



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών και Πληροφορικής

Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αποδοτική Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων

Συγγραφέας:
Φίλιππος Βασιλάκης,
ΑΜ: 3895
vasilakis@ceid.upatras.gr

Επιβλέπων:
Σωτήρης Νικολετσέας,
Επίκουρος Καθηγητής
nikole@cti.gr

Μάιος 2012

Πρόλογος

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων(ΑΔΑ) αποτελείται από πολλές διασπαρμένες μικρές, αυτόνομες, ασύρματα συνδεδεμένες συσκευές. Κάθε συσκευή λαμβάνει μετρήσεις από το άμεσο περιβάλλον της όπως θερμοκρασία, υγρασία, κλπ ενώ ταυτόχρονα οι πόροι όπως η μνήμη και η ενέργεια που έχει στη διάθεσή της η κάθε συσκευή είναι πολύ περιορισμένοι. Η ιδέα αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας 1990 και τα πρώτα πειραματικά δίκτυα κατασκευάστηκαν στις αρχές του 2000. Σε αυτά τα χρόνια η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στην διατύπωση των θεμελιωδών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων. Από τους πρώτους ερευνητές που άρχισαν να ασχολούνται με αυτά τα δίκτυα υπήρχε η κοινή διαπίστωση ότι οι διαφορές από τα κλασσικά Ασύρματα Δίκτυα(ad-hoc networks) ήταν πολύ μεγάλες κυρίως στους στόχους του κάθε δικτύου. Διατυπώθηκαν τα πρώτα προβλήματα που έπρεπε να λυθούν σε ένα τέτοιο δίκτυο τα οποία κυρίως αφορούσαν την εξοικονόμηση ενέργειας.

Σχεδόν μία δεκαετία μετά, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ακόμα προκαλούν τους επιστήμονες στο θέμα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης της ενέργειας. Αποδοτικοί αλγόριθμοι, καινοτόμες τοπολογίες, ριζοσπαστικές ιδέες που ξεφεύγουν από τα κλασσικά μοντέλα, όπως κίνηση κάποιων αισθητήρων, τελευταίως και η εκμετάλλευση εναλλακτικών μορφών ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το ανολοκλήρωτο όνειρο της επιστημονικής κοινότητας είναι να γίνει πραγματικότητα ένα ΑΔΑ στο οποίο όλες οι συσκευές να έχουν μικρή παρόμοια κατανάλωση ενέργειας και χρόνο ζωής το άπειρο.

Τελευταία, μία καινούργια ανακάλυψη έρχεται να αναταράξει τα ΑΔΑ: Η Ασύρματη μεταφορά ενέργειας.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήρη Νικολετσέα, Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών, για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, τη καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου όταν του ζήτησα μία καινοτόμα διπλωματική. Η εμπιστοσύνη αυτή σίγουρα με έκανε να δουλέψω ακόμα σκληρότερα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδακτορικό Μάριο Αγγελακόπουλο ο οποίος με την πολυετή εμπειρία και τις σοφές παρατηρήσεις του συνέβαλε σημαντικά στα παρακάτω αποτελέσματα. Επίσης ευχαριστώ τον συνάδελφο, απόφοιτο, Φάνη Ράπτη που βοήθησε σημαντικά να βγουν έγκαιρα τα αποτελέσματα. Είμαι σίγουρος ότι έχει λαμπρό μέλλον ως μέλος της υπόλοιπης ομάδας.

Πάνω από όλους όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τις συμβουλές τους και την στήριξη και που μου παρείχαν καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς αυτούς τίποτα από όλα αυτά δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Ευχαριστίες	ii
Περιεχόμενα	iii
1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων(ΑΔΑ)	3
1.3 Το Κίνητρο και Σύνομη Ιστορία των ΑΔΑ	5
1.4 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και οι Εφαρμογές τους	7
1.5 Περιβάλλοντα Ανάπτυξης Εφαρμογών	8
1.6 Σχεδιασμός Δικτύου, Προκλήσεις και το Μέλλον	11
1.7 Επισκόπηση της Διπλωματικής	13
2 Τεχνικές για την Ελαχιστοποίηση της Κατανάλωσης Ενέργειας	14
2.1 Αποδοτικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	14
2.1.1 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα	14
2.1.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα	14
2.1.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοποθεσία	14
2.1.4 Πρωτόκολλα Εξισορόπισης Ενέργειας	14
2.2 Επιτρέποντας Κινητούς Κόμβους	14
2.2.1 Πρωτόκολλα με Κινητή Πηγή	14
2.2.2 Πρωτόκολλα με Κινητούς Κόμβους	14
2.3 Άλλες Τεχνικές	14
3 Ασύρματα Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΕΔΑ)	15
3.1 Μεταφορά Ενέργειας μέσω Ισχυρά Συνδεδεμένων Αντιχηρίων	15
3.1.1 Επεξήγηση της Τεχνολογίας	15
3.1.2 Λίγη Ιστορία	15
3.2 Άλλες τεχνικές	15
4 Ορισμός του Προβλήματος και Ιδιότητές του	16
4.1 Ορισμός	16
4.1.1 Γενικευμένος ορισμός	16
4.1.2 Παραλλαγές του Προβλήματος	16
4.2 Ιδιότητες του Προβλήματος	16
4.2.1 Απόδειξη της Δυσκολίας Επίλυσης του Προβλήματος	16
4.2.2 Ένα άνω φράγμα	16

4.3	Σχετική έρευνα	16
5	Στρατηγικές και Αλγόριθμοι	17
6	Πειραματική Αξιολόγηση	18
7	Επίλογος και Ανοιχτά Προβλήματα	19
	Αναφορές	20

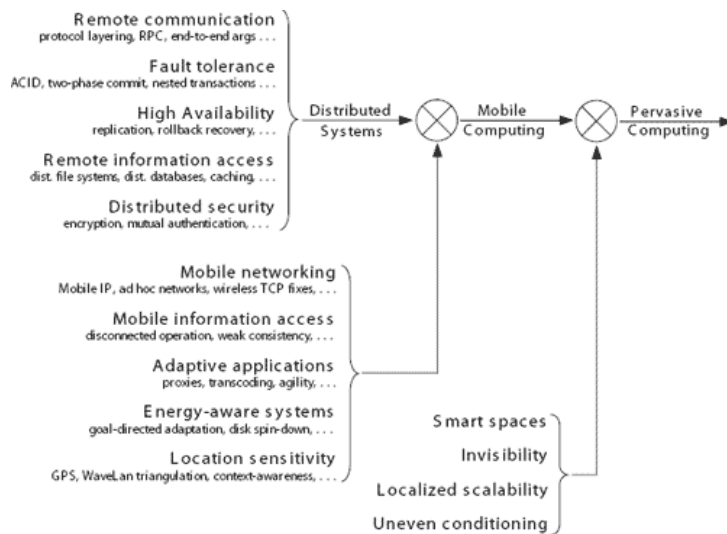
Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

1.1 Εισαγωγή

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 αναπτύχθηκαν στον κόσμο των υπολογιστών και της πληροφορικής, αμφότερα τα όραματα "Περιρρέουσα Νοημοσύνη" (Ambient Intelligence) και του "Διάχυτου Υπολογισμού" (Pervasive Computing ή πιο συχνά Ubiquitous Computing). Η έννοιας αυτές αναφέρονται αφηρημένα σε ένα περιβάλλον το οποίο είναι ικανό να "νιώθει" και να καταλαβαίνει τους ανθρώπους, και γενικότερα τις οντότητες, που βρίσκονται σε αυτό [1]. Λίγο πιο συγκεκριμένα, σε ένα τέτοιο περιβάλλον υπάρχουν αυθαίρετα πολλές συσκευές οι οποίες επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους με κοινό στόχο την εξυπηρέτηση του ανθρώπου. Η εξυπηρέτηση αυτή έχει να κάνει από τις καθημερινές εργασίες, όπως αυτόματος οπλισμός/αφοπλισμός συναγερμού, αυτόματο πότισμα, αυτόματο άνοιγμα των φώτων, παράθυρων και ρύθμιση της θερμοκρασίας του σπιτιού όταν εισέρχεται ο ιδιοκτήτης του, αλλά και πιο προηγμένες τεχνολογίες όπως αντιμετώπιση μιας πυρκαγιάς σε ένα δημόσιο κτήριο ή υπόδειξη νέων κατάλληλων προϊόντων σύμφωνα με τις καταναλωτικές συνήθειες μιας οικογένειας.

Γίνεται επομένως εμφανές ότι το όραμα αυτό, αν και αρκετά ελπιδοφόρο, στην τελική του μορφή περιλαμβάνει πολλές τεχνολογίες και επιστήμες μαζί, αποτελεί δηλαδή ένα σχετικά καινούργιο διεπιστημονικό πεδίο. Συγκεκριμένα για την υλοποίηση του οράματος χρειάζονται βασικά εργαλεία (γνώσεις και αλγόριθμοι) από επιστήμες όπως η Θεωρία Πληροφορίας, της Ανοχής σε Σφάλματα, τα Δίκτυα, τα Ασύρματα Κινητά Δίκτυα, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, τα Κατανεμημένα Συστήματα, της Ασφάλειας και πολλών άλλων. Ένας παραστατικός συνδυασμός αυτών των επιστημών με τελικό αποτέλεσμα αυτών τον Διάχυτο Υπολογισμό φαίνεται στην εικόνα 1.1.

Ένα από τα πιο σημαντικά, αν όχι το πιο σημαντικό, εργαλεία του Διάχυτου Υπολογισμού είναι τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων(ΑΔΑ). Τα ΑΔΑ αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων οι οποίοι καλύπτουν επαρκώς το περιβάλλον το οποίο είναι σε επιτήρηση. Είναι το υποσύστημα το οποίο καταγράφει όλες τις πληροφορίες από το περιβάλλον αλλά και ταυτόχρονα είναι το ίδιο υποσύστημα που εκτελεί τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες κάθε στιγμή. Ένα από τα κρισιμότερα συστατικά των ΑΔΑ είναι ο αισθητήρας: είναι το υποσύστημα του κόμβου το οποίο μετατρέπει μια φυσική ποσότητα όπως η υγρασία, η θερμοκρασία κλπ σε ηλεκτρονικό δεδομένο. Η επιστημονική κοινότητα από τις αρχές του 2000, αφού έχει μελετήσει σε βάθος

Εικόνα 1.1: Ο Διάχυτος Υπολογισμός ως συνδυασμός επιστημών¹

τις προηγούμενες επιστήμες, σε σχέση με τα ΑΔΑ, όπως τα Δίκτυα, Ασύρματα Δίκτυα, Κατανεμημένα Συστήματα κλπ έχει εστιάσει μεγάλο μέρος της προσοχής της στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αφού αποτελούν απαραίτητο εργαλείο για τον Διάχυτο Υπολογισμό.

Τα τελευταία αυτά 10 χρόνια, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων γνώρισαν τρομερή πρόοδο σε όλο το διάστημα. Εφευρέθηκαν μαθηματικά μοντέλα που προσομοιώνουν πλήρως τα ΑΔΑ[2], αλγόριθμοι οι οποίοι εκμεταλεύονται πλήρως τις ιδιότητές τους ώστε να έχουν καλύτερη απόδοση, άνω και κάτω φράγματα σε αποδόσεις αλγορίθμων και πολλά άλλα. Ο πιο σημαντικός περιορισμός τους, ο οποίος διαπιστώθηκε από την αρχή της έρευνας, είναι οι περιορισμένοι πόροι των κόμβων ειδικά σε θέματα ενέργειας. Η περιορισμένη χωρητικότητα ενέργειας ενός κόμβου είναι το σημείο κλειδί το οποίο μάλιστα διαφοροποιεί τα ΑΔΑ από τα κλασσικά Ασύρματα Δίκτυα. Επομένως η περισσότερη έρευνα πάνω στα ΑΔΑ, ακόμα και 10 χρόνια μετά, έχει σχέση με την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας. Είναι πλέον αποδεκτό ότι με την σημερινή τεχνολογία τα ΑΔΑ δεν γίνεται να λειτουργούν επ'άπειρον χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση κάτι που επηρεάζει σημαντικά το όραμα του Διάχυτου Υπολογισμού. Διότι αν ο κάθε κόμβος σε ένα ΑΔΑ χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση ανά τακτά χρονικά διαστήματα τότε το κόστος του συνολικού συστήματος αυξάνεται σημαντικά, ένας τομέας που από την έναρξη μαζικής παραγωγής τέτοιων συστημάτων λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και καθορίζει τελικά την επιτυχία τους. Όμως ακόμα και αν εξαιρέσουμε τον παράγοντα του κόστους, ένα ΑΔΑ στο οποίο οι κόμβοι λόγω περιορισμένης ενέργειας διακόπτουν τη λειτουργία τους απρόσμενα μετά το ίδιο το δίκτυο γίνεται αναξιόπιστο αποτυγχάνοντας τον αρχικό του στόχο: να βοηθά τον άνθρωπο.

Ωστόσο μια καινούργια τεχνολογία που εφευρέθηκε από τους επιστήμονες του MIT [3] έρχεται να αλλάξει άρδην τις προσδοκίες στο πεδίο των ΑΔΑ. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την ασύρματη μετάδοση ενέργειας από μια πηγή σε έναν δέκτη με πολύ

¹ Η εικόνα παρουσιάζεται στην ιστοσελίδα του εργαστηρίου Διάχυτου Υπολογισμού του πανεπιστημίου Carnegie Mellon (CMU)

μικρές απώλειες ενέργειας.

1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων(ΑΔΑ)

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων(ΑΔΑ) αποτελείται από αυτόνομους κατανεμημένους κόμβους(ή αισθητήρες) όπου ο καθένας λαμβάνει μετρήσεις για το κοντινό του περιβάλλον, όπως θερμοκρασία, υγρασία, επίπεδα θορύβου, σεισμικές δονήσεις, πίεση ακόμα και κίνηση με την προϋπόθεση πάντα ότι υπάρχει το απαραίτητο υλικό πάνω στον κόμβο ώστε να μπορεί να λαμβάνει εκάστοτε μέτρηση. Οι κόμβοι λαμβάνουν μετρήσεις περιοδικά με περίοδο που εξαρτάται από το είδος το δικτύου και ρυθμίζεται από τον αρχικό σχεδιαστή του δικτύου. Για ένα δίκτυο οι κόμβοι μπορεί να λαμβάνουν μετρήσεις ανά μια ώρα ενώ σε κάποιο άλλο δίκτυο οι αισθητήρες μπορεί να λαμβάνουν μετρήσεις ανα ένα δευτερόλεπτο. Σε ένα ΑΔΑ σχεδόν πάντα θεωρείται ότι υπάρχει ένα ακόμα πολύ σημαντικό στοιχείο: η Πηγή. Ο κάθε κόμβος αφού λάβει και καταγράψει ένα μέγεθος μετρήσεων στέλνει τα δεδομένα αυτά, δομημένα σε πακέτα μέσα από ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, στην Πηγή χρησιμοποιώντας ως διαμελوسαβητές άλλους κόμβους. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο κάθε κόμβος δεν γνωρίζει την συνολική διαδρομή που θα ακολουθήσουν τα πακέτα αλλά γνωρίζει μόνο τον πρώτο γείτονα στον οποίο στέλνει κάθε φορά ένα πακέτο που έχει προορισμό την Πηγή. Ένα παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων φαίνεται στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: Ένα τυπικό σενάριο ενός ΑΔΑ

Τα βασικά κριτήρια που χαρακτηρίζουν ένα δίκτυο ως ΑΔΑ είναι τα εξής:

- μεγάλοι περιορισμοί ως προς την κατανάλωση ενέργειας για τους κόμβους
- ικανότητα του δικτύου να μπορεί να αντιμετωπίζει αποδοτικά δυσλειτουργίες και σφάλματα κόμβων
- ικανότητα αντιμετώπισης αποτυχιών και προβλήματα επικοινωνίας μεταξύ κόμβων

- ανομοιογένεια ως προς τους κόμβους
- τοπικότητα στην πληροφορία
- επεκτασιμότητα του δικτύου σε πολύ μεγάλα μεγέθη
- εύκολη εγκατάσταση και χρήση του συνολικού δικτύου από έναν χειριστή

Ο αριθμός των κόμβων μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέχρι και αρκετές χιλιάδες. Η κατανομή των κόμβων, δηλαδή ο τρόπος που τοποθετούνται, συνήθως είναι ομοιόμορφη αλλά αυτό δεν ισχύει πάντα. Για παράδειγμα έχει αποδεχτεί ότι μια διαφορετική κατανομή όπως η Gaussian μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση σε ένα ΑΔΑ, όσον αφορά κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά [4]. Ο κάθε κόμβος αποτελείται συνήθως από κάποια τυπικά μέρη:

- πομπό/δέκτη που να χρησιμοποιεί χαμηλής ενέργειας ασύρματα πρωτόκολλα
- μικροελεγκτή χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, από πολύ απλούς των 8bit μέχρι και σύγχρονους με μεγάλη υπολογιστική δύναμη. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η μικρή κατανάλωση ενέργειας
- μπαταρία και γενικά ένας πόρος ενέργειας
- αισθητήρες όπως θερμομέτρο, βαρόμετρο, κάμερα κλπ

Αν και υπάρχει η τεχνολογία να φτιαχτεί το υλικό ενός κόμβου σε μέγεθος "ψείρας", οι μπαταρίες αυξάνουν δραματικά το μέγεθος ούτως ώστε ένας κόμβος να λειτουργεί αποβλημάτιστα για πλύ καιρό. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και θεωρούμε ότι υπάρχουν κάποιοι περιορισμένοι πόροι όσον αφορά το υλικό όπως για παράδειγμα τις δυνατότητες του μικροεπεξεργαστή και κατα συνέπεια του μικροελεγκτή που φέρει ένας κόμβος, στα ΑΔΑ δεν μελετώνται περιπτώσεις όπου οι κόμβοι δεν έχουν έλεγχο της κίνησής τους ή δεν έχουν καθόλου μνήμη και ικανότητα εκτέλεσης βασικών πράξεων. Τέτοιες περιπτώσεις υπάγονται σε άλλα μοντέλα όπως τα πρωτόκολλα πληθυσμών [5].

Η Πηγή είναι ένα ξεχωριστό στοιχείο του δικτύου, το οποίο έχει τεράστια υπολογιστική ικανότητα σε σχέση με τους κόμβους, δεν έχει κανέναν περιορισμό πόρων ενώ ταυτόχρονα έχει εμβέλεια επικοινωνίας πολύ μεγαλύτερη από τους κόμβους. Σε μερικά δίκτυα η Πηγή συμμετέχει στο πρωτόκολλο δρομολόγησης ή βοηθάει μερικώς το συνολικό δίκτυο χρησιμοποιώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Στην Πηγή φθάνουν τελικά όλες οι πληροφορίες και είναι υπεύθυνη για την διαχείριση αυτών των πληροφοριών όπως για παράδειγμα εκτέλεση ειδικών ερωτημάτων(queries) επάνω στα δεδομένα για ασφαλή και γρήγορη εξαγωγή συμπερασμάτων για το δίκτυο.

Τα βασικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων σταματάνε σε αυτό το σημείο. Ο χειρισμός των δεδομένων καθώς και η εξαγωγή μετα-πληροφοριών από αυτά τα δεδομένα κλπ αποτελούν μέρη των διεπιστημονικών πεδίων του Διάχυτου Υπολογισμού και Περιρρέουσας Νουμοσύνης. Γίνεται επομένως σαφές λόγω του ότι τα ΑΔΑ αποτελούν το πιο κρίσιμο συστατικό για τις προαναφερθείσες επιστήμες.

Τέλος να σημειωθεί ότι γενικώς στα ΑΔΑ θεωρείται ότι οι αισθητήρες έχουν συνεργατικές τάσεις, δηλαδή συνολικά το δίκτυο έχει κοινό στόχο. Αντίθετα πολύ σπάνια μελετώνται περιπτώσεις όπου ο κάθε κόμβος κοιτάει μεμονωμένα και εγωιστικά το δικό του συμφέρον. Η ανάλυση αυτών των περιπτώσεων χρησιμοποιεί συνήθως θεωρία παιγνίων [6], ενώ υποδεικνύει ένα πλήρως ανομοιογενές δίκτυο διαφορετικό από την αρχική φιλοσοφία των ΑΔΑ.

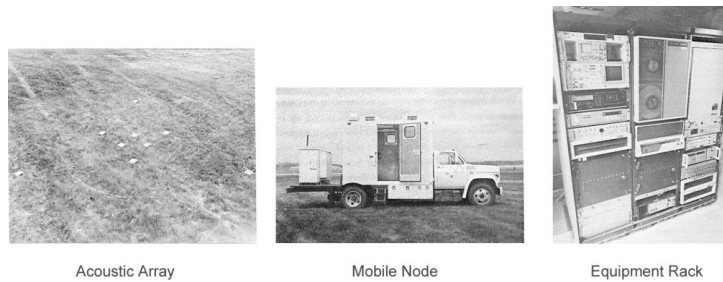
1.3 Το Κίνητρο και Σύντομη Ιστορία των ΑΔΑ

Το βασικό κίνητρο των ΑΔΑ ήταν κατα κύριο λόγο οι στρατιωτικές εφαρμογές. Επισκόπηση του πεδίου μάχης, αναγνώριση στόχων, παρακολούθηση και καταγραφή των στρατιωτικών δυνάμεων και των διαθέσιμων πυρομαχικών τους ήταν από τις πρώτες εφαρμογές που είχαν πυροδοτήσει την απόσπαση κονδυλίων, από κυβερνήσεις δυνατών κρατών, για την έρευνα τέτοιων μηχανισμών. Συγκεκριμένα η πρώτη πραγματική εύρευνα πάνω στα δίκτυα αισθητήρων ξεκίνησε μέσα στην δεκαετία του 1980 στην υπηρεσία του υπουργείου Αμύνης των Η.Π.Α, την DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Η υπηρεσία αυτή ξεκίνησε ένα καινούργιο πρόγραμμα το οποίο λεγόταν Καταναμημένα Δίκτυα Αισθητήρων (DSN, Distributed Sensor Networks). Ταυτόχρονα το ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) δίκτυο ήταν πλήρως λειτουργικό με 200 πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα συνδεδεμένα. Η βασική ιδέα των DSN ήταν ένα δίκτυο πολλών καταναμημένων συνδεδεμένων κόμβοι οι οποίοι συνεργάζονταν μεταξύ τους αλλά ο κάθε κόμβος λειτουργούσε ανεξάρτητος. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε βασιζόταν στην μέθοδο της πλημύρας.

Αν συνοπολογισθεί ότι εκείνη την περίοδο δεν υπήρχαν προσωπικοί υπολογιστές, πόσο μάλλον φορητοί υπολογιστές, ενώ το Ethernet μόλις άρχιζε και αποκτούσε φήμη, το πρόγραμμα DSN ήταν πολύ φιλόδοξο. Η τεχνολογία για την υλοποίηση αυτού του εγχειρήματος είχε βρεθεί σε ένα σχετικά πρόσφατο συνέδριο[7]. Ουσιαστικά περιελάμβανε έναν αισθητήρα ήχου, ικανότητα αποστολής και λήψης σημάτων χαμηλής ενέργειας και το απαραίτητο λογισμικού καταναμημένου χαρακτήρα. Επιστήμονες από το πανεπιστήμιο Carnegie Mellon (CMU), εστίασαν το ενδιαφέρον τους στη κατασκευή ενός λειτουργικού συστήματος το οποίο θα απευθυνόταν σε τέτοιες συσκευές, δηλαδή συσκευές συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο, στις οποίες υπάρχει εύκολη και ενιαία πρόσβαση στους καταναμημένους πόρους ενός αξιόπιστου DSN συστήματος. Το αποτέλεσμα αυτού του συστήματος ήταν να δημιουργηθεί το λειτουργικό σύστημα Mach το οποίο για την εποχή του είχε αρκετά πρωτοπόρα στοιχεία [8] ενώ είχε μάλιστα και κάποια περιορισμένη εμπορική επιτυχία.

Λίγο καιρό αργότερα, επιστήμονες στο πανεπιστήμιο MIT επικεντρώθηκαν στην αναγνώριση (εχθρικών) ελικοπτέρων μέσα από επεξεργασία ακουστικών σημάτων. Το σύστημα που χρησιμοποιήσαν ήταν μικρόφωνα καταναμημένα διάσπαρτα σε ένα χώρο τα οποία στέλναν τις πληροφορίες τους σε έναν κεντρικό υπολογιστή. Χρησιμοποίησαν ευρετικούς αλγόριθμους και τεχνικές ταιριάσματος για να μπορέσουν να πετύχουν αποδεχτά αποτελέσματα στην αναγνώριση ελικοπτέρων. Επιπλέον επέκτειναν το σύστημα DSN προσθέτοντας αλγόριθμους για επεξεργασία σημάτων και τεχνικών ταιριάσματος[9]. Για την επίδειξη του συστήματος το εργαστήριο Lincoln στο MIT κατασκεύασε ένα πραγματικό δοκιμαστικό σενάριο για την ακουστική αναγνώριση ελικοπτέρων χαμηλής πτήσης και αεροπλάνων [10]. Χρησιμοποιήθηκαν κόμβοι που στην πραγματικότητα ήταν μικρόφωνα τα οποία έστελναν με ασύρματη τεχνολογία τα σήματα ήχου σε 3 σταθερούς υπολογιστές(επεξεργαστής MC68000, 256KB μνήμη και 512KB κοιμή μνήμη). Στην εικόνα 1.3[11] φαίνεται το δοκιμαστικό σενάριο. Τελικά το συνολικό σύστημα δούλεψε επιτυχώς και κατάφερε να εντοπίσει τα χαμηλής πτήσης ελικόπτερα και αεροσκάφη.

Ενώ οι ερευνητές είχαν κατανοήσει ότι τέτοια συστήματα θα έπρεπε να περιλαμβάνουν πολλά μικρά δίκτυα αισθητήρων τα οποία θα έχουν εκατοντάδες κόμβους, η τεχνολογία για αυτά τα συστήματα δεν ήταν πλήρως έτοιμη. Ωστόσο στρατιωτικοί παράγοντες είχαν αναγνωρίσει την τεράστια χρησιμότητα αυτών των συστημάτων καθώς και την υπερτερότητα των δικτυακών όπλων: χιλιάδες αισθητήρες που συνεργάζονται



Εικόνα 1.3: Το δοκιμαστικό πείραμα του εργαστηρίου Lincoln του MIT

και μαζεύουν πληροφορίες σε σχέση με τον εχθρό και τις αποστέλλουν στο κέντρο επιχειρήσεων, το οποίο μπορεί να είναι χιλιόμετρα μακριά από το πεδίο μάχης. Το προβάδισμα αυτό θα μπορούσε να λειτουργήσει μοιραία στην εξέλιξη μιας μάχης.

Το πρώτο πραγματικό σύστημα που υλοποιήθηκε με αυτόν τον σκοπό και έχει αρκετή σχέση με τα ΑΔΑ είναι το CEC (Cooperative Engagement Capability) το οποίο κατασκευάστηκε από το ναυτικό των Η.Π.Α. στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Το σύστημα αποτελείται από πολλά ραντάρ τα οποία συλλέγουν πληροφορίες για στόχους αέρος όπως αεροσκάφη, ελικόπτερα πύραυλοι κλπ. Οι μετρήσεις αυτές αποστέλλονται σε έναν κόμβο αρχηγό (ουσιαστικά πρόκειται για μία Πηγή) ο οποίος επεξεργάζεται και φιλτράρει τις πληροφορίες. Ο κόμβος αυτός είναι κοινός σε όλους τους άλλους κόμβους που μαζεύουν πληροφορίες. Το σημαντικό στοιχείο του συστήματος είναι ότι όλοι οι κόμβοι έχουν πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες δημιουργώντας ένα πραγματικά κατακευματισμένο σύστημα το οποίο δίνει την ίδια εικόνα σε όλους τους στρατιωτικούς οι οποίοι βρίσκονται σε ένα κόμβο ο καθένας. Το σύστημα αυτό ακολούθησαν και άλλα στρατηγικά συστήματα με παρόμοιους στόχους όπως το REBMASS (Remote Battlefield Sensor System) και το TRSS (Tactical Remote Sensor System).

Ταυτόχρονα η τεχνολογία στους υπολογιστές εξελισσόταν ραγδαία. Είχαν κατασκευαστεί ασύρματα δίκτυα, είχε δημιουργηθεί το Internet, οι μικροεπεξεργαστές είχαν πλέον αρκετή υπολογιστική ισχύ ενώ το υπήρχε η δυνατότητα κατασκευής μικρουπολογιστικών συστημάτων που είχαν μέγεθος όσο μια παλάμη. Αυτές οι εξελίξεις σε συνδυασμό με τα οράματα της Περιρρέουσας Νουμοσύνης και του Διάχυτου Υπολογισμού έκαναν τους επιστήμονες να οραματιστούν μια διαφορετική πλευρά των δικτύων αισθητήρων: ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία θα συλλέγαν πληροφορίες με στόχο να βοηθήσουν τον άνθρωπο. Τα ΑΔΑ δηλαδή θα είχαν στόχο να κάνουν πιο εύκολη την ζωή του ανθρώπου από κάθε μεριά αναλαμβάνοντας αυτά κάποιες λειτουργίες σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουν συλλέξει χωρίς όμως ο άνθρωπος να αλληλεπιδρά με το συνολικό σύστημα. Έγινε όμως αμέσως αντιληπτό ότι τέτοια συστήματα θα ήταν άμεσα ευπαθή στην διαχείριση της ενέργειας. Διότι ενώ όλες οι υπόλοιπες τεχνολογίες είχαν εξελιχθεί ραγδαία, η πρόοδος στις τεχνολογίες της μπαταρίας είχαν πολύ μικρότερη πρόοδο ενώ ταυτόχρονα τέτοια συστήματα θα έπρεπε να λειτουργούν σχεδόν για πάντα χωρίς την αλληλεπίδραση του ανθρώπου. Επίσης διαπιστώθηκε ότι αλγόριθμοι για τα κλασσικά ασύρματα δίκτυα (όπως ALOHA, slotted ALOHA κλπ) δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν καθώς τα ασύρματα δίκτυα έχουν στόχο την μεγιστοποίηση της απόδοσης ενώ τα ΑΔΑ έχουν στόχο την μεγιστοποίηση των χρονικών διαστημάτων που οι κόμβοι, με περιορισμένους πόρους ενέργειας, αποστέλλουν πληροφορίες προς την Πηγή.

Από το 2000 και μετά η προσοχή της επιστημονικής κοινότητας επικεντρώθηκε

κυρίως στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας στα ΑΔΑ είτε αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είτε από τον τρόπο ανάπτυξης των αισθητήρων είτε με οποιαδήποτε άλλη τεχνική που θα μπορούσε να κάνει τα ΑΔΑ να αντισταθούν ακόμα περισσότερη ώρα στο χρόνο. Επίσης ξεκίνησαν να κατασκευάζονται μαζικά αισθητήρες οι οποίοι ήταν εμπορικά διαθέσιμη για πρακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς ενώ ταυτόχρονα δημιουργήθηκε το πρώτο λειτουργικό σύστημα ειδικά για ΑΔΑ, το TinyOS. Άμεσα οι πρώτες πειραματικές εφαρμογές που δημιουργήθηκαν με τα ΑΔΑ οι οποίες αφορούσαν σχεδόν όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

1.4 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και οι Εφαρμογές τους

Η τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου και να φέρει στην επιφάνεια κάποιες εντελώς καινούριες. Ένα κρίσιμο και πρωτεύον συστατικό των κόμβων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ο αισθητήρας. Για πολλές παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος υπάρχει η κατάλληλη τεχνολογία αισθητήρα που μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα WSN. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ήχου, πίεσης και οι χημικοί αισθητήρες. Μια σύντομη λίστα με τις πιο βασικές εφαρμογές παρουσιάζεται παρακάτω:

- **Πρόληψη Καταστροφών:** Μια από τις πιο συχνά αναφερόμενες εφαρμογές των WSNs είναι στην πρόληψη καταστροφών. Ένα τυπικό σενάριο για εφαρμογές αυτής της κατηγορίας είναι η ανίχνευση πυρκαγιών. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι με θερμόμετρα και μπορούν να υπολογίσουν τη θέση τους τρέχοντας κάποιον αλγόριθμο εντοπισμού θέσης (localization). Τους κόμβους αυτούς μπορούμε να τους απλώσουμε σε ένα δάσος, πετώντας τους από ένα αεροπλάνο. Έτσι σχηματίζεται ένας θερμοκρασιακός χάρτης της περιοχής και σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής υγρασίας που υπονοούν πυρκαγιά ενημερώνουν τους πυροσβέστες.
- **Έλεγχος του περιβάλλοντος και της βιοποικιλότητας** Τα WSNs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγχουν το περιβάλλον ως προς τους χημικούς ρύπους ή ακόμα και για το σχηματισμό μιας εικόνας ως προς τον αριθμό των διαφορετικών ειδών πανίδας και χλωρίδας μια περιοχή.
- **Ευφυή Κτίρια** Τα μεγάλα κτίρια συχνά καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας εξαιτίας λανθασμένης χρήσης των συσκευών Air Conditioning (HVAC). Μια αποδοτικότερη, πραγματικού-χρόνου και ακριβέστερη παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων παραμέτρων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των μηχανικών καταπονήσεων σε κτίρια ή γέφυρες που βρίσκονται σε σεισμικά ενεργές ζώνες, ενώ άλλου τύπου αισθητήρες μπορούν χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό εγκλωβισμένων ανθρώπων σε περιπτώσεις σεισμού. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν στα κτίρια τη στιγμή της κατασκευής τους ή αφού έχουν κατασκευαστεί. Σε αυτές τις εφαρμογές η εξοικονόμηση ενέργειας για τους αισθητήρες είναι πολύ σημαντική απαίτηση.
- **Διαχείριση Εγκαταστάσεων** Τα WSNs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές διαχείρισης μεγάλων εγκαταστάσεων, όπως θέματα ασφαλείας. Η είσοδος των ανθρώπων στις εγκαταστάσεις μπορεί να γίνεται χωρίς κλειδιά, αλλά

με τη χρήση κάποιου πομπού, ενώ μπορούν να εντοπίζονται πιθανοί εισβολείς. Επίσης σε χημικές εγκαταστάσεις τα WSNs θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό διαρροών.

- **Συντήρηση Μηχανών** Αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε δυσπρόσιτα σημεία μηχανών για να ελέγχουν τους κραδασμούς που υποδεικνύουν ανάγκη για συντήρηση. Παραδείγματα τέτοιων μηχανών είναι αυτόματες μηχανές ή οι άξονες των τροχών των τρένων.
- **Εφαρμογές στη Γεωργία** Η εφαρμογή WSNs σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις με τοποθέτηση αισθητήρων μέτρησης υγρασίας και ανάλυσης της σύστασης του εδάφους επιτρέπει την ακριβέστερη και αποδοτικότερη λίπανση και άρδευση των εκτάσεων. Επίσης, η εκτροφή ζώων μπορεί να ωφεληθεί τοποθετώντας αισθητήρες στα ζώα που ελέγχουν την κατάσταση της υγείας τους.
- **Εφαρμογές στον τομέα της υγείας** Η χρήση WSNs στον τομέα της υγείας μπορεί να αποδειχτεί πολύ ωφέλιμη. Όμως υπάρχουν αρκετά ηθικά διλήμματα πάνω στο θέμα αυτό. Οι πιθανές εφαρμογές εκτείνονται από την άμεση τοποθέτηση αισθητήρων στον ίδιο τον ασθενή για την παρακολούθηση της υγείας του και ίσως αυτόματη χορήγηση φαρμάκων, μέχρι την παρακολούθηση των ιατρών και των ασθενών στα νοσοκομεία.
- **Ευφυή οδικά συστήματα** Στα ευφυή οδικά συστήματα αισθητήρες τοποθετούνται στους δρόμους, ακόμα και στα κράσπεδα των δρόμων οι οποίοι συλλέγουν πληροφορίες για την κίνηση και την κατάσταση του οδικού δικτύου γενικότερα και επικοινωνούν με τους οδηγούς δίνοντάς τους χρήσιμες πληροφορίες.
- **Στρατιωτικές Εφαρμογές** Τα WSNs μπορούν να είναι ενιαίο και αναπόσπαστο τμήμα των στρατιωτικών συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά των WSNs, όπως είναι η γρήγορη τοποθέτησή τους, η αυτο-οργάνωση και η ανοχή στα σφάλματα, τα μετατρέπουν σε μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τα στρατιωτικά συστήματα. Κάποιες από τις πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές τους είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των εξοπλισμών και των πολεμοφοδίων, η στενή παρακολούθηση του πεδίου της μάχης, η αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων, η εκτίμηση των καταστροφών μετά από μάχη καθώς και ο εντοπισμός και η αναγνώριση χημικής, ατομικής ή βιολογικής επίθεσης.

1.5 Περιβάλλοντα Ανάπτυξης Εφαρμογών

Ένα δίκτυο αισθητήρων προκειμένου να είναι εύκολα προγραμματίσιμο και να δίνει πληθώρα επιλογών στον προγραμματιστή αλλά και στο χρήστη θα πρέπει να τρέχει ένα λειτουργικό σύστημα (ΛΣ) το οποίο είναι φτιαγμένο ειδικά για συστήματα ΑΔΑ. Να σημειωθεί ότι το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να καλύπτει τόσο τους χρήστες (οι οποίοι π.χ. θα θέλουν να τρέξουν ειδική εφαρμογή για την καλλιέργεια των φυτών τους) αλλά και τους προγραμματιστές οι οποίοι θέλουν να φτιάξουν δυνατές και αξιόπιστες εφαρμογές εύκολα και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Γενικώς ένα λειτουργικό σύστημα προορισμένο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Μικρή έκταση κώδικα:** Δεδομένης της περιορισμένης μνήμης ενός κόμβου, ο πύρηνος του λειτουργικού θα πρέπει να υλοποιηθεί με τον ελάχιστον δυνατό κώδικα.

- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Λόγω της φύσης και των περιορισμών των ΑΔΑ ένα ΛΣ προορισμένο για τα ΑΔΑ θα πρέπει να κάνει από μόνο του σωστή διαχείριση των πόρων της ενέργειας.
- **Αξιόπιστη αρχιτεκτονική:** Τα μονολιθικά ΛΣ πλέον θεωρούνται ξεπερασμένα λόγω της αρχιτεκτονικής τους. Τα σύγχρονα ΛΣ προκειμένου να προσφέρουν αξιοπιστία θα πρέπει να έχουν αρχιτεκτονική μικροπυρήνα(micro-kernel). Με αυτή την αρχιτεκτονική μόνο τα βασικά συστατικά του ΛΣ φορτώνονται στον πυρήνα ενώ όλα τα υπόλοιπα (σύστημα αρχείων, σύστημα επικοινωνίας κλπ) τρέχουν ως διακομιστές(servers). Επομένως αν κάποιο υποσύστημα πάθει βλάβη, όπως το σύστημα αρχείων, ενώ σε ένα μονολιθικό ΛΣ θα τίθονταν εκτός λειτουργίας όλος ο κόμβος, σε ένα ΛΣ αρχιτεκτονικής μικροπυρήνα το σύστημα αρχείων θα έκανε μια επανέκδοση και ο κόμβος θα συνέχιζε την λειτουργία του.
- **Εύκολο προγραμματιστικό μοντέλο:** Το προγραμματιστικό μοντέλο έχει σημαντική επιρροή στην δημιουργία εφαρμογών. Το πιο γνωστό προγραμματιστικό μοντέλο είναι το πολυνηματικό με χαμηλές απαιτήσεις σε πόρους.[13]
- **Αποδοτική χρονοδρομολόγηση:** Η χρονοδρομολόγηση ορίζει την διάταξη με την οποία εισέρχονται οι διαδικασίες στον πυρήνα του κεντρικού επεξεργαστή. Επειδή όμως τα ΑΔΑ χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, υπάρχουν εφαρμογές που χρειάζονται ελαστική χρονοδρομολόγηση η οποία εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια ενώ άλλες χρειάζονται, λόγω της φύσης τους, χρονοδρομολόγηση πραγματικού χρόνου η οποία εξαντλεί την ενέργεια ενός κόμβου γρηγορότερα. Το ΛΣ θα πρέπει να επιτρέπει στον προγραμματιστή τον τύπο της χρονοδρομολόγησης που θέλει να χρησιμοποιήσει.
- **Αφηρημένη διεπαφή επικοινωνίας:** Η διεπαφή επικοινωνίας αναφέρεται τόσο στην επικοινωνία των διεργασιών μέσα σε έναν κόμβο όσο και στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επειδή οι κόμβοι μπορεί να είναι τελείως ετερογενείς μεταξύ τους, με άλλο υλικό και αρχιτεκτονική ο καθένας τους, το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να αφαιρέσει τέτοιες λεπτομέρειες από την διεπαφή του προγραμματιστή.

Όπως φάνηκε και στο κεφάλαιο 1.3 από το ξεκίνημα των ΑΔΑ οι επιστήμονες προσπαθούσαν να δημιουργήσουν ένα λειτουργικό σύστημα το οποίο να έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που αναφέρθηκαν. Τα πρώτο λειτουργικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε μαζί ήταν το TinyOS το 2000. Μετέπειτα δημιουργήθηκαν και άλλα ΛΣ για δίκτυα αισθητήρων καθένα με διαφορετικό κίνητρο και στόχο. Συνοπτικά τα πιο γνωστά λειτουργικά συστήματα για δίκτυα αισθητήρων είναι τα εξής:

- **TinyOS:** Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Berkeley σε συνεργασία με την Intel και την Crossbow Technology. Είναι ανοιχτού κώδικα και πρώτη έκδοσή του κυκλοφόρησε το 2000. Υποστηρίζει έναν τεράστιο αριθμό από πλατφόρμες υλικού ενώ οι απαιτήσεις του σε μνήμη RAM είναι μόλις 2KB. Η ανάπτυξη εφαρμογών TinyOS γίνεται στην γλώσσα nesC(Network Embedded Systems C) μία παραλλαγή της C αλλά με αντικειμενοστρεφή χαρακτηριστικά και προορισμένη ειδικά για ΑΔΑ.
- **Contiki:** Είναι ένα μικρό, ανοιχτού κώδικα, πολυνηματικό και πλήρως φορητό ΛΣ σχεδιασμένο ειδικά για συσκευές με περιορισμένους πόρους. Μία τυπική

εγκατάσταση χρειάζεται μόλις 2KB RAM και 40 KB ROM. Είναι γραμμένο σε C, υποστηρίζει πλήρως το IPv6 ενώ μπορεί να εγκατασταθεί γραφικό περιβάλλον, περιηγητής, web server και πολλά ακόμα. Η πρώτη έκδοση κυκλοφόρησε το 2005 ενώ έχει μεγάλη κοινότητα που ασχολείται με την περαιτέρω ανάπτυξή του.

- **Mantis:** Πολυνηματικό λειτουργικό σύστημα ειδικά σχεδιασμένο για μικροελεγκτές με πολύ περιορισμένους πόρους. Συγκεκριμένα μπορεί να τρέξει ακόμα και με 500Bytes RAM ενώ απαιτεί μόλις 14KB μνήμη ROM. Ο δρομολογητής κάνει αποδοτική χρήση της διαθέσιμης ενέργειας θέτωντας σε λειτουργία ύπνου τον μικροελεγκτή όποτε χρειάζεται. Είναι γραμμένο σε γλώσσα C [14].
- **SOS:** Το λειτουργικό σύστημα αναπτύχθηκε στα πλαίσια ενός έργου του πανεπιστημίου UCLA σε συνεργασία με άλλα πανεπιστήμια. Το κύριο κίνητρο για την ανάπτυξή του ήταν το γεγονός ότι μια εφαρμογή για ένα λειτουργικό σύστημα ΑΔΑ είχε άμεση σχέση με το ίδιο το ΛΣ. Επομένως η μεταφορά του σε άλλο ΛΣ ήταν απαγορευτική. Το ΛΣ SOS έχει δημιουργήσει διεπαφές οι οποίες συναντώνται στα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα όπως run-time error checking, garbage collection κλπ [15]. Έχει μεταφερθεί σε μικροελεγκτές αλλά η ανάπτυξή του γίνεται με αργά βήματα κυρίως λόγω περιορισμένης χρήσης του.
- **Nano-RK:** Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο Carnegie Mellon με πλήρη υποστήριξη multi-hop δικτύου. Υποστηρίζει τις πλατφόρμες FireFly και MicaZ. Περιλαμβάνει πυρήνα πολύ μικρού μεγέθους αλλά με αρκετές δυνατότητες ενώ μπορεί να τρέξει σε συστήματα με 2KB RAM και 18KB ROM. Υποστηρίζει σταθερής προτεραιότητας preemptive δρομολογητή διασφαλίζοντας έτσι ότι όλες οι προθεσμίες συναντώνται. Το ΛΣ μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας μέσω της ιδιότητας που παρέχει οι εφαρμογές να μπορούν να ορίσουν τις απαιτήσεις τους σε πόρους που θα χρειαστούν κατά την εκτέλεσή τους [16].
- **Maté:** Η βασική ιδέα αυτού του εγχειρήματος είναι να φτιαχτεί μια εικονική μηχανή(virtual machine) που να μπορεί να εγκατασταθεί επάνω από ΛΣ για δίκτυα αισθητήρων. Επομένως το Maté θα λειτουργούσε όπως η Java λειτουργεί στα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα. Όμως ενώ η Java προσφέρει σωρεία από κλάσσες δημιουργεί ένα πολύ μεγάλο αρχείο bytecode απαγορευτικού μεγέθους για τους μικροελεγκτές που χρησιμοποιούνται στα ΑΔΑ. Αντίθετα η ιδέα στο Maté είναι ότι θα επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει σε ποια γλώσσα προγραμματισμού θα γράψει το πρόγραμμά του, ποιές κλάσσες να συμπεριλάβει κλπ ώστε να μειωθεί το μέγεθος της εικονικής μηχανής και του τελικού αρχείου bytecode [17].

Φυσικά υπάρχουν και άλλα εργαλεία για την γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών σε λειτουργικά συστήματα ΑΔΑ. Για παράδειγμα έχουν αναπτυχθεί αναπτυχθεί εξομοιωτές διακριτού χρόνου όπως ο ns-2 [18] και ο νεότερος ns-3 [19], ο OMNeT++ [20], ο NetSim [21] και ο J-Sim [22]. Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί frameworks που περιέχουν έτοιμες υλοποιήσεις αλγορίθμων και μοντέλων για δίκτυα αισθητήρων και ασύρματα δίκτυα γενικότερα. Ένα από τα πιο γνωστά είναι το wiselib [23], μια βιβλιοθήκη η οποία περιέχει συναρτήσεις για αλγορίθμους δρομολόγησης, localization, καταναμεμένους αλγόριθμους κλπ ενώ παρέχει πλήρη υποστήριξη για όλες σχεδόν τις πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων.

1.6 Σχεδιασμός Δικτύου, Προκλήσεις και το Μέλλον

Κατα το σχεδιασμό ενός νέου δικτύου αισθητήρων ο σχεδιαστής έχει μια πληθώρα ερωτημάτων να κάνει ώστε να πετύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα σε σχέση με τις απαιτήσεις του. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν άρθρα που μελετάνε κάθε πρόβλημα των ΑΔΑ ξεχωριστά αλλά κρατάνε όλους τις άλλες παράμετρους σταθερές. Επομένως όταν ο σχεδιαστής αναμίζει διάφορους αλγορίθμους και μοντέλα κατα την σχεδίαση (πχ έναν αλγόριθμο για την δρομολόγηση των πακέτων και ένα μοντέλο για την τοπολογία του δικτύου) μπορεί να έχει χειρότερα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα. Οι πιο σημαντικές παράμετροι που ένας σχεδιαστής θα πρέπει να ρυθμίσει είναι οι εξής:

- **Ανάπτυξη των κόμβων:** Καθώς οι κόμβοι σε ένα ΑΔΑ γίνονται ολοένα και μικρότεροι, η ανάπτυξή τους μέσα σε έναν χώρο μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα μπορούν να αναπτυχθούν ομοιόμορφα τυχαία (π.χ. να ριχθούν από ένα αεροπλάνο) ή να εγκατασταθούν σε συγκεκριμένα σημεία το οποίο είναι πιο δύσκολο ειδικά αν ο αριθμός των κόμβων είναι μεγάλος. Όμως η ανάπτυξη των κόμβων μπορεί να είναι συνεχόμενη. Για παράδειγμα σε ένα ΑΔΑ μπορεί να διαπιστωθεί ότι μετά από κάποιο καιρό λειτουργίας ένα σημείο ίσως χρειάζεται περισσότερους κόμβους για να το επιβλέπουν. Ο τρόπος που θα τοποθετηθούν τελικά οι κόμβοι (δηλαδή αν θα είναι ομοιόμορφοι ή ανομοιόμορφοι η κατανομή τους) επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του δικτύου.
- **Κινητικότητα:** Η κινητικότητα μπορεί να είναι απρόσμενη (π.χ. μέσω του αέρα ή του νερού) ή να είναι προσχεδιασμένη για μερικούς κόμβους. Η κίνηση μερικών κόμβων σε ένα δίκτυο μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του δικτύου αφού μέσω της κίνησής τους μπορούν να ξεκουράζουν τους υπόλοιπους κόμβους πηγαίνοντας πολύ κοντά σε αυτούς και παίρνοντας τα δεδομένα τους. Όμως οι κόμβοι που κινούνται θα πρέπει να έχουν μεγάλους πόρους ενέργειας ή να μπορούν να επαναφορτίζονται με κάποιο τρόπο γιατί αλλιώς η ενέργειά τους θα τους τελειώσει πολύ πιο γρήγορα από την ενέργεια των υπολοίπων κόμβων.
- **Κόστος, Αριθμός κόμβων και Διαθέσιμοι πόροι:** Οι 3 έννοιες αυτές είναι αλληλένδετα συνδεδεμένες. Μεγαλύτερο μέγεθος δικτύου, δηλαδή περισσότεροι κόμβοι, ή μεγαλύτερο μέγεθος διαθέσιμων πόρων συνεπάγεται άμεσα στην δραματική αύξηση του κόστους. Κρατώντας το κόστος του δικτύου σταθερό ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει μεταξύ μεγάλου αριθμού κόμβων και μεγάλων διαθέσιμων πόρων, κυρίως ενέργειας.
- **Τύπος κόμβων** Ένα ακόμα στοιχείο το οποίο έχει άμεση σχέση με το κόστος του δικτύου αλλά ταυτόχρονα και με την λειτουργία και τον σκοπό του ΑΔΑ. Χαρακτηριστικά των κόμβων περιλαμβάνουν την αρχιτεκτονική τους (π.χ. επεξεργαστής, μέγεθος RAM και ROM) αλλά και τις δυνατότητες επικοινωνίας τους όπως Wifi, Zigbee, Laser, Bluetooth, IrDA κλπ.
- **Ομοιογένεια κόμβων:** Αν και συνήθως τα ΑΔΑ κατασκευάζονται από ίδιο τύπο κόμβων αυτό δεν είναι ο κανόνας. Ένας σχεδιαστής δικτύου μπορεί να προτιμήσει να εισάγει 80% φθηνών κόμβων και 20% ακριβότερων οι οποίοι όμως να έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως κίνηση ή GPS που τελικά το δίκτυο να έχει καλύτερη απόδοση.
- **Κάλυψη του χώρου:** Ανάλογα με τον σκοπό ενός ΑΔΑ διαφορετικές πολιτικές κάλυψης είναι αναγκαίες. Για παράδειγμα αν ένα ΑΔΑ πρέπει να εντοπίζει κινούμενες οντότητες μέσα στον χώρο του τότε θα πρέπει το κάθε σημείο να είναι

τουλάχιστον 3-φορές καλυμένο(δηλαδή τουλάχιστον 3 κόμβοι να το αντιλαμβάνονται μέσω αισθητήρων) έτσι ώστε να μπορούν να δουλέψουν αλγόριθμοι localization και να μπορεί να βρεθεί η ακριβής θέση της οντότητας. Αντίθετα αν κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο τότε 1-φορά ή 2-φορές κάλυψη είναι αρκετή για τις ανάγκες του δικτύου.

Ο σχεδιασμός ενός ΑΔΑ έχει άμεση σχέση με την απόδοσή του. Ωστόσο η απόδοση έχει πολλές έννοιες ανάλογα με τον σκοπό του δικτύου. Οι βασικότερες μετρικές απόδοσης είναι οι εξής:

- **Διάρκεια ζωής:** Ο πιο κρίσιμη αλλά ταυτόχρονα η πιο αμφιλεγόμενη μετρική απόδοσης. Αφηρημένα, η διάρκεια ζωής ενός ΑΔΑ ορίζεται το χρονικό διάστημα μέχρι το δίκτυο να γίνει άχρηστο. Στην βιβλιογραφία οι ορισμοί διαφέρουν σημαντικά. Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μέχρι να πεθάνει ο πρώτος κόμβος του δικτύου ενώ υπάρχουν και ορισμοί που το ορίζουν ως το χρονικό διάστημα μέχρι να πεθάνει το 70% των κόμβων του δικτύου.
- **Ομοιομορφη κατανομή ενέργειας:** Μετρική που έχει άμεση σχέση με την διάρκεια ζωής ενός ΑΔΑ. Μη ανομοιόμορφη κατανομή ενέργειας οδηγεί άμεσα κάποιους κόμβους να εξαντλήσουν την ενέργειά τους πολύ πιο γρήγορα από κάποιους άλλους. Επομένως δημιουργούνται τρύπες(energy holes) στο δίκτυο οι οποίες μπορεί να σπάσουν το δίκτυο σε μικρότερες συνεκτικές συνιστώσες και ως αποτέλεσμα να χάνονται πακέτα.
- **Καθυστερήση (Latency):** Ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται από την στιγμή που δημιουργηθεί ένα γεγονός(event) στο δίκτυο μέχρι να το μάθει η πηγή. Εξαρτάται από τα hops του δικτύου αλλά γενικά είναι κλάσμα του δευτερολέπτου.
- **Success Rate** Ορίζεται ως το ποσοστό των ληφθέντων γεγονότων στην πηγή προς το ποσοστό των συνολικών γεγονότων που δημιουργήθηκαν στο χώρο που καλύπτει το ΑΔΑ. Ή αλλιώς ο αριθμός των πακέτων που αποστάλθηκαν σωστά προς τον συνολικό αριθμό πακέτων που αποστάλθηκαν.
- **Μέσος βαθμός των κόμβων (node degree)** Ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των γειτόνων ενός κόμβου. Έχει μεγάλη σημασία γιατί αν ο μέσος αριθμός γειτόνων είναι 1 με μικρή διασπορά τότε αν πεθάνει ένας κόμβος με μεγάλη πιθανότητα το δίκτυο θα σπάσει σε 2 μικρότερα υποδίκτυα.

Φυσικά σε όλα αυτά θα πρέπει να συνυπολογίζεται κάθε φορά και η τυπική απόκλιση των εκάστοτε μετρικών.

Το όραμα που υπάρχει για τα ΑΔΑ για το μέλλον είναι ο κάθε άνθρωπος να μπορεί να αγοράσει και να εγκαταστήσει εκατοντάδες κόμβους εύκολα σε σημεία που χρειάζεται ο ίδιος. Οι κόμβοι αυτόματα θα ορίζουν αυτόματα πρωτόκολλα και τους αλγόριθμους που πρέπει να χρησιμοποιήσουν για την λειτουργία που έχουν επιλεχτεί. Ο κάθε κόμβος θα πρέπει να είναι αθάνατος, δηλαδή να μην χρειάζεται ποτέ να αντικατασταθεί για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης τα ΑΔΑ θα χρησιμοποιούνται πολύ στην παρακολούθηση πλανητών. Εκεί ο κάθε κόμβος θα πρέπει να παραμένει ζωντανός για χρόνια ίσως και δεκαετίες. Επομένως οι πλήρης εκμετάλευση των μηχανισμών που βοηθούν τους κόμβους να κρατήσουν την ενέργειά τους για χρόνια είναι πάγια τοποθέτηση της επιστημονικής κοινότητας.

1.7 Επισκόπηση της Διπλωματικής

2

Τεχνικές για την Ελαχιστοποίηση της Κατανάλωσης Ενέργειας

2.1 Αποδοτικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

2.1.1 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα

2.1.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα

2.1.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοποθεσία

2.1.4 Πρωτόκολλα Εξισορόπισης Ενέργειας

2.2 Επιτρέποντας Κινητούς Κόμβους

2.2.1 Πρωτόκολλα με Κινητή Πηγή

2.2.2 Πρωτόκολλα με Κινητούς Κόμβους

2.3 Άλλες Τεχνικές

3

Ασύρματα Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΕΔΑ)

3.1 Μεταφορά Ενέργειας μέσω Ισχυρά Συνδεδεμένων Αντιηχείων

3.1.1 Επεξήγηση της Τεχνολογίας

3.1.2 Λίγη Ιστορία

3.2 Άλλες τεχνικές

4

Ορισμός του Προβλήματος και Ιδιότητες του

4.1 Ορισμός

4.1.1 Γενικευμένος ορισμός

4.1.2 Παραλλαγές του Προβλήματος

4.2 Ιδιότητες του Προβλήματος

4.2.1 Απόδειξη της Δυσκολίας Επίλυσης του Προβλήματος

4.2.2 Ένα άνω φράγμα

4.3 Σχετική έρευνα

5

Στρατηγικές και Αλγόριθμοι

6

Πειραματική Αξιολόγηση

7

Επίλογος και Ανοιχτά Προβλήματα

Αναφορές

- [1] E.J. Pauwels, A.A. Salah, and R. Tavenard. Sensor networks for ambient intelligence. In *Multimedia Signal Processing, 2007. MMSP 2007. IEEE 9th Workshop on*, pages 13 --16, oct. 2007.
- [2] H. Kenniche and V. Ravelomananana. Random geometric graphs as model of wireless sensor networks. In *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on*, volume 4, pages 103 --107, feb. 2010.
- [3] Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljačić. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, 323(1):34--48, January 2008.
- [4] Demin Wang, Bin Xie, and Dharma P. Agrawal. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with gaussian distribution. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(12):1444--1458, December 2008.
- [5] James Aspnes and Eric Ruppert. An introduction to population protocols. In Benoît Garbinato, Hugo Miranda, and Luís Rodrigues, editors, *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications*, pages 97--120. Springer-Verlag, 2009.
- [6] Renita Machado and Sirin Tekinay. A survey of game-theoretic approaches in wireless sensor networks. *Comput. Netw.*, 52(16):3047--3061, November 2008.
- [7] CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA DEPT OF COMPUTER SCIENCE. *Proceedings of a Workshop on Distributed Sensor Nets Held at Pittsburgh, Pennsylvania on December 7-8, 1978*. Defense Technical Information Center, 1978.
- [8] Richard Rashid, Robert Baron, Ro Forin, David Golub, and Michael Jones. Mach: A system software kernel. In *In Proceedings of the 1989 IEEE International Conference, COMPCON*, pages 176--178. Press, 1989.
- [9] Chee-Yee Chong, Kuo-Chu Chang, and Shozo Mori. Distributed tracking in distributed sensor networks. In *American Control Conference, 1986*, pages 1863 --1868, june 1986.
- [10] Richard T. Lacoss. Distributed mixed sensor aircraft tracking. In *American Control Conference, 1987*, pages 1827 --1830, june 1987.
- [11] MIT Lincoln Laboratory. Distributed sensor networks. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/290Q/Papers/History%20and%20Context/DistributedSensorNetworks-LL-1986.pdf>. Accessed: 12/07/2012.

- [12] The cooperative engagement capability. <http://techdigest.jhuapl.edu/td/td1604/APLteam.pdf>. Accessed: 12/07/2012.
- [13] Muhammad Omer Farooq and Thomas Kunz. Operating systems for wireless sensor networks: A survey. In *Sensors II*, 2011.
- [14] Shah Bhatti, James Carlson, Hui Dai, Jing Deng, Jeff Rose, Anmol Sheth, Brian Shucker, Charles Gruenwald, Adam Torgerson, and Richard Han. Mantis os: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms. In *ACM/Kluwer Mobile Networks & Applications (MONET), Special Issue on Wireless Sensor Networks*, page 2005, 2005.
- [15] Chih-Chieh Han, Ram Kumar, Roy Shea, Eddie Kohler, and Mani Srivastava. A dynamic operating system for sensor nodes. In *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '05*, pages 163--176, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [16] A. Eswaran, A. Rowe, and R. Rajkumar. Nano-rk: an energy-aware resource-centric rtos for sensor networks. In *Real-Time Systems Symposium, 2005. RTSS 2005. 26th IEEE International*, pages 10 pp. --265, dec. 2005.
- [17] Philip Levis and David Culler. Maté: a tiny virtual machine for sensor networks. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 36(5):85--95, October 2002.
- [18] D. Mahrenholz and S. Ivanov. Real-time network emulation with ns-2. In *Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2004. DS-RT 2004. Eighth IEEE International Symposium on*, pages 29 -- 36, oct. 2004.
- [19] Gustavo Carneiro, Helder Fontes, and Manuel Ricardo. Fast prototyping of network protocols through ns-3 simulation model reuse. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(9):2063 -- 2075, 2011.
- [20] Xiaodong Xian, Weiren Shi, and He Huang. Comparison of omnet++ and other simulator for wsn simulation. In *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, pages 1439 --1443, june 2008.
- [21] M. Lord and D. Memmi. Netsim: a simulation and visualization software for information network modeling. In *e-Technologies, 2008 International MCETECH Conference on*, pages 167 --177, jan. 2008.
- [22] A. Sobeih, Mahesh Viswanathan, D. Marinov, and J.C. Hou. J-sim: An integrated environment for simulation and model checking of network protocols. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2007. IPDPS 2007. IEEE International*, pages 1 --6, march 2007.
- [23] Tobias Baumgartner, Ioannis Chatzigiannakis, Sandor P Fekete, Christos Koninis, Alexander Kroeller, and Apostolos Pyrgelis. Wiselib: A generic algorithm library for heterogeneous sensor networks. *Computer Engineering*, page 16, 2011.