



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

**Μελέτη στον εντοπισμό των
Ασύρματων Δικτύων
Αισθητήρων**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαρίλαος Αλέξανδρος Γιοράν (ΑΜ: 3120035)

Επιβλέπων: Σαμαράς Νικόλαος, Καθηγητής

ΛΑΡΙΣΑ, Μήνας Έτος

----- v.13/12/2021 ----- μην πειράζετε κάτω από εδώ – θα χαλάσει η σελιδοποίηση! -----



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

Study of the Wireless Sensor Network's localization

BACHELOR THESIS

Charilaos Alexandros Gioran (RN: 3120035)

Supervisor: *Samaras Nikolaos, Professor*

LARISSA, month year

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Χαρίλαος Αλέξανδρος Γιοράν
02/07/2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων	Ονοματεπώνυμο Επιβλέποντα Βαθμίδα/ιδιότητα επιβλέποντα, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 1 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 1, Τμήμα/Ίδρυμα μέλους 1

Ημερομηνία έγκρισης: dd-mm-yyyy

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα εμβαθύνει στον τομέα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSN) με μια εστιασμένη έρευνα στις τεχνικές εντοπισμού. Μελετώντας τον κρίσιμο ρόλο του ακριβούς εντοπισμού των κόμβων στα WSN, η εργασία θα εξετάσει επίσης τις διαφορές μεταξύ των παραδοσιακών δικτύων (WAN, PAN, LAN κ.λπ.) και των δικτύων ad-hoc. Επιπρόσθετα, θα μιλήσουμε για τις προσαρμογές που γίνονται σε θέμα εντοπισμού, με βάση το δίκτυο που υλοποιούμε. Κύριο θέμα συζήτησης θα είναι οι κατηγορίες αλγορίθμων εντοπισμού, όπως οι range-based, range-free, angle-based κ.α. ToA (ώρα άφιξης), TDoA (διαφορά ώρας άφιξης) και άλλοι. Παράλληλα, θα γίνει ανάλυση του αλγορίθμου Monte-Carlo για τον εντοπισμό κόμβων, έπειτα απ' την μελέτη των διαφορών μεταξύ robot και node εντοπισμού. Θα αναφερθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου και συγκεκριμένα, τα στάδια εντοπισμού, ορισμένες ρυθμίσεις που γίνονται σε αυτόν και παροχή γραφημάτων για την εξήγηση των επιδόσεων του.

Abstract

This thesis will delve into the field of Wireless Sensor Networks (WSN) with focused research on localization techniques. By studying the critical role of accurate node localization in WSNs, the thesis will also examine the differences between traditional networks (WAN, PAN, LAN, etc.) and ad-hoc networks. In addition, we will discuss the adaptations made to localization issues based on the network we are implementing. The main topic of discussion will be the categories of localization algorithms, such as range-based, range-free, Angle-based, etc. Furthermore, the Monte-Carlo algorithm for node localization will be analysed, after studying the differences between robot and node localization. All the necessary information on how the algorithm works will be reported the localization stages, some settings made in it, and graphs will be provided to explain its performance.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του τμήματος, που έδειξαν κατανόηση αυτά τα τέσσερα χρόνια σπουδών. Παράλληλα, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συμφοιτητές μου, για την παρηγοριά, την παρέα και την βοήθεια όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, πρέπει να πω ένα τελευταίο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που με στήριξε στις αποφάσεις μου και κυρίως στον στόχο μου να πετύχω στην ζωή μου με το να βρίσκομαι σε αυτή την θέση.

Χαρίλαος Αλέξανδρος Γιοράν

02/07/2024

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	VII
ABSTRACT.....	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ.....	5
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	5
2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	6
2.2.1 Μέτρηση Γωνίας – Απόστασης.....	7
2.2.2 Υπολογισμός τοποθεσίας – Locality.....	7
3 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ.....	9
3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	9
3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	10
3.2.1 Δομημένα δίκτυα.....	10
3.2.2 Αδόμητα δίκτυα – Ad-hoc networks.....	12
3.2.3 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – WSN.....	15
4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ – LOCALIZATION ALGORITHMS.....	21
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ – LOCALIZATION.....	23
4.2.1 Centralized localization.....	24
4.2.2 Distributed Localization.....	24
4.2.3 Ανασκόπηση και προοπτική.....	38
5 MONTE CARLO – LOCALIZATION ALGORITHM.....	39
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	39
5.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ.....	41

5.3	ROBOT VS NODE LOCALIZATION – MCL.....	44
5.3.1	<i>Robot localization</i>	44
5.3.2	<i>Node localization</i>	44
5.4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ MCL.....	45
5.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	53
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	57
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59

1 Εισαγωγή

Όταν αναφερόμαστε στον όρο «Ασύρματες Επικοινωνίες», μιλάμε για το είδος στο οποίο γίνεται τα δεδομένα να παραδοθούν ασύρματα. Αυτό το είδος επικοινωνίας συμπεριλαμβάνει την συμμετοχή μεταξύ δύο συσκευών το ελάχιστο, που βασίζεται σε ασύρματο σήμα που ενσωματώθηκαν τεχνικές ασύρματης επικοινωνίας και μηχανισμών. Σύμφωνα με τον όρο αυτό, η μεταφορά αυτή των δεδομένων ανάμεσα σε διάφορα σημεία σε ένα δίκτυο, δεν συμπεριλαμβάνει κάποιου είδους ηλεκτρικό αγωγό (καλώδιο).

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN, αποτελούν ένα ενδιαφέρον θέμα έρευνας-συζήτησης στην επιστημονική κοινότητα, λόγω των αμέτρητων εφαρμογών τους. Το κάθε δίκτυο διαθέτει εκατοντάδες αν όχι χιλιάδες(ανάλογα το έργο) συσκευές γνωστές ως “Motes”, μικροσκοπικοί υπολογιστές χαμηλής ενέργειας και κόστους. Οι συσκευές αυτές, διαμορφώνουν τα θεμέλια των ασύρματων δικτύων ως αυτόνομοι μηχανισμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούν κάθε διαθέσιμο αισθητήρα για την παρακολούθηση οποιασδήποτε φυσικής ή τεχνικής μεταβλητής, σαν την θερμοκρασία, τον ήχο, την δόνηση και άλλων τέτοιων μεταβλητών σε διάφορες περιοχές.

Figure 1: Mote computer, Mica 2.



Figure 2: A mote's architecture.

Ωστόσο, η λεπτομέρεια που κάνει ένα σύστημα αισθητήρων γνωστό ως WSN, κρύβεται στο ίδιο το όνομα του, δηλαδή την ασύρματη σύνδεση η οποία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός ασύρματου πρωτοκόλλου(Wireless Protocol) που εφαρμόζεται σε αυτό.

Για την επίτευξη όχι μόνο της συλλογής αλλά και γενικότερα της διαχείρισης των δεδομένων και του δικτύου, εφαρμόζονται μηχανισμοί και πρωτόκολλα για να ικανοποιήσουν τους εκάστοτε στόχους που τους έχουν ανατεθεί. Φυσικά, είναι αυτονόητο πως κανένα δίκτυο αισθητήρων δεν είναι ίδιο με ένα άλλο, εφόσον η εφαρμογή του καθενός διαφοροποιείται μαζί και τα συστατικά του. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων WSN είναι:

- Περιβαλλοντική παρακολούθηση
- Σεισμική ανίχνευση
- Εντοπισμό υψηλών πιέσεων
- Στρατιωτική παρακολούθηση

Βέβαια, η πλειοψηφία των έργων, συμπεριλαμβανομένου και των παραπάνω προϋποθέτει και την διαμοίραση των αισθητήρων σε απομακρυσμένα μέρη. Για αυτόν τον λόγο, πέρα από τα υπόλοιπα προβλήματα σαν την διατήρηση πηγών τροφοδοσίας,

κύριο μέλημα αποτελεί επίσης ο εντοπισμός(Localization) των κόμβων για την μεταφορά, αποθήκευση και διαχείριση της πληροφορίας.

2 Ασύρματα δίκτυα και εντοπισμός

Εδώ θα κάνουμε μια μικρή εισαγωγή στις κατηγορίες των ασύρματων δικτύων, σαν τα ad-hoc δίκτυα και τα WSN. Επίσης, θα αναφέρουμε μερικά από τα πιο βασικά εργαλεία σε αυτού του είδους δίκτυα και το πώς ο εντοπισμός ξεκινά μέσα από αυτά, αλλά και μερικές τεχνικές που μας βοηθάνε.

2.1 Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ή Wireless Sensor Networks(WSN) αποτελεί μια καινοτομία στον χώρο της τεχνολογίας, καινοτομία που η επίδραση και οι εφαρμογές της αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Είναι ένα ή μάλλον πολλαπλά δίκτυα υπολογιστών που συνδέονται μεταξύ τους ασύρματα ή ενσύρματα, βασιζόμενα σε εγκεκριμένο φυσικό υλικό(hardware). Παρόλο που και οι δυο μέθοδοι χρησιμοποιούνται, εδώ θα εστιάσουμε στην ασύρματη συνδεσμολογία τους. Τα πιο αξιότιμα πλεονεκτήματα της ασύρματης σύνδεσης των ασύρματων δικτύων είναι:

- Ευκολία στην εγκατάστασή τους και την χρήση τους
- Μειωμένο κόστος (χωρίς επένδυση σε φυσικά μέσα ή ορισμένου χώρου τοποθέτησης).
- Δυνατότητα κλιμάκωσης (δηλαδή, επέκταση και αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου).

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εφαρμόζονται σε ποικίλες εφαρμογές, που μέχρι και σήμερα ακόμη αναπτύσσονται. Φυσικά, αυτό βασίζεται στο μεγάλο πλήθος ασύρματων δικτύων αισθητήρων, που με την αξιοποίηση των μηχανισμών και του λογισμικού τους αντλούν δεδομένα που μεταφέρονται από κατάλληλο πρωτόκολλο επικοινωνίας στους κεντρικούς κόμβους.

Ένα ασύρματο δίκτυο υπολογιστών μπορεί να βρεθεί σε διάφορες μορφές όπως κυψελοειδή(clustering networks), αδόμητη μορφή(unstructured network όπως ένα δίκτυο ad-hoc) ή βασικές μορφές που έχουμε στις πόλεις όπως το WAN(Wide-Area-Network).

Στην περίπτωση των αδόμητων δικτύων (ad-hoc networks) δεν βασίζεται σε προ-εγκατεστημένη υποδομή και δεν υπάρχει ορισμένη δομή δικτύου, σαν τις συσκευές routers που συναντάμε σε ενσύρματα δίκτυα ή σημεία πρόσβασης(access points). Αντιθέτως, η μετάδοση πληροφορίας πραγματοποιείται μέσω των κόμβων(nodes). Με άλλα λόγια, οι κόμβοι αναλαμβάνουν και τον ρόλο των δρομολογητών αν χρειαστεί, με στόχο την μεταφορά-λήψη(σύμφωνα με το δίκτυο) της πληροφορίας.

Παρά τους περιορισμούς τους, η ταχεία εγκατάσταση και διαμόρφωση τους, τα καθιστά ιδανικά για έκτακτες ανάγκες, στα φαινόμενα φυσικών καταστροφών(πυρκαγιές) ή στρατιωτικών αντιπαραθέσεων. Τα ασύρματα δίκτυα Ad-hoc θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενη ενότητα, στην οποία θα σχολιάσουμε την εφαρμογή τους.

2.2 Εισαγωγή στον εντοπισμό δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) έχουν τραβήξει τεράστια προσοχή πάνω τους από την επιστημονική κοινότητα, χάρις τον μεγάλο βαθμό εφαρμογών τους. Πολλαπλές εργασίες πλέον γίνονται όλες με έξυπνο τρόπο μέσω πολλαπλών μικρών – φθηνών συσκευών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Εφαρμογές όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος καθιστούν τα ασύρματα αυτά δίκτυα ιδιαίτερα σημαντικά. Ωστόσο, εξίσου σημαντική είναι και η ανίχνευση των κόμβων, που επιτρέπει σε αυτά τα δίκτυα να διαχειρίζονται και να μεταφέρουν πακέτα δεδομένων. Οποιαδήποτε πληροφορία που έχει ληφθεί δεν μας χρησιμεύει και τόσο αν κανένας εμπλεκόμενος κόμβος δεν γνωρίζει την τοποθεσία του συμβάντος, απ' όπου λάβαμε την πληροφορία.

Κάθε WSN αποτελείται από ένα δίκτυο τέτοιων κόμβων, στο οποίο οι κόμβοι ανίχνευσης(ή κόμβοι αισθητήρων), μετά την λήψη του φαινομένου(όπως μεταβαλλόμενες καταστάσεις μέσα σε ένα πεδίο ερευνών) στέλνουν την ευαίσθητη πληροφορία στον κατάλληλο σταθμό βάσης (base station). Στο επίπεδο των κόμβων, έχουμε αυτούς που γνωρίζουν την θέση τους(αυτοί λέγονται συνήθως Anchor Nodes) αλλά και αυτούς που δεν γνωρίζουν(Unknown/dumb Nodes).

Οι κόμβοι άγκυρας(Anchor Nodes) συνήθως διαθέτουν εξάρτημα GPS και λειτουργούν ως σημείο αναφοράς σε ένα δίκτυο, με στόχο να βοηθήσει τον εντοπισμό άλλων κόμβων, που αξιοποιούν διαφορετικά "μέσα" όπως αλγορίθμους για τον σκοπό αυτό. Βέβαια, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι η ύπαρξη ενός εξαρτήματος GPS

εξαρτάται από παράγοντες όπως αλγόριθμους (συνεργασίας/collaborative και range-free) οι οποίοι χρησιμοποιούνε άλλες μεθόδους(αποστάσεις και γωνίες) και κόστος.

Στα WSN, με παράδειγμα της λήψης και μετάδοσης λεπτομερειών ενός φαινομένου που συμβαίνει στον κεντρικό κόμβο, αν δεν γνωρίζουμε την τοποθεσία ενός κόμβου που μεταφέρει τα δεδομένα, δεν είναι δυνατόν να επιτύχουμε την εφαρμογή των WSN. Για αυτόν τον λόγο, η γνώση της θέσης ενός κόμβου έχει μεγάλη επίδραση στην δράση του δικτύου. Έτσι, λαμβάνουμε υπόψιν κριτήρια σαν την ακρίβεια (precision), των αριθμό κόμβων(αγκύρωσης/Anchor και αγνώστων/Unknown κόμβων), τον χώρο και τον εξοπλισμό(δηλαδή εμβέλεια κτλ.), αναλύοντας την διαδικασία του εντοπισμού σε 3 μέρη.

- Υπολογισμό απόστασης/γωνίας(range/angle – based).
- Υπολογισμός τοποθεσίας.
- Αλγόριθμοι εντοπισμού.

2.2.1 Μέτρηση Γωνίας – Απόστασης

Ο υπολογισμός της απόστασης ή της γωνίας γίνεται μεταξύ δυο κόμβων μέσα στο εκάστοτε δίκτυο, οι οποίοι αξιοποιούνται για τον εντοπισμό. Για τέτοιες μετρήσεις διαθέτουμε μεθόδους που χρησιμοποιούνται και τώρα, όπως τον χρόνο άφιξης(ToA), την διαφορά χρόνου άφιξης(TDoA) και γωνίας άφιξης(AoA). Μερικές από αυτές τις μεθόδους μέτρησης απόστασης-γωνίας θα τις αναλύσουμε περαιτέρω σε διαφορετική ενότητα.

2.2.2 Υπολογισμός τοποθεσίας – Locality

Στον εντοπισμό ενός αγνώστου κόμβου (unknown/dumb node) έχουμε την επιλογή να αξιοποιήσουμε τις πληροφορίες των μεθόδων απόστασης/γωνίας που αναφέραμε παραπάνω σε συνδυασμό με τα δεδομένα που μας δίνονται από τους κόμβους αγκύρωσης (Anchor Nodes). Εναλλακτικές τεχνικές είναι τριπλής/πολλαπλής

διαστολής και γωνίασης (Tri-/Multi Lateration και Angulation). Στην περίπτωση της διαστολής, κάνουμε χρήση 3 ή περισσότερων κόμβων για την εκτίμηση της τοποθεσίας. Αντιθέτως, στην μέθοδο της γωνίασης επεμβαίνουν οι νόμοι συνημίτονων και ημιτόνων στο θέμα του εντοπισμού, εφόσον μιλάμε για γωνίες.

3 Ασύρματα δίκτυα και διαφορές

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα κάνουμε μια μικρή εισαγωγή στην ιστορία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των μεθόδων εντοπισμού στις αρχές της εμφάνισής τους. Έπειτα, θα κάνουμε μια εισαγωγή στις κατηγορίες των ασύρματων δικτύων, συμπεριλαμβανομένου και των WSN. Θα πραγματοποιηθεί μια έμμεση σύγκριση μεταξύ κατηγοριών δικτύων με βάσει την χρήση υποδομών, και συγκεκριμένα μεταξύ δομημένων και αδόμητων δικτύων, καθώς και τις μοναδικές προκλήσεις που συναντάμε σε θέμα εντοπισμού.

3.1 Ιστορική αναδρομή

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN είχαν αρχικά εμφανισθεί στις αρχές του 1950 σε μορφή που είναι παρόμοια με αυτήν των σημερινών. Βέβαια, η πρώτη αυτή εμφάνιση είχε αναπτυχθεί από το αμερικανικό στρατό (United States Military) υπό την ονομασία “SOSUS” (ηχητικό σύστημα παρακολούθησης) για τον εντοπισμό εχθρών που βρίσκονταν κάτω από την θάλασσα. Αυτό το δίκτυο αισθητήρων έκανε χρήση καταδυόμενων ακουστικών αισθητήρων, γνωστών και ως υδρόφωνων (hydrophones), κατανεμημένα στον Ατλαντικό και τον Ειρηνικό Ωκεανό.

Αν και δεν αναφερόμαστε άμεσα στον όρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, οι πρώτες εμφανίσεις μεθόδων εντοπισμού ξεκίνησαν στον τομέα της ρομποτικής. Στην περίοδο του 1970-1980, οι ερευνητές προσπαθούσαν να βρουν την τοποθεσία Ρομπότ μέσα σε ένα περιβάλλον, έχοντας τεχνικές σαν την Οδομετρία (Odometry) και άλλες που βασίζονται στο ίδιο το περιβάλλον (landmark-based).

Ύστερα, ορόσημο υπήρξε η ανάπτυξη της μεθόδου EFK (Extended-Kalman-Filter), που απέκτησε φήμη στην δεκαετία του 1990 και αφορούσε επίσης τον τομέα της ρομποτικής. Παρόμοιο συμβάντα ακολούθησαν με την μέθοδο SLAM (Simultaneous – Localization – And - Mapping) στην περίοδο του 1990-2000 που εξηγούσε την ταυτόχρονη δημιουργία χάρτη και τον εντοπισμό της θέσης τους μέσα σε αυτόν.

Στην δεκαετία του 1990 αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι–τεχνικές και για τον εντοπισμό των ασύρματων δικτύων αισθητήρων WSN, με την αρχική εισαγωγή των αλγορίθμων

υπολογισμού απόστασης-γωνίας (Range/angle based). Αλγόριθμοι όπως TDOA, TOA και τριμερισμού (tri-lateration) χρησιμοποιήθηκαν εκείνη την περίοδο σε συνδυασμό με τους αλγορίθμους ρομποτικού εντοπισμού σε ένα από τα γνωστά έργα της εποχής, το “Smart Dust Project”.

Βάση του έργου αυτού αποτελούσε η ποικιλία συστημάτων αισθητήρων, ρομποτικού υλικού και άλλων μηχανισμών (ή σε συντομία, MEMS), ικανά να εντοπίζουν φως, υψηλές πιέσεις, χημικά κ.α. Τα συστήματα αυτά, συνδέονταν ασύρματα μεταδίδοντας δεδομένα σε κατάλληλα ψηφιακά συστήματα υπολογιστών και έχοντας έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών κυρίως στον στρατιωτικό τομέα. Η παρουσίαση του στην AVS κέντρισε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, κάτι που μαζί με διάφορα έργα επηρέασε επίσης την επιρροή των WSN, καθώς έγινε χρήση κοινών μεθόδων εντοπισμού και αρχιτεκτονικής. Μερικές απ’ αυτές ήταν:

➤ Range-based Localization:

- RSSI (Received–Signal – Strength–Indicator).
- TDOA (Time Difference of Arrival).
- TOA (Time-of-Arrival/Flight Time).

➤ Range-Free localization:

- Dv–Hop.

➤ Acoustic Localization.

3.2 Κατηγορίες ασύρματων δικτύων

3.2.1 Δομημένα δίκτυα

Η κατηγορία των δομημένων δικτύων είναι από τις βασικότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιημένες. Η αρχιτεκτονική τους προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά τους, αλλά και επηρεάζεται από πολλαπλούς παράγοντες, σαν το επίπεδο επεκτασιμότητας, ασφάλειας (ή αλλιώς και εμπιστοσύνης) και στην επιθυμητή αντοχή σε αποτυχίες (σφάλματα) και επιθέσεις. Η αρχιτεκτονική τους μπορεί να είναι Συγκεντρωτική (Centralized), Αποκεντρωμένη (Decentralized) ή και Υβριδική (Hybrid), δηλαδή ένας συνδυασμός και των δύο ομάδων. Τα ασύρματα δομημένα δίκτυα βασίζονται σε ήδη υπάρχουσες υποδομές, κάτι που αλλάζει πολλά χαρακτηριστικά τους σε σύγκριση με τα αδόμητα δίκτυα και τα δίκτυα WSN. Μερικές από τις πιο βασικές ομάδες δομημένων δικτύων είναι:

- WAN (Wide—Area—Network).
- LAN (Local—Area—Network).
- MAN (Metropolitan—Area—Network).
- CAN (Campus—Area—Network).
- PAN (Personal—Area—Network).

Πέρα των διαφορών τους σε θέμα χρήσης, εξοπλισμού και δυνατοτήτων οι ομάδες αυτές μοιράζονται επίσης αρκετά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Η διόρθωση σφαλμάτων σε αυτά τα δίκτυα είναι πιο εύκολη, καθώς με τον εντοπισμό ενός προβλήματος, ένα ορισμένο τμήμα του δικτύου (όχι ολόκληρο) απομονώνεται για την επίλυσή του. Ο σχεδιασμός του δικτύου εμπεριέχει ορισμένες τεχνικές και μεθόδους δρομολόγησης όπως πρωτόκολλο RIP (Routing Information Protocol) και BGP(Border Gateway Protocol) που υπαγορεύουν την κατεύθυνση των δεδομένων.

Η επεκτασιμότητα είναι εξίσου σημαντική στα δομημένα δίκτυα, την στιγμή που οι υπάρχουσες υποδομές μας βοηθάνε στην διαχείριση των δικτύων αυτών. Παράλληλα, η πρόσθεση νέων συσκευών και η επεκτασιμότητα του δικτύου είναι πιο ομαλή σε αντίθεση με τα αδόμητα λόγω της συγκεντρωτικής τους αρχιτεκτονική, τον εντοπισμό κόμβων και τον προ-καθορισμένο ρόλο τους μέσα στο δίκτυο. Βέβαια, θα ήταν λάθος να πούμε ότι είναι πάντα έτσι, καθώς ζητήματα σαν τον εντοπισμό στα αδόμητα γίνεται να επιλυθεί με εναλλακτικούς τρόπους.

Βέβαια, σε πυκνά δομημένα δίκτυα σαν το WAN, LAN και το MAN που συναντάμε κυρίως στις πόλεις, αντιμετωπίζουμε προκλήσεις σχετικά με τον εντοπισμό. Τα διάφορα εμπόδια και παρεμβολές είναι ένα πρώτο παράδειγμα δυσκολίας στο θέμα του

εντοπισμού, εφόσον δημιουργείται ένας συμβιβασμός στην ακρίβεια από τα σήματαδιαφόρων συσκευών (τηλέφωνα, ραδιόφωνα κτλ.) μέχρι και τα κτίρια (οικοδομικά υλικά και σχεδίαση).

Η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων εντοπισμού είναι ένα πρόβλημα από μόνο του, καθώς επηρεάζεται από το κόστος και άλλους περιορισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί πολύπλοκοι αλγόριθμοι απαιτούν τεράστιους υπολογιστικούς πόρους, κάτι που δεν είναι επιτρεπτό να εκπληρωθεί πάντοτε με τους εκάστοτε πόρους. Σε συνδυασμό με το παραπάνω, ο περιορισμός του φυσικού υλικού (hardware), εμποδίζει την πλήρη (ή αποτρέπει εντελώς) αξιοποίηση διαφόρων μεθόδων εντοπισμού που ενσωματώνονται στους διαφόρους αισθητήρες-μηχανισμούς, αφήνοντάς μας με λιγότερες διαθέσιμες επιλογές.

Αλγόριθμοι βασισμένη στην απόσταση (Range-Based) σαν τον TDOA είναι καλή επιλογή για τον εντοπισμό σε πυκνά δίκτυα, έχοντας παράλληλα καλύτερη αντοχή σε παρεμβολές σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους (RSS βασιζόμενοι) και κρατώντας τα αρνητικά θέματα πολυπλοκότητας σχετικά χαμηλά.

3.2.2 Αδόμητα δίκτυα – Ad-hoc networks

Όπως αναφέραμε, ένα δίκτυο Ad-Hoc (αλλιώς, δίκτυο κατά – απαίτηση) είναι ένα αδόμητης μορφής δίκτυο το οποίο όπως ίσως μπορούμε να καταλάβουμε, δεν βασίζεται σε κάποια ήδη υπάρχουσα υποδομή. Όταν εννοούμε υποδομή, αναφερόμαστε σε συσκευές όπως τους δρομολογητές, σημεία πρόσβασης κ.α. Επίσης είπαμε σε προηγούμενη ενότητα, πως ο κάθε κόμβος σε ένα τέτοιο δίκτυο συμμετέχει στην δρομολόγηση πακέτων πληροφορίας, κατέχοντας έναν δυναμικό μηχανισμό προώθησης. Επιπλέον, τα δίκτυα αυτά είναι ικανά να αξιοποιήσουν και το φαινόμενο της υπερχειλίσσης (overflow) για την μετάδοση των δεδομένων.

Ένα διάσημο παράδειγμα αδόμητων δικτύων που παρουσιάστηκε γύρω στο 1998 είναι το “Bluetooth”. Βασικό στοιχείο του αποτελούσε η χρήση ραδιοκυμάτων για την μετάδοση δεδομένων σε κοντινές αποστάσεις και ο αριθμός των 8 συσκευών, που αποτελούσε ένα μικρό δίκτυο γνωστό και ως “Piconet”.

Τα αδόμητα δίκτυα, πέρα των τυπικών δικτύων αισθητήρων σαν το WSN, διαθέτει και μια ειδική περίπτωση, των αδόμητων κινητών δικτύων αισθητήρων (ή αλλιώς

MANS). Στα MANS, οι αισθητήρες έχουν και την ικανότητα να κινούνται, με λίγα λόγια

την ευκαιρία κινητής επικοινωνίας που εφαρμόζοντας ορισμένους μηχανισμού, μπορούν να μεταδώσουν τα δεδομένα.

Πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι εξαιρετικά απαραίτητα για την σύνδεση κόμβων και αποστολή πληροφορίας. Το πρωτόκολλο DSR (Dynamic Source Routing) αποτελεί γνωστή λύση δρομολόγησης στα κινητά Ad-hoc δίκτυα, που περιλαμβάνει την πλήρη διαδρομή πηγής-προορισμού στην κεφαλίδα του πακέτου (header packet).

Ωστόσο, πέρα της ευελιξίας που προσφέρει σαν πρωτόκολλο, συντελεί και σε μεγαλύτερα πακέτα. Εναλλακτική επιλογή μπορεί να αποτελέσει και το πρωτόκολλο AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) που αντιθέτως καθιερώνει ένα μονοπάτι όταν είναι αναγκαίο. Περιληπτικά, κρατάει ένα είδους πίνακα με τις γνωστές αποστάσεις σε όλους τους κόμβους, όπου στην περίπτωση που κάποιος κόμβος πρέπει να μεταδώσει δεδομένα σ' έναν προορισμό και χρειάζεται μια διαδρομή, ξεκινά μια διαδικασία “ανακάλυψης” για τον επόμενο κόμβο που οδηγεί στον προορισμό.

Αυτής της φύσης δίκτυα χαρακτηρίζονται από “decentralized” επικοινωνία τους που οφείλεται στην έλλειψη υποδομών όπως αναφέραμε προηγουμένως. Η μέθοδος μετάδοσης της πληροφορίας συντελείται από το P2P (Peer-To-Peer). Η P2P δεν βασίζεται σε κάποια κεντρική οντότητα, επιτρέποντας στους κόμβους που έχουν ίδια αναγνωσιμότητα να μιλάνε απευθείας μεταξύ τους, εφαρμόζοντας τεχνική “Anchor-free” μειώνοντας και το λεγόμενο “Network Traffic”.

Παράλληλα με αυτό, η P2P αξιοποιείται και ως δυναμική τοπολογία μαζί με την τοπολογία Mesh στα ad-hoc δίκτυα, την στιγμή που η γενική δομή του αλλάζει (δυναμικά) σε θέμα τοποθεσίας, σφαλμάτων και ενέργειας όταν σε κινούμενα δίκτυα (mobile ad-hoc networks) οι κόμβοι εισέρχονται ή εξέρχονται οποιαδήποτε στιγμή.

Σε αντίθεση με τα WSN, εδώ το ενεργό Duty-Cycle είναι αρκετά υψηλότερο (των WSN φτάνει μέγιστο 1%). Η διαρκής λειτουργία τους υποστηρίζεται με την δυνατότητα επαναφόρτισης μαζί και με την δυνατή αντικατάσταση των μπαταριών.

Στην μετάδοση (αιτήσεις δηλαδή) τα δίκτυα ad-hoc διαθέτουν broadcast (πολύ-εκπομπή) και μέθοδο “hop by hop”. Την πρώτη την συναντάμε και στα WSN, ενώ για την hop by hop μπορούμε να την αναλύσουμε με 3 μικρά βήματα:

- **First Hop:** Τα δεδομένα που μεταδίδονται από την πηγή σε πρώτη γειτονική συσκευή, την καθιστούν ως “First-Hop” και ως συνέχεια, η συσκευή θα μεταδώσει την πληροφορία στην επόμενη(αναμεταδότης).

- **Intermediate Hops:** Σε αυτό το στάδιο, μιλάμε για όλες τις ενδιάμεσες συσκευές που μεσολαβούν μεταξύ πηγής-προορισμού. Κάθε κόμβος αναμεταδίδει δεδομένα στον αμέσως επόμενο στο μονοπάτι μέχρι η πληροφορία να ταξιδέψει το δίκτυο. (Ο τελικός αριθμός των hop μπορεί να βοηθήσει και στην βελτίωση κατανόησης του δικτύου.)

- **Last Hop to destination:** Εδώ η πληροφορία προσεγγίζει τον τελικό σταθμό που βρίσκεται εντός ακτίνας. Η συσκευή που πραγματοποιεί την τελική μετάδοση, εξυπηρετεί ως last-hop στην μετάδοση.

Στην παραπάνω διαδικασία, οι κόμβοι συνεργάζονται για την διαδρομή που η πληροφορία θα ακολουθήσει προς τον τελικό σταθμό, έχοντας υπόψη μας πως κάθε κόμβος για λόγους επιδόσεων γνωρίζει μονάχα για τους άμεσους “γείτονές” του.

Συγκεκριμένα, είναι χρήσιμο σε κινητά δίκτυα ad-hoc που αντιμετωπίζουν τακτικές τροποποιήσεις στην τοπολογία τους. Τα AODV και DSR πρωτόκολλα βασίζονται στον μηχανισμό (μέσω αιτήσεων για ανακάλυψη μονοπατιού, πακέτο RREQ).

Όπως και τα διαχειριζόμενα δίκτυα, τα αδόμητα δίκτυα έχουν επίσης θέματα περί εντοπισμού. Ιδιαίτερα στα κινητά αδόμητα δίκτυα, όπου η δομή αλλάζει συνεχώς(δυναμικά), η γνώση της θέσης κόμβων έχει την πρώτη και τελευταία προτεραιότητα. Σε αυτές τις περιπτώσεις εκτός από τα απαραίτητα πρωτόκολλα εντοπισμού, διατίθεται και η ανάγκη χρήσης μηχανικής μάθησης που μπορεί να βοηθήσει στην εύρεση της επόμενης θέσης των κόμβων μέσω υπάρχων δεδομένων. Πέρα από αυτό το κομμάτι όμως, η αξιοποίηση αλγορίθμων βασιζόμενοι στο Multi-Hop(και σαν μηχανισμό και σαν αλγόριθμο) εξυπηρετεί στον εντοπισμό κινούμενων κόμβων.

Σε υβριδικά μάλιστα μοντέλα, οι αλγόριθμοι αυτοί υλοποιούν ένα είδος πολλαπλής αναζήτησης(μετάδοση-επεξεργασία δεδομένων από πολλούς ταυτόχρονα κόμβους). Καθώς την στιγμή που αποτελούν και μέρος αλγορίθμων δρομολόγησης, τον καθιστά χρήσιμο και για ογκώδη δίκτυα βάσει ορισμένων μονοπατιών δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, είναι συμβατό και με δίκτυα Mesh (δίκτυα πλέγματος) στα οποία οι κόμβοι συνεργάζονται με σκοπό εκτεταμένης αναζήτησης.

Εκτός αυτού, τεχνικές εντοπισμού σαν το Dv-Hop και Multi-Hop που ανήκουν στην κατηγορία των Range-Free αλγορίθμων, δεν υποχρεώνονται εντελώς σε ακριβείς μετρήσεις. Αντιθέτως αξιοποιούν το λεγόμενο “Hop Count” που υποδεικνύει τον

αριθμό κόμβων που η πληροφορία-αιτήσεις έχουν περάσει, παρέχοντας απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό αποστάσεων κ.α.

3.2.3 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – WSN

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια ακόμη κατηγορία ασύρματων δικτύων που φαίνεται να μοιράζεται μερικές ιδιότητες με τα δίκτυα Ad-hoc. Και τα δύο μπορούν να εφαρμοστούν σε μακρινές περιοχές με έλλειψη υποδομών ή αντίθετα μέσω υβριδικής αρχιτεκτονικής, αλλά με τα WSN να έχουν δυνατότητα παραπάνω συσκευών στην διάθεσή τους προς χρήση. Παρομοίως, τα WSN βασίζονται πάντα σε περιορισμένους πόρους (φυσικό και ψηφιακό υλικό), με αποτέλεσμα να χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην χρήση των συστατικών τους.

Είναι ευρέως γνωστό πως στα δίκτυα αυτά υπάρχει σημαντική ανησυχία σχετικά με την παροχή ενέργειας. Τα περιβάλλοντα στα οποία τοποθετούνται συσκευές σε συνεργασία με τα καιρικά φαινόμενα των πεδίων αυτών αλλά και τα κόστη δεν καθιστούν εύκολες τις επαναφορτιζόμενες λειτουργίες πάντα και για αυτόν λόγο, βασιζόμαστε κυρίως σε χαμηλές πηγές ισχύος όπως τις μπαταρίες. Αυτό όμως επηρεάζει πολύ περισσότερο απ' ό τι φαίνεται. Δηλαδή, οι αλγόριθμοι εντοπισμού και άλλα που εφαρμόζονται εδώ είναι σχεδιασμένοι, ώστε σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας θα προσαρμοστούν προκειμένου να μην καταναλωθεί ενέργεια κάτω από ένα ορισμένο όριο, κάτι που με διαφορετικές επιλογές δεν θα ήταν εφικτό. Για παράδειγμα η οικογένεια πρωτοκόλλου SPIN που προορίζεται για εξοικονόμηση ενέργειας είναι μια συμβατή επιλογή. Συγκεκριμένα το πρωτόκολλο SPIN-EC(Sensor Protocol for Information Negotiation-Energy Conserving) είναι μια έκδοση του SPIN-PP με μια πρόσθετη λειτουργία που έχει να κάνει με την διατήρηση της ενέργειας. Ας το δούμε το SPIN-PP για να καταλάβουμε.

Οι κόμβοι ενός δικτύου με αυτό το πρωτόκολλο δρομολόγησης ανταλλάσσουν μηνύματα:

- Μηνύματα REQ, με τα οποία οι κόμβοι ζητούν πληροφορία που χρειάζονται.
- Μηνύματα DATA, δηλαδή ένας κόμβος λαμβάνει το πακέτο δεδομένων εφόσον βεβαιωθεί η ανάγκη.

Αν τα ενεργειακά επίπεδα δεν είναι ικανοποιητικά, τότε τα μηνύματα REQ δεν θα σταλούν(μπορούν να ληφθούν). Παράλληλα, το SPIN-EC δεν θα επιτρέψει τον χειρισμό των “DATA” πέρα από το καθορισμένο όριο. Σε διαφορετική περίπτωση, ο κόμβος θα λειτουργήσει πλήρες μέσα στο δίκτυο για όποια διαδικασία.

Μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι η λεγόμενη “event-driven” διαμόρφωση λειτουργίας τους, που σημαίνει ότι θέτονται σε ισχύ, συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα σχετικά με γεγονότα ή αλλαγές που συμβαίνουν εκείνη την στιγμή. Αυτός ο μηχανισμός κρατάει και το “duty-cycle”(χρόνο λειτουργίας) χαμηλό, συνεισφέροντας στην διατήρηση των επιπέδων κατανάλωσης ισχύος μεταξύ των συσκευών.

Αναλόγως των στόχων και του κόστους, τα δίκτυα WSN περιλαμβάνουν έναν ειδικό κόμβο που ενεργεί σαν τον κεντρικό σταθμό του δικτύου, τον λεγόμενο Base Station (Σταθμό βάσης). Αυτός ο κόμβος αποτελεί την μονάδα επεξεργασίας λόγω των χαρακτηριστικών σαν την υψηλή μνήμη, την επεξεργαστική ισχύ και ενέργεια σε αντίθεση με τους υπόλοιπους. Επιπρόσθετα, είναι δυνατόν να λειτουργεί και ως gateway (δηλαδή πύλη-κόμβος) με άλλα δίκτυα ή σημείο πρόσβασης για κάποιον χειριστή, κάτι που του επιτρέπει να μοιράζεται δεδομένα τα οποία συλλέγονται από το δικό του μέρος του δικτύου. Βέβαια, πρέπει να έχουμε υπόψιν μας πως η ύπαρξη ενός τέτοιου κόμβου δεν αποτελεί υποχρεωτικά και την καλύτερη επιλογή σε ορισμένης κλίμακας δίκτυα, την στιγμή που επιδρά αναλόγως με την επεκτασιμότητά του, την καθυστέρηση μέσα σ’ αυτό και την απαίτηση για περισσότερη ισχύ.

Σε αυτόν τον σχεδιασμό(δηλαδή του σταθμού βάσης) η ροή των δεδομένων ή αλλιώς data flow είναι κυρίως προς τον σταθμό αυτό, αφήνοντας φυσικά και την αντίστροφη πορεία, καθώς οι κόμβοι αισθητήρων κατέχουν έναν πομποδέκτη για την μεταφορά/λήψη πληροφορίας προς και από τον σταθμό.

Παράλληλα, με την εμφάνιση σταθμού βάσης σε ένα δίκτυο WSN, αξιοποιούμε διαφορετικές μεθόδους επικοινωνίας που χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Single-Hop with clusters
- Multi-Hop with clusters
- Single-Hop with no clusters
- Multi-Hop with no clusters

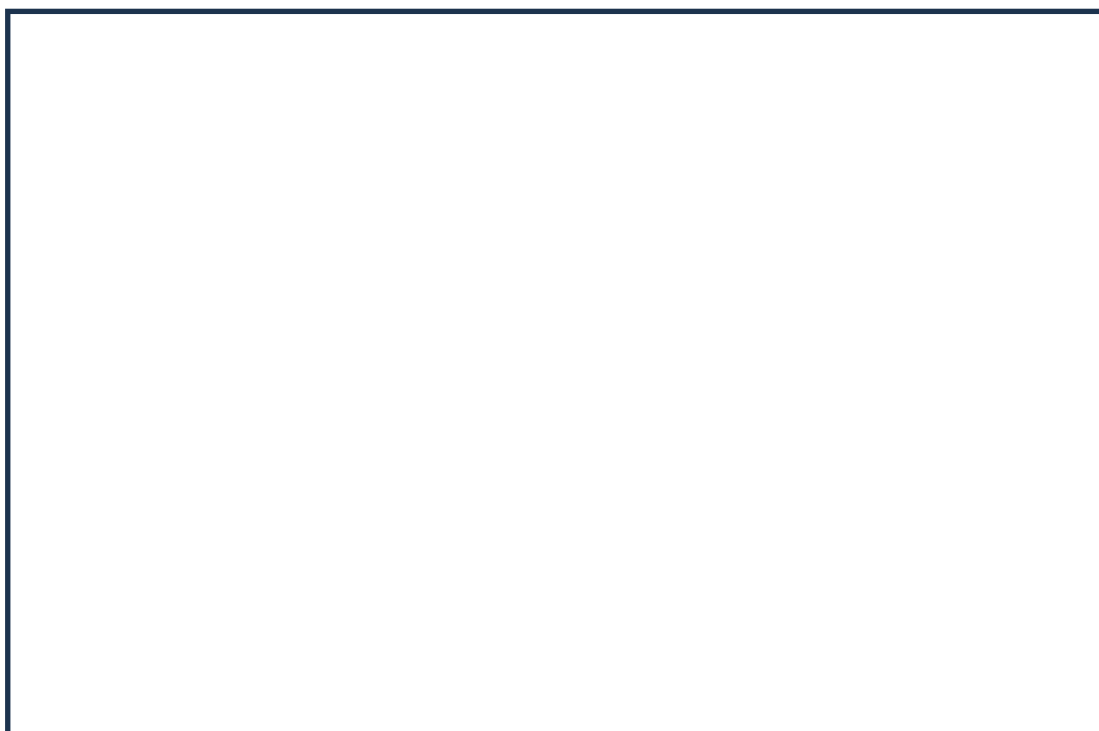


Figure 3: Shimon Y. Nof, Springer Handbook of Automation, 2023

Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούμε μεθόδους “Single-hop”(απλής αναπήδησης, σχήματα a, c) όπου οι κόμβοι βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τον σταθμό, τα δεδομένα πηγαίνουν απευθείας σ’ εκείνον. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν είναι ιδανική για μεγάλης κλίμακας WSN, εξαιτίας την υψηλής κατανάλωσης ενέργειας που οφείλεται στις μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων και δυσκολίας επέκτασης λόγω των πολλαπλών συνδέσεων με τον σταθμό.

Από την άλλη, όταν έχουμε “Multi-Hop”(πολλαπλής αναπήδησης, σχήματα b, d), τα πακέτα μεταφέρονται μέσω πολλαπλών κόμβων μέχρι τον σταθμό βάσης. Έτσι, εξοικονομούμε ενέργεια και περαιτέρω πόρους σε μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων, ιδιαίτερα πρακτικό σε μεγάλης κλίμακας δικτύων που έχουν αραιά διαμοιραζόμενες τις συσκευές τους. Παρόλα αυτά, απαιτούνται κατάλληλα πρωτόκολλα δρομολόγησης σαν το “LEACH”(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) που καθοδηγούν την πληροφορία σωστά μέσα στο δίκτυο.

Τα συμπλέγματα (Clusters) καθιστούν μια τεχνική που συναντάμε κυρίως σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα με σκοπό την μείωση των άμεσα συνδεδεμένων κόμβων με

τον σταθμό βάσης. Λόγος της χρήσης τους είναι η ελάττωση του όγκου πληροφορίας που χρειάζεται να μεταδοθεί (από πολλούς κόμβους ταυτόχρονα) εξυπηρετώντας σε εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και την μακροζωία ενός δικτύου.

Τα δίκτυα WSN στο θέμα του εντοπισμού διαμορφώνονται από μερικά χαρακτηριστικά που αναφέραμε και νωρίτερα σαν το κόστος και την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την δομή τους. Η χρήση των GPS σχεδόν πάντα αποτελεί πολύ ακριβή επιλογή για την επίλυση του εντοπισμού, που μπορεί επίσης να αποτύχει σε περιβάλλοντα όπως πυκνά δάση, υπόγεια εδάφη (που μερικές φορές οι κόμβοι τοποθετούνται) σε εσώκλειστα μέρη. Σε συνδυασμό με αυτό, η χειροκίνητη προσέγγιση είναι επίσης περίπλοκη διαδικασία όσον αφορά τα χρονικά περιθώρια για τον μεγάλο αριθμό συσκευών.

Τα δίκτυα WSN στο θέμα του εντοπισμού διαμορφώνονται από μερικά χαρακτηριστικά που αναφέραμε και νωρίτερα σαν το κόστος και την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την δομή τους. Η χρήση των GPS σχεδόν πάντα αποτελεί πολύ ακριβή επιλογή για την επίλυση του εντοπισμού, που μπορεί επίσης να αποτύχει σε περιβάλλοντα όπως πυκνά δάση, υπόγεια εδάφη (που μερικές φορές οι κόμβοι τοποθετούνται) σε εσώκλειστα μέρη. Σε συνδυασμό με αυτό, η χειροκίνητη προσέγγιση είναι επίσης περίπλοκη διαδικασία όσον αφορά τα χρονικά περιθώρια για τον μεγάλο αριθμό συσκευών.

Η αξιοποίηση κόμβων άγκυρας(Anchor nodes) είναι μια ιδανική μέθοδος διευκόλυνσης του προβλήματος εντοπισμού. Αυτοί οι κόμβοι αρχικά εξυπηρετούν ως σημεία αναφοράς μέσω των καθορισμένων συντεταγμένων τους και με βάση της ισχύς σήματος και χρόνο μεταξύ αυτών και των υπόλοιπων αισθητήριων κόμβων, υπολογίζουν τις αποστάσεις. Tri/multi-lateration(Τριπλή/πολλαπλή διαστολή) τεχνικές γίνεται να εφαρμοστούν για την εύρεση μη γνωστών κόμβων.

Σε ευρύς-κλίμακας δίκτυα WSN, οι απευθείας επικοινωνίες δεν είναι δυνατές, λόγω του όγκου πληροφορίας που μεταφέρεται και πολύ πιθανόν να χαθεί, προκαλώντας τεράστιες ζημιές. Η στρατηγική διαμοίραση των anchor-nodes μέσα στο δίκτυο διευκολύνουν την υιοθέτηση Multi-Hop μεθόδων. Με αυτόν τον τρόπο, ενδιαμέσοι κόμβοι αναμεταδίδουν την πληροφορίες θέσης τους, επιτρέποντας σε άλλους κόμβους να εκτιμήσουν την δικιά τους, ακόμη και όταν δεν βρίσκονται σε άμεση ακτίνα μετάδοσης με τους Anchor-nodes.

To Ad-Hoc Positioning System(APS) (D. Niculescu and B. Nath, Telecommunication Systems, 2003) είναι ένας multi-hop αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στους κόμβους άγκυρας (anchor nodes). Στην εκκίνηση της διαδικασίας του εντοπισμού, ο αριθμός αυτών των διαθέσιμων είναι περιορισμένος, ενώ οι υπόλοιποι δεν είναι σε θέση να λαμβάνουν από άλλους. Οι άμεσοι “γείτονες” των anchor καθορίζουν την απόσταση μεταξύ αυτών με των αγκυρών και τους άλλους κόμβους, και όταν αποκτήσει μια εκτίμηση απο περισσότερους από 3 κόμβους άγκυρας, τότε θα είναι σε θέση να βρουν την θέση τους και να γίνουν οι ίδιοι anchor-nodes. Ο Dv-Hop, ο Dv-Distance και η Ευκλείδεια μέθοδος είναι τρεις τρόποι για την διάδοση που εφαρμόζονται στο παραπάνω σύστημα.

4 Αλγόριθμοι εντοπισμού – Localization algorithms

Κομμάτι συζήτησης αυτού του κεφαλαίου, θα αποτελέσουν οι κατηγορίες αλγορίθμων εντοπισμού. Θα πραγματοποιηθεί μια εισαγωγή στις 2 βασικές προσεγγίσεις εντοπισμού, τις Centralized και την Distributed. Έπειτα, το κύριο θέμα θα είναι οι αλγόριθμοι εντοπισμού της Distributed προσέγγισης που εφαρμόζονται, περιγράφοντας θεμελιώδη στοιχεία για την κατανόησή τους.

4.1 Εισαγωγή

Οι πρόσφατες καινοτομίες στην ασύρματη επικοινωνία και στα συστήματα MEM IC(δηλαδή μικρό-ηλεκτρομηχανικά συστήματα) συνεισφέρανε στην δημιουργία μεγάλων δικτύων ασύρματων αισθητήρων(WSN) για εφαρμογές, όπως συστήματα παρακολούθησης. Τα WSN αναμένεται να γίνουν η λύση σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, σαν τον εντοπισμό στρατιωτικών στόχων, επίβλεψη φυσικών καταστροφών και ιατρικών ασθενών, λόγω της βασικής τους λειτουργία (δηλαδή παρακολούθηση φαινομένων). Σε μερικές από αυτές τις εφαρμογές που αναφέραμε, η επίγνωση θέσης είναι απόλυτα κρίσιμη. Πράγματι, χωρίς την επίγνωση τοποθεσίας των κόμβων αισθητήρων(sensor node) σε ένα δίκτυο, οι πληροφορίες που συλλέγονται είναι περιττές.

Η έννοια του εντοπισμού μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους, σαν δέκτες GPS. Βέβαια, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι δέκτες αυτοί δεν είναι και η καλύτερη λύση, καθώς το κόστος, η κατανάλωση ενέργειας και ο περιορισμός τους σε κάθε περιβάλλον αυξάνεται. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, οι δέκτες αυτοί δεν συνιστώνται προς χρήση σε πυκνά δάση ή εσωτερικούς χώρους(όπως σπηλιές).

Εναλλακτικά, μπορούμε να βασιστούμε στο λεγόμενο “Self-Localization”(αυτό-εντοπισμό), όπου οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν διάφορα πρωτόκολλα εντοπισμού για την εκτίμηση της τοποθεσίας τους. Κοινό χαρακτηριστικό αυτών των πρωτοκόλλων είναι: η αξιοποίηση από ειδικούς κόμβους που λέγονται κόμβοι

σήματος (beacon nodes ή anchor nodes), οι οποίοι έχουν επίγνωση της δικιάς τους θέσης. Αυτοί παρέχουν δεδομένα περί τοποθεσίας, σε μορφή μηνυμάτων στους μη-Anchor nodes (αλλιώς και dumb/unknown nodes). Έτσι, με κατάλληλες τεχνικές, οι μη-Anchor nodes αξιοποιούν τις πληροφορίες θέσεων των beacon nodes για την εκτίμηση των δικών τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Figure 4: Node localization (Kaur Amanpreet, Padam Kumar, and Govind P. Gupta, 2010)

Αρκετές έρευνες, οι οποίες μιλάνε για το θέμα του εντοπισμού, πολλοί επιστήμονες αναγνωρίζουν διαφορετικούς τρόπους ταξινόμησης αλγορίθμων εντοπισμού για τα δίκτυα αισθητήρων μέσω κριτηρίων όπως:

- Εξάρτηση στο εύρος (δηλαδή αλγόριθμοι, Range-Free/Based).
- Υπολογισμός κατανεμημένης ή κεντρικής θέσης (Distributed/centralized localization).
- Υποστήριξη (μερική ή πλήρης) ή μη από είδη υποδομών (anchor-based/free localization).

Στην συνέχεια, θα μιλήσουμε αναλυτικότερα για τις κατηγορίες αλγορίθμων εντοπισμού, εστιάζοντας στις κυριότερες απ' αυτές.

4.2 Κατηγορίες αλγορίθμων – Localization

Μέχρι τώρα, έχουμε μιλήσει για γνωστές μεθόδους υπολογισμού θέσης σαν την “Trilateration”, “Triangulation” αλλά και για δύο από τις κατηγορίες αλγορίθμων εντοπισμού, την range-Free και range-based. Προτού προχωρήσουμε με αυτές, θα πρέπει να ξεκινήσουμε από την αρχή για κατανοήσουμε την δομή των αλγορίθμων εντοπισμού.



Figure 5: Classification of Localization in WSN
(S. Sivasakthiselvan and V. Nagarajan, 2020, India)

Όπως αναφέραμε προηγουμένως οι μέθοδοι Trilateration και Triangulation ανήκουν στις τεχνικές υπολογισμού θέσης και όχι άμεσα στους αλγόριθμους. Σύμφωνα με το σχήμα, διαθέτουμε 2 θεμελιώδεις κατηγορίες αλγορίθμων εντοπισμού, την Centralized και την Distributed.

4.2.1 Centralized localization

Στην κατηγορία των Centralized μεθόδων περιλαμβάνονται το GPS που έχει προαναφερθεί, αλλά και αλγόριθμοι που δεν αναφέρονται στο παραπάνω σχήμα, όπως:

- To SDP (Semi-Definite-Programming).
- To MDS-MAP (Multi-Dimensional Scaling-Mobile Assisted Programming).

Το μοντέλο αυτής της κατηγορίας βασίζεται στην συγκέντρωση των συλλεγόμενων μετρήσεων(δηλαδή δεδομένων προς υπολογισμό) στον σταθμό βάσης (base Stations/Sink node). Εκεί γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί, οπότε στην συνέχεια μεταδίδονται προς τον αντίθετο προορισμό, με άλλα λόγια στους κόμβους.

Η διαδικασία αυτή όμως προκαλεί μεγάλες καθυστερήσεις στο δίκτυο, συνοδευόμενη με αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και εύρους ζώνης(bandwidth). Αν και εξαλείφεται η ανάγκη υπολογισμού αυτών των μετρήσεων στους ίδιους τους κόμβους (λόγω της μικρής ισχύς τους), το μειονέκτημά ενός τέτοιου σχεδίου είναι ο μη-βέλτιστος τρόπος πρόσβασης στα δεδομένα αλλά και της επεκτασιμότητας. Παρόλα αυτά, καθίσταται πιο προσαρμόσιμη σε μικρής κλίμακας δίκτυα.

4.2.2 Distributed Localization

Το μοντέλο αυτών των αλγορίθμων είναι υπολογιστικά αποτελεσματικό και εύκολα εφαρμόσιμο για μεγάλης κλίμακας δικτύων WSN. Σε δίκτυα που έχουμε υιοθετήσει μια πιο κεντρική αρχιτεκτονική(Centralized architecture), οι αλγόριθμοι αυτοί δεν είναι το

ίδιο παραγωγικοί όταν τα δεδομένα πρέπει να συλλεχτούν και να επεξεργαστούν κεντρικά(Centrally) όπως σε ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου δικτύου χωρίς τις απαραίτητες προσαρμογές.

Η κατηγορία αυτή των αλγορίθμων έχει το μειονέκτημα της πιο πολύπλοκης σχεδίασής τους, που κατά κύριο λόγο οφείλεται στην πολυπλοκότητα μεταξύ της τοπικής(local) και της πιο ευρείας(global) συμπεριφοράς τους. Αυτό γίνεται, καθώς ένας distributed αλγόριθμος δεν εκτελεί τα καθήκοντα του το ίδιο καλά σε global επίπεδο, σε αντίθεση με την εφαρμογή του σε ένα πιο τοπικό σενάριο. Παρόλο που αυτού του είδους οι αλγόριθμοι είναι πιο αποτελεσματικοί σε θέμα εξοικονόμησης ενέργειας (οι Centralized έχουν μικρότερο ποσοστό λόγω πολλών μεταδόσεων) δεν προσεγγίζουν παρόμοιες επιδόσεις όσον αφορά την ακρίβεια εντοπισμού. Εδώ είναι αναγκαία η πολλαπλή ανταλλαγή πληροφοριών(δηλαδή επαναλήψεις) στους κόμβους για να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση. Παρακάτω δίνεται ένα σχήμα, στο οποίο φαίνονται ξεκάθαρα οι κύριες διαφορές ανάμεσα σε Centralized και Distributed μεθόδους εντοπισμού.

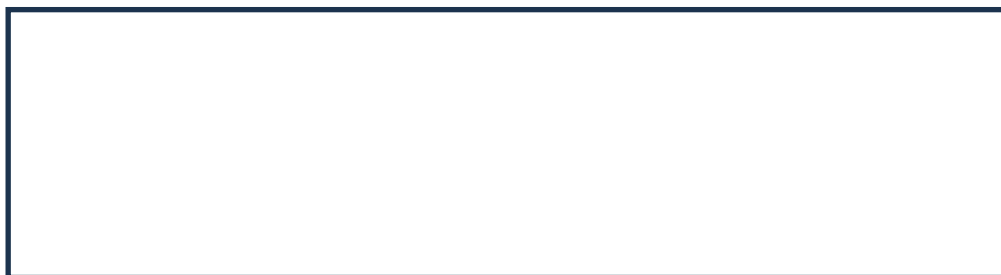


Figure 6: Main difference between centralized and distributed techniques.

Τα WSN, προσφέρουν 3 επίπεδα, έχοντας την εκτίμηση τοποθεσίας, την τοποθέτηση των κόμβων και τον έλεγχο πυκνότητάς τους. Ανεξαρτήτως αν είναι Centralized ή distributed, η διαδικασία εντοπισμού θα ακολουθεί αρχικά τον υπολογισμό της απόστασης και τον προσδιορισμό της τοποθεσίας.

Στην συνέχεια, θα κάνουμε μια βασική ανάλυση των κατηγοριών αλγορίθμων εντοπισμού που υπόκεινται υπό την κατηγορία των distributed σύμφωνα με το σχήμα 5.

- Proximity-Based
- Angle-Based

- Range-Free
- Range-Based

Proximity-Based techniques

Η κατηγορία των proximity-based αλγορίθμων χρησιμοποιείται για να καθορίσει την τοποθεσία ενός αντικειμένου(όσο για τα WSN, εννοούμε σταθμό) με βάση κάποια γνωστά σημεία. Αυτές οι τεχνικές επιτυγχάνονται μέσω γεωμετρικών σχέσεων μεταξύ αισθητήριων κόμβων άγκυρας και μη. Εδώ, τα WSN περιγράφεται ως ένα γράφημα που έχει υποδίκτυα κόμβων με γνωστές θέσεις, οι οποίοι κόμβοι αξιοποιούνται για την εκτίμηση θέσεων των υπολοίπων στο δίκτυο. Οι μετρήσεις αυτές υπολογίζονται, χρησιμοποιώντας είτε πίνακες απόστασης είτε πίνακες γειτνίασης.

Με αυτόν τον τρόπο, η εκτίμηση της τοποθεσίας των κόμβων γίνεται με σχετικά δεκτή ακρίβεια, χωρίς επιπρόσθετα έξοδα προς εξοπλισμό. Μπορούμε να αναφερθούμε σε αυτούς και ως range-free μεθόδους. Από τις μετρήσεις εγγύτητας (proximity), μας παρέχονται ενδείξεις για το εάν δυο συσκευές είναι συνδεδεμένες ή βρίσκονται εντός εμβέλειας. Σύμφωνα με τους ερευνητές Brida, Duha and Krasnovsky[2], ο βαθμός εγγύτητας(proximity factor) αποφασίζεται από την ικανότητα του δέκτη να αποδιαμορφώσει και να αποκρυπτογραφήσει το πακέτο που στάλθηκε από τον πομπό.

Η κατηγορία αυτή συναντιέται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους (σπηλιές, ορυχεία κτλ.). Ένα παράδειγμα είναι η χρήση μιας ειδικής μορφής του Bluetooth, το BLE (Bluetooth Low Energy). Αυτή η προσέγγιση κάνει χρήση των τηλεπικοινωνιών με εξοπλισμό που διαθέτει αυτή την τεχνολογία, προκειμένου να σιγουρευτούν επαρκή δεδομένα για τον εντοπισμό. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή “έξυπνων εφαρμογών” σε παρόμοιες καταστάσεις, εκπληρώνοντας τις ατομικές ανάγκες σύμφωνα με τις προδιαγραφές ορισμένων έργων.

Angle-based techniques

Σε αυτήν την κατηγορία, η εκτίμηση θέσεων γίνεται με βάσει των κόμβων άγκυρας (anchors) και χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις γωνιών που κάθε τοπικός κόμβος έχει αποκτήσει. Η κατηγορία αυτή αξιοποιεί τα λαμβανόμενα σήματα γωνίας, διαφορετικά και Angle-of-Arrival (AOA) για την αναγνώριση αποστάσεων. Αυτό απαιτεί και χρήση ειδικών κεραιών που έχουν μεγαλύτερο κόστος, λόγος που τους συναντάμε κυρίως σε σταθμούς βάσης (Base Stations). Παρακάτω, φαίνεται ένα σχήμα που παρουσιάζει τον εντοπισμό αγνώστων κόμβων σύμφωνα με το AOA.

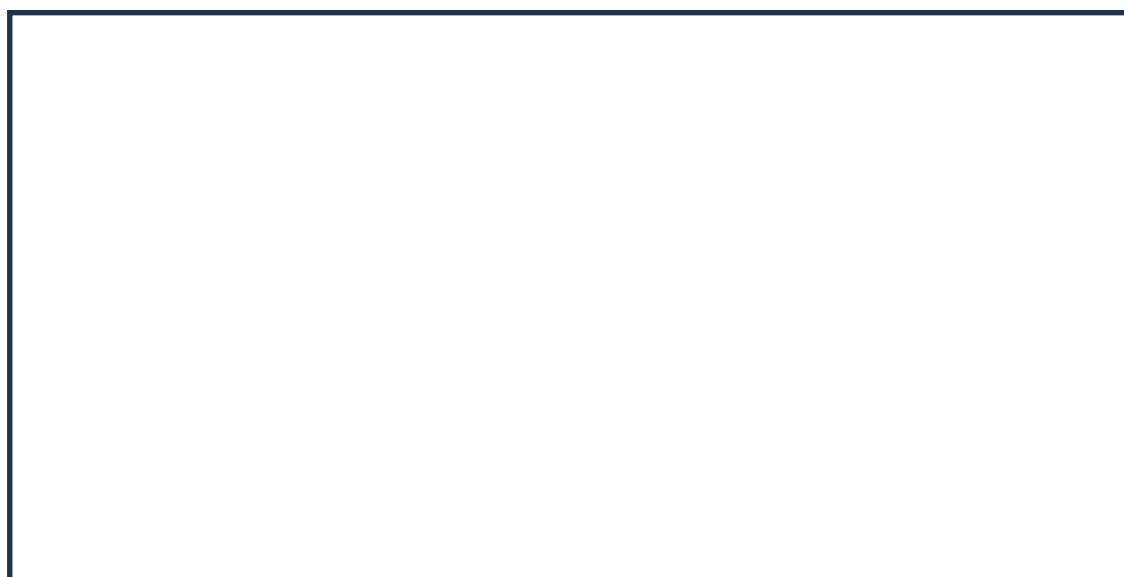


Figure 7: AOA Localization of unknown nodes.
(S. Sivasakthiselvan and V. Nagarajan, 2020, India)

Ωστόσο, ο εξοπλισμός του AOA τείνει να είναι πιο ογκώδεις και πιο ακριβός από άλλων μεθόδων σαν της TDOA.

Η ακρίβεια του AOA περιορίζεται από την τοποθέτηση των κεραιών(δηλαδή της κατεύθυνσή τους), της πιθανής σκίασης και των αντανάκλασεων πολλαπλών σημάτων. Οι εκτιμήσεις του βασίζονται στην απευθείας “LOS”(Line of Sight) μεταξύ πομπού-δέκτη. Εδώ έχουμε οι δύο στρατηγικές που ακολουθούμε στο AOA:

Beam forming: Όπου η κατεύθυνση του πομπού συσχετίζεται με την κατεύθυνση, μέσω της οποίας η μέγιστη ισχύ σήματος λαμβάνεται.

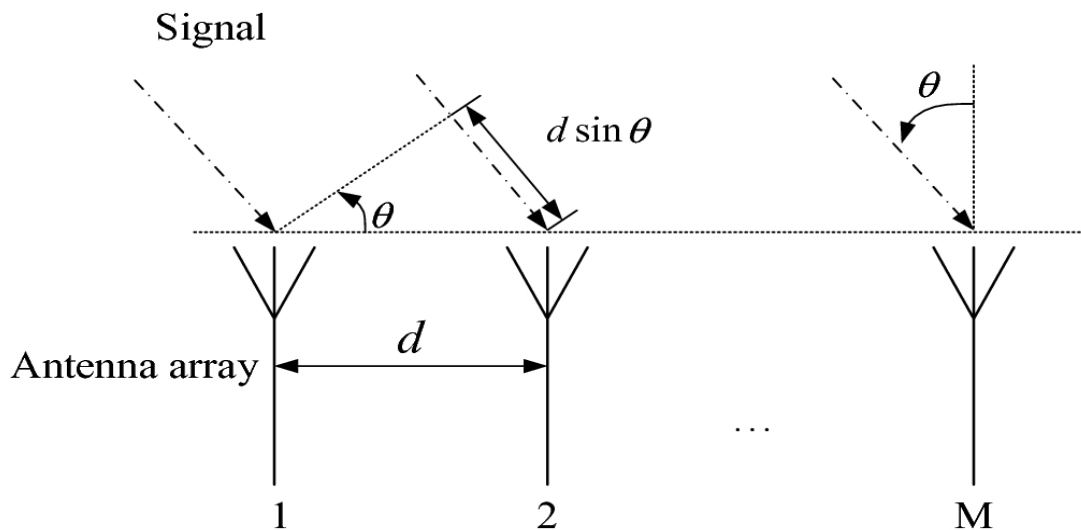


Figure 8: Estimations of angle at antenna array.

(Guoqiang, M., B. Fidan, USA, 2009)

Αυτό γίνεται με την περιστροφή των κεραιών του δέκτη. Η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων εκτιμάται απ’ την ευαισθησία του δέκτη και την απόσταση της δέσμης.

Phase Interferometry: Οι μετρήσεις του AOA μπορούν να βρεθούν από μετρήσεις διαφοράς φάσης. Για μια τέτοια τεχνική, χρειαζόμαστε μια ευρύτερη κεραία λήψης καθώς και συστοιχία κεραιών. Στην περίπτωση που ο πομπός είναι απομακρυσμένος απ’ τις κεραίες, το διάστημα R_k από την εκάστοτε κεραία(έστω n -νιοστή κεραία), προσεγγίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$R_k \approx R_{0 \rightarrow n} * d * \cos(\theta)$$

Όπου το R_0 αποτελεί την απόσταση ανάμεσα με τον πομπό και $0 \rightarrow n$ -νιοστής κεραίας, την προ-καθορισμένη απόσταση μεταξύ σταθμών d και το θ , ο προσανατολισμός του πομπού. Το σήμα του αποστολέα που λαμβάνεται, παράγει διαφορά φάσης που δίνεται από $2\pi \cdot \frac{d \cos(\theta)}{\lambda}$, με το λ να δείχνει το μήκος κύματος από το σήμα του πομπού.

Range – Based techniques

Αυτοί οι αλγόριθμοι εντοπισμού βασίζονται σε τεχνικές όπως το RSSI(received-signal-strength-indicator), ραδιοφωνικά και υπέρηχα σήματα και των τεχνικών που πρόκειται να μιλήσουμε σε λίγο (TDOA, TOA κτλ.) που πραγματοποιούνται στους κόμβους. Οι τεχνικές αυτές συνήθως επιτυγχάνουν υψηλά ποσοστά ακριβείας όσον αφορά τον εντοπισμό κόμβων, καθώς υπολογίζουν την ακριβή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη τους γεωμετρικούς παράγοντες (όπως TOA αλλιώς Time Of Arrival και RSSI). Ωστόσο, οι μετρήσεις αυτές (γνωστές και ως *ranges*) παρουσιάζουν ιδιαίτερες ευαισθησίες σε σφάλματα, δηλαδή ανακρίβειες. Για αυτόν τον εξής λόγο, οι range-based αλγόριθμοι συχνά βασίζονται στην χρήση πρόσθετου ειδικευμένου εξοπλισμού, καταλήγοντας σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και προϋπολογισμού μέσω από αυτού.

Τα αποτελέσματά τους φυσικά, επηρεάζονται ή μάλλον υπόκεινται στα ενδιάμεσα μέσα που αξιοποιούνται και το περιβάλλον στο οποίο τα εγκαθιστάμε. Μερικές από τις πιο συχνά εφαρμοσμένες μεθόδους αυτής της κατηγορίας είναι η TDOA, TOA και RSSI.

➤ RSSI

Σε αυτή την μέθοδο, μελετάμε την απόσταση μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη βασιζόμενοι στην ισχύ του σήματος, το οποίο λαμβάνουμε από την μεριά

του δέκτη. Εδώ, η απώλεια διάδοσης(propagation loss) είναι δυνατόν να υπολογιστεί και αποτιμηθεί ως μέτρο απόστασης. Το παρακάτω σχήμα αποτυπώνει το RSSI.

Όπως καταλάβαμε, η απόσταση διαθέτει κρίσιμη μεταβλητή στις μετρήσεις του RSSI. Έτσι, είναι απαραίτητο να συνειδητοποιήσουμε ότι μια αύξηση της απόστασης μεταξύ ενός πομπού και του δέκτη, θα συνεισφέρει στην μείωση της ποιότητας της ισχύος του σήματος που λαμβάνεται. Αυτήν την ισχύ φυσικά, είναι δυνατόν να την υπολογίσουμε από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_r(d) = \frac{p_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\lambda)^2 * d^2}, 1$$

Που σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, έχουμε:

P_t = την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος.

G_t = το κέρδος της κεραίας πομπού.

G_r = το κέρδος της κεραίας δέκτη.

d = η απόσταση.

λ = μήκος κύματος σήματος (σε μέτρα).



Figure 9: RSSI unknown localization.

Γενικώς, η τεχνική αυτή περιγράφεται ως σχετικά προσιτή σε θέμα κόστους χωρίς την απαραίτητη εφαρμογή πρόσθετου εξοπλισμού, καθώς οι κόμβοι του δικτύου ενδέχεται να περιλαμβάνουν ένα είδος ραδιοφώνου.

Στο RSSI, την μέτρηση απώλειας διάδοσης (δηλαδή propagation loss) κατά την διαδικασία μετρήσεων, μπορούμε να την υπολογίσουμε μέσω μιας φθίνουσας συνάρτησης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω μοντέλο.

$$P_r(d)_{[dbm]} = P_o(d_o)_{[dbm]} - 10 * n_p * \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + \chi_\sigma$$

Όπου, $P_o(d_o)$ είναι η ισχύς (σε dB milliwatts) με απόσταση d_o μακριά από τον πομπό. Η n_p είναι ο λεγόμενος path loss exponent(εκθέτης απώλειας διαδρομής), που μετράει τον ρυθμό με τον οποίο το σήμα χάνει την ισχύ του σύμφωνα με την απόσταση που διανύει. Τέλος, η μεταβλητή X_σ είναι μια τυχαία Gaussian μεταβλητή με τυπική απόκλιση “ σ ” που συσχετίζεται με την τυχαία επίδραση που προκαλείται από το φαινόμενο της σκίασης (shadowing). Το φαινόμενο της σκίασης, μιλά για τις επιδράσεις που έχουν διάφορα εμπόδια (δέντρα, βράχοι κτλ.) στις μετρήσεις για τις οποίες μιλάμε. Μέθοδοι που δεν βασίζονται στον μηχανισμό GPS, δηλαδή το RSSI σε αυτήν την περίπτωση(ισχύει και για το AOA) επηρεάζονται αρνητικά. Μάλιστα, όσον αφορά το RSSI, μια περίπτωση είναι η μείωση της τιμής του αν έχουμε κάποιο εμπόδιο στο άμεσο “μονοπάτι” του σήματος (Line – Of – Sight).

Οι μεταβλητές n_p και σ είναι περιβαλλοντικά εξαρτώμενες. Όταν η απόσταση μεταξύ των κόμβων έχει βρεθεί, ο αλγόριθμος τότε εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της θέσης μέσω της **multilateration**. Μια βελτιωμένη εκδοχή του RSS είναι το RSS Profiling. Οι παραδοσιακές μετρήσεις του RSS έρχονται με δύο σημαντικές προκλήσεις. Αρχικά, πιθανά παράτυπα αντικείμενα εσωτερικά του χώρου μέτρησης (σε εσωκλειστούς ή εξωτερικούς χώρους) μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τις μετρήσεις του RSS, δηλαδή δίνοντας μας μη-ακριβείς εκτιμήσεις. Πρόκληση καθίσταται και ο προσδιορισμός των παραμέτρων ενός μοντέλου μετρήσεων που αποτελεί πολύπλοκη διεργασία λόγω του εκάστοτε δυναμικού χώρου που εγκαθίστανται και την υπολογιστική-λειτουργική πολυπλοκότητα. Για αυτούς τους λόγους, τεχνικές RSS profiling αξιοποιούνται για την βελτίωση της ακρίβειας.

Καταρχάς, ένα είδος χάρτη κατασκευάζεται που περιέχει την ισχύ κάθε σήματος των anchor node διαμοιραζόμενοι στον χώρο. Αυτός ο χάρτης αποκτάται μέσω μερικών ειδικών παραμέτρων (σαν την ισχύ σήματος) χωρίς κάποια σύνδεση (offline) ή με την

σύνδεση (online) σε σημεία δειγματοληψίας και αναφοράς (sampling/reference points). Αυτή η προσέγγιση συναντάται στα δίκτυα WLAN, αλλά είναι ελκυστική και για τα WSN.

➤ TDOA

Στην TDOA, υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ χρόνου άφιξης ενός μεταδιδόμενου σήματος σε 2 διαφορετικούς δέκτες, όταν αυτοί είναι σωστά συγχρονισμένοι. Σε αυτήν την μέθοδο, η ακρίβεια των υπολογισμών επηρεάζεται σημαντικά από τα πιθανά σφάλματα συγχρονισμού και σφάλματα που εμφανίζονται κατά του φαινομένου “multipath” (φαινόμενο στο οποίο το σήμα φτάνει στον δέκτη από πολλαπλές διαδρομές, π.χ. αντανάκλαση και διάθλαση).

Σε αυτήν την τεχνική, η βελτιστοποίηση της ακρίβειας είναι δυνατή με την αύξηση της απόστασης ανάμεσα στους δέκτες, καθώς με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διαφορά των χρόνων άφιξης των μεταδιδόμενων σημάτων σε αυτούς. Η TDOA προϋποθέτει την ελάχιστη χρήση 3 κόμβων για την υλοποίηση της αλλά και την διαθεσιμότητα της multilateration που εφαρμόζεται για πάνω από 3 κόμβους και υπολογίζει τις αποστάσεις με βάση των αποτελεσμάτων της TDOA.

➤ TOA

Η TOA, γνωστή και ως χρόνος πτήσης (flight time) έχει να κάνει με τον υπολογισμό της περιόδου μετάδοσης ανάμεσα σε έναν πομπό και έναν δέκτη. Εφόσον το σήμα μετάδοσης πηγαίνει με μια γνωστή ταχύτητα, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την απόσταση με την TOA. Για καλύτερη ακρίβεια, οι κεραίες θα πρέπει να είναι κατάλληλα ευθυγραμμισμένες. Για τον συγχρονισμό τους, χρησιμοποιούμε

απαραίτητους μηχανισμούς για την αποφυγή ανακριβή υπολογισμού θέσεων. Έλλειψη τέτοιων μηχανισμών σαν το PTP (Precision-Time-Protocol) ίσως προκαλέσει αποδιοργάνωση στον γενικό συγχρονισμό σε distributed χώρους ή προβλήματα αρχειοθέτησης πακέτων πληροφορίας.

Range-Free techniques

Αυτές οι τεχνικές, σε αντίθεση με τις τεχνικές range based δεν απαιτούν απαραίτητα την επένδυση σε πρόσθετο ειδικευμένο εξοπλισμό, κάνοντάς τους μια φθηνή επιλογή. Μερικές από τις συχνότερα σε θέμα χρήσης τεχνικές είναι η APIT, DV-Hop, Multi-Hop, Centroid και Gradient.

➤ *APIT*

Στην τεχνική APIT (Approximate Point-In Triangulation), η περιοχή στην οποία κάνουμε τις μετρήσεις διαιρείται σε τριγωνικές περιοχές. Αυτές οι περιοχές σχηματίζονται από τις ομάδες σύνδεσης των 3 ή παραπάνω γειτονικών κόμβων anchor όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

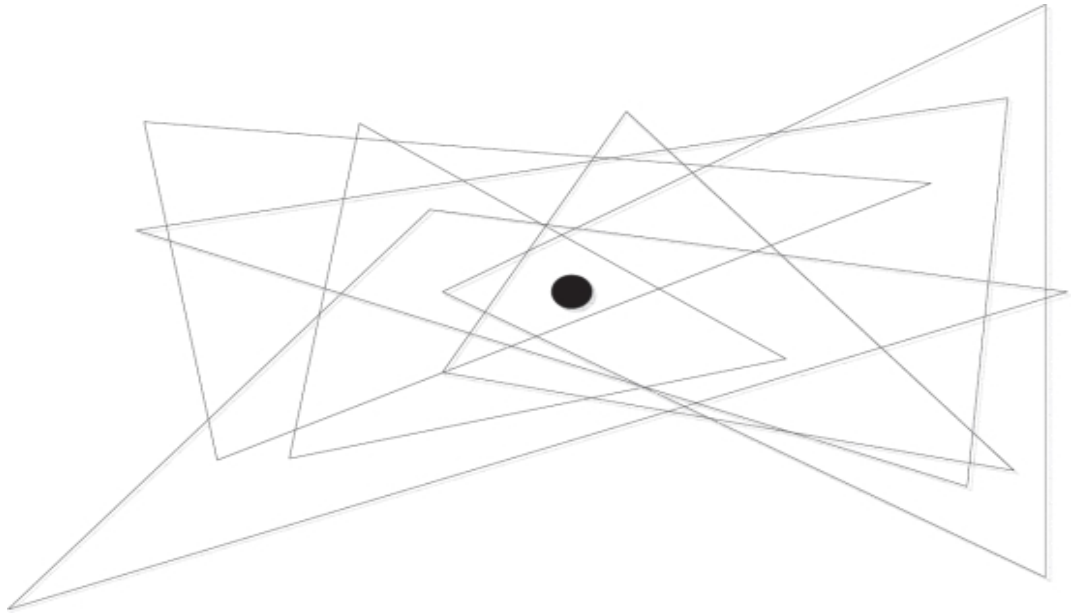


Figure 10: The standard of APIT localization. Y. Zhang and Q. Zhang, "Research on APIT localization algorithm in wireless sensor networks," 2018.

Ο άγνωστος κόμβος τον οποίο επιθυμούμε να βρούμε, προσπαθεί μέσω μερικών δοκιμών να εκτιμήσει αν βρίσκεται εντός ή όχι αυτής της τριγωνικής περιοχής που έχει σχηματιστεί. Στο ποσοστό ακρίβειάς του εμπλέκεται και η πιθανότητα να έχουμε έναν άλλον ίσως κόμβο εντός των περιοχών μετρήσεων. Στην περίπτωση οποιοδήποτε σενάριο εκτίμησης αποτύχει, τότε θα συμπεριληφθεί μια περιοχή εκτός της τριγωνικής αυτής περιοχής.

Οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται, δεν επηρεάζονται από περιβαλλοντικές παρεμβολές. Σαν μια range free τεχνική, δεν χρειαζόμαστε πρόσθετο ειδικευμένο εξοπλισμό, κάτι αρκετά βολικό για WSN. Βέβαια, είναι επιθυμητή η εφαρμογή παραπάνω κόμβων anchor από ότι συνηθίζεται για τον σχηματισμό των περιοχών που αναφέρθηκαν.

➤ Dv-Hop

Εδώ, οι κόμβοι anchor μεταδίδουν ένα σήμα, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την θέση τους, κάνοντας χρήση hop-count. Μετά την λήψη κάθε σήματος, οι άγνωστοι κόμβοι κρατούν στην μνήμη τους την μικρότερη τιμή hop-count (η οποία δηλώνει την μικρότερη σε μήκος απόσταση μεταξύ αγνώστου και anchor κόμβου) και απορρίπτοντας τις υπόλοιπες. Παρακάτω είναι το σχήμα, από το οποίο βρίσκουμε το Hop-Size:

$$Hop_{Size(i)} = \frac{\sum \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sum h_j}$$

Από το παραπάνω σχήμα, το h_j είναι η απόσταση σε hops μεταξύ των κόμβων και οι μεταβλητές $X_{i \rightarrow j}, Y_{i \rightarrow j}$ αναφέρονται στις συντεταγμένες αυτών των κόμβων (ας υποθέσουμε κόμβους i και j).

Στο Dv-Hop χρησιμοποιούμε την μέθοδο triangulation για την διαδικασία εκτίμησης της θέσης του αγνώστου κόμβου. Κάτι άλλο που είναι σημαντικό να γνωρίζουμε είναι πως ο αριθμός των anchor nodes σχετίζεται με την εφαρμογή ενός πλάνου, δηλαδή αν εφαρμόσουμε σε διδιάστατη ανάπτυξη (2D deployment), ο ελάχιστος αριθμός αυτών των κόμβων πρέπει να ξεκινά από 3.

➤ *Multi-Hop*

Για το Multi-Hop θα αναφερθούμε περισσότερο ως το πρωτόκολλο επικοινωνίας που συντελεί στην αποτελεσματικότητα των μεθόδων εντοπισμού των κόμβων. Όπως και σε άλλες τεχνικές, το Multi-Hop απαιτεί την ελάχιστη χρήση κόμβων anchor (3 για 2-D και 4 για 3-D εφαρμογές) για την εκτίμηση των αγνώστων κόμβων μέσω RSSI, TOA και AOA. Το πρωτόκολλο αυτό, είναι σημαντικά πιο αποτελεσματικό σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα WSN σε σύγκριση με το single-hop.

Τα δίκτυα που το περιλαμβάνουν στην επικοινωνία τους, επιτυγχάνουν ευρύτερες αποστάσεις μετάδοσης σήματος, με τα μηνύματα πληροφορίας να μπορούν να “πηδάνε” από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσουν το προορισμό τους. Λόγω της επίδοσής τους, είναι ικανοί όχι μόνο να συνδέσουν ελεγκτές και ενεργοποιητές σε κατάλληλο ποσοστό, αλλά καθιστούν αποτελεσματική την μετάδοση πληροφορίας και την συσσωμάτωσή τους (δηλαδή την τελική ένωσή τους στον τελικό προορισμό ως ενιαίο πακέτο) στα WSN δίκτυα.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η χαμηλή κατανάλωσης ενέργειας, πράγμα κρίσιμο για τα WSN και ειδικά όταν μιλάμε για σημαντικού μεγέθους δίκτυα. Οι επιδόσεις του multi-hop βασίζονται και στην χρήση ενός καλού πρωτοκόλλου δρομολόγησης, οπότε με τον συνδυασμό ενός κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης μπορούμε να καταφέρουμε παράλληλα χαμηλές καθυστερήσεις(latencies) και βελτίωση των επιδόσεων του δικτύου.

➤ Centroid

Κύρια ιδιότητα αυτού του αλγορίθμου είναι η χρήση ενός αλγόριθμου κοντινής απόστασης και τοποθέτησης(proximity-based grained algorithm). Οι μετρήσεις αυτού του αλγορίθμου εξαρτιόνται από μερικούς παράγοντες όπως την πυκνότητα, το μέγεθος και τον διαμοιρασμό των anchor nodes μέσα στον χώρο μετρήσεων. Εδώ, η τοποθεσία ενός κόμβου υπολογίζεται βασιζόμενη στις αναφορές θέσης των άλλων κόμβων, συγκεκριμένα των anchor. Οι anchor nodes εκπέμπουν ένα σήμα, το οποίο “κουβαλά” πληροφορίες για την θέση τους στους άλλους κόμβους του δικτύου. Οι άγνωστοι κόμβοι βασίζονται με αυτόν τον τρόπο στους anchor nodes με την παρακάτω εξίσωση κατά την λήψη εκείνου του σήματος.

$$(X_{est} , Y_{est}) = \frac{\sum (X_N)}{N} , \frac{\sum (Y_N)}{N}$$

Όπου X,Y οι συντεταγμένες και N, ο αριθμός των κόμβων. Βέβαια, είναι κάπως φανερό πως αυτό το μοντέλο είναι αρκετά περιορισμένο περί μεταβλητών. Ο Centroid δεν μπορεί να διατεθεί για υπόγεια περιβάλλοντα λόγω του path loss και ως εκ τούτου των σφαλμάτων στους υπολογισμούς.

➤ Gradient

Στην μέθοδο gradient, πληροφορίες για την θέση των άγνωστων κόμβων βρίσκονται μέσω της τεχνικής του πολυμερισμού (multilateration όπως

αναφέραμε). Ο τρόπος λειτουργίας του μας θυμίζει το Dv-Hop με την χρήση hop-count.

Το hop-count αρχικοποιείται στο μηδέν και στην συνέχεια αυξάνεται με κάθε διάδοση μέσω κοντινών κόμβων μέχρι τον τελικό σταθμό. Οι κόμβοι για τους οποίους αναζητάμε την θέση, επιλέγουν την μικρότερη απόσταση προς τον anchor που έκανε προηγουμένως μετάδοση σήματος, λέγοντας για την δική του θέση. Η απόσταση αυτή μετριέται από τον παρακάτω τύπο.

$$d_{ji} = h_j, A_i * d_{Hop}$$

Όπου d_{ji} είναι η εκτιμημένη απόσταση μεταξύ αγνώστου και anchor κόμβου, το h_j το hop-count (δηλαδή, το μικρότερο μονοπάτι) με A_i να είναι ο συντελεστής κλιμάκωσης (προσαρμογή της απόστασης) που βασίζεται στην ισχύ σήματος και τους διαφόρους περιβαλλοντικούς παράγοντες και d_{hop} η μέση απόσταση ανά hop (διάδοση).

Από τον παραπάνω τύπο, μπορούμε να ψάξουμε και το σφάλμα που γίνεται στις μετρήσεις, μέσω του οποίου ο κόμβος μπορεί κιόλας να εκτιμήσει την θέση του από τον ακόλουθο δεύτερο τύπο.

$$E = \sum_{i=1}^N d_{ji} - d^{ji}$$

Στην παραπάνω σχέση, το E που όπως είπαμε είναι το σφάλμα που γίνεται κατά τις μετρήσεις. Εκτός αυτού, έχουμε το d_{ji} που είναι η εκτιμώμενη απόσταση που υπολογίσαμε από την προηγούμενη σχέση και το d^{ji} που είναι η εκτιμώμενη απόσταση με βάση την κλίση διάδοσης. Ωστόσο, αυτοί γενικότερα οι υπολογισμοί βάζουν έναν ιδιαίτερο φόρτο, δηλαδή απαιτούν και πολλούς πόρους για την πραγματοποίησή τους, πράγμα περίπλοκο για πολύπλοκες αρχιτεκτονικές δικτύων.

4.2.3 Ανασκόπηση και προοπτική

Το θέμα του εντοπισμού είναι ένα κομμάτι έρευνας που έχει αποκτήσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια, με πολλά προτεινόμενα σχέδια που στοχεύουν προς

την επίλυσή του. Όταν σκεφτόμαστε localization σε θέμα μεθόδων προσέγγισης, έχουμε στην διάθεσή μας έναν τεράστιο αριθμό μοντέλων εντοπισμού, το καθένα φυσικά για διαφορετικά σενάρια και εφαρμογές.

Είναι γενικά δεκτό και από την ίδια την επιστημονική κοινότητα ότι κανένας αλγόριθμος δεν μπορεί να θεωρηθεί ο καλύτερος. Αυτό συμβαίνει γιατί είτε κάποια μοντέλα είναι σχετικά έως και δραματικά ακριβά σχετικά με το κόστος του υλικού που χρειάζεται είτε παρουσιάζει ευαισθησίες σε διάφορα φαινόμενα (από το περιβάλλον ή παρεμβολές) ή/και τεχνικούς περιορισμούς (μπορεί να είναι επιπρόσθετο υλικό ή τρόποι εγκατάστασης).

Βέβαια, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα κεφάλαια, έχουμε και την ύπαρξη υβριδικών μοντέλων που περιλαμβάνουν τα κυριότερα θετικά 2 ή παραπάνω μεθόδων. Αν και αυτά τα μοντέλα θεωρούνται και τα πιο υποσχόμενα, ωστόσο χαρακτηρίζονται και ως περίπλοκα, συχνά με μεγάλες απαιτήσεις για πόρους και περίπλοκους υπολογισμούς.

5 Monte Carlo – Localization algorithm

Στο ακόλουθο αυτό κεφάλαιο θα μιλήσουμε αποκλειστικά για τον αλγόριθμο εντοπισμού, Monte Carlo. Πέρα της εισαγωγή μας στον αλγόριθμο αυτό, τα κύρια κομμάτια συζήτησης θα αποτελέσουν, η εξέλιξή του μέσα στα χρόνια, οι ιδιότητες που διαφέρουν σύμφωνα με το είδος της υλοποίησης που θέλουμε να πετύχουμε και τον μηχανισμό του (δηλαδή το πώς λειτουργεί). Τέλος, θα παρατηρήσουμε πως μερικά στοιχεία – ρυθμίσεις προσαρμόζουν την αποτελεσματικότητά του με την χρήση γραφημάτων.

5.1 Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος Monte Carlo, γνωστός και ως αλγόριθμος εντοπισμού φίλτρου σωματιδίων (particle filter localization) ανήκει στην κατηγορία των range-free αλγορίθμων εντοπισμού, που όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τους καθιστά πιο ανθεκτικούς απέναντι σε σφάλματα μετρήσεων. Επίσης, καθώς ανήκει σε αυτήν την κατηγορία πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή περαιτέρω εξοπλισμού, πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι τέτοιου είδους αλγόριθμοι (δηλαδή range-free) βασίζονται σε πληροφορίες θέσης και το hop-count που οι άγνωστοι κόμβοι λαμβάνουν από γειτονικούς κόμβους (anchors ή κανονικούς). Ωστόσο, είναι καλό να έχουμε την επίγνωση πώς αν και σε γενικά πλαίσια, ο αλγόριθμος αυτός ανήκει στους range-free, υπάρχουν διάφορες εκδοχές του (στην επιστημονική κοινότητα) στις οποίες παρατηρούνται τεχνικές των range-based σαν την ένδειξη ισχύος λαμβανόμενου σήματος (RSSI).

Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του αλγορίθμου αυτού είναι όπως και με το όνομά του, η χρήση σωματιδίων. Αυτό έχει να κάνει με την διαδικασία του εντοπισμού που θα μιλήσουμε αναλυτικότερα παρακάτω, αλλά εισαγωγικά πρέπει να ξέρουμε ότι από αυτήν την διαδικασία μοιράζονται στον χώρο μέτρησης, σωματίδια που αναπαριστούν καταστάσεις. Ο Monte Carlo διακρίνεται ως ένας αρκετά προσαρμόσιμος αλγόριθμος σε γενικά πλαίσια, και ιδιαίτερα στο θέμα των σωματιδίων

με την έννοια πως ο αριθμός των δειγμάτων (των σωματιδίων δηλαδή) μπορεί να αλλάξει. Γίνεται να θέσουμε έναν διαφορετικό αριθμό σε καταστάσεις που απαιτείται περισσότερο ή αντίστοιχα μικρότερο, σύμφωνα με τις καταστάσεις ή περιορισμούς που επικρατούν στο χώρο μετρήσεων. Αυτό φυσικά θα έχει επίπτωση στα αποτελέσματά του με την 1η περίπτωση να ευνοεί υψηλότερο βάθος υπολογισμών (σε ακρίβεια κτλ.) ενώ στην αντίθετη καταφέρνουμε πιο ταχείς υπολογισμούς.

Ο αλγόριθμος δέχεται δεδομένα από αισθητήρες εμβέλειας αλλά και πιο εξειδικευμένα εξαρτήματα, γνωστά και ως οδόμετρα (odometry sensor). Αυτός ο αισθητήρας, χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό απόστασης που καλύφθηκε από κάποιου είδους μηχανισμό, μέσω των περιστροφών των τροχών του. Το βασικό που κρατάμε για την ώρα είναι ότι εφαρμόζεται για την μερική εκτίμηση θέσης και την παρατήρηση της κίνησης.

Ο Monte Carlo, στην πραγματικότητα είναι ένας αλγόριθμος που συναντάμε σε μεγαλύτερο ποσοστό σε κινητά WSN και γενικότερα κινητά δίκτυα σε αντίθεση με την στατική τους μορφή. Κύριο συμπέρασμα που έχει εξακριβωθεί από πολλαπλές μελέτες, αποτελεί πως ο αλγόριθμος μας δίνει την δυνατότητα να μειώσουμε τον αριθμό των κόμβων anchor με χρήση κινούμενων anchor κόμβων, επιτυγχάνοντας μικρότερα κόστη και καλύτερη ακρίβεια μάλιστα σε μέρη όπου παρατηρείται έλλειψη πόρων. Βέβαια, αναλόγως την προσέγγιση και την πιθανή τροποποίηση του αλγορίθμου, είναι συχνή η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας που οφείλεται στην αυξανόμενη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων για τις απαραίτητες ενημερώσεις σχετικά με τις εκτιμήσεις των θέσεων.

Εδώ, έχουμε και την δυνατότητα της επίλυσης του προβλήματος local-global εντοπισμού. Στην πρώτη περίπτωση, ο μηχανισμός (ας υποθέσουμε ένας κόμβος) που διαφορετικά θα αναζητάγαμε, πλέον γνωρίζει την θέση του και σκοπός μας είναι η περαιτέρω διόρθωση μέσω του αισθητήρα οδομετρίας. Αυτό γίνεται για την συντήρηση των ακριβή εκτιμήσεων. Όσο για την δεύτερη περίπτωση(global localization), εδώ ο αισθητήρας μας δεν διαθέτει κάποια πληροφορία για την θέση του.

Γνωστό και ως το “kidnapped robot problem”, ο αλγόριθμος θα ξεκινήσει από την αρχή, ξεκινώντας με τον διαμοιρασμό των σωματιδίων που αναφέραμε που θα αναπαραστήσουν όλες τις πιθανές τοποθεσίες του ρομπότ. Με τα παραπάνω στοιχεία που αναφέραμε, ο μηχανισμός θα κινείται στον χώρο, με αποτέλεσμα να συλλέγει πληροφορίες. Έτσι, θα οδηγηθούμε στο στάδιο της ενημέρωσης αυτών των

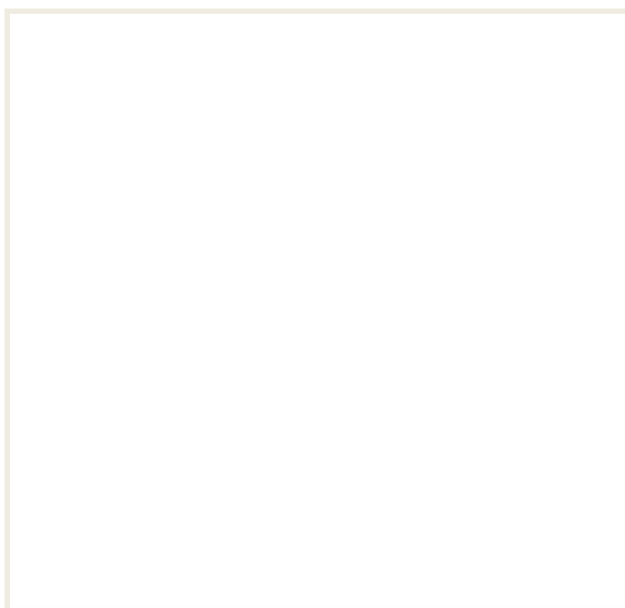
σωματιδίων, όπου με την πάροδο του χρόνου θα φτάσουμε στην σταδιακή σύγκλιση τους, με άλλα λόγια την πραγματική θέση του ρομπότ.

5.2 Ιστορικά γεγονότα

Ο Monte Carlo επινοήθηκε κατά την περίοδο του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου από τους John Von Neumann και Stanislaw Ulam. Σε συνεργασία με άλλους επιστήμονες, και κυριότερους τους Enrico Fermi και Robert Richtmyer που δούλεψαν έχοντας εργαλεία όπως τον Monte Carlo στο γνωστό Manhattan Project.



Stanislaw Ulam, Enrico Fermi, and John Von Neumann



Robert Richtmyer

Εφευρέθηκε (όχι αποκλειστικά) για ντετερμινιστικά προβλήματα που εξακολουθούσαν να είναι απίστευτα πολύπλοκα έως και δυσνόητα, εξαιτίας της παρουσίας ποικίλων μεταβλητών που εμφανίζονταν στους χώρους μετρήσεων. Η έννοια αυτής της μεθόδου υπήρξε σε διάφορα είδη παιχνιδιών που έχουν να κάνουν με πιθανότητες – άγνωστες καταστάσεις σαν τα ζάρια, παιχνίδια του καζίνο και το παιχνίδι της ρουλέτας.

Αξιόλογο στοιχείο του αλγορίθμου που φυσικά εφαρμόστηκε για την επίλυση αρκετών προβλημάτων, είναι η τυχαιότητα σε συνδυασμό με τα εξής 3 κριτήρια:

- Βελτιστοποίηση.
- Αριθμητική ενσωμάτωση.
- Παραγωγή «κληρώσεων» από διανομή πιθανοτήτων.

Όσον αφορά το έργο Manhattan, ο αλγόριθμος Monte Carlo αξιοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της παραγωγής αλλά και της διάχυσης νετρονίων σε ραδιενεργά υλικά. Λόγω των αμέτρητων πιθανοτήτων σε κάθε βήμα για την επίλυση του, αυτό το πρόβλημα θεωρήθηκε αδύνατον να λυθεί ντετερμινιστικά (δηλαδή δεν μπορεί να επιλυθεί επακριβώς). Με την εφαρμογή τυχαίων και επανειλημμένων δοκιμών, ο αλγόριθμος ήταν σε θέση να εκτιμήσει το περιθώριο των δυνατών αποτελεσμάτων και μάλιστα με αντίστοιχα ποσοστά πιθανότητας.

Με άλλα λόγια, χάρη στις προσομοιώσεις σχετικά με τις κινήσεις των νετρονίων, οι επιστήμονες εκτιμούσαν την αποτελεσματικότητα των πυρηνικών αντιδράσεων. Πέρα από τα παραπάνω στοιχεία, οι εφαρμογές εκείνης της μεθόδου εκείνον τον καιρό έπαιρναν μέρος κυρίως στον τομέα της πυρηνικής μηχανικής (μέσα του 1940).

Όλα αυτά είχαν κρίσιμη συνεισφορά στην ανάπτυξη της ατομικής βόμβας. Γενικότερα, ο Monte Carlo αποτέλεσε ισχυρό εργαλείο στην λήψη καλύτερων αποφάσεων εκείνη την περίοδο, κάτι που οφείλεται στην δυνατότητά του να διαχειριστεί πολύπλοκα συστήματα με πολλαπλές μεταβλητές και αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Παρόλο που η ιστορία του αλγορίθμου είναι αρκετά μεγάλη και βαθιά χρονολογικά, ορισμένες εφαρμογές – έργα που συναντάμε και πρόσφατα, σχετικά με τον εντοπισμό ρομπότ ή κόμβων ξεκίνησαν από την περίοδο του 2000ς και ύστερα.

Συγκεκριμένα, αφετηρία προς τον σημερινό Monte Carlo ήταν η δεκαετία του 90' με την εμφάνιση φίλτρων σωματιδίων (particle filters) που μάλιστα συνίσταται κρίσιμο συστατικό του. Με την ερχομό του 2000ς, αρκετά επιστημονικά έγγραφα δημοσιοποιούνταν χαρακτηρίζοντας θετικά αυτόν τον αλγόριθμο, όσον αφορά τον εντοπισμό ρομπότ και ιδιαίτερα λόγω της εφαρμογής του σε ρεαλιστικά σενάρια. Αιτιολογία όλης αυτής της θετικής κριτικής απέναντι του, οφειλόταν στα πλεονεκτήματα που έφερνε μαζί του, για παράδειγμα:

➤ *Αποτελεσματικότητα:*

Ο αλγόριθμος ήταν ικανός να διαχειριστεί δύσκολες καταστάσεις(που δημιουργούνταν από το περιβάλλον) με καλύτερες επιδόσεις από άλλες μεθόδους της εποχής.

➤ *Ακρίβεια:*

Η πιθανολογική προσέγγισή του, που χρησίμευσε στην παρουσίαση αβεβαιότητας από την μεριά του ρομπότ/κόμβου σχετικά με την θέση του.

➤ *Προκλήσεις:*

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το θέμα του local-global εντοπισμού και προβλήματα όπως το “robot-kidnapping”, επιλύθηκαν χάρις αυτόν.

5.3 Robot vs node localization – MCL

Ο Monte Carlo συνάντησε τα πρώτα του έργα (όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα) στον εντοπισμό ρομπότ, αλλιώς robot localization. Ύστερα από αρκετές προσαρμογές, εφαρμόστηκε και για τον εντοπισμό των ασύρματων κόμβων στα WSN.

5.3.1 Robot localization

Εδώ, τα μηχανήματα κατέχουν πρόσθετα εξαρτήματα και δυνατότητες (τροχοί, αισθητήρες όρασης-πλοήγησης κτλ.), πράγμα ισχύει ιδιαίτερα σπάνια στα δίκτυα κόμβων. Αυτό συμβαίνει λόγω του χώρου που έχουμε στην διάθεσή μας. Δηλαδή, δύναται να εισάγουμε πιο ογκώδη εξοπλισμό, βελτιστοποιώντας κατά κύριο λόγο την υπολογιστική ισχύ. Μόνο του αυτό μας προσφέρει καλύτερες επιδόσεις για την υλοποίηση του αλγορίθμου (συνεχή επικοινωνία, αποστολή περισσότερων δεδομένων κ.α.).

Στον εντοπισμό ρομπότ ή άλλων παρόμοιων μηχανισμών, η διαδικασία του εντοπισμού συνήθως εστιάζεται με έναν αποκλειστικό μηχανισμό μέσα στον περιβάλλον στο οποίο κινείται. Συχνό καθήκον τους είναι η εξερεύνηση του πεδίου που τοποθετείται και η αναγνώριση σημείων αναφοράς.

Ακόμη ένα φαινόμενο εδώ είναι πως όσον αφορά τον χώρο μετρήσεων, έχουμε στην διάθεσή μας πληθώρα γνώσεων σε αντίθεση με αυτή των κόμβων (εξαιρείται το πείραμα του “robot kidnapping”). Για την ακρίβεια, ο χάρτης μας δίνεται ως πληροφορία και στόχος μας αποτελεί η ακριβής θέση του μηχανισμού. Πρώτος λόγος γιατί δεν γίνεται να θεωρηθεί απόλυτα ως πλεονέκτημα, είναι γιατί τα δίκτυα WSN θεωρούνται on-demand δίκτυα, και την πλειοψηφία των περιστάσεων δεν βρίσκεται χρόνος για την πλήρη μελέτη του χώρου υπολογισμών.

5.3.2 Node localization

Στα δίκτυα αισθητήρων, ο εντοπισμός αναφέρεται στις τοποθεσίες των κόμβων στα WSN, τα οποία διακυμαίνονται ανάμεσα σε στατικά, δηλαδή οι κόμβοι δεν πραγματοποιούν καμία κίνηση ή κινητά (οι κόμβοι μετακινούνται). Αντίθετα εδώ, τα δίκτυα αισθητήρων αναθέτονται θέματα παρακολούθησης του γύρω χώρου ή των ζώων. Παράλληλα, εδώ κάθε αλγόριθμος ξεκινάει δίχως την επίγνωση κάποιου χάρτη όπως με

την προηγούμενη κατηγορία και για αυτό συναντάμε μεγαλύτερη δυσκολία λόγω της πολυπλοκότητας.

Παρουσιάζουν σημαντική έλλειψη υπολογιστικής ισχύος που οφείλεται στο μικρό μέγεθος του, καθώς γίνεται εστίαση στην ελαχιστοποίηση του κόστους για την εκτέλεση σχετικά απλών έργων. Βέβαια, αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα πως είναι δυνατή η συνεργασία μεταξύ των κόμβων ώστε να ισορροπήσουμε την ζυγαριά μεταξύ διαθέσιμης ενέργειας και των διαδικασιών(μεταφορά δεδομένων, υπολογισμοί, επικοινωνία κτλ.).

5.4 Μηχανισμός αλγορίθμου MCL

Ο αλγόριθμος Monte Carlo, γνωστός και ως αλγόριθμος εντοπισμού-φίλτρου σωματιδίων (particle filter localization), όπως αναφέρει και το όνομά του σχετίζεται με τα σωματίδια. Όπως αναφέραμε νωρίτερα, με την έννοια σωματίδια, μιλάμε για τις πιθανές καταστάσεις ενός μηχανισμού(στην περίπτωση των WSN δικτύων μιλάμε για κόμβους) στον χώρο που πραγματοποιούμε μετρήσεις. Συγκεκριμένα, ο όρος “πιθανές καταστάσεις” αναφέρεται στην πιθανότητα ο εκάστοτε κόμβος να βρίσκεται σε εκείνη την αναφερόμενη τοποθεσία. Ο αριθμός των σωματιδίων είναι δυνατόν να αλλάξει και να μάλιστα να μειωθεί κατά την διάρκεια εντοπισμού ενός κόμβου.

Το πλήθος τους είναι δυνατόν να προσαρμοστεί, προκειμένου να καλυφθούν οι εκάστοτε ανάγκες ή προϋποθέσεις που έχουν τεθεί σε κάθε έργο. Τέτοιες προϋποθέσεις αποτελούν η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ (στα WSN δεν παρατηρείται ιδιαίτερη), ο χρόνος που αφοσιώνεται για τους υπολογισμούς και σημαντικότερο, η ακρίβεια των μετρήσεων. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει η δυνατότητα να γίνει λανθασμένη εκτίμηση θέσης από μια μικρή απόκλιση (δηλαδή μερικά μέτρα) έως και τελείως ανακριβή υπολογισμό (ο κόμβος να βρίσκεται στην πραγματικότητα μέχρι και διαφορετικό δωμάτιο, αν υποθέσουμε ότι ο χώρος είναι ένα σπίτι).

Διαδικασία εντοπισμού

Initialization:

Η διαδικασία έναρξης του εντοπισμού ξεκινά με την διανομή σωματιδίων στον χώρο μέτρησης. Με άλλα λόγια, “σημειώνουμε” θέσεις στις οποίες υποθέτουμε πως ένας κόμβος πιθανόν να βρίσκεται. Ο αριθμός των σωματιδίων(ας πούμε ότι είναι N) στην πραγματικότητα είναι μια παράμετρος απίστευτα σημαντική, γιατί επηρεάζει το πόσο ακριβείς θα είναι οι μετρήσεις μας αλλά και αν θα είμαστε σε θέση να βρεθούμε κοντά στην λύση.

Η πρώτη “τυχαία” διανομή σωματιδίων αποτελεί το 1ο σετ ή την πρώτη ομάδα εκτιμήσεων μέσα στον χώρο μετρήσεων, ας την παρουσιάσουμε ως:

$$L_o = (l_o^0, l_o^1, \dots, l_o^{N-1})$$

Όπου το L_o αποτελεί την 1η ομάδα σωματιδίων/εκτιμήσεων σχετικά με την θέση ενός κόμβου. Είπαμε προηγουμένως ότι το πλήθος των σωματιδίων γίνεται να αλλάξει, αυτό ισχύει και κατά την αρχή του εντοπισμού, ρυθμίζοντας με πόσα σωματίδια θα ξεκινήσουμε στον χώρο. Δηλαδή, αν πάρουμε την περίπτωση ενός σπιτιού ως τον χώρο αναζήτησης κάποιου κόμβου, θα μπορούσαμε να την περιγράψουμε ως εξής:



Figure 11: Monte Carlo, particle distribution in deployment area.

Το σχήμα παρουσιάζει ένα περιβάλλον (λόγω της ομοιομορφίας του χώρου, ας υποθέσουμε ότι είμαστε σε κάποιον εσωτερικό χώρο), στον οποίο διακρίνονται μερικά σημάδια σε διάφορα σημεία. Αυτά τα σημεία (σε μπλε χρώμα) αποτελούν τα σωματίδια που λέγαμε ή καλύτερα, τις πιθανές καταστάσεις του κόμβου. Τέλος, μην ξεχνάμε την φιγούρα (σε πράσινο χρώμα) που παριστάνει τον μηχανισμό (ρομπότ ή κόμβο σ' αυτό το παράδειγμα).

Τα σωματίδια του παραδείγματος είναι διάσπαρτα και μετρημένα στον χώρο, κάτι που έχουμε πει ότι γίνεται να προσαρμόσουμε ανάλογα με τις ανάγκες μας.

Σε διαφορετικές καταστάσεις, όπως θα δούμε στο παρακάτω σχήμα, θα έχουμε *global localization*, δηλαδή ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στον χώρο. Αυτό γίνεται σε περιπτώσεις, στις οποίες δεν διαθέτουμε καμία αρχική εκτίμηση της θέσης του κόμβου (ή άλλου μηχανισμού).



*Figure 12: Monte Carlo particle distribution with variable *globalLocalization* = True.*

Στάδιο πρόβλεψης/

Prediction stage:

Σε αυτό το στάδιο, στόχος του αλγορίθμου είναι να προβλέψει τις επόμενες πιθανές καταστάσεις, ύστερα από αντίστοιχες μεταβολές στην θέση του κόμβου/μηχανισμού. Διαφορετικά, θα λέγαμε ότι πραγματοποιείται μια καινούργια κατανομή σωματιδίων για την πρόβλεψη της νέας θέσης μετά από κάποια αλλαγή.

Σε μία χρονική στιγμή (έστω στιγμή t), ο αλγόριθμος θα δώσει μια νέα ομάδα δειγμάτων N (ομάδα L_t , την στιγμή t) η οποία θα βασιστεί στα στοιχεία της προηγούμενης ομάδας, δηλαδή μιας ομάδας L_{t-1} .

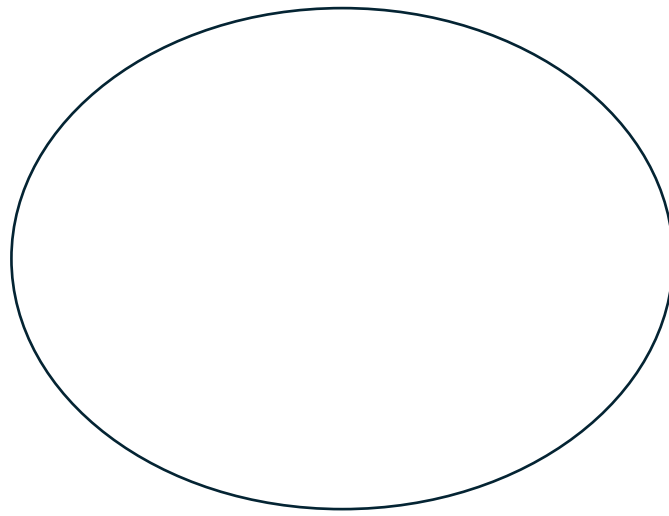


Figure 13: Χώρος τοποθεσίας σε χρονική στιγμή t .

Βασιζόμαστε στα δεδομένα του προηγούμενου βήματος την στιγμή $t-1$ για μια κυκλική περιοχή li με ακτίνα ίση με την τιμή της V_{max} . Αν οι ταχύτητες είναι σταθερές ανάμεσα στο διάστημα $[0, V_{max}]$ η πιθανότητα της τωρινής θέσης που εκτιμάται από την προγενέστερη εκτίμηση τοποθεσίας, δίνεται από την ομοιόμορφη κατανομή:

$$p(l_t | l_{t-1}) = \begin{cases} \frac{1}{\pi * V_{max}^2}, & \|d(l_t - l_{t-1})\| \leq V_{max} \\ 0, & d(l_t, l_{t-1}) \geq V_{max} \end{cases}$$

Όπου $\mathbf{l}_{t-1}$ αναφέρεται για την ομάδα N δειγμάτων την χρονική στιγμή $t-1$. Η δεύτερη περίπτωση (δηλαδή $p(l_t | l_{t-1}) = 0$) λαμβάνει χώρα όταν ένας κόμβος ή γενικότερα ένας μηχανισμός πιθανών να κινείται με σημαντικά μικρότερη ταχύτητα (μπορεί και απλά να αλλάζει προσανατολισμό).

Σε περιπτώσεις στις οποίες διαθέτουμε ίσως μια πληροφορία σχετικά με την κινητικότητα του κόμβου (δηλαδή το γεγονός ότι κινείται προς μια ορισμένη κατεύθυνση ή με συγκεκριμένη ταχύτητα), η πιθανότητα κατανομής προσαρμόζεται αναλόγως για την βελτίωση των εκτιμήσεων.

Στο στάδιο της πρόβλεψης, υιοθετούμε την ακόλουθη αναδρομική συνάρτηση, μέσω της οποίας ένας κόμβος δύναται να προβλέψει την τωρινή τοποθεσία του. Το στοιχείο $O_0 \rightarrow t$, αναφέρεται στις παρατηρήσεις των γειτονικών κόμβων:

$$\pi(l_t | o_0, o_1, \dots, o_t) = p(l_0) \prod_{k=1}^t p(l_k | l_{k-1})$$

Update:

Μέχρι τώρα δεν μιλήσαμε για μια ιδιαίτερη ιδιότητα του αλγορίθμου περί των σωματιδίων που είναι τα λεγόμενα “βάρη”(weights). Στόχος αυτών είναι να μας δείξουν την πιθανότητα ενός κόμβου ή μηχανισμού να βρίσκεται σε μια εκάστοτε τοποθεσία. Αυτά τα βάρη αποκτούν τιμή με βάση αυτήν την πιθανότητα (μεγάλη τιμή σημαίνει μεγάλη πιθανότητα, ενώ μικρή τιμή εννοεί μικρή πιθανότητα) από την οποία εξετάζουμε πόσο δυνατόν θα ήταν, αν ένας κόμβος βρισκόταν στον αναφερόμενο χώρο.

Το στάδιο της ενημέρωσης (update stage), είναι ένα βήμα στο οποίο τα βάρη ενημερώνονται σε καινούργιες τιμές, σύμφωνα με στοιχεία που συλλέχθηκαν από ορισμένες παρατηρήσεις.

Αυτές τις παρατηρήσεις τις παίρνουμε από άλλους κόμβους μέσα στον χώρο, συνήθως σε απόσταση από 1 έως και 2-hop μακριά απ’ τον στόχο μας, ανεξάρτητα της δομής του δικτύου (δηλαδή αν είναι στατικής ή κινητής μορφής). Η 1η περίπτωση μιλάει για κόμβους anchor άμεσα γειτονικούς με τον στόχο μας, ενώ στην 2η αναφερόμαστε στους γειτονικούς της 1ης περίπτωσης (συνήθως οι 2-hop anchors απέχουν σχεδόν την διπλάσια απόσταση σε σύγκριση με αυτούς της 1ης). Ο λόγος που αξιοποιούμε αυτή την προσέγγιση είναι για να επιτύχουμε καλύτερη ακρίβεια στις εκτιμήσεις.

Βέβαια δεν ισχύει το ίδιο σε περιβάλλον, στο οποίο συναντάμε πολλά εμπόδια καθώς αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να εμφανισθούν πολλαπλά σφάλματα. Ένα σχήμα περί γειτονικών κόμβων φαίνεται και παρακάτω.



Figure 14 A: Direct nodes(1-hop) with r radius. B: indirect node (2-hops) with radius $2r$.

Τελευταίο κομμάτι του σταδίου update, είναι η ενημέρωση για τα εκάστοτε βάρη που μιλήσαμε στην αρχή. Με άλλα λόγια, ο κόμβος ενημερώνει τα βάρη των καινούργιων δειγμάτων, σύμφωνα με τις λαμβανόμενες παρατηρήσεις/δεδομένα.

$$\tilde{w}_t^i = \tilde{w}_t^i * p(o_t | l_t^i)$$

Όπως φαίνεται, τα βάρη συσχετίζονται με τα δεδομένα της προηγούμενης χρονικής κατάστασης, αλλά και τα δεδομένα των παρατηρήσεων O_t για την αναφερόμενη ομάδα σωματιδίων. Έπειτα, κανονικοποιούμε τα βάρη αυτά (δηλαδή $\tilde{w}_t^i$ σε w_t^i).

$$w_t^i = \frac{\tilde{w}_t^i}{\sum_i \tilde{w}_t^i}$$

Η διαδικασία αυτή γίνεται ώστε σε μια κατανομή πιθανοτήτων, το σύνολο (το άθροισμα δηλαδή) είναι ίσο με 1. Καθώς, τα βάρη δηλώνουν πιθανότητες για τις εκάστοτε καταστάσεις, μας βοηθά στον έλεγχο εγγυημένης κατανομής.



Figure 15: Monte Carlo localization, first sample update.

Το παραπάνω σχήμα μας δείχνει την νέα κατάσταση που επικρατεί στον χώρο μέτρησης, στον οποίο σύμφωνα με προηγούμενα στοιχεία οδηγηθήκαμε σε μια περίπτωση πιο κοντά στον στόχο μας. Βέβαια, η διαδικασία δύναται να συνεχιστεί για την βελτίωση των μετρήσεων που έγιναν, προκειμένου να επιτύχουμε υψηλότερες ακρίβειες.

Filtering stage:

Εδώ ο άγνωστος κόμβος θα αξιοποιήσει τις παρατηρήσεις από τους γειτονικούς κόμβους του (σχήμα 14) σε απόσταση 1-hop ή 2-hop , προκειμένου να απαλείψει τα “αδύνατα” δείγματα στην πιο κάτω εξίσωση. Σε αυτήν, το S υποδηλώνει το σύνολο των anchor nodes σε 1-hop απόσταση, και το T το σύνολο των anchor nodes σε απόσταση 2-hop.

$$\begin{cases} p(0_t | l'_t) = 1, & \forall s \in S, d(l_t, s) \leq r \wedge \forall s \in T, r < d(l_t, s) \leq 2r \\ p(0_t | l'_t) = 0, & \text{οπουδΨποτε} \end{cases}$$

Resampling:

Βασική ιδέα του resampling αποτελεί η εξάλειψη των μικρών σε βάρη δειγμάτων/σωματιδίων και επικέντρωση σε αυτά με τα μεγαλύτερα. Κατάλληλο μέτρο του αλγορίθμου είναι το “effective sample size” (αποτελεσματικό μέγεθος δείγματος) N_{eff} . Η εκτίμησή του, μας δίνεται παρακάτω:

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_i^t)^2}$$

Όταν η μεταβλητή N_{eff} είναι μικρότερη από ένα καθορισμένο όριο, γνωστό και ως $N_{threshold}$, τότε θα προχωρήσουμε στην διαδικασία της αναδειγματοληψίας (resampling). Το N_{eff} αποτελεί τον ακριβή αριθμό έγκυρων δειγμάτων (samples). Για αυτό τον λόγο, προϋπόθεση είναι να έχουμε έναν ορισμένο αριθμό δειγμάτων, (σύμφωνα με την κανονικοποίηση που είπαμε προηγουμένως θα ισούνται με μονάδα) ώστε το N_{eff} να είναι μεγαλύτερο ή έστω ίσο του $N_{threshold}$.

Η λειτουργία της κανονικοποίησης είναι εδώ σημαντική, όχι μόνο για την παραπάνω εξίσωση αλλά και γιατί χωρίς αυτό το βήμα θα υπάρχει προκατάληψη στα δείγματά μας σε σχέση με τα βάρη τους, πράγμα που θα επηρεάσει σημαντικά τις τελικές μετρήσεις του αλγορίθμου. Παράλληλα, μας βοηθά να αποφύγουμε ένα τυπικό πρόβλημα του Monte Carlo, που ονομάζεται δειγματολογική εξαθλίωση (sample impoverishment). Σε αυτό, παρατηρείται παραμέληση πολλαπλών δειγμάτων που κατέχουν χαμηλά βάρη, που οδηγεί σε ανισορροπία και έλλειψη ποικιλίας ανάμεσα στα δείγματα. Ως αποτέλεσμα αυτών των συμπτωμάτων είναι η πρόωρη σύγκλιση των σωματιδίων και εμφάνιση λανθασμένων αποτελεσμάτων.

Ειδική περίπτωση

Για να δώσουμε μια εικόνα ενός ορισμένου αριθμού επαναλήψεων του αλγορίθμου, θα υποθέσουμε ότι κατά την διάρκεια της κίνησής του στον χώρο, πραγματοποιήσαμε 60 επαναλήψεις. Αν πάρουμε τα στοιχεία του παραδείγματος που αναλύσαμε πιο πάνω (χώρο, μηχανισμούς κτλ.), μπορούμε να δούμε την σύγκλιση των σωματιδίων προς την θέση του στόχου μας.



Figure 16: The particle convergence after 60 updates.

5.5 Ανάλυση γραφημάτων

Έχουμε περιοχή με διαστάσεις 100m*100m και αφήσαμε 10 anchor nodes να βρουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την τοποθεσία τους μόνοι τους. Γνωρίζουμε πως η μέγιστη εμβέλεια επικοινωνίας φτάνει τα 20m και με την ταχύτητά τους στα 20m/s. Αναλύουμε την επίδραση της κίνησης στον εντοπισμό, διαχωρίζοντας την σε 2 περιπτώσεις. Στην 1η πλην των 10 anchor nodes, μόνο οι άγνωστοι κινούνται στον χώρο, ενώ στην άλλη και οι 2 ομάδες βρίσκονται εν κινήσει.

Από το αρχικό στάδιο ξεκινάμε να συλλέγουμε παρατηρήσεις σχετικά με τις θέσεις των κόμβων. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των πληροφοριών σχετικά με αυτούς, παρατηρείται σταδιακή μείωση στα σφάλματα των εκτιμήσεων θέσης. Παράλληλα, σύμφωνα με το σχήμα 17 φαίνεται η υπεροχή με την κίνηση των beacon nodes.



Figure 17: Algorithm localization error of beacon nodes in the case of static and mobile.

Παρομοίως με το παραπάνω γράφημα, εστιάζουμε στους beacon nodes σε επίπεδο πυκνότητας. Το ακόλουθο σχήμα με το ίδιο μέγεθος δειγμάτων ($N=100$), αποτυπώνει την καμπύλη των σφαλμάτων σε θέμα τοποθεσίας με βάσει την πυκνότητα των beacon nodes.

Με αυτόν τον τρόπο αποκτούμε περισσότερα δεδομένα/παρατηρήσεις, μειώνοντας τις υπάρχουσες ανακρίβειες και φτάνοντας σε μια αναφερόμενη ισορροπία για έναν ορισμένο αριθμό κόμβων στον χώρο.

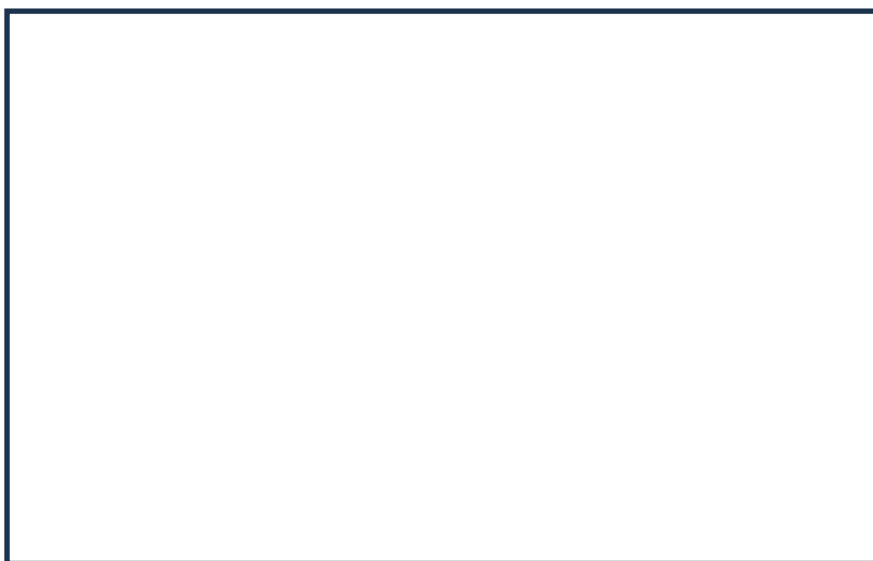


Figure 18: Positioning accuracy based on beacon node density.

Τέλος, παρόμοια επίδραση στα σφάλματα των εκτιμήσεων εντοπισμού αποφέρει και ο αριθμός δειγμάτων. Αναφέραμε αρκετές φορές μέχρι τώρα, πως ο αλγόριθμος επιτρέπει την αλλαγή αυτού του αριθμού αναλόγως τις ανάγκες/περιορισμούς μας. Ανεξαρτήτως των περιστάσεων, όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται, και στο σχήμα 19 φτάνουμε μέχρι και τα 300 διαθέσιμα δείγματα.

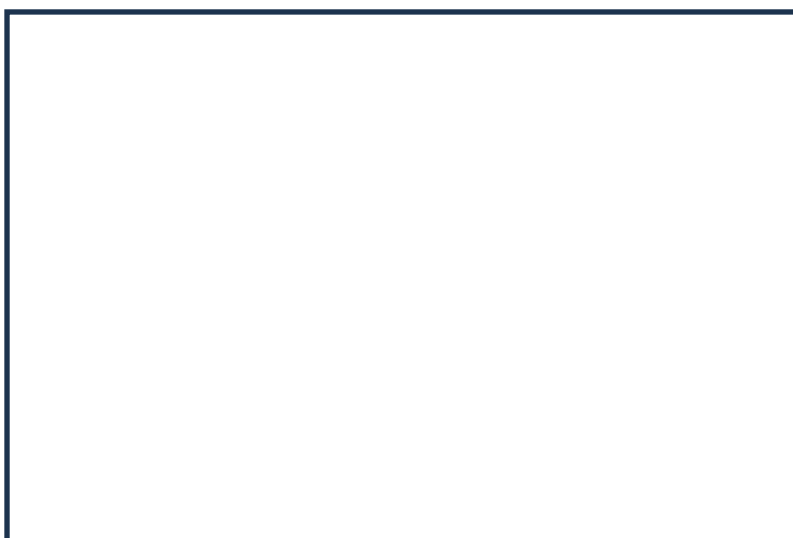


Figure 19: Localization error changed based on sample size.

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή και αναγνώριση κάποιων βασικών ορισμών περί των ασύρματων δικτύων, και αναφορά σε μερικούς τρόπους υπολογισμών.

Στο κεφάλαιο 3, αναφέραμε μερικά σημαντικά ιστορικά γεγονότα για την γενικότερη εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και λεπτομερή ανάλυση των κατηγοριών ασύρματων δικτύων, μερικά βασικά χαρακτηριστικά τους και ορισμένες προσαρμογές που δημιουργούν σε θέμα εντοπισμού.

Με το κεφάλαιο 4, κάναμε αναφορά στους αλγορίθμους εντοπισμού μετά από μια κατανοητή κατηγοριοποίηση τους. Κυρίως στην ενότητα 3.2, όπου μιλήσαμε για τους ίδιους του αλγορίθμους, καθώς και την λεπτομερή εξήγηση των διαφορών τους από θέμα εξοπλισμού μέχρι και λειτουργίας.

Το τελευταίο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5), έγινε μια εκτενής μελέτη του αλγορίθμου εντοπισμού, Monte Carlo. Αρχικά, δώσαμε βασικά στοιχεία για την αναγνώρισή του και μερικών ιδιαίτερων ιδιοτήτων του για τους αναγνώστες. Έπειτα, μιλήσαμε για την σοβαρή εξέλιξη που είχε μέσα στα χρόνια, καθώς και πώς υιοθετήθηκε στα δίκτυα αισθητήρων, WSN. Τέλος, ερμηνεύσαμε βήμα-βήμα τον μηχανισμό πίσω από αυτόν τον αλγόριθμο, την μεθοδολογία που ακολουθούμε και αλλαγές που είμαστε ικανοί να εφαρμόσουμε, αναφέροντας τα αποτελέσματα μέσω κατάλληλων γραφημάτων.

Βιβλιογραφία

1. (Youngwan Lee, Joong-won Hwang, Hyung-Il Kim, Kimin Yun, Yongjin Kwon, Yuseok Bae, Sung Ju Hwang, 2020-2022)[[arXiv:2006.15607v6](#)].
2. **Springer Handbook of Automation, Shimon Y. Nof, 2023[2]**
3. Sneha, V. & Nagarajan, M. (2020). Localization in Wireless Sensor Networks: A Review. *Cybernetics and Information Technologies*,20(4) 3-26[3]
4. R. Beaubrun, "Methods for Node Localization in Wireless Sensor Networks," 2014 IEEE 11th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, Philadelphia, PA, USA, 2014, pp. 521-522
5. S. P. Racharia and J. Kalaivani, (A Review on Localization Problems in Wireless Sensor Network: Algorithmic and Performance Analysis, 2021).
6. Brida, P., Duha, J., Krasnovsky, (On the Accuracy of Weighted Proximity Based Localization in Wireless Sensor Networks, 2007)[6]
7. Mao, G., &Fidan, B., (Introduction to wireless sensor network localization. In *Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks: Monitoring and Surveillance Techniques for Target Tracking*, 2009)
8. Paul AK, Sato T., (Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey on Algorithms, Measurement Techniques, Applications and Challenges, 2017)
9. Jaya and A. Payal, (Analysis and Implementation of APIT Localization Algorithm for Wireless Sensor Network, 2018)
10. S. Sivasakthiselvan and V. Nagarajan, (Localization Techniques of Wireless Sensor Networks: A Review, 2020)
11. R. Beaubrun, (Methods for Node Localization in Wireless Sensor Networks, 2014)
12. S. Chaurasia and A. Payal, (Analysis of range-based localization schemes in wireless sensor networks: A statistical approach, 2011)
13. (Ammar M. A. Abu Znaid, Mohd. Yamani Idna Idris, Ainuddin Wahid Abdul Wahab, Liana Khamis Qabajeh, Omar Adil Mahdi), *Sequential Monte Carlo Localization Methods in Mobile Wireless Sensor Networks: A Review*, 2017[13].
14. Bin Wu, (Algorithm of Underground Personnel Positioning Based on Improved Monte Carlo, 2021)[14].