απεικόνισης πολλαπλών δικτύων στην οθόνη του χρήστη, χαρακτηριστικό χρήσιμο στην περίπτωση που έχουμε πλήθος αισθητήρων ή δικτύων στον ίδιο χώρο (κτίριο). Ένα παράδειγμα τέτοιας απεικόνισης φαίνεται στο σχήμα 5.5, όπου έχουμε διαφορετικά δίκτυα αισθητήρων στο ίδιο κτίριο (EAITY, Πανεπιστημιούπολη Πατρών).

Σε ότι αφορά την υλοποίηση της διεπαφής χρήστη, η οποία βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης, απλά θα αναφέρουμε ότι βασιστήκαμε στη χρήση ενός πλήθους από Servlets τα οποία εκτελούνται σε έναν Application Server (συγκεκριμένα τον Resin 3.2, ο οποίος είναι διαθέσιμος δωρεάν) στο σύστημα του χρήστη ή σε κάποιο υπολογιστικό σύστημα το οποίο μετέχει στο δίκτυο ομοτίμων εταιρών του WebDust. Τα servlet αυτά χρησιμοποιούν στην ουσία τις βιβλιοθήκες του συστήματος για να έχουν πρόσβαση στα χαρακτηριστικά και τις μετρήσεις που παίρνουμε από τους κόμβους που μετέχουν στο σύστημα, και σε συνδυασμό με κάποια έτοιμα τρισδιάστατα μοντέλα που δημιουργήσαμε για τις ανάγκες της εφαρμογής, και παράγουν την τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων που θέλουμε να δούμε μέσω του Google Earth σε μορφή KML. Στην παρούσα φάση, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα network link στο Google Earth ή να καλέσει την αντίστοιχη διεύθυνση στον application server για να μπορέσει να έχει πρόσβαση στη αντίστοιχη πληροφορία.

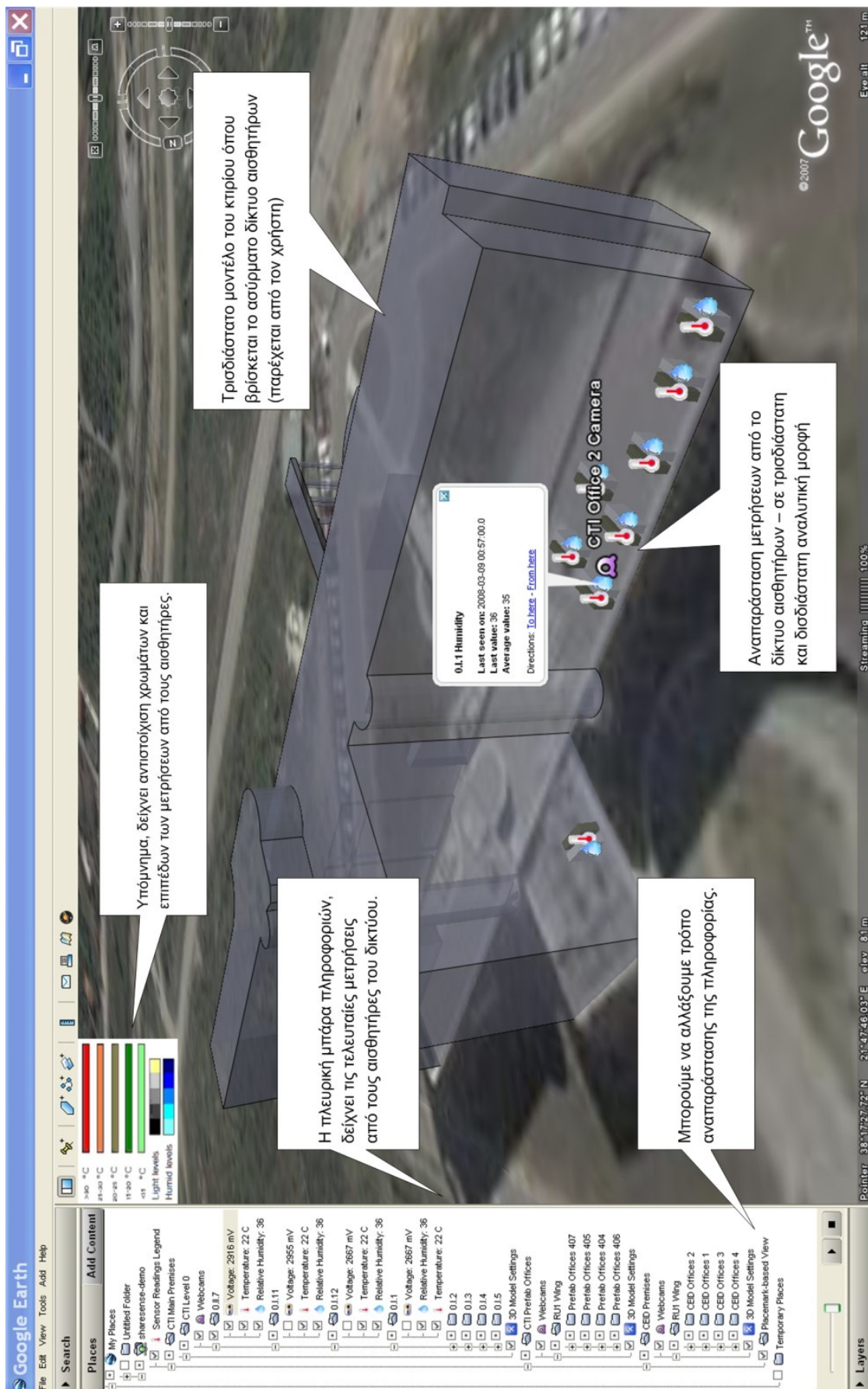
Σε ότι αφορά την οργάνωση της πληροφορίας στην διεπαφή χρήστη του συστήματος, διακρίνουμε δύο βασικά μέρη:

- Την τρισδιάστατη πληροφορία που εμφανίζεται στο κύριο παράθυρο της εφαρμογής, η οποία περιλαμβάνει τους κόμβους, τα δεδομένα και τα κτίρια στα οποία βρίσκονται τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων του συστήματος.

- Την πληροφορία για τα χαρακτηριστικά του συστήματος που εμφανίζονται σε δενδρική μορφή στην πλευρική μπάρα της εφαρμογής.

Κύριο παράθυρο εφαρμογής: στο μέρος αυτό εμφανίζονται τα τρισδιάστατα μοντέλα των κτιρίων, οι κόμβοι των δικτύων αισθητήρων, οι αισθητήρες και οι μετρήσεις που έρχονται από τους κόμβους αυτούς. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, θεωρούμε ότι τα μοντέλα των κτιρίων παρέχονται από τους χρήστες του συστήματος και είναι σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιήσει το Google Earth (KML). Οι αισθητήρες απεικονίζονται με τη μορφή placemarks: σε κάθε αισθητήρα ανατίθεται ένα σημείο στον εικονικό τρισδιάστατο χώρο και ένα εικονίδιο που τον αντιπροσωπεύει (π.χ., για αισθητήρες θερμοκρασίας ένα θερμόμετρο). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει για κάθε αισθητήρα το αντίστοιχο placemark, και ως αποτέλεσμα αυτού θα εμφανιστεί ένα νέο παράθυρο με πληροφορίες για τον συγκεκριμένο αισθητήρα, όπως ο χρόνος και η τιμή της τελευταίας μέτρησης, μια γραφική παράσταση των μετρήσεων σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, στατιστικά στοιχεία για το δίκτυο, κτλ. Παράλληλα με τους αισθητήρες, οι τελευταίες μετρήσεις για κάθε κόμβο απεικονίζονται σε τρισδιάστατη μορφή με τη μορφή μιας μπάρας, η οποία βρίσκεται στις συντεταγμένες του κόμβου και χρωματίζεται σύμφωνα με τον πίνακα που φαίνεται στο άνω αριστερό άκρο του κυρίου παραθύρου της εφαρμογής. Επίσης, απεικονίζεται το δέντρο μεταδόσεων από τους κόμβους του κάθε δικτύου προς το αντίστοιχο κέντρο ελέγχου δικτύου.

Πλευρική μπάρα εφαρμογής: στην πλευρική μπάρα της εφαρμογής εμφανίζονται πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και τις μετρήσεις των δικτύων και των κόμβων που μετέχουν στο σύστημα με μία δενδρική μορφή. Στο ανώτερο επίπεδο εμφανίζεται μια μικρή περιγραφή για το κάθε δίκτυο, στο δεύτερο εμφανίζονται οι κόμβοι για το κάθε δίκτυο, και στο κατώτερο επίπεδο εμφανίζονται οι αισθητήρες του κάθε κόμβου. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την πλευρική μπάρα για να μεταπηδήσει άμεσα από το ένα δίκτυο αισθητήρων στο άλλο (ιδιαίτερα χρήσιμο αν τα δίκτυα αυτά βρίσκονται απομακρυσμένα μεταξύ τους).



Σχήμα 5.8: Στιγμιότυπο από τη διεπαφή χρήση μέσα από το Google Earth

6

Πειραματικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων – Εφαρμογή του συστήματος WebDust

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφουμε τη λειτουργία ενός πειραματικού ασύρματου δικτύου που εγκαταστήσαμε στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Το δίκτυο αυτό υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως βάση το σύστημα WebDust, που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η περιγραφή του δικτύου αυτού χρησιμεύει ουσιαστικά ως επίδειξη των δυνατοτήτων του συστήματός μας σε τρεις βασικούς άξονες:

- δυνατότητα κλιμάκωσης για μεγάλο αριθμό κόμβων και δικτύων,
- επεκτασιμότητα του συστήματος,
- ευκολία χρήσης – πρωτότυπες δυνατότητες οπτικοποίησης αποτελεσμάτων.

Δίνουμε στη συνέχεια μια αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασης του πειραματικού δικτύου σε ότι αφορά την οργάνωσή του και το υλικό που χρησιμοποιήσαμε.

6.1 Σκοπός του πειράματος

Το πειραματικό δίκτυο αισθητήρων που περιγράφουμε στην παρούσα ενότητα λειτούργησε στο σύνολό του για ένα διάστημα δύο εβδομάδων, ενώ κάποια μέρη του λειτουργούν συνεχώς από τον Ιούνιο του 2008. Συνολικά στο δίκτυο συμμετείχαν 5 διαφορετικοί φορείς:

- το Πανεπιστήμιο Πατρών,
- το Ερευνητικό Ακαδημαϊκό Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών (EAITY),
- το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων,
- το Πανεπιστήμιο La Sapienza της Ρώμης,

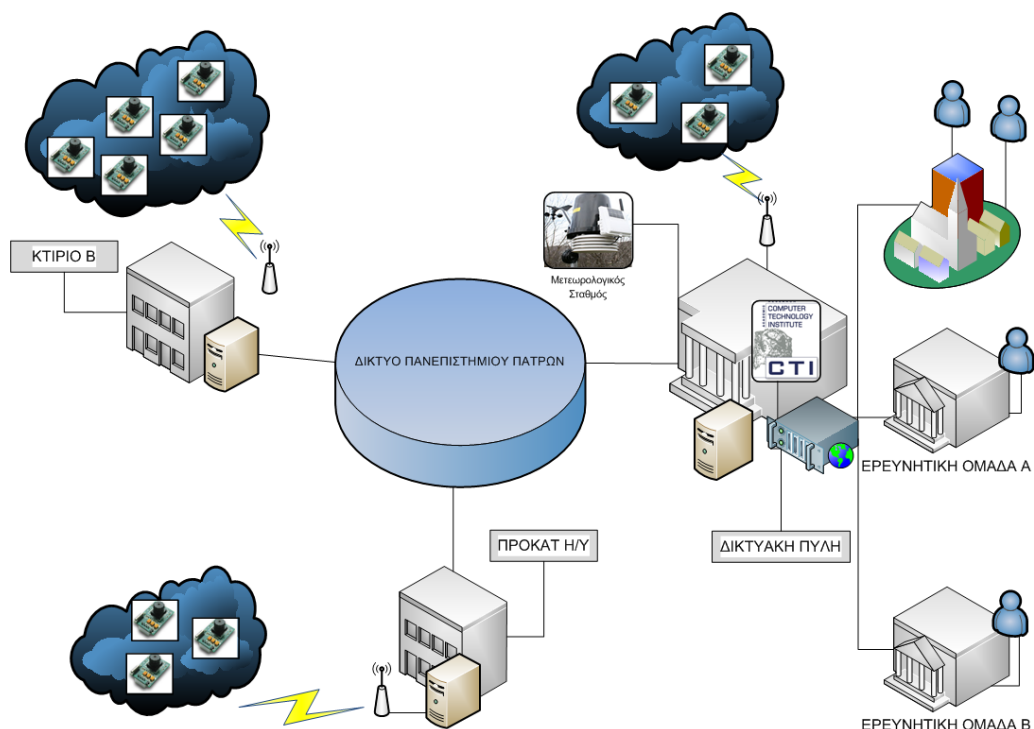
- το Πανεπιστήμιο της Γενεύης.

Ο σκοπός των συγκεκριμένων δικτύων σε πρώτη φάση ήταν να παρακολουθήσουμε και να καταγράψουμε συνθήκες μέσα σε κάποια συγκεκριμένα κτίρια και χώρους. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μας ενδιέφερε να παρακολουθήσουμε τις συνθήκες έντασης φωτός, θερμοκρασίας και υγρασίας μέσα στους συγκεκριμένους χώρους. Πρωταρχικός στόχος ήταν να επιβεβαιώσουμε ότι το σύστημά μας διαθέτει τα τρία βασικά χαρακτηριστικά που αναφέραμε προηγουμένως. Μπορέσαμε παράλληλα να καταγράψουμε με αρκετή λεπτομέρεια τις συνθήκες που επικρατούν στα συγκεκριμένα κτίρια, με απώτερο στόχο στο μέλλον να χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις αυτές για να υλοποιήσουμε κάποια πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στο κτίριο του EAITY (στην Πανεπιστημιούπολη Πατρών), το εγκατεστημένο δίκτυο είχε ως σκοπό την καταγραφή τέτοιων συνθηκών σε ένα μεγάλο αριθμό από τα γραφεία του κτιρίου, ενώ χρησιμοποιήθηκε και στο υπολογιστικό κέντρο του EAITY προκειμένου να έχουμε μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας (οι οποίες έχουν μεγάλη σημασία για τη σωστή ψύξη και τον εξαερισμό του συγκεκριμένου χώρου) με μεγάλη λεπτομέρεια.

6.2 Υλικό που χρησιμοποιήσαμε

Στο δίκτυο αυτό συμμετείχαν 9 διαφορετικά δίκτυα αισθητήρων (είχαμε δηλαδή διαφορετικά δίκτυα αισθητήρων σε κάποια κτίρια), συνολικά 55 κόμβοι, με 4 διαφορετικές τεχνολογίες. Πιο συγκεκριμένα:

1. Στο υπολογιστικό κέντρο του EAITY χρησιμοποιήσαμε 4 κόμβους TelosB, για να καταγράφουν θερμοκρασία, υγρασία και φως (με τους ενσωματωμένους αισθητήρες τους).
2. Στον όροφο 0 του EAITY (εγκαταστάσεις Ερευνητικής Μονάδας 1) χρησιμοποιήσαμε 10 κόμβους TelosB για να καταγράφουν επίσης θερμοκρασία, υγρασία και φως (με τους ενσωματωμένους αισθητήρες τους).
3. Στον όροφο 3 του EAITY χρησιμοποιήσαμε 6 κόμβους SUN Spot για να καταγράφουμε θερμοκρασία και φως (με τους ενσωματωμένους αισθητήρες τους).
4. Στον όροφο 4 του EAITY χρησιμοποιήσαμε 6 κόμβους Mica2 για να καταγράφουμε θερμοκρασία, φως, υγρασία, βαρομετρική πίεση, μαγνητικά πεδία (χρησιμοποιώντας τα sensor board MTS310CB, MTS400CB, MTS420CC και MDA100CB).
5. Στα Προκάτ κτίρια του τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών χρησιμοποιήσαμε 5 κόμβους για να καταγράφουμε θερμοκρασία, φως, μαγνητικά πεδία (χρησιμοποιώντας τα sensor board MTS310CB και MDA100CB).
6. Στο κτίριο του τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών χρησιμοποιήσαμε 5 κόμβους για να καταγράφουμε θερμοκρασία, φως, μαγνητικά πεδία (χρησιμοποιώντας τα sensor board MTS310CB και MDA100CB).
7. Στο κτίριο του τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων χρησιμοποιήσαμε 6 κόμβους Mica2 για να καταγράφουμε θερμοκρασία και υγρασία (χρησιμοποιώντας τα sensor board MTS310CB και MDA100CB).



Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση της διασύνδεσης των τριών διαφορετικών τοποθεσιών στην Πανεπιστημιούπολη Πατρών, στις οποίες λειτουργεί μόνιμα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

8. Στο Πανεπιστήμιο της Ρώμης χρησιμοποιήσαμε 11 κόμβους TelosB για να καταγράφουμε θερμοκρασία, υγρασία και φως (με τους ενσωματωμένους αισθητήρες τους).
9. Στο Πανεπιστήμιο της Γενεύης χρησιμοποιήσαμε 4 κόμβους MicaZ για να καταγράφουμε θερμοκρασία, φως, μαγνητικά πεδία (χρησιμοποιώντας τα sensor board MTS310CB και MDA100CB).

Σε όλους τους κόμβους παρακολουθούσαμε τα αποθέματα ενέργειας που τους απέμεναν (μέσω μετρήσεων της τάσης τροφοδοσίας τους).

Από τα παραπάνω, μόνο τα δίκτυα που βρίσκονται στην Πανεπιστημιούπολη Πατρών (δηλαδή του ΕΑΙΤΥ και του τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής) λειτουργούν σε μόνιμη βάση. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται διαγραμματικά η οργάνωση του δικτύου στην Πανεπιστημιούπολη Πατρών. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για κάθε μία από τις πλατφόρμες υλικού που χρησιμοποιήσαμε.

Mica2 και MicaZ: αυτές οι συσκευές φέρουν ένα μικροελεγκτή Atmel ATmega128L 8-bit, ένα πομποδέκτη που λειτουργεί στα 868/916 MHz (Mica2) ή 2.4 GHz (MicaZ, IEEE 802.15.4), τροφοδοτούνται από 2 μπαταρίες μεγέθους AA, και είναι επεκτάσιμες μέσω της χρήσης κάποιων πρόσθετων πλακετών οι οποίες φέρουν συγκεκριμένους αισθητήρες (οι οποίες είναι διαθέσιμες από την εταιρία Crossbow). Από τις διαθέσιμες πλακέτες επέκτασης χρησιμοποιήσαμε τις MTS310CB (οι οποίες φέρουν αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας, μαγνητικών πεδίων, επιτάχυνσης, μικρόφωνο), τις MTS400 (οι οποίες φέρουν

αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας, υγρασίας, βαρομετρικής πίεσης, επιτάχυνσης), τις MTS420 boards (οι οποίες είναι ίδιες με τις MTS400 αλλά φέρουν έναν επιπρόσθετο αισθητήρα GPS), και τις MDA100 (οι οποίες φέρουν αισθητήρες φωτός και θερμοκρασίας, παρέχοντας παράλληλα μια breadboard επιφάνεια για prototyping).

TelosB: οι συσκευές αυτές στην ουσία είναι ίδιες με τις Tmote Sky της εταιρίας Moteiv (με κάποιες μικρές διαφορές). Φέρουν έναν μικροελεγκτή MSP 430 16-bit (ο πιο αποδοτικός από άποψη κατανάλωσης ενέργειας που είναι σήμερα διαθέσιμος), ένα Chipcon 2420 IEEE 802.15.4 ασύρματο πομποδέκτη, όπως επίσης ενσωματωμένους αισθητήρες για φως, θερμοκρασία και υγρασία. Μπορούν να πάρουν τροφοδοσία είτε μέσω 2 AA μπαταριών είτε χρησιμοποιώντας το USB interface που διαθέτουν. Έχουν ακόμα μια μικρή επιφάνεια prototyping για να μπορεί κάποιος να συνδέσει επιπλέον αισθητήρες στις συσκευές.

Sun SPOT: Αυτές οι συσκευές ανήκουν σε άλλη κατηγορία, σε σχέση με τις προηγούμενες, σε ότι αφορά τους υπολογιστικούς πόρους. Τα Sun SPOT χρησιμοποιούν έναν 32-bit 180MHz μικροελεγκτή, μαζί με 512 KB RAM και 4MB flash μνήμη. Χρησιμοποιούν τον ίδιο ασύρματο πομποδέκτη με τις TelosB (IEEE 802.15.4-compliant). Φέρουν ενσωματωμένους αισθητήρες φωτός και θερμοκρασίας, μαζί με ένα επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων. Υπάρχει επίσης μια πλήρως προγραμματιζόμενη επιφάνεια για prototyping πάνω σε κάθε SPOT.

Crossbow Stargate Netbridge και MIB600: αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται ως δίοδοι επικοινωνίας – κέντρα ελέγχου του δικτύου αισθητήρων, για τις συσκευές τύπου Mica2 και TelosB. Τα Stargate Netbridge έναν Intel IXP420 XScale επεξεργαστή, διαθέτουν 8MB flash μνήμης, 32MB κύριας μνήμης και χρησιμοποιούν ένα ξεχωριστό 2 GB usb stick για να εκκινήσουν μια ειδική διανομή βασισμένη στο Debian linux. Διαθέτουν επίσης 1 USB port για να μπορεί κάποιος να συνδέσει μια συσκευή TelosB ή ένα USB programming board για συσκευές τύπου Mica2 ή MicaZ. Το MIB600 είναι απλά ένα programming board το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω απομακρυσμένης πρόσβασης, λόγω της σύνδεσης τοπικού δικτύου (ethernet) που προσφέρει.

Κέντρα ελέγχου δικτύου Alix: αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν ένα AMD Geode επεξεργαστή στα 500 MHz, διαθέτουν 256 MB κύρια μνήμη και 4 GB Compact Flash μνήμη ως κύριο αποθηκευτικό χώρο, 2 ή 4 USB θύρες, συνδεσιμότητα τοπικού δικτύου και ασύρματη wi-fi σύνδεση ως επιλογή επέκτασης. Έχουν αρκετά μικρό μέγεθος (Mini-ITX), και έχουν κατανάλωση ρεύματος της τάξης των 4W συνολικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν ως ιδανική επιλογή για το ρόλο των κέντρων ελέγχου του δικτύου, καθώς επιθυμούμε οι συσκευές αυτές να είναι dedicated στον συγκεκριμένο ρόλο, έχοντας παράλληλα μικρές απαιτήσεις σε χώρο και κατανάλωση (καθώς λειτουργούν ανελλιπώς).

6.3 Αρχιτεκτονική του δικτύου

Σχετικά με το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε στο πειραματικό δίκτυο αισθητήρων, όπως είπαμε το σύστημα βασίζεται στη χρήση του webDust. Καθώς καθένα από τα διαφορετικά site του δικτύου εκτελεί έναν peer, ο οποίος επικοινωνεί με τους υπόλοιπους και μπορεί να στείλει και να λάβει μετρήσεις από και προς το υπόλοιπο δίκτυο, σύμφωνα με αυτά που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σε σχέση τώρα με το λογισμικό που εκτελείται στο επίπεδο των συσκευών των δικτύων αισθητήρων (καθώς αυτό είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητο από το WebDust), για τις συσκευές τύπου Mica2 και TelosB χρησιμοποιούμε το TinyOS σαν βάση για το σύστημα και εκτελούμε μια επεκταμένη έκδοση του λογισμικού Octopus για την διαχείριση των συγκεκριμένων συσκευών. Το Octopus επιτρέπει απλές διαχειριστικές λειτουργίες πάνω σε τέτοιους κόμβους, στο οποίο προσθέσαμε υποστήριξη για διαφορετικούς αισθητήρες και πλακέτες επέκτασης (βασιζόμενοι στις βιβλιοθήκες του Tinyos 2).

Ένας αριθμός από κ'ομβους χρησιμοποίησε το XMesh firmware που παρέχεται από την Crossbow, και ο οποίος επιτρέπει τη διαχείριση των κόμβων του συστήματος μέσω της εφαρμογής MoteView. Το συγκεκριμένο λογισμικό επιτρέπει την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε μορφή XML stream, και εκμεταλλευτήκαμε το χαρακτηριστικό για να συνδέσουμε τα συγκεκριμένα δίκτυα με το υπόλοιπο σύστημα. Το σχετικό κώδικα για τη σύνδεση με τα δίκτυα αυτά προσέφερε ο Ι. Χατζηγιαννάκης.

Επιπλέον, χρειάστηκε να συνδέσουμε τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούν συσκευές τύπου Sun SPOT. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν μια εξειδικευμένη εικονική μηχανή Java, την SquawkVM, η οποία είναι πλήρως J2ME-capable και χρησιμεύει παράλληλα ως 'λειτουργικό σύστημα', επομένως ολόκληρος ο σχετικός κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα Java (όπως και το WebDust). Ο σχετικός κώδικας διασύνδεσης με το σύστημα γράφτηκε από τον συνάδελφο Χ. Κονίνη.

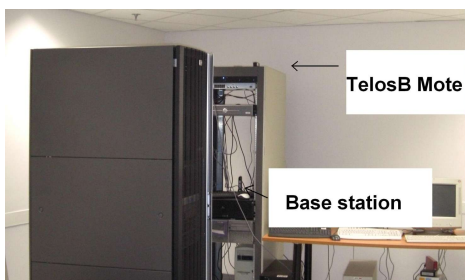
Σχετικά με το λογισμικό που εκτελείται στα κέντρα ελέγχου του δικτύου, χρησιμοποιούμε τη διανομή Xubuntu στις συσκευές τύπου Alix, λόγω του ότι προσφέρει ένα πλήρες περιβάλλον με λίγες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους. Μια εξειδικευμένη διανομή Debian χρησιμοποιείται στα Stargate Netbridge, η οποία παρέχεται από την εταιρία κατασκευής τους (Crossbow). Αυτή η διανομή περιέχει εγκατεστημένο το σύστημα MoteWorks (της Crossbow), το οποίο χρησιμοποιείται σε συνεργασία με τα XMesh firmware που εκτελούν κάποιοι από τους κόμβους του δικτύου.

Ιεραρχικά, το δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα :

- το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τους κόμβους-αισθητήρες,
- το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει τα σταθερά ή κινητά κέντρα ελέγχου που χρησιμεύουν ως πύλες επικοινωνίας μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και του υπόλοιπου κόσμου,
- το τρίτο επίπεδο περιλαμβάνει τους εξυπηρετές που χρησιμεύουν την αποθήκευση της πληροφορίας και τη διαχείριση του πειραματικού δικτύου.

Η ανάπτυξη των κόμβων ακολούθησε γενικά τη δομή του κτιρίου στο οποίο ήταν εγκατεστημένοι. Π.χ., στο κτίριο του EAITY κάθε όροφος χωρίζεται σε δύο ή τρεις τομείς, οι οποίοι είναι απομονωμένοι μεταξύ τους λόγω του πάχους των τοίχων και μεταλλικών θυρών σε κάθε τομέα. Για το λόγο αυτό σε κάθε τέτοιο τομέα του κτιρίου υπάρχει ένα κέντρο ελέγχου για την οργάνωση του δικτύου. Παράλληλα, στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιήσαμε κατάλληλα τροφοδοτικά για τη συνεχή παροχή ρεύματος στους κόμβους του δικτύου (δηλαδή δεν χρησιμοποιήσαμε μπαταρίες στους περισσότερους κόμβους), λόγω των πρακτικών δυσκολιών που ανέκυψαν κατά τη λειτουργία του δικτύου (αλλαγές μπαταριών, χαμηλή διαθεσιμότητα κόμβων, κτλ.). Τα δίκτυα αισθητήρων που

λειτουργήσαν σε μόνιμη βάση στο κτίριο του ΕΑΙΤΥ βρίσκονταν σε 4 διαφορετικούς ορόφους και κάλυψαν ένα αρκετά σημαντικό μέρος του κτιρίου. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται ο τρόπος και ο χώρος εγκατάστασης των κόμβων που χρησιμοποιήσαμε στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που βρίσκονται στο κτίριο του ΕΑΙΤΥ, σύμφωνα με τα παραπάνω. Στο σχήμα 6.3 βλέπουμε ένα στιγμιότυπο από τη διεπαφή χρήστη στην οποία φαίνονται τα 4 διαφορετικά δίκτυα αισθητήρων που βρίσκονται εγκατεστημένα στο κτίριο του ΕΑΙΤΥ. Η χρήση του τρισδιάστατου interface επιτρέπει την ταυτόχρονη παρακολούθηση της κατάστασης των δικτύων αυτών.



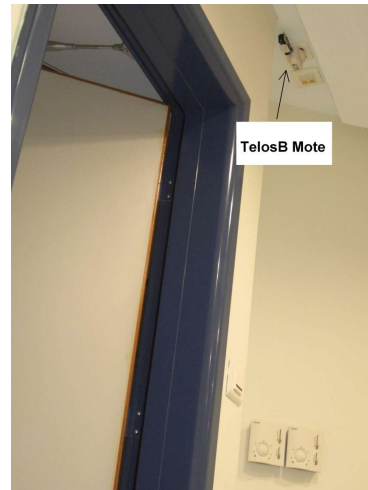
Σχήμα 6.2: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο υπολογιστικό κέντρο του ΕΑΙΤΥ



Σχήμα 6.3: Συσκευή TelosB με μόνιμη τροφοδοσία



Σχήμα 6.4: Συσκευές TelosB (αριστερά) και Stargate Netbridge (δεξιά)



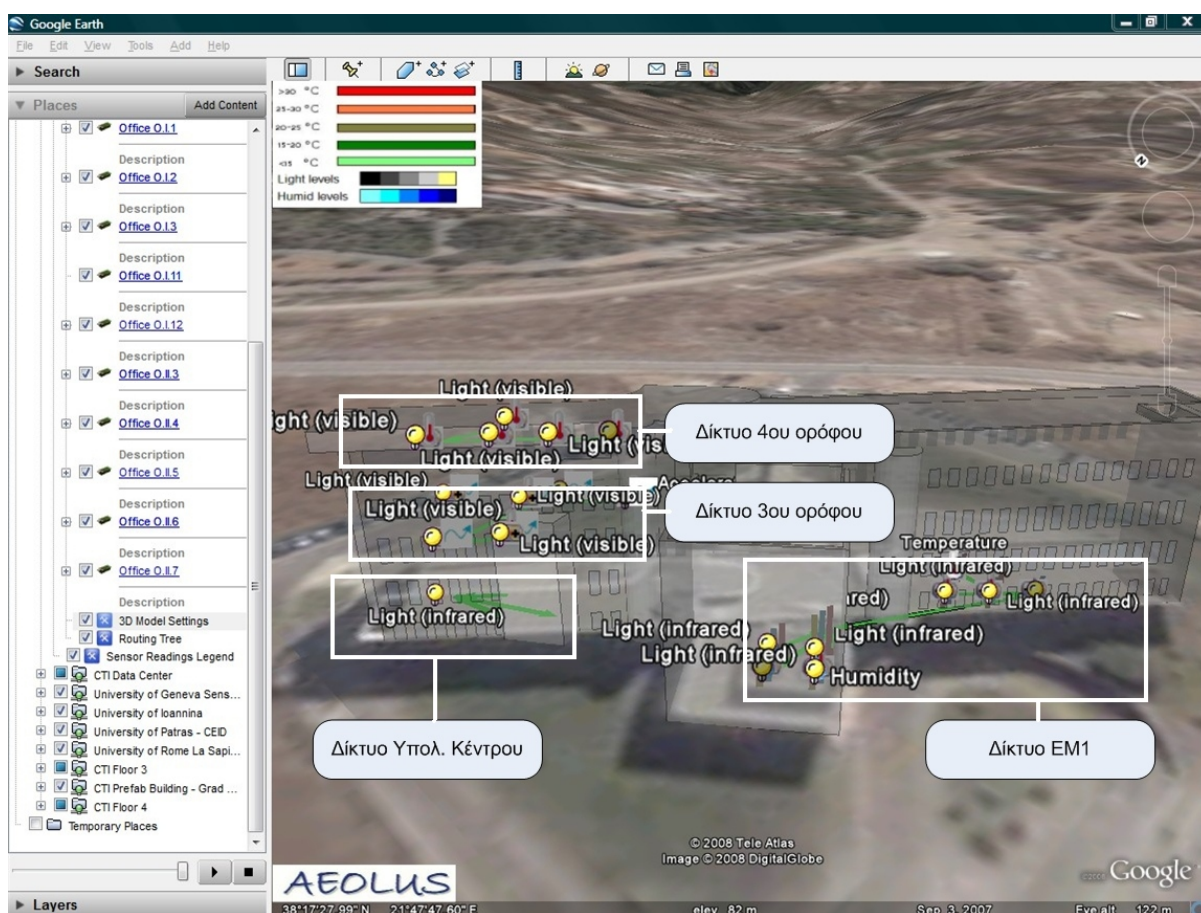
Σχήμα 6.5: Συσκευή TelosB τοποθετημένη στην οροφή γραφείου του ΕΑΙΤΥ



Σχήμα 6.6: Συσκευή SUN SPOT και το κέντρο ελέγχου δικτύου Alix



Σχήμα 6.7: Συσκευές SUN SPOT



Σχήμα 6.8: Στιγμιότυπο από τη διεπαφή χρήση μέσα από το Google Earth

7

Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις

Ανακεφαλαιώνοντας, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι από τις πιο δυναμικές ερευνητικές περιοχές στην πληροφορική τα τελευταία χρόνια. Έχουμε γίνει μάρτυρες αρκετών εξελίξεων στο συγκεκριμένο χώρο και μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι κάποιες από τις βασικές ιδέες που υπάρχουν στα δίκτυα αυτά έχουν αρχίσει ήδη να περνούν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στην καθημερινή μας ζωή. Ακόμα κι αν δεν έχει βρεθεί ακόμα αυτό που ονομάζουμε “killer application” για τα δίκτυα αισθητήρων, βλέπουμε ότι έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται π.χ., αισθητήρες σε κινητά τηλέφωνα, μέσα σε κτίρια, κτλ., γεγονός που έστω κι έμμεσα επιβεβαιώνει σε κάποιο βαθμό τη χρησιμότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής των δικτύων αυτών.

Καθώς το όραμα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συνεχώς διευρύνεται προς νέες κατευθύνσεις, καινούριες απαιτήσεις προστίθενται στις ήδη υπάρχουσες. Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής μελετήσαμε αρκετές διαφορετικές πλευρές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, ξεκινώντας από το σχεδιασμό πρωτοκόλλων για τη διάδοση πληροφορίας ως την υλοποίηση πειραματικών εφαρμογών που να χρησιμοποιούν τέτοια δίκτυα. Παραθέτουμε στη συνέχεια εν συντομία κάποια βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία μας.

Παρουσιάσαμε αρχικά ένα πλήθος από προτάσεις αρχιτεκτονικών και λογισμικού, μαζί με μια απλή και αρκετά γενική κατηγοριοποίηση. Το βασικό συμπέρασμά μας είναι ότι αν και υπάρχει ένα πλήθος από έτοιμο λογισμικό για να βοηθήσει τον προγραμματιστή, τα υπάρχοντα συστήματα δεν υποστηρίζουν όλες τις σχεδιαστικές απαιτήσεις που προκύπτουν από την εξελικτική πορεία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Σημαντικές παράμετροι που δεν έχουν ερευνηθεί επαρκώς είναι η υποστήριξη για ασφάλεια και εμπιστοσύνη, διαφάνεια, οντολογίες και κινητικότητα κόμβων. Επιπλέον, μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν ακόμα πολλά πρότυπα υλικού και λογισμικού τα οποία να έχουν τύχει κοινής αποδοχής, εξαιτίας εν μέρει και των διαφορετικών απαιτήσεων για όλες αυτές τις εφαρμογές που έχουν προταθεί ως σήμερα. Επίσης, υπάρχει και το θέμα της χρήσης

αποτελεσμάτων γειτονικών ερευνητικών πεδίων, όπως το context-aware computing, η οποία ως τώρα είναι σχετικά περιορισμένη.

Παρουσιάσαμε ακόμα ένα πρωτόκολλο για το πρόβλημα του εντοπισμού και διάδοσης πληροφορίας μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο χρησιμοποιεί μεταβολές της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων για να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες στην προώθηση της πληροφορίας προς το κέντρο ελέγχου του δικτύου. Μελετήσαμε την απόδοση του πρωτοκόλλου αυτού χρησιμοποιώντας τον εξομοιωτή *simDust*. Στα πειράματα που πραγματοποιήσαμε χρησιμοποιήσαμε δίκτυα με μεταβαλλόμενο πλήθος κόμβων και πυκνότητας κόμβων. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι το πρωτόκολλο αντιμετωπίζει ικανοποιητικά την κατάσταση που δημιουργείται στα δίκτυα αισθητήρων σε περιοχές όπως αυτή που βρίσκεται κοντά στο κέντρο ελέγχου του δικτύου, όπου η πυκνότητα κόμβων πέφτει απότομα, και επεκτείνει τη χρονική διάρκεια της σωστής λειτουργίας του δικτύου σε ορισμένες περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, προτείνουμε ένα συστηματικό και γενικό μοντέλο εμποδίων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και παρέχουμε μια κατηγοριοποίηση κάποιων βασικών τύπων εμποδίων, βασισμένοι σε ένα πλήθος από κριτήρια. Η μελέτη της συμπεριφοράς των διαφόρων πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας και της επίδρασης των διαφορετικών τύπων εμποδίων πάνω στη λειτουργία τους δίνει ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Το μοντέλο που προτείνουμε μπορεί να υλοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί εύκολα, καλύπτει ένα εύρος από διαφορετικούς τύπους εμποδίων, μπορεί να παραμετροποιηθεί εύκολα και ορίζει τα 'στοχαστικά' εμπόδια (δηλαδή εμπόδια στα οποία υπεισέρχεται η έννοια της πιθανότητας). Παρέχουμε κάποια πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία είναι σε ένα βαθμό αντιπροσωπευτικά των βασικών κατηγοριών των πρωτοκόλλων διάδοσης πληροφορίας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι τα εμπόδια μέσα στο δίκτυο ενδέχεται να έχουν καθοριστική επίδραση στην απόδοση τέτοιων πρωτοκόλλων, αλλά και ότι οι διαφορετικοί τύποι εμποδίων επιδρούν διαφορετικά πάνω στο δίκτυο. Εστίασαμε στο πρόβλημα της διάδοσης πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, επειδή είναι βασικότατο για όλες τις λειτουργίες του δικτύου που βρίσκονται πάνω από αυτό και προκειμένου να διερευνήσουμε το βαθμό που η παρουσία εμποδίων επηρεάζει τη λειτουργία των πρωτοκόλλων αυτών. Παρουσιάσαμε ακόμα την αρχιτεκτονική του TRAILS, το οποίο αποτελεί επέκταση του εξομοιωτή δικτύων *ns-2*. Στοχεύει στην εκπλήρωση στόχων όπως η χρήση ρεαλιστικών συνθηκών και η δυναμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, ενώ παράλληλα είναι δυνατή η σχετικά εύκολη μεταφορά του σε άλλα περιβάλλοντα εξομοίωσης δικτύων. Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής συνίσταται στον καθορισμό της αρχιτεκτονικής του, και ιδιαίτερα σε ότι έχει να κάνει με δυναμικά εμπόδια και δυναμικά μοντέλα αστοχιών.

Παρουσιάσαμε στη συνέχεια την αρχιτεκτονική του συστήματος WebDust, το οποίο επιχειρεί να διαχειριστεί την ετερογένεια που υπάρχει μέσα σε ένα δίκτυο αισθητήρων, την υποστήριξη δυνατότητας κλιμάκωσης της εφαρμογής σε ότι αφορά πλήθος κόμβων και δικτύων, και την απλοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης μιας εφαρμογής για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το σύστημα αυτό 'ενοποιεί' πολλά διακριτά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιώντας μια peer-to-peer λογική, και παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές έτσι ώστε ο προγραμματιστής ή ο απλός χρήστης να μην χρειάζεται να γνωρίζει πολλές λεπτομέρειες για την υλοποίηση που υπάρχει στα κατώτερα επίπεδα του συστήματος. Το σύστημα έχει δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε

συνδυασμό με άλλα περιβάλλοντα διαχείρισης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Παρέχουμε μια υλοποίηση για τη διαχείριση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, η οποία δίνει κάποιες βασικές δυνατότητες στον προγραμματιστή για να μπορέσει να εκτελέσει απλές λειτουργίες διαχείρισης στο δίκτυό του. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που το ξεχωρίζει από άλλα αντίστοιχα συστήματα είναι η δυνατότητα επιλογής της χρήσης του Google Earth και του Google Maps ως διεπαφής με τον τελικό χρήστη. Παρουσιάσαμε επίσης μια εφαρμογή του συστήματος σε ένα μικρό πλήθος από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία βρίσκονται διεσπαρμένα σε διάφορα ευρωπαϊκά πανεπιστήμια, επιβεβαιώνοντας την δυνατότητα κλιμάκωσης που διαθέτει το σύστημά μας, και την ευκολία προσαρμογής του για την υλοποίηση συγκεκριμένων εφαρμογών.

Σε ότι αφορά τις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις που σκοπεύουμε να ακολουθήσουμε στο άμεσο μέλλον, στρέφονται κυρίως γύρω από την εξέλιξη του συστήματος WebDust. Ένας βασικός στόχος είναι η συμπλήρωση της διεπαφής χρήστη με την παροχή περισσότερων δυνατοτήτων, μαζί με την περαιτέρω εξέλιξη της υπάρχουσας διεπαφής μέσω του Google Earth (η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στην παρούσα διατριβή). Επίσης, σκοπεύουμε να επεκτείνουμε τις δυνατότητες διαχείρισης ασύρματων δικτύων αισθητήρων που παρέχει στην τρέχουσα μορφή του το σύστημα, και ειδικότερα να προσφέρουμε δυνατότητες ελέγχου και αυτοματισμών, προκειμένου να υλοποιήσουμε μια εφαρμογή εξοικονόμησης ενέργειας μέσα σε κτίρια. Αυτή η επέκταση της λειτουργικότητας του συστήματος θα συνοδευτεί από την ανάπτυξη κατάλληλων οδηγών ώστε περισσότερες πλατφόρμες υλικού και λογισμικού να είναι συμβατές με το σύστημά μας, δίνοντάς του νέες δυνατότητες. Τέλος, στα σχέδιά μας είναι να εκμεταλλευτούμε την αρχιτεκτονική του TRAILS και να εξετάσουμε την εφαρμογή της σε άλλους εξομοιωτές δικτύων.

Μέρος V

Δημοσιεύσεις – Βιβλιογραφία

8

Λίστα Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά

1. I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*The Design of an Environment for Monitoring and Controlling Remote Sensor Networks*”, in the International Journal of Distributed Sensor Networks (IJDSN), accepted, to appear.
2. I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*A Model for Obstacles to be used in Simulations of Wireless Sensor Networks and its Application in studying Routing Protocol Performance*”, in the SCS Simulation Journal, Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, volume 83, number 8, pages 587-608, 2007.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή συνέδρια:

1. I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, G. Prasinos, C. Zaroliagis, “*TRAILS, a Toolkit for Efficient, Realistic and Evolving Models of Mobility, Faults and Obstacles in Wireless Networks*”, in: 41th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium, pages 23-32, SCS, ACM/IEEE, Ottawa, Canada, 2008.
2. A. Antoniou, I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, A. Pappageorgiou, “*A Peer-to-Peer Environment for Monitoring Multiple Wireless Sensor Networks*”, in: 10th ACM/IEEE Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM'07), pages 132-135, ACM/IEEE, ACM/IEEE, Chania, Crete Island, Greece, 2007.
3. I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*50 ways to build your application: A Survey of Middleware and Systems for Wireless Sensor Networks*”, in: Proceedings of the 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2007), pages 466-473, IEEE, 2007.

4. I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*The Architecture of a Generic Application Environment for Wireless Sensor Networks Accessible via Internet*”, in: 5th IEEE Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Patras, Greece, 2006.
5. I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*Modeling and Evaluation of the Effect of Obstacles on the Performance of Wireless Sensor Networks*”, in: 39th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS’06), pages 50-60, SCS, ACM/IEEE, 2006.
6. I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*jWebDust: A Java-based Generic Application Environment for Wireless Sensor Networks*”, in: 1st IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), pages 376-386, Springer Verlag, IEEE/ACM, Marina Del Rey, CA, USA, 2005.
7. A. Antoniou, A. Boukerche, I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, S. Nikolettseas, “*A New Energy Efficient and Fault-tolerant Protocol for Data Propagation in Smart Dust Networks using Varying Transmission Range*”, in: 37th Annual Simulation Symposium (ANSS), pages 43-52, IEEE Computer Society, SCS, Arlington, Virginia, USA, 2004.
8. S. Nikolettseas, I. Chatzigiannakis, A. Antoniou, C. Efthymiou, A. Kinalis, G. Mylonas, “*Energy Efficient Protocols for Sensing Multiple Events in Smart Dust Networks*”, in: 37th Annual Simulation Symposium (ANSS), pages 15-24, IEEE Computer Society, SCS, Arlington, Virginia, USA, 2004.

Άλλες δημοσιεύσεις:

1. O. Akrivopoulos, et al, “*A Software Platform for Developing Multi-player Pervasive Games Using Small Programmable Object Technologies*”, in the proceedings of the 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS ’08), **Best Demo Award**, pages 544-546, October 2008.
2. O. Akrivopoulos, et al. “*Using Wireless Sensor Networks to Develop Pervasive Multi-player Games*”, in the proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys ’08), pages 375-376, November 2008.
3. M. Kalochristianakis, V. Gkamas, G. Mylonas, S. Nikolettseas, J. Rolim, E. Varvarigos, “*The Design of an Open and Integrated Sensor Network Management Platform*”, in the proceedings of the 11th IEEE Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2008.

Βιβλιογραφία

- [1] K. Aberer, M. Hauswirth, and A. Salehi, *The global sensor networks middleware for efficient and flexible deployment and interconnection of sensor networks*, Tech. report, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), 2006, Technical Report.
- [2] T. Antoniou, A. Boukerche, I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, and S. Nikoletseas, *A new energy efficient and fault-tolerant protocol for data propagation in smart dust networks using varying transmission range*, 37th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS 2004), 2004, pp. 43–52.
- [3] N. Aschenbruck, M. Frank, P. Martini, and J. Tolle, *Human mobility in manet disaster area simulation - a realistic approach*, Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2004.
- [4] Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Gunnar Schaefer, Martin Vetterli, Olivier Couach, and Marc Parlange, *Sensorscope: Out-of-the-box environmental monitoring*, IPSN '08: Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks (Washington, DC, USA), IEEE Computer Society, 2008, pp. 332–343.
- [5] Elizabeth A. Basha, Sai Ravela, and Daniela Rus, *Model-based monitoring for early warning flood detection*, SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems (New York, NY, USA), ACM, 2008, pp. 295–308.
- [6] *Bonnmotion: A mobility scenario generation and analysis tool*, <http://web.informatik.uni-bonn.de/IV/Mitarbeiter/dewaal/BonnMotion/>.
- [7] P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, and J. Urrutia, *Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks*, In Proc. of the ACM Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, 1999, pp. 48–55.
- [8] P. Buonadonna, D. Gay, J. Hellerstein, W. Hong, and S. Madden, *TASK: Sensor network in a box*, In the Proceedings of the 2nd European Workshop on Sensor Networks, 2005, pp. 133–144.
- [9] I. Chatzigiannakis, T. Dimitriou, M. Mavronicolas, S. Nikoletseas, and P. Spirakis, *A comparative study of protocols for efficient data propagation in smart*

- dust networks*, Journal of Parallel Processing Letters (PPL) **13** (2003), no. 4, 615–627.
- [10] I. Chatzigiannakis, T. Dimitriou, S. Nikoletseas, and P. Spirakis, *A probabilistic forwarding protocol for efficient data propagation in sensor networks*, 5th European Wireless Conference on Mobile and Wireless Systems beyond 3G (EW 2004), 2004, pp. 344–350.
 - [11] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, G. Mylonas, S. Nikoletseas, G. Prasinos, and C. Zaroliagis, *TRAILS, a Toolkit for Efficient, Realistic and Evolving Models of Mobility, Faults and Obstacles in Wireless Networks*, in the proceedings of the 41st IEEE/ACM Annual Simulation Symposium (ANSS '08), 2008.
 - [12] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikoletseas, *Efficient and robust data dissemination using limited extra network knowledge*, In the Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Networks (DCOSS), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), 2006, pp. 218–233.
 - [13] I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, and S. Nikoletseas, *jWebDust : A java-based generic application environment for wireless sensor networks*, In the proceedings of the first International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS '05), 2005, pp. 376–386.
 - [14] I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, and S. Nikoletseas, *Modeling and evaluation of the effect of obstacles on the performance of wireless sensor networks*, in the proceedings of the 39th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS '06), 2006, pp. 50–60.
 - [15] I. Chatzigiannakis, G. Mylonas, and S. Nikoletseas, *A model for obstacles to be used in simulations of wireless sensor networks and its application in studying routing protocol performance*, in the Simulation Journal, Volume 83, Number 8 (2007), 587–607.
 - [16] I. Chatzigiannakis and S. Nikoletseas, *A sleep-awake protocol for information propagation in smart dust networks*, 3rd International Workshop on Mobile, Ad-hoc and Sensor Networks (WMAN 2003), 2003, IPDPS Workshops, p. 225.
 - [17] I. Chatzigiannakis, S. Nikoletseas, and P. Spirakis, *Smart dust protocols for local detection and propagation*, 2nd ACM International Annual Workshop on Principles of Mobile Computing (POMC 2002), 2002, pp. 9–16.
 - [18] D. Chu, L. Popa, A. Tavakoli, J. Hellerstein, P. Levis, S. Shenker, and I. Stoica, *The design and implementation of a declarative sensor network system*, Tech. report, University of California, 2006, Tech. Report.
 - [19] *Citysense - an open, urban-scale sensor network testbed*, <http://citysense.net/>.

- [20] P. Costa, G. Coulson, R. Gold, M. Lad, C. Mascolo, L. Mottola, G.P. Picco, T. Sivaharan, N. Weerasinghe, and S. Zachariadis, *The RUNES Middleware for Networked Embedded Systems and its Application in a Disaster Management Scenario*, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM07) (New York, USA), IEEE Press., March 2007.
- [21] *The Cougar Sensor Database Project homepage*, <http://www.cs.cornell.edu/database/cougar>.
- [22] G. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg, *Distributed Systems: Concepts and Design*, 3rd ed., Addison-Wesley, Boston, USA, 2001.
- [23] C. Curino, M. Giani, M. Giorgetta, A. Giusti, A. Murphy, and G. Picco, *TinyLIME: Bridging Mobile and Sensor Networks through Middleware*, Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2005, 2005, pp. 61–72.
- [24] M. O’ Dell, R. O’ Dell, M. Wattenhofer, and R. Wattenhofer, *Lost in space or positioning in sensor networks*, In the proceedings of the Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN’05), 2005.
- [25] D. M. Doolin and N. Sitar, *Wireless sensors for wildfire monitoring*, Proceedings of SPIE Symposium on Smart Structures & Materials/ NDE 2005, San Diego, California, 2005.
- [26] S. Eisenman, N. Lane, E. Miluzzo, R. Peterson, G. Ahn, and A. Campbell, *MetroSense project: People-centric sensing at scale*, In Workshop on World-Sensor-Web (WSW 2006), Boulder, October 31, 2006.
- [27] *eko - wireless sensor network for monitoring your crops, vineyard, agriculture, conservation and environmental study*, <http://www.xbow.com/eko/>.
- [28] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, *Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks*, 5th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 1999), 1999, pp. 263–270.
- [29] A. Lachenmann et al., *Versatile support for efficient neighborhood data sharing*, In the Proc. of the European Workshop on Sensor Networks (EWSN 2007), 2007.
- [30] G. Simon et al., *Sensor network-based countersniper system*, Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, 2004, pp. 1–12.
- [31] M. Balazinska et al., *Data management in the worldwide sensor web*, IEEE Pervasive Computing (2007).
- [32] M. Malinowski et al., *Cargonet: a low-cost micropower sensor node exploiting quasi-passive wakeup for adaptive asynchronous monitoring of exceptional events*, Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems, 2005, pp. 145–159.

- [33] O. Gnawali et al., *The Tenet architecture for tiered sensor networks*, In the Proc. of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys'06), 2006, pp. 153–166.
- [34] Q. Fang, J. Gao, and L. Guibas, *Locating and bypassing routing holes in sensor networks*, In the proceedings of the 23rd Conference of the IEEE Communications Society (Infocom), 2004, pp. 2458–2468.
- [35] C. Fok, G. Roman, and C. Lu, *Rapid development and flexible deployment of adaptive wireless sensor network applications*, In Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05), 2005, pp. 653–662.
- [36] R. Fonseca, S. Ratnasamy, J. Zhao, C. T. Ee, D. Culler, S. Schenker, and I. Stoica, *Beacon vector routing: Scalable point-to-point routing in wireless sensor networks*, In the Proceedings of the 2nd Symposium on Networked Systems design and implementation (NSDI 2005) (Boston, USA), 2005.
- [37] *Habitat monitoring on great duck island*, <http://www.greatduckisland.net>.
- [38] P. Gibbons, B. Karp, and S. Seshan Y. Ke, S. Nath, *IrisNet: An Architecture for a World-Wide Sensor Web*, IEEE Pervasive Computing **2** (2003), no. 4.
- [39] *GoodFood Integrated Project homepage*, <http://www.goodfood-project.org/>.
- [40] B. Greenstein, E. Kohler, and D. Estrin, *A Sensor Network Application Construction Kit (SNACK)*, In the Proc. of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004), 2004, pp. 69–80.
- [41] R. Gummadi, O. Gnawali, and R. Govindan, *Macro-programming wireless sensor networks using Kairos*, In the Proc. of the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05), Springer, 2005, pp. 126–140.
- [42] P. Gupta and P.R. Kumar, *The capacity of wireless networks*, IEEE Transactions on Information Theory **46** (2000), no. 2, 388–404.
- [43] G. Hackmann, C. Fok, G. Roman, and C. Lu, *Agimone: Middleware Support for Seamless Integration of Sensor and IP Networks*, In the Proceedings of International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS '06), 2006.
- [44] S. Hadim and N. Mohamed, *Middleware challenges and approaches for wireless sensor networks*, IEEE Distributed Systems Online **7(3)** (2006).
- [45] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks*, 33rd IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000), 2000, p. 8020.
- [46] K. Henricksen and R. Robinson, *A survey of middleware for sensor networks: State-of-the-art and future directions*, In the Proc. of MidSens '06, 2006.

- [47] B. Hull, V. Bychkovsky, K. Chen, M. Goraczko, A. Miu, E. Shih, Y. Zhang, H. Balakrishnan, and S. Madden, *CarTel: A distributed mobile sensor computing system*, In the Proceedings of SenSys '06, 2006.
- [48] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, *Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks*, 6th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2000), 2000, pp. 56–67.
- [49] M. Isomura, T. Riedel, C. Decker, M. Beigl, and H. Horiuchi, *Sharing sensor networks*, Sixth International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing (IWSAWC), Lisbon, Portugal, Proceedings of the ICDCS 2006, 2006.
- [50] A. Jardosh, K. Almeroth, E. Belding-Royer, and S. Suri, *Real world environment models for mobile ad hoc networks*, IEEE Journal on Special Areas in Communications - Special Issue on Wireless Ad hoc Networks (2005), 622–632.
- [51] A. Jardosh, E. Belding-Royer, K. Almeroth, and S. Suri, *Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks*, In the proceedings of the 9th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2003) (San Diego, CA, 2003, pp. 217–229.
- [52] Jaein Jeong, D. Culler, and Jae-Hyuk Oh, *Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks*, Networked Sensing Systems, 2007. INSS '07. Fourth International Conference on (2007), 27–34.
- [53] *Project JXTA*, <http://www.jxta.org/>.
- [54] H. Karl and A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*, John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [55] C. Karlof, N. Sastry, and D. Wagner, *Tinysec: A link layer security architecture for wireless sensor networks*, In the Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SensSys 2004), 2004.
- [56] Y. Kim, R. Govindan, B. Karp, and S. Schenker, *Geographic routing made practical*, In the Proc. of the 2nd Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2005), 2005.
- [57] D. Kotz, C. Newport, R. Gray, J. Liu, Y. Yuan, and C. Elliott, *Experimental evaluation of wireless simulation assumptions*, Proceedings of the ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), 2004, 2004, pp. 78–89.
- [58] Andreas Krause, Eric Horvitz, Aman Kansal, and Feng Zhao, *Toward community sensing*, IPSN '08: Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks (Washington, DC, USA), IEEE Computer Society, 2008, pp. 481–492.

- [59] S. Krco, D. Cleary, and D. Parker, *Enabling ubiquitous sensor networking over mobile networks through peer-to-peer overlay networking*, Computer communications **28** (2005), 1586–1601.
- [60] A. Kröllner, D. Pfisterer, C. Buschmann, S.P. Fekete, and S. Fischer, *Shawn: A new approach to simulating wireless sensor networks*, Proceedings of the Design, Analysis, and Simulation of Distributed Systems (DASD 05), San Diego, 2005.
- [61] M. Kuorilehto, M. Hannikainen, and T. Hamalainen, *A survey of Application Distribution in Wireless Sensor Networks*, EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking **5** (2005), 774–788.
- [62] S. Kurkowski, T. Camp, and M. Colagrosso, *MANET simulation studies: The incredibles*, Mobile Computing and Communications Review **9** (2006), no. 4, 50–61.
- [63] K. Langendoen, A. Baggio, and O. Visser, *Murphy loves potatoes: experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture*, Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International (2006), 8 pp.–.
- [64] Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, and David Culler, *Tossim: accurate and scalable simulation of entire tinyos applications*, SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (New York, NY, USA), ACM Press, 2003, pp. 126–137.
- [65] Shan Lin, Jingbin Zhang, Gang Zhou, Lin Gu, John A. Stankovic, and Tian He, *Atpc: adaptive transmission power control for wireless sensor networks*, SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems (New York, NY, USA), ACM, 2006, pp. 223–236.
- [66] T. Liu and M. Martonosi, *Impala: A middleware system for managing autonomic, parallel sensor systems*, In the proc. of the 9th ACM SIGPLAN symposium on Principles and Practice of Parallel Programming (PPoPP'03), 2003, pp. 107–118.
- [67] A. Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, and A. Wang, *Modeling VANET deployment in urban settings*, Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), 2007, pp. 151–158.
- [68] *Application specific virtual machines for TinyOS*, <http://www.cs.berkeley.edu/~pal/mate-web/>.
- [69] *Mote-VIEW monitoring software*, Crossbow Technology Inc., <http://www.xbow.com/>.
- [70] *Moteworks software platform*, <http://www.xbow.com>.
- [71] *MSR Networked Embedded Sensing Toolkit*, <http://research.microsoft.com/nec/msrsense/>.
- [72] *Violet, official webdite*, <http://www.violet.net>.

- [73] S. Nath, J. Liu, and F. Zhao, *Sensormap for wide-area sensor webs*, IEEE Computer Magazine **40** (2007), no. 7, 90–93.
- [74] S. Nikolettseas, I. Chatzigiannakis, H. Euthimiou, A. Kinalis, T. Antoniou, and G. Mylonas, *Energy efficient protocols for sensing multiple events in smart dust networks*, 37th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS 2004), 2004, pp. 15–24.
- [75] S. Nikolettseas and O. Powell, *Simple and efficient geographic routing around obstacles for wireless sensor networks*, Proceedings of the 6th International Workshop on Efficient and Experimental Algorithms (WEA), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volume 4525., 2007, pp. 161–174.
- [76] *The network simulator - ns-2*, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [77] *Ns-miracle: Multi-interface cross-layer extension library for the network simulator*, <http://www.dei.unipd.it/~maguolof/doc-ns-miracle/index.html>.
- [78] *The Octavex platform*, Octave Technology Inc., <http://www.octavetech.com/>.
- [79] *OGC Sensor Web Enablement, Overview and High-level Architecture*, OpenGIS white paper, OGC 07-165, 28-12-2007.
- [80] *The OMNeT++ simulation system*, <http://www.omnetpp.org/>.
- [81] *OPNET modeller*, OPNET technologies, inc., <http://www.opnet.com>.
- [82] RUNES Project, *Survey of middleware for networked embedded systems*, 2005, Deliverable 5.1.
- [83] A. Rao, S. Ratnasamy, C. Papadimitriou, S. Shenker, and I. Stoica, *Geographic routing without location information*, 9th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing (MOBICOM 2003) (San Diego, CA), 2003, pp. 96–108.
- [84] T. Rappaport, *Wireless communications: Principles and practices*, Prentice Hall, 2000.
- [85] Arch Rock, *A new embedded web services experience for wireless sensor networks*, In the Proc. of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '06), 2006.
- [86] K. Romer, O. Kasten, and F. Mattern, *Middleware challenges for wireless sensor networks*, ACM Mobile Computing and Communications Review **6** (2002), 59–61.
- [87] A. Santanche, S. Nath, J. Liu, B. Priyantha, and F. Zhao, *SenseWeb: Browsing the physical world in real time*, Demo Abstract, ACM/IEEE IPSN06, Nashville, TN, 2006.
- [88] *The Scatterweb wireless sensor network platform*, <http://www.scatterweb.de>.

- [89] *Sensilink WSN Middleware Platform, Meshnetics*, <http://www.meshnetics.com>.
- [90] *NanoStack 6loWPAN open-source implementation*, <http://www.sensinode.com>.
- [91] *Introduction to SensorML, webpage*, <http://vast.uah.edu/SensorML/>.
- [92] R.C. Shah, A. Wolisz, and J.M. Rabaey, *On the performance of geographical routing in the presence of localization errors*, In the Proc. of the IEEE International Conference on Communications, (ICC 2005), 2005.
- [93] C. Sharp, E. Brewer, and D. Culler, *Hood: A neighborhood abstraction for sensor networks*, In the Proc. of MobiSYS'04, 2004.
- [94] *Shawn*, <http://shawn.sf.net>.
- [95] J. Shneidman, P. Pietzuch, J. Ledlie, M. Roussopoulos, M. Seltzer, and M. Welsh, *Hourglass: An infrastructure for connecting sensor networks and applications*, Tech. report, Harvard TR-21-04, 2004.
- [96] Dongjin Son, B. Krishnamachari, and J. Heidemann, *Experimental study of the effects of transmission power control and blacklisting in wireless sensor networks*, Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on (2004), 289–298.
- [97] R. Sugihara and R. K. Gupta, *Programming Models for Sensor Networks: a Survey*, ACM Transaction on Sensor Networks **4** (2008), no. 2.
- [98] *SynapSense OneClick WSN software architecture*, <http://www.synapsense.com>.
- [99] Γ. Μυλωνάς, *Δίκτυα Έξυπνης Σκόνης: Τεχνολογική Μελέτη υπαρχόντων συστημάτων για αποδοτικό εντοπισμό και διάδοση πληροφορίας. Ανάπτυξη και λειτουργία πειραματικού δικτύου*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2003.
- [100] Γ. Μυλωνάς, *Σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός γενικού περιβάλλοντος για υλοποίηση εφαρμογών σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων*, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2005.
- [101] *Tikitag, official website*, <http://www.tikitag.com>.
- [102] *TinyDB: A declarative database for sensor networks*, <http://telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/>.
- [103] *Udelmodels, simulation of urban mobile wireless networks*, <http://udelmodels.eecis.udel.edu/>.
- [104] Ning Wang, Naiqian Zhang, and Maohua Wang, *Wireless sensors in agriculture and food industry-recent development and future perspective*, Computers and Electronics in Agriculture **50** (2006), no. 1, 1 – 14.

- [105] M. Welsh and G. Mainland, *Programming sensor networks using abstract regions*, In the Proc. of 1st Usenix/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'04), 2004, pp. 29–42.
- [106] Georg Wittenburg, Kirsten Terfloth, Freddy López Villafuerte, Tomasz Naumowicz, Hartmut Ritter, and Jochen Schiller, *Fence Monitoring - Experimental Evaluation of a Use Case for Wireless Sensor Networks*, Proceedings of the Fourth European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN '07) (Delft, The Netherlands), January 2007, pp. 163–178.
- [107] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Kant Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, *A wireless sensor network for structural monitoring*, SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (New York, NY, USA), ACM, 2004, pp. 13–24.
- [108] F. Zhao and L. Guibas, *Wireless sensor networks: An information processing approach*, Elsevier Press, 2004.