

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

DIPLOMA THESIS

Design and Implementation of a Low Cost Embedded System for Localization of Drones Flying in Swarms

Author:

Christos SPYRIDAKIS

Thesis Committee:

Prof. Apostolos DOLLAS (Supervisor)

Asst. Prof. Eftychios KOUTROULIS

Asst. Prof. Panagiotis PARTSINEVELOS



*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the diploma of Electrical and Computer Engineer
in the*

School of Electrical and Computer Engineering
Microprocessor and Hardware Laboratory

December 30, 2020

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Abstract

School of Electrical and Computer Engineering

Electrical and Computer Engineer

**Design and Implementation of a Low Cost Embedded System for
Localization of Drones Flying in Swarms**

by Christos SPYRIDAKIS

TODO: Abstract ...

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Περίληψη

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Σχεδίαση και Υλοποίηση Ενσωματωμένου Συστήματος Χαμηλού
Κόστους για Εύρεση Θέσης μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών που
Πετούν σε Σχηματισμό

από τον Χρήστο ΣΠΤΡΙΔΑΚΗ

TODO: Περίληψη ...

Acknowledgements

TODO: Acknowledgements

Contents

Abstract	iii
Abstract	v
Acknowledgements	vii
Contents	ix
List of Figures	xi
List of Tables	xiii
List of Algorithms	xv
Physical Constants	xvii
List of Symbols	xix
List of Abbreviations	xxi
1 Introduction	1
1.1 Unmanned aerial vehicles	2
1.1.1 History and drone types	2
1.1.2 Characteristics	4
1.2 Motivation	5
1.2.1 Nature	5
1.2.2 Swarms and Applications	5
1.3 Scientific Goals and Contributions	6
1.4 Thesis Outline	7
2 Theoretical Background	9
2.1 Distance/Angle Estimation	12
2.1.1 Distance	12
Received Signal Strength	12
Propagation Time	13

2.1.2	Angle	17
	Amplitude response	17
	Phase response	18
2.2	Position Computation	20
2.2.1	Trilateration	20
2.2.2	Bounding Box	23
2.2.3	Triangulation	23
2.2.4	Multilateration	25
2.2.5	Probabilistic approaches	26
2.3	Localization Algorithm	27
2.3.1	Range-based vs Range-free	27
2.3.2	Distributed vs Centralized Position Computation	27
2.3.3	Relative vs Absolute Positioning	27
2.3.4	Indoor vs Outdoor	27
2.3.5	One-hop vs Multihop	27
2.3.6	With vs Without Infrastructure	27
3	Related Work	29
3.1	Thesis Approach	29
4	Design Features and Implementation	31
5	Applications and Usage Examples	33
6	Experiments and Results	35
7	Conclusions and Future Work	37
	References	39

List of Figures

1.1	UAV Examples	3
1.2	UAV principal axes	4
2.1	Localization System components	10
2.2	Localization System overview	11
2.3	Ideal RSSI over distance	13
2.4	Time of Arrival cases	14
2.5	Time Difference of Arrival cases	15
2.6	TDoA hyberbolas based on Δt	16
2.7	Typical anisotropic antenna pattern	18
2.8	Antenna Arrays	19
2.9	Trilateration examples	21
2.10	Bounding Box example	23
2.11	Principles of Triangulation	24
2.12	Triangulation examples	24
2.13	Multilateration example	26

List of Tables

1.1	Κατηγοριοποίηση των UAV βάσει της δομή τους [8].	2
2.1	Nodes' names definitions	9
2.2	Distance/angle estimation techniques and position Computation overview	26

List of Algorithms

Physical Constants

Speed of Light in vacuum $c_0 = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ (exact)

Pi, Archimedes' constant $\pi = 3.14159\,26535$ (approximation)

List of Symbols

A	amplitude	
d	distance	m
r	radius	m
t	time	s
V	velocity	m s^{-1}
s	speed	m s^{-1}
P	power	W (J s^{-1})
f	frequency	Hz
ω	angular frequency	rad
λ	wavelength	m
ϕ	phase	

List of Abbreviations

AoA	Angle of Arrival
BS	Base Station
DoA	Direction of Arrival
ESC	Electronic Speed Control
FPV	First Person View
FSPL	Free Space Path Loss
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Intertial Measurement Unit
ISR	Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance
LoS	Line of Sight
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MAV	Micro Aerial Vehicle
MCU	Micro Controller Unit
ML	Maximum Likelihood
MPU	Micro Processor Unit
NLoS	Non-Line of Sight
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTLS	Real Time Location System
S&R	Search & Rescue
SNR	Signal to Noise Ratio
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
ToF	Time of Flight
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
USV	Unmanned Surface Vehicle
VTOL	Vertically Hover, Take-off, and Land

WSN **Wireless Sensor Networks**

*Dedicated to those people who have helped me be the
person I am today...*

Chapter 1

Introduction

“Alone we can do so little,
together we can do so much”

Hellen Keller

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της επιστήμης έχει επιφέρει την απόκτηση των τεχνολογικών επιτευγμάτων από το ευρύ κοινό με ένα πολύ οικονομικό αντίτιμο. Αυτό σημαίνει ότι ο καθένας πολύ εύκολα μπορεί να έχει στην κατοχή του ακόμα και προϊόντα τα οποία θεωρούνται state-of-the-art χωρίς να χρειάζεται να δαπανήσει μεγάλα ποσά. Το ίδιο φυσικά, συμβαίνει και με τον κλάδο των drone και την - κατά επέκταση - χρήση αυτών · ακόμα και για ψυχαγωγικό σκοπό.

Κατά το τέλος του έτους 2019 μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής υπήρχαν πάνω από 990 χιλιάδες εγγεγραμμένοι χειριστές drone με πάνω από 1.32 εκατομμύρια drone ψυχαγωγικού χαρακτήρα να χρησιμοποιούνται [1]. Ενώ μέχρι το 2025 υπολογίζεται ότι το μέγεθος αγοράς των υπηρεσιών drone θα κοστολογείται στα 63.6 εκατομμύρια δολάρια [2].

Φυσικά η χρήση τους δεν περιορίζεται μόνο στην ψυχαγωγία, εταιρίες όπως η Amazon έχουν αποκτήσει ήδη τα απαραίτητα πιστοποιητικά και εγκρίσεις, με σκοπό να χρησιμοποιήσουν drone για παράδοση των δεμάτων αρκετά σύντομα [3], καθώς προς το παρόν η διαδικασία βρίσκεται σε στάδιο δοκιμών. Συνεπώς είναι εύκολο να κατανοηθεί ότι ο συγκεκριμένος κλάδος πρόκειται να έχει ακόμα μεγαλύτερη άνθιση, με αρκετά μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον να του αναλογεί.

Με την αύξηση των drone και την αύξηση των εφαρμογών, υπάρχει η ανάγκη συνεργασίας και η δημιουργία drone swarms για την επιτυχή ολοκλήρωση των στόχων που έχουν οριστεί. Όμως για να καταφέρουν τα drone να συνεργαστούν χρειάζεται πρώτα να μπορούν να ξεπεράσουν τα προβλήματα τα οποία υπάρχουν.

1.1 Unmanned aerial vehicles

Είναι σημαντικό από τα πρώτα βήματα, να έχει γίνει κατανοητό με τον όρο drone σε τι παραπέμπουμε - όπως επίσης πότε θεωρείται ότι ένα σμήνος από drone πετάει σε σχηματισμό (drone swarm).

1.1.1 History and drone types

Όταν αναφερόμαστε στον όρο Unmanned Aerial Vehicle (**UAV**) ή απλούστερα drone κάνουμε αναφορά για ένα μη επανδρωμένο ιπτάμενο αεροσκάφος το οποίο ελέγχεται είτε απομακρυσμένα από έναν άνθρωπο, είτε είναι τελείως αυτόνομο. Τα **UAV** μαζί με ένα Base Station (**BS**) και την από κοινού επικοινωνίας του σταθμού - drone, δημιουργούν αυτό που ονομάζουμε Unmanned Aircraft System (**UAS**) [4] [5].

Η πρώτη εμφάνιση των **UAV** έγινε κατά το 1849 στα πλαίσια μάχης, ενώ οι πρώτες καινοτομίες πάνω σε αυτά ξεκίνησαν ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα. Το 2013 τουλάχιστον 50 χώρες χρησιμοποιούσαν **UAVs** για κάποιον σκοπό, με μερικές από αυτές φυσικά να σχεδιάζουν τα δικά τους [5]. Αυτήν την στιγμή υπάρχουν πάνω από 1000 διαφορετικά μοντέλα **UAV** που χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο, με τα περισσότερα από αυτά να μην έχουν ψυχαγωγικό χαρακτήρα [6].

Είναι λοιπόν ξεκάθαρο ότι το πλήθος των drone είναι τόσο μεγάλο, λόγω των διαφορετικών αναγκών - και ότι κάποια έχουν καλύτερα αποτελέσματα από ότι άλλα σε συγκεκριμένες αποστολές. Για αυτό, έχουν γίνει ήδη προσπάθειες για την κατηγοριοποίηση των **UAVs** σύμφωνα με τα διάφορα χαρακτηριστικά που μπορεί να έχουν. Ενδεικτικά με βάση το μέγεθος, την αυτονομία, το βάρος ή το μηχανολογικό σχεδιασμό των **UAV** να είναι μερικές από τις υπάρχουσες [4] [7] [8]. Στο Table 1.1 υπάρχει μία απλουστευμένη κατηγοριοποίηση η οποία προτάθηκε από τους συγγραφείς του [8] σύμφωνα με τη βασική μηχανολογική δομή που μπορεί να έχει ένα drone καθώς και τα πλεονεκτήματα της κάθε δομής.

TABLE 1.1: Κατηγοριοποίηση των **UAV** βάση της δομής τους [8].

Drones	Main features
Fixed-Wing	long endurance and fast flight speed
Fixed-Wing Hybrid	VTOL and long endurance flight
Single Rotor	VTOL , hover, and long endurance flight
Multicopter	VTOL , hover, and short endurance flight



FIGURE 1.1: UAV Examples

Τυπικά τα Fixed-Wing drones είναι αρκετά ακριβά, χρειάζονται εξειδικευμένους χειριστές για να λειτουργήσουν, όπως επιπλέον και περισσότερο χώρο για την απογείωση και την προσγείωση. Είναι ιδανικά για εφαρμογές που χρειάζεται να καλύψουμε μεγάλες περιοχές και συχνά έχουν αυτονομία τουλάχιστον μερικών ωρών. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιούνται κυρίως από κυβερνήσεις, στρατιωτικές μονάδες ή επιχειρήσεις για την γρήγορη επίβλεψη μεγάλων εκτάσεων [9].

Τα Fixed-Wing Hybrid προσπαθούν να λύσουν τα μειονεκτήματα που έχουν τα Fixed-Wing drones, την μη ικανότητα δηλαδή για Vertically Hover, Take-off, and Land (VTOL) όμως είναι ακόμα σε αρχικά στάδια [8].

Τα Single Rotor είναι επίσης αρκετά ακριβά, πολύπλοκα μηχανολογικά μηχανήματα, που δέχονται πολλούς κραδασμούς, απαιτούν εξειδικευμένους χειριστές όμως μπορούν να μεταφέρουν αρκετά βαριά payloads, θετικό στην χρήση τους ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν VTOL [8].

Τα Multirotor είναι ίσως τα πιο ευρέως διαδεδομένα. Καθώς είναι τα πιο οικονομικά από τα παραπάνω και εύκολο να κατασκευαστούν. Μπορούν να βρεθούν στο εμπόριο με διάφορο πλήθος από έλικες και είναι το κύριο είδος που χρησιμοποιείται από ερασιτέχνες ή χομπίστες για λόγους αναψυχής [8].

Στο Figure 1.1 δίνονται κάποια ενδεικτικά παραδείγματα UAVs με βάση την κατηγοριοποίηση του Table 1.1. Φυσικά αυτή η κατηγοριοποίηση δεν περιλαμβάνει όλα τα είδη drone, είναι όμως ικανοποιητική για να γίνουν ξεκάθαρες δύο βασικές ιδέες. Αρχικά ανάλογα με την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει, θα πρέπει να επιλέξουμε την χρήση του πλέον κατάλληλου τύπου drone. Όπως επίσης με βάση την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου - αυτόματα έχουμε να διαχειριστούμε τα πλεονεκτήματα ή τα μειονεκτήματα που έχει.

Σε περίπτωση που μας ενδιαφέρει, οι συγγραφείς του [7] παρουσιάζουν με εκτενέστερο τρόπο διάφορες κατηγοριοποιήσεις και είδη drone τα οποία δεν εμπίπτουν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής και κυμαίνονται από smart dust, bio-drones, hybrid drones και άλλα πολλά.

1.1.2 Characteristics

Σε όποια από τις κατηγορίες και αν αντιστοιχεί ένα drone από την στιγμή που είναι ένα ιπτάμενο αντικείμενο, θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να κινείται - φυσικά - στον αέρα. Στο Figure 1.2 παρουσιάζονται στους 3 άξονες, οι βαθμοί ελευθερίας κίνησης ενός UAV [10] καθώς και το όνομα που δίνεται στην κίνηση ανάλογα με τον άξονα που πραγματοποιείται.



FIGURE 1.2: UAV principal axes (URL)

Ζούμε σε μία ψηφιακή εποχή, όπου έξυπνες συσκευές γεμάτες με αισθητήρες βρίσκονται γύρω μας. Τέτοια τεχνολογικά επιτεύγματα όπως τα drones είναι επίσης εξοπλισμένα με Micro Controller Units (MCU) [11] ή Micro Processor Units (MPU) [12]

για τον έλεγχο τους, ενώ δεν θα μπορούσαν να μην περιλαμβάνουν πλέον και ένα μεγάλο πλήθος και εύρος διαφορετικών τύπων sensors on-board. Με δύο από τους πιο σημαντικούς να είναι το Electronic Speed Control (ESC) [13] και το Inertial Measurement Unit (IMU) [14] τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε το drone να μπορεί να διατηρεί μία σταθερή και ελεγχόμενη πτήση [8]. Εκτός από αυτούς βέβαια, ένα drone μπορεί να διαθέτει Global Positioning System (GPS), camera για λήψη οπτικού υλικού ή ελέγχου μέσω First Person View (FPV), Obstacle avoidance sensors ή ακόμα και άλλους. Με κύριο περιορισμό τα αισθητήρια όργανα να βρίσκονται στο εύρος βάρους του payload που μπορεί να μεταφέρει το drone.

Σε αυτό το section πραγματοποιήθηκε μία πρώτη οριοθέτηση του όρου drone, παρόλα αυτά δεν αναφέρθηκαν λόγοι ύπαρξης τους, καθώς και εφαρμογές τους. Η ύπαρξης των swarms είναι ουσιαστικά η κάλυψη των αναγκών από των individual drones σε μεγαλύτερη κλίμακα, για αυτό μερικές από τις εφαρμογές των drone βρίσκονται στο Section 1.2.2.

1.2 Motivation

Ξεκινώντας από τα individual drones, αξίζει να σημειωθεί ότι το Πολυτεχνείο Κρήτης έχει ένα ενεργό ερευνητικό ιστορικό στον τομέα των αεροχημάτων. Το SenseLab στο οποίο υπεύθυνος καθηγητής είναι ο κύριος Παρτσινέβελος της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων να είναι ένα από αυτά - και μάλιστα με πολλαπλές διακρίσεις σε διεθνείς διαγωνισμούς [15] [16].

1.2.1 Nature

Στην φύση είναι αρκετά συχνή η ύπαρξη έμβιων οργανισμός που κινούνται σε ομάδες, με μερικά από αυτά ως παράδειγμα, τα σμήνη από πουλιά και έντομα, κοπάδια ψαριών ή και αγέλες ζώων. Σκοπός της συνεργασίας τους είναι κυρίως η προστασία από θηρευτές ή άλλοι σχετικοί με την επιβίωση. Αρκετές έρευνες έχουν γίνει εμπνευσμένες σε αυτό, ακόμα και στον τομέα των fleet of drones [17] [18] [19].

1.2.2 Swarms and Applications

Από μόνο του ένα UAV σε πολλές περιπτώσεις θα μπορέσει να φέρει εις πέραν την αποστολή που του έχει ανατεθεί. Πολύ εύκολα όμως μπορούν να δημιουργηθούν

ζητήματα αξιοπιστίας, όταν ένα μεμονωμένο drone χρειάζεται ως παράδειγμα να χαρτογραφήσει σε μικρό χρονικό διάστημα ένα άγνωστο και μεγάλης έκτασης περιβάλλον. Όπως επίσης, εάν θα θέλαμε να διαθέτει πολλαπλούς αισθητήρες για να έχουμε πιο λεπτομερείς δεδομένα σε μία αποστολή, όμως αυτό να είναι αδύνατον διότι υπερβαίνουν το δυνατόν payload που μπορεί να μεταφέρει το drone. Η ακόμα, και για το ενδεχόμενο αποτυχίας της αποστολής, σε κάποιο πιθανό malfunction που θα πραγματοποιηθεί στο ιπτάμενου όχημα. Μπορούμε να πούμε λοιπόν σε μία abstract σύγκριση με αυτή των ζώων, ότι ωθούμαστε για ανάλογους σκοπούς στην χρήση των swarms ώστε να ξεπεράσουμε αυτά τα προβλήματα [20].

Με τον όρο swarm συχνά αναφερόμαστε στην μεθοδολογία που ακολουθούμε ώστε να συντονίζουμε πολλαπλές ανεξάρτητες ρομποτικές οντότητες να συμπεριφέρονται συνεργατικά ως ένα ενιαίο σύστημα [21]. Με τον όρο συνεργατικά, αυτό σημαίνει είτε να μπορούν να κινηθούν ως ομάδα [22] [23] [24], είτε να επικοινωνούν ώστε γνώση πληροφορίας την οποία έχει συλλέξει ένα από αυτά να μεταδίδεται και στα υπόλοιπα (π.χ. σε περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε 3D reconstruction μίας περιοχής ή γνώση της θέσης από την οποία λαμβάνεται - με χρήση της κάμερας - υλικό είναι σημαντική για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου [25]).

Σήμερα τα drones καθώς και τα fleet of drones χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Έχει γίνει αναφορά είδη από την αρχή του chapter ότι χρησιμοποιούνται για λόγους αναψυχής, με μερικά παραδείγματα, την διεκπεραίωση shows [26] [27] [28] και την καταγραφή οπτικού υλικού για δημιουργία ταινιών [29]. Άλλες πιο ζωτικής σημασίας χρήσεις τους, είναι σχετικές με environment mapping [30], police surveillance [31], natural disaster inspection [32], Search & Rescue (S&R) [33], light cargo transportation [34] και πολλές άλλες. Ακόμα και στρατιωτικές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν drones. Συνήθως σε αυτές τις περιπτώσεις αναφερόμαστε στην χρήση Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV) [35] [36] και πολλές από τις εφαρμογές στο συγκεκριμένο τομέα έχουν να κάνουν με Intelligence Surveillance, and Reconnaissance (ISR) [37].

Για περισσότερες εφαρμογές των drones/swarms [38] ή λεπτομέρειες σχετικά με αυτές, μπορούμε να ανατρέξουμε στην υφιστάμενη βιβλιογραφία [39] [40] [41].

1.3 Scientific Goals and Contributions

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό η γνώση της σχετικής θέσης ενός UAV σε σχέση με τα υπόλοιπα του σμήνους, είναι αρκετά σημαντική για ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει

η απαραίτητη ερευνητική αναζήτηση, ώστε να επιτευχθεί ο σχεδιασμός καθώς και η υλοποίηση ενός ενσωματωμένου συστήματος - το οποίο να είναι σε θέση με όσο το δυνατόν πιο οικονομικό τρόπο να υπολογίζει την θέση των μεμονωμένων αεροχημάτων όταν αυτά πετούν σε σχηματισμό.

1.4 Thesis Outline

- **Chapter 2 - Theoretical Background:** Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο, καθώς και βασικές μεθοδολογίες εύρεσης τοποθεσία, που προέρχονται από τον τομέα των Wireless Sensor Networks (WSN).
- **Chapter 3 - Related Work:** Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται μία συνοπτική αναφορά σε τεχνικές που χρησιμοποιούν ήδη τα drones για την εύρεσης θέσης μέσα στα swarms.
- **Chapter 4 - Design Features and Implementation:** Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του ενσωματωμένου συστήματος που σχετίζεται αυτή η διπλωματική.
- **Chapter 5 - Applications and Usage Examples:**
- **Chapter 6 - Experiments and Results:** Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι απαραίτητοι έλεγχοι που έγιναν για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του συστήματος.
- **Chapter 7 - Conclusions and Future Work:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα τα οποία βγήκαν από το σύνολο της διπλωματικής - καθώς και κάποιες από τις πιθανές μελλοντικές εξελίξεις της.

Chapter 2

Theoretical Background

"Let no one ignorant of
geometry enter"

Plato

Ο χώρος των **WSN** έχει και αυτός τα τελευταία χρόνια υψηλό ερευνητικό ενδιαφέρον. Θα μπορούσε να πει κανείς - λόγω το ότι αποτελεί ένα πιο γενικό κλάδο - περισσότερο από ότι αυτό των drones. Συνεπώς θα μεταφερθούμε σε πρώτο επίπεδο στο πιο γενικό φάσμα, αυτό των **WSN** για να προσεγγίσουμε το localization problem.

Όταν μιλάμε για **WSN**, αναφερόμαστε σε αυτόνομα ηλεκτρονικά συστήματα, χωρικά διασκορπισμένα σε ένα πεδίο - τα οποία συχνά περιλαμβάνουν αισθητήρες και επικοινωνούν με τα γειτονικά τους ή **BS** για να μεταφέρουν πληροφορία [42] [43].

Το καθένα από αυτά τα ανεξάρτητα συστήματα ονομάζεται **Node**. Ενώ για το κάθε μεμονωμένο node μπορεί να έχουμε στην διάθεση μας location information ή όχι. Μία πρώτη σκέψη θα ήταν κάθε node ενός συστήματος αισθητήρων να περιλαμβάνει **GPS** ώστε να γνωρίζουμε την θέση του. Αυτό μπορεί γρήγορα να καταρριφθεί σαν σκέψη, αν αναλογιστούμε αρχικά ότι το Global Navigation Satellite System (**GNSS**) δεν είναι διαθέσιμο σε κάθε περιβάλλον λειτουργίας (π.χ. εσωτερικούς χώρους), όπως επίσης μπορεί να μην είναι δυνατή η χρήση του σε όλους τους κόμβους ενός συστήματος, λόγω περιορισμών όπως το κόστος, μέγεθος του node και energy consumption [43].

TABLE 2.1: Nodes' names definitions

Node name	Definition
Unknown/Free/Dumb/Non-anchors	Their position is unknown
Beacons/Anchors/Landmarks	Nodes with known location information
Settled	Initial unknown nodes with estimated position

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία [43] [44] [45] βρίσκουμε ότι nodes των οποίων η θέση είναι γνωστή ή άμεσα υπολογίσιμη, συχνά ονομάζονται **Beacons**. Πληροφορία σχετικά με την θέση αυτών των nodes είναι γνωστή, είτε γιατί έχουν τοποθετηθεί από εμάς σε προκαθορισμένες θέσεις, είτε μέσου ενός εξωτερικού συστήματος όπως το **GPS** [46]. Αντίθετα κόμβοι για τους οποίους δεν έχουμε αρχικά πληροφορία της θέσης τους, ονομάζονται **Non-anchors**. Άλλος ένας σημαντικός ορισμός, που θα πρέπει να αναφερθεί είναι ότι συχνά ονομάζουμε **Settle nodes**, αυτά τα οποία αρχικά δεν γνωρίζαμε την θέση τους αλλά στην συνέχεια την εκτιμήσαμε. Στο Table 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα διάφορα ονόματα που έχουν δοθεί ανά καιρούς για το κάθε τύπο node.

Σκοπός ενός localization system είναι, με χρήση της γνώσης που έχουμε για τα beacon nodes να εκτιμήσουμε την θέση όσο περισσότερων unknown nodes ώστε να τα μετατρέψουμε σε settled nodes και η εκτίμηση της κάθε θέσης να είναι με όσο το δυνατόν μικρότερο error απόκλισης.



FIGURE 2.1: Localization System components based on [44] ([URL](#))

Οι συγγραφείς του [44] επιχειρούν να χωρίσουν ένα localization system, ώστε αυτό να αποτελείται από τρία διακριτά components, αυτή τη κατηγοριοποίηση την υιοθετούν κατά την έρευνα τους και οι ερευνητές του [47]. Πρώτο μπορεί να θεωρηθεί αυτό του **Distance/Angle Estimation**, που σκοπό έχει να υπολογίσει την απόσταση ή γωνία που έχουν δύο nodes του συστήματος μεταξύ τους. Η πληροφορία που θα παραχθεί από αυτό το component θα χρησιμοποιηθεί στα άλλα μέρη του συστήματος. Στην συνέχεια υπάρχει το **Position Computation**, δουλειά του οποίου είναι να υπολογίσει την θέση ενός node με βάση την γνώση που έχουμε για τα beacons και την πληροφορία που λάβαμε από το πρώτο component. Ενώ τέλος είναι το κύριο μέρος του συστήματος, με όνομα **Localization Algorithm** και ουσιαστικά είναι ο προκαθορισμένος τρόπος που θα ακολουθηθεί για να υπολογιστεί η θέση των unknown nodes με βάση όλες τις πληροφορίες που έχουμε. Στο Figure 2.1 δίνεται η

απεικόνιση που έδωσαν οι συγγραφείς του [44] για να εξηγήσουν το παραπάνω. Ενώ στο Figure 2.2 έχει γίνει μία προσπάθεια να κατηγοριοποιηθούν τα κομμάτια καθώς και τεχνικές των Localization Systems, με βάση τα [43] [44] [45] και αναλύονται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

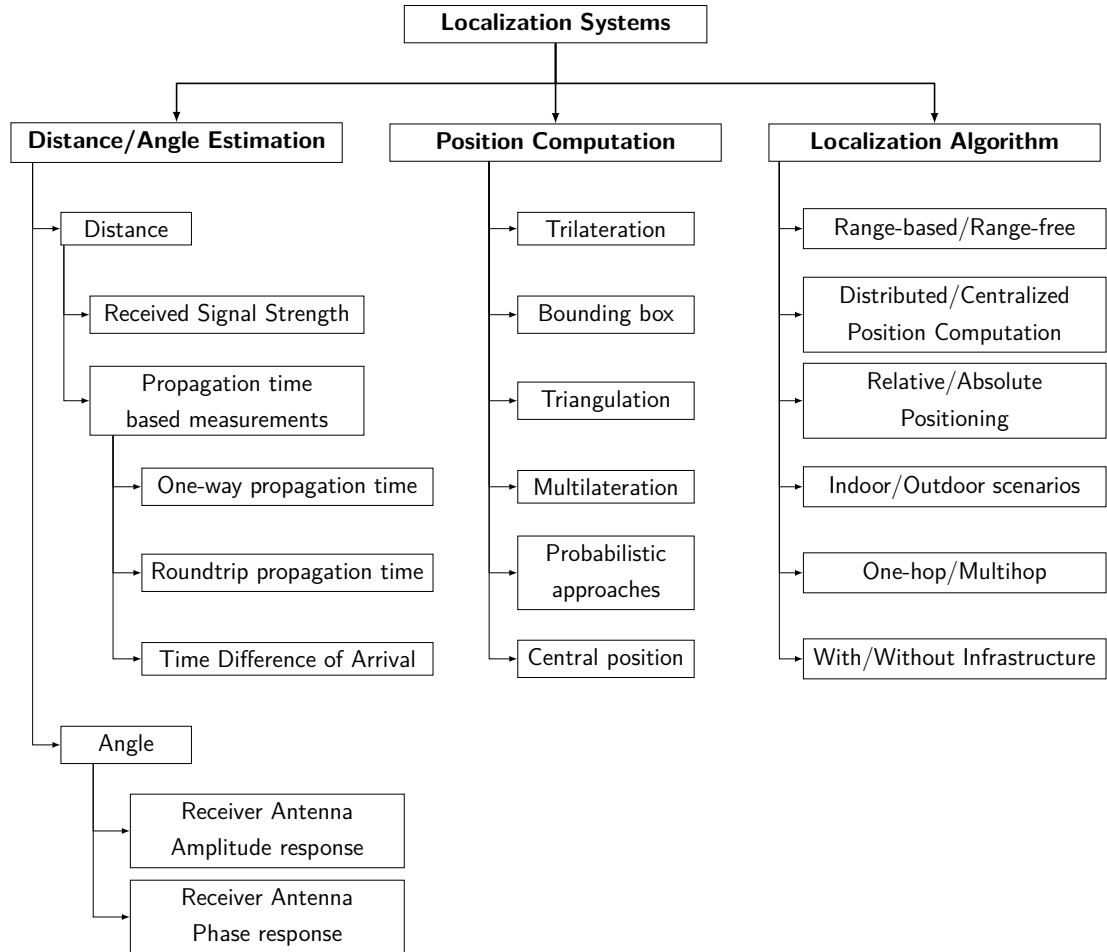


FIGURE 2.2: Localization System overview

Με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό των Localization Systems σε τρία διακριτά μέρη, μπορούμε να καταλάβουμε ότι η απόκλιση της εκτίμησης του συνολικού συστήματος, εξαρτάται από τα σφάλματα του κάθε μεμονωμένου μέρους.

2.1 Distance/Angle Estimation

2.1.1 Distance

Θα ξεκινήσουμε με μία σύντομη ανάλυση των τεχνικών εκτίμησης της απόστασης μεταξύ δύο nodes που χρησιμοποιούνται ήδη.

Received Signal Strength

Η πρώτη τεχνική η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό απόστασης στα WSN, είναι αυτή με όνομα Received Signal Strength Indicator (RSSI) και έχει ως αρχή την χρήση της έντασης της ισχύς ενός σήματος που λαμβάνουμε στον δέκτη, ως τρόπο υπολογισμού της απόστασης του πομπού από αυτόν. Path loss ή path attenuation [48] ονομάζεται η μείωση της ισχύς ενός σήματος καθώς αυτό διαδίδεται. Στον ελεύθερο χώρο η λαμβανόμενη ισχύς $P_r(d)$ που ανιχνεύει ο πομπός μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο του Free Space Path Loss (FSPL) [49], το οποίο προκύπτει μέσω της Friis transmission equation [45] [50] [51] - σχέση (2.1).

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2.1)$$

Όπου P_t είναι η ισχύς που στέλνει ο πομπός, G_t είναι το gain της κεραίας του πομπού, G_r το gain της κεραίας του δέκτη, λ είναι το μήκος κύματος του σήματος το οποίο μεταδίδουμε και d η απόσταση του πομπού από τον δέκτη. Αν θεωρήσουμε ότι τα G_t , G_r και λ είναι μη μεταβλητές τιμές - με $C_f = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2}$ - τότε μπορούμε να καταλήξουμε στην (2.2) [52].

$$P_r(d) = C_f \frac{P_t}{d^2} \quad (2.2)$$

Αυτό που μπορούμε να δούμε από την παραπάνω σχέση είναι ότι, ιδανικά στον ελεύθερο χώρο σε Line of Sight (LoS) μετάδοση - η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ο πομπός εξαρτάται από το αντίστροφο τετράγωνο της απόστασης των δύο nodes. Η σχέση (2.2) συχνά αναφέρεται σε watt, όμως όταν μιλάμε για transmitting power αντί για την χρήση των watt, είναι αρκετά βολική η χρήση του dBm [53]. Για αυτό τον λόγω παρακάτω παραπεύθονται τα conversion equations, από το ένα στο άλλο [50] [53].

$$\begin{cases} P[dBm] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P[mW]}{1[mW]} \right) \\ P[mW] = 10^{\frac{(P[dBm])}{10}} \end{cases} \quad (2.3)$$

Ενώ το Figure 2.3 περιγράφει σχηματικά το ιδανικό μοντέλο της εξάρτησης της ισχύος με την αύξηση της απόστασης όταν χρησιμοποιούμε στον δέκτη μέτρηση σε dBm.

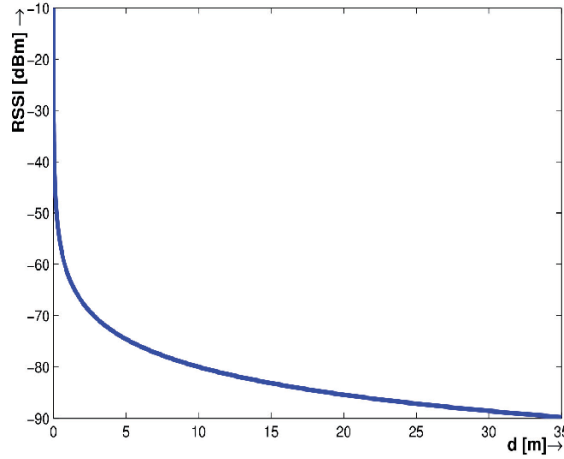


FIGURE 2.3: Ideal RSSI over distance based on [54]

Αν λοιπόν, μετράμε την ισχύ με την οποία λαμβάνουμε ένα σήμα, μπορούμε να είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την απόσταση που βρίσκεται ο πομπός από εμάς. Αυτή η μέθοδος παρόλο που είναι αρκετά δημοφιλής και οικονομική για τον υπολογισμό της απόστασης - λόγω του ότι δεν απαιτεί επιπλέον αισθητήρες - σε πραγματικές συνθήκες αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα, καθώς οι μετρήσεις μπορούν να επηρεαστούν από θόρυβο, ανακλάσεις του σήματος, διαθλάσεις, δυναμικά περιβάλλοντα ή εμπόδια σε αυτά, Non-Line of Sight (NLoS) μετάδοση, ή ακόμα και errors στο hardware [44] [54]. Σε ένα βαθμό μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση με στατικό ή δυναμικό calibration του συστήματος όμως μέχρι τώρα δεν χρησιμοποιείται για εκτίμηση απόστασης σε εφαρμογές όπου nodes έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους ή μας ενδιαφέρει να έχουμε μεγάλη ακρίβεια προσέγγισης της απόστασης [54].

Propagation Time

Σε αυτήν την κατηγορία εκτίμησης απόστασης μεταξύ nodes - η οποία βασίζεται σε χρονικές μετρήσεις της διάδοσης του σήματος Time of Flight (ToF) - κατά κύριο

λόγο χρησιμοποιούνται δύο βασικές τεχνικές, η Time of Arrival (ToA) και η Time Difference of Arrival (TDoA) [44].

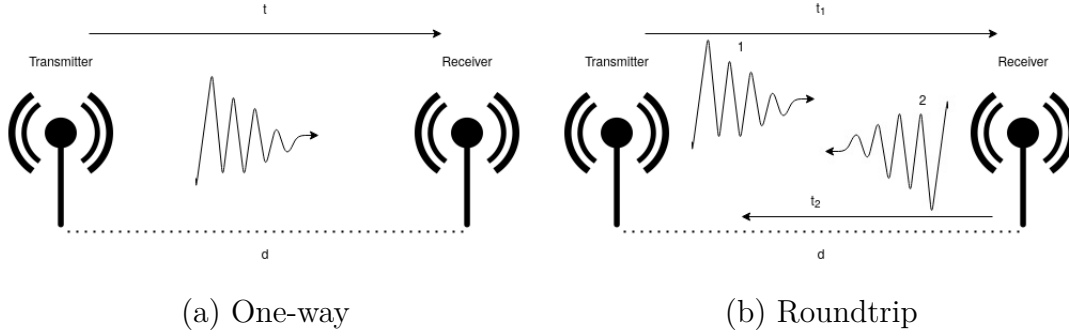


FIGURE 2.4: Time of Arrival cases

Θα ξεκινήσουμε με μία σύντομη περιγραφή της ToA. Από την κινηματική γνωρίζουμε την σχέση (2.4), η οποία συσχετίζει την ταχύτητα κίνησης ενός σώματος V ως το πηλίκο της μεταβολής της θέσης ds - που έκανε το σώμα, προς τον χρόνο dt που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η μεταβολή [55].

$$V = \frac{ds}{dt} \quad (2.4)$$

$$d = s(t_b - t_a) \quad (2.5)$$

Αξιοποιώντας την (2.4) ως αρχή, μπορούμε να καταλήξουμε στην (2.5) για να εκτιμήσουμε την απόσταση d που βρίσκονται δύο nodes μεταξύ τους, αν ένα κύμα κινείται με ταχύτητα s και χρειάστηκε χρόνο t για να μεταδοθεί από το ένα node στο άλλο. Στο Figure 2.4 (a) απεικονίζεται σχηματικά αυτό, όπου $t = t_b - t_a$ με t_b η χρονική στιγμή που φτάνει το κύμα στο receiver και t_a η χρονική στιγμή η οποία ξεκινάει από τον transmitter. Σε περίπτωση που μιλάμε για Radio Frequency (RF) η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος είναι ίση με την ταχύτητα μετάδοσης του φωτός c_o , το οποίο σε $0.1\mu s$ διανύει περίπου $30m$. Με βάση αυτό, μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε ότι για να έχουμε ακριβή αποτελέσματα είναι αρκετά σημαντικό τα clocks των δύο nodes να είναι απόλυτα συγχρονισμένα για να μην έχουμε error απόκλισης, πράγμα που απαιτεί να κάνουμε το συνολικό σύστημα αρκετά πιο πολύπλοκο σχεδιαστικά ώστε η απόκλιση μας να είναι σε ανεκτά σημεία για την εφαρμογή [44] [45].

Μπορούμε να το παρακάμψουμε αυτό, με το να γίνει η μέτρηση σε roundtrip μετάδοση, Figure 2.4 (b). Σε αυτήν την περίπτωση το ένα node στέλνει ένα σήμα, και

μόλις το λάβει ένα γειτονικό node, απαντάει πίσω στο πρώτο. Με αυτόν τον τρόπο η μέτρηση του χρόνου εκκίνησης t_a και άφιξης t_b του σήματος γίνονται στο ίδιο node - άρα δεν χρειάζεται συγχρονισμός, και η πραγματική απόσταση είναι η μισή από αυτή που θα υπολογιστεί. Ο κύριος παράγοντας σφάλματος σε αυτή την μέθοδο, είναι ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάστηκε το δεύτερο node για να διαχειριστεί το σήμα που έλαβε και να απαντήσει. Αυτό το internal delay t_{in} μπορεί να είναι είτε γνωστό από ένα a priori calibration, είτε μπορεί να μετριέται και να στέλνεται μαζί με το σήμα απάντησης - ώστε να αφαιρείται από τον χρόνο μετάδοσης του κύματος [45]. Με αυτά τα δεδομένα, η σχέση (2.6) περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού της απόστασης d μεταξύ των δύο nodes.

$$d = \frac{s(t_b - t_a - t_{in})}{2} \quad (2.6)$$

Όσον αφορά την τεχνική **TDoA**, και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν δύο παραλλαγές της [44] - όπου και οι δύο είναι βασισμένες στην αρχή το ότι δεν μας ενδιαφέρει η χρονική στιγμή που ξεκίνησε η αποστολή ενός σήματος, αλλά μόνο οι χρονική στιγμή που το λάβαμε.

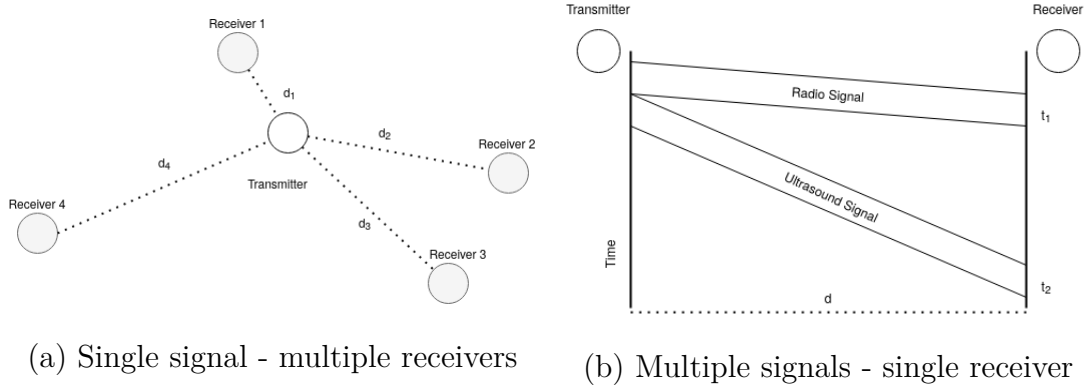


FIGURE 2.5: Time Difference of Arrival cases

Η πρώτη περίπτωση σχετίζεται με single signal και multiple receivers, παρουσιάζεται στο Figure 2.5 (a), χρησιμοποιείται συνήθως στα cellular network και απαιτεί την ύπαρξη τουλάχιστον 4 beacons για την απόκτηση location πληροφορίας ενός free node στον τρισδιάστατο χώρο. Υπολογίζει την χρονική διαφορά που έφτασε σε καθένα από τα beacons το σήμα που έστειλε το free node, για την εκτίμηση της θέσης του free node από το καθένα από αυτά. Σημαντικό σε αυτήν την περίπτωση είναι και εδώ, να είναι απόλυτα συγχρονισμένα τα beacons. Βασίζεται στις ιδιότητες των υπερβολικών καμπύλων και στο ότι με δεδομένη μία συγκεκριμένη χρονική διαφορά

του σήματος, το free node θα πρέπει να βρίσκεται κάπου πάνω σε μία υπερβολική καμπύλη όπως παρουσιάζεται από το Figure 2.6 [56].

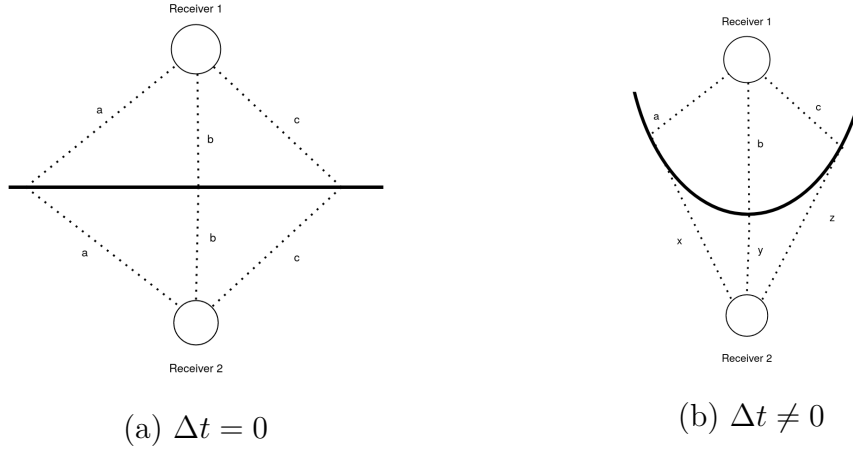


FIGURE 2.6: TDoA hyperbolas based on Δt

$$\Delta t = a - a = 0$$

$$\Delta t = x - a$$

$$\Delta t = b - b = 0$$

$$\Delta t = y - b$$

$$\Delta t = c - c = 0$$

$$\Delta t = z - c$$

Μόνο από αυτόν τον υπολογισμό δεν δύναται να κάνουμε ακριβή εκτίμηση απόστασης, μπορούμε να συμπεράνουμε όμως τον γεωμετρικό τόπο στον οποίο βρίσκεται το free node. Στο Section 2.2.4 - και σε επέκταση αυτού - παρουσιάζεται όμως, ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να συνδυάσουμε τέτοια πληροφορία από πολλαπλά beacon για να εκτιμήσουμε την ακριβή θέση του free node.

Η δεύτερη εκδοχή της χρήσης TDoA - η οποία είναι πιο συχνή στα WSN και μας ενδιαφέρει περισσότερο, χρησιμοποιεί multiple signals με single receiver και παρουσιάζεται στο Figure 2.5 (b). Αρχή λειτουργίας έχει ότι ο transmitter θα στείλει πολλαπλά διαφορετικού είδους σήματα και ο δέκτης θα μετρήσει την χρονική διαφορά που τα έλαβε. Ως παράδειγμα μπορεί το ένα σήμα να είναι σε RF και να κινείται με ταχύτητα $s_r = c_o$ και το άλλο ηχητικό με ταχύτητα $s_s \approx 343m/s$ ¹. Αν t_1 τη χρονική στιγμή που λαμβάνει το RF σήμα ενώ t_2 το ηχητικό, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση μεταξύ των κόμβων από την εξίσωση (2.7) [44].

¹Για μετάδοση σε ξηρό αέρα υπό θερμοκρασία 20 °C [57]

$$d = (s_r - s_s)(t_2 - t_1) \quad (2.7)$$

Θετικό σε αυτήν την μέθοδο είναι ότι το error μπορεί να είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, όμως αρχικά απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό στο node - ώστε να μπορεί να στείλει και να λάβει πολλαπλά είδη σήματος - πράγμα που μπορεί να το κάνει αντιστοιχονομικό ή αρκετά μεγαλύτερο σε διαστάσεις από το επιθυμητό. Όπως επίσης - και μάλιστα σημαντικότερο - η απόσταση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του δεύτερου σήματος. Ως παράδειγμα τα ηχητικά σήματα δεν μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις ή το ότι η ταχύτητα τους μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από περιβαλλοντολογικούς παράγοντες [43].

2.1.2 Angle

Άλλη μία χρήσιμη μέτρηση η οποία μας ενδιαφέρει, είναι η εκτίμηση της γωνίας από την οποία λαμβάνουμε το σήμα ενός γειτονικού node σε σχέση με έναν άξονα αναφοράς. Ο άξονας αυτός μπορεί να είναι είτε κοινός για όλα τα nodes (π.χ. ως προς το βόρειο γεωγραφικό πόλο), είτε μπορεί να είναι για το κάθε node ξεχωριστός, ως παράδειγμα με βάση τον προσανατολισμό του ίδιου του node ή με βάση την γωνία λήψης ενός επιπλέον σήματος [44]. Την πληροφορία αυτή την βρίσκουμε στην βιβλιογραφία να ονομάζεται Angle of Arrival (AoA) ή Direction of Arrival (DoA).

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2.8)$$

Γνωρίζουμε ότι ένα σήμα καθορίζεται πλήρως από τρεις παραμέτρους, το πλάτος του A , την συχνότητα του f καθώς επίσης και από την φάση του ϕ - σχέση (2.8). Για τον υπολογισμό της γωνίας AoA μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές με γνώμονα τα παραπάνω.

Amplitude response

Ο όρος Beamforming [58] χρησιμοποιείται για να περιγράψει το pattern της ευαισθησίας του σήματος που στέλνει/λαμβάνει μία directional antenna [59] ή γενικά στην χρήση του μοντέλο της anisotropy antenna. Το pattern αυτού του τύπου

κεραίας, παρουσιάζεται στο Figure 2.7 [45] και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτό το χαρακτηριστικό για τον υπολογισμό της AoA. Εάν χρησιμοποιούμε directional antenna στον receiver και μπορούμε είτε με μηχανικό είτε με ηλεκτρονικό τρόπο να στρέψουμε την κεραία σε διάφορες κατευθύνσεις, τότε μπορούμε μετρώντας το πλάτος του σήματος που λαμβάνουμε, να εκτιμήσουμε και την κατεύθυνση του - όπου ιδανικά βρίσκεται εκεί από όπου έχουμε την μέγιστη τιμή του amplitude του κύματος. Σημαντικές παράμετροι για την εκτίμηση της γωνίας σε αυτήν την περίπτωση, είναι επίσης η ευαισθησία του δέκτη καθώς και το width του beam της. Λανθασμένη εκτίμηση μπορεί να προκύψει, αν για κάποιο λόγο το πλάτος του σήματος που λαμβάνουμε δεν είναι σταθερό. Σε αυτή την περίπτωση, μία λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε μία δεύτερη - μη κινούμενη - omnidirectional κεραία και να κανονικοποιήσουμε τις μετρήσεις της directional με βάση τις μετρήσεις της δεύτερης [45].

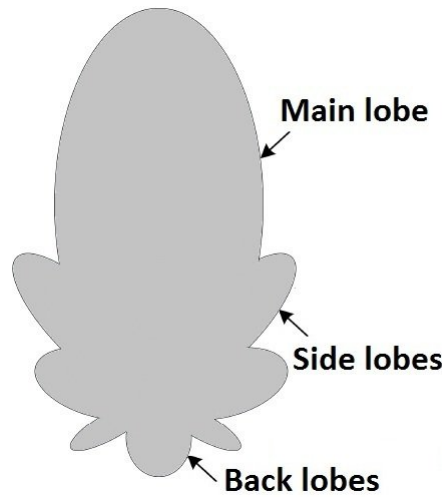


FIGURE 2.7: Typical anisotropic antenna pattern based on [45]
(URL)

Phase response

Άλλος τρόπος υπολογισμού του AoA είναι με την αξιοποίηση της πληροφορία για την φάση που έχουμε για ένα σήμα. Σε αυτήν την περίπτωση χρειαζόμαστε ή κεραίες αρκετά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του σήματος που στέλνουμε, ή antenna arrays [45].

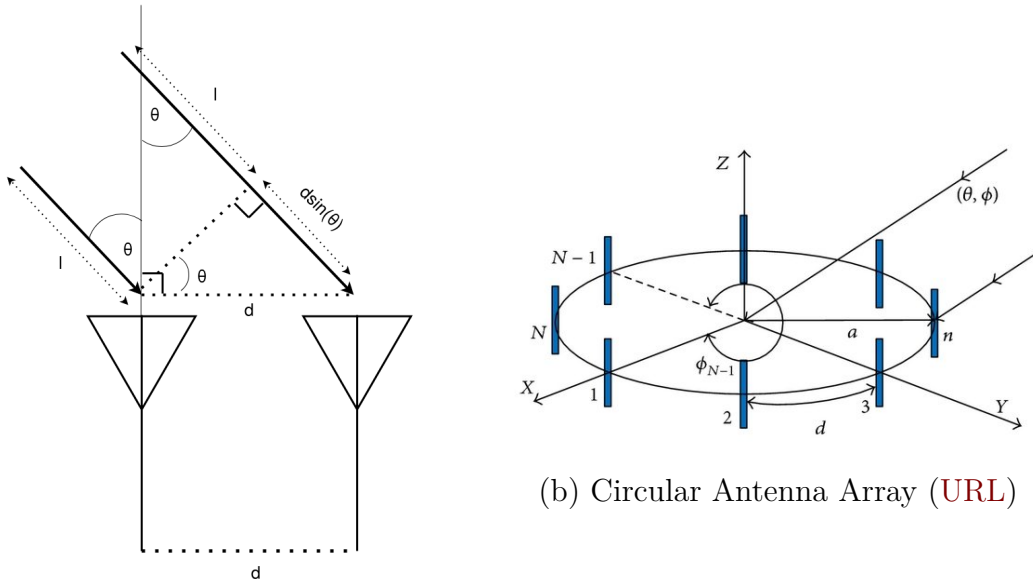
Για τα κύματα γνωρίζουμε ότι η διαφορά φάσης $\Delta\phi$ δύο σημείων που απέχουν μεταξύ τους Δx μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (2.9) [60].

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta\chi}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad (2.9)$$

Συνεπώς αν σχεδιάσουμε ένα antenna array, όπου η κάθε κεραία απέχει από την γειτονική της σε συγκεκριμένη απόσταση d και μετρώντας το phase difference του σήματος που λαμβάνουμε στην κάθε μία, μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία πρόσληψης της ακτινοβολίας μέσω της σχέσης (2.10) [45] [61]. Παράδειγμα αυτού βρίσκεται στο Figure 2.8 (a). Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε omnidirectional κεραίες και τον υπολογισμό της διαφοράς φάσης μπορεί να γίνει μέσω μετρήσεων TDoA.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta) \Rightarrow \\ \theta &= \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \phi}{2\pi d} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Δεν υπάρχουν όμως μόνο τα linear antenna arrays, μπορούμε να σχεδιάσουμε σε διάφορες διατάξεις, παράδειγμα μίας εξ' αυτών βρίσκεται στο Figure 2.8 (b).



(a) Linear Two Antenna Array

(b) Circular Antenna Array (URL)

FIGURE 2.8: Antenna Arrays

Η μέθοδος με την αξιοποίηση της σχέσης (2.10) λειτουργεί αρκετά καλά όταν έχουμε υψηλό Signal to Noise Ratio (SNR), αλλά μπορεί να έχει λανθασμένα αποτελέσματα

όταν έχουμε διασυμβολικές παρεμβολές ή multipath signals. Επειδή στην πράξη εμφανίζονται και τα δύο, υπάρχει αρκετά μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός. Αρκετές τεχνικές έχουν προταθεί οι οποίες στρέφονται γύρω από την λογική του Maximum Likelihood (ML) για τον υπολογισμό τελικά της γωνίας [45].

2.2 Position Computation

Αν έχουμε δύο nodes, οι μετρήσεις που λάβαμε από το Section 2.1 είναι αρκετές για να γνωρίζουμε την θέση του καθενός, συνεπώς ενδιαφέρον βρίσκεται στην ύπαρξη τριών ή παραπάνω nodes σε ένα σύστημα. Με βάση τις πληροφορίες που έχουμε συλλέξει - μέσω των τεχνικών που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο - θα προσπαθήσουμε πλέον να εκτιμήσουμε την θέση ενός node. Στην συνέχεια αυτού του section περιγράφονται μέθοδοι οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να το επιτύχουν αυτό. Κύρια διαφορά τους είναι η απόδοση που μπορεί να έχουν, η οποία όμως σχετίζεται με την αύξηση της πολυπλοκότητας στους υπολογισμούς που θα χρειαστούν καθώς επίσης και ποιες από τις παραπάνω πληροφορίες θα εκμεταλλευτούν.

Για την εύρεση της θέσης ενός unknown node στο τρισδιάστατο χώρο (\mathfrak{R}^3) ως ελάχιστο χρειαζόμαστε τέσσερα επιπλέον nodes. Στις παρακάτω περιγραφές όμως, και χωρίς βλάβη της γενικότητας θα χρησιμοποιηθούν τρία για την απλούστευση της περιγραφής, με την παραδοχή ότι μας ενδιαφέρει η δισδιάστατη ανάλυση (\mathfrak{R}^2).

2.2.1 Trilateration

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ίσως η πιο απλή διαισθητικά, βασίζεται στην γεωμετρία κύκλων, είναι αυτή που χρησιμοποιείται από τα GPS για τον υπολογισμό θέσης [62], ενώ αξιοποιεί μόνο πληροφορία απόστασης και όχι γωνίας [63]. Η εξίσωση ενός κύκλου από την γεωμετρία γνωρίζουμε ότι περιγράφεται από την εξίσωση (2.11) όπου (x_i, y_i) οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου με ακτίνα d_i .

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \quad (2.11)$$

Εάν χρησιμοποιούμε omnidirectional κεραίες [64] ή στην γενικότερη περίπτωση το μοντέλο της isotropic antenna [65] και υπολογίσουμε την απόσταση ενός beacon

από το node στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε την θέση του - τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το free node είναι κάπου πάνω στην περιφέρεια ενός κύκλου, με κέντρο το beacon και ακτίνα την απόσταση μεταξύ του beacon και του free node. Επαναλαμβάνοντας αυτό για ακόμα δύο beacons, τελικά το free node στο διδιάστατο επίπεδο (\mathbb{R}^2) θα πρέπει να βρίσκεται στην τομή των τριών κύκλων, πράγμα που γραφικά απεικονίζεται στο Figure 2.9 (a) [66].

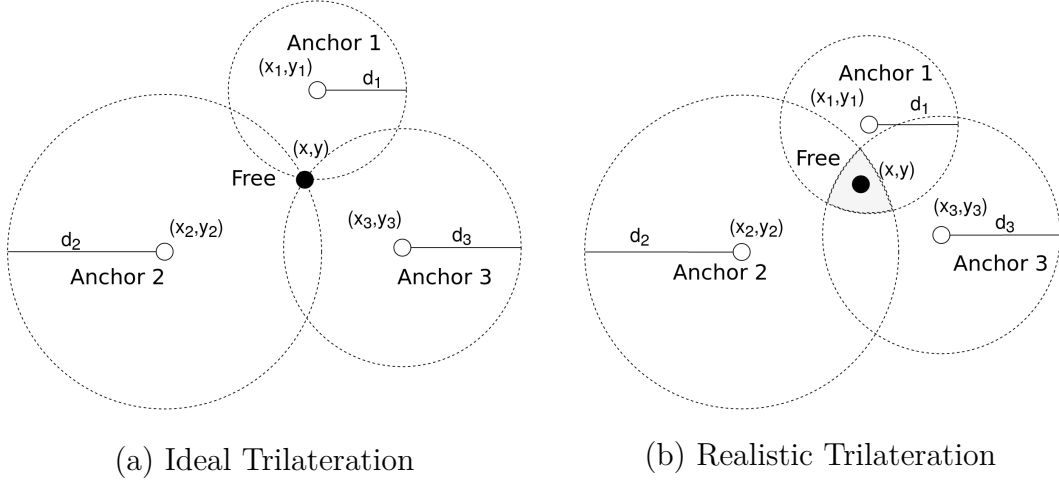


FIGURE 2.9: Trilateration examples

$$x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 = d_1^2 \quad (2.12)$$

$$x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 = d_2^2 \quad (2.13)$$

$$x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 = d_3^2 \quad (2.14)$$

Οι εξισώσεις (2.12), (2.13) και (2.14) περιγράφουν πλήρως τους κύκλους του κάθε node από το παράδειγμα του Figure 2.9 (a), όπου (x_i, y_i) το κέντρο του κύκλου, d_i η ακτίνα του - για κάθε beacon $i = 1, 2, 3$ και τελικά (x, y) οι συντεταγμένες του free nodes τις οποίες και ψάχνουμε. Ένας τρόπος να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες αυτές είναι να αφαιρέσουμε από την (2.13) την (2.12) και όμοια από την (2.14) την (2.13) ώστε να καταλήξουμε στις παρακάτω δύο εξισώσεις [67] [68].

$$(-2x_1 + 2x_2)x + (-2y_1 + 2y_2)y = d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2$$

$$(-2x_2 + 2x_3)x + (-2y_2 + 2y_3)y = d_2^2 - d_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2$$

Ο λόγος που κάναμε το παραπάνω βήμα είναι διότι πλέον έχουμε ένα σύστημα με δύο εξισώσεις και δύο αγνώστους, οπότε μπορούμε εύκολα να θεωρήσουμε τους παρακάτω πίνακες.

$$A = \begin{bmatrix} -2x_1 + 2x_2 & -2y_1 + 2y_2 \\ -2x_2 + 2x_3 & -2y_2 + 2y_3 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ d_2^2 - d_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \end{bmatrix}$$

Με την χρήση των οποίων καταλήγουμε ότι έχουμε να λύσουμε το γραμμικό σύστημα πινάκων που περιγράφεται από την εξίσωση (2.15) για τον υπολογισμό των συντεταγμένων (x, y) του free node οι οποίες μας ενδιαφέρουν.

$$AX = B \quad (2.15)$$

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, ο υπολογισμός της απόστασης πολύ πιθανόν να περιλαμβάνει μια μικρή απόκλιση $\hat{d}_i = d_i - \varepsilon$, με το ε συχνά να θεωρείται μία ανεξάρτητη κανονική τυχαία μεταβλητή με μηδενικό μέσο. Αυτό σημαίνει ότι τότε οι κύκλοι δεν έχουν ένα κοινό σημείο τομής, αλλά το free node βρίσκεται κάπου μέσα στο χωρίο επικάλυψης των τριών κύκλων, σχηματικά αυτό παρουσιάζεται στο Figure 2.9 (b) και σε αυτήν την περίπτωση καταλήγουμε σε ένα μη πεπερασμένο πλήθος λύσεων, με τη συνάρτηση του κάθε κύκλου να περιγράφεται από την εξίσωση (2.16) [44].

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 - e \quad (2.16)$$

Το αρνητικό με αυτήν την μέθοδο, είναι η ανάγκη πραγματοποίησης floating point operations για τον υπολογισμό των συντεταγμένων (x, y) σε πραγματικές συνθήκες - όπου το πλήθος των οποίων εξαρτάται από τον τρόπο που θα επιλέξουμε να επιλύσουμε το σύστημα. Ένας από της μεθόδους επίλυσης της γραμμικής εξίσωσης είναι μέσω του least square method, όπου τότε το πλήθος των floating point operations που απαιτούνται είναι $(m + n/3)n^2$ με m τον αριθμό των αγνώστων και n τον αριθμό των δοθέντων εξισώσεων [44].

2.2.2 Bounding Box

Σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιούνται τετράγωνα αντί για κύκλους του Trilateration, ενώ και εδώ θεωρούμε (x_i, y_i) τις συντεταγμένες των beacon και d_i η απόσταση που έχουμε υπολογίσει από το free node - για κάθε beacon i . Δημιουργούμε τετράγωνα μήκος πλευράς $2d_i$ με κέντρο το κέντρο του beacon και συντεταγμένες $(x_i - d_i, y_i - d_i)$ & $(x_i + d_i, y_i + d_i)$. Θετικό πλεόν είναι ότι δεν χρειάζεται να κάνουμε floating point operations για τον υπολογισμό του χωρίου τομής - αλλά μπορούμε να το υπολογίσουμε με απλή γεωμετρία. Αφού έχουμε υπολογίσει το χωρίο τομής των τετραγώνων μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στο κέντρο του βρίσκεται το free node. Παράδειγμα αυτής της μεθόδου βρίσκεται στο Figure 2.10. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να είναι ευκολότερη υπολογιστικά και να απαιτεί λιγότερα processor resources από το Trilateration, όμως ταυτόχρονα προκύπτει και μεγαλύτερο σφάλμα απόκλισης [44].

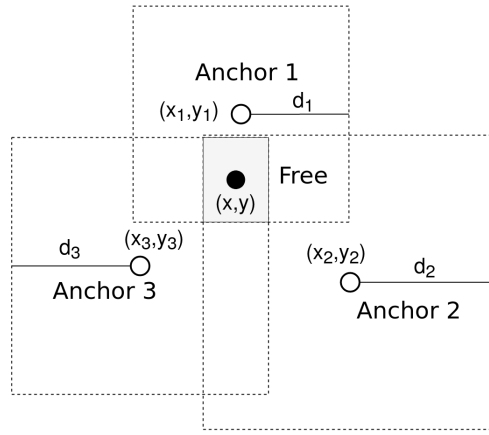


FIGURE 2.10: Bounding Box example

2.2.3 Triangulation

Σε αντίθεση με τις παραπάνω μεθόδους, η τεχνική Triangulation εκτιμάει την θέση του node που μας ενδιαφέρει, χρησιμοποιώντας γνώση που έχουμε για γωνίες και όχι εκτίμηση της απόστασης. Ένα απλούστερο παράδειγμα παρουσιάζεται στο Figure 2.11, όπου σε αυτό το παράδειγμα από την τριγωνομετρία, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι για τις γωνίες ϕ_1 και ϕ_2 ισχύουν οι σχέσεις (2.17).

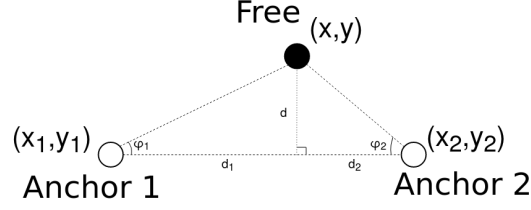


FIGURE 2.11: Principles of Triangulation

$$\phi_1 = \frac{d}{d_1} = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y}{x_1 - x} \right) \quad \phi_2 = \frac{d}{d_2} = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y}{x_2 - x} \right) \quad (2.17)$$

Από τις σχέσεις (2.17) μπορούμε να καταλήξουμε στις σχέσεις (2.18) [69], μέσω των οποίων τελικά για δεδομένες θέσεις των beacon - γνωστά δηλαδή τα (x_i, y_i) για κάθε beacon i - και με βάση την μέτρηση των γωνιών να υπολογίσουμε την θέση του free node (x, y) .

$$x = \frac{y_2 - y_1 - x_2 \tan \phi_2 + x_1 \tan \phi_1}{\tan \phi_1 - \tan \phi_2} \quad (2.18)$$

$$y = x \tan \phi_1 + y_1 - x_1 \tan \phi_1 = x \tan \phi_2 + y_2 - x_2 \tan \phi_2$$

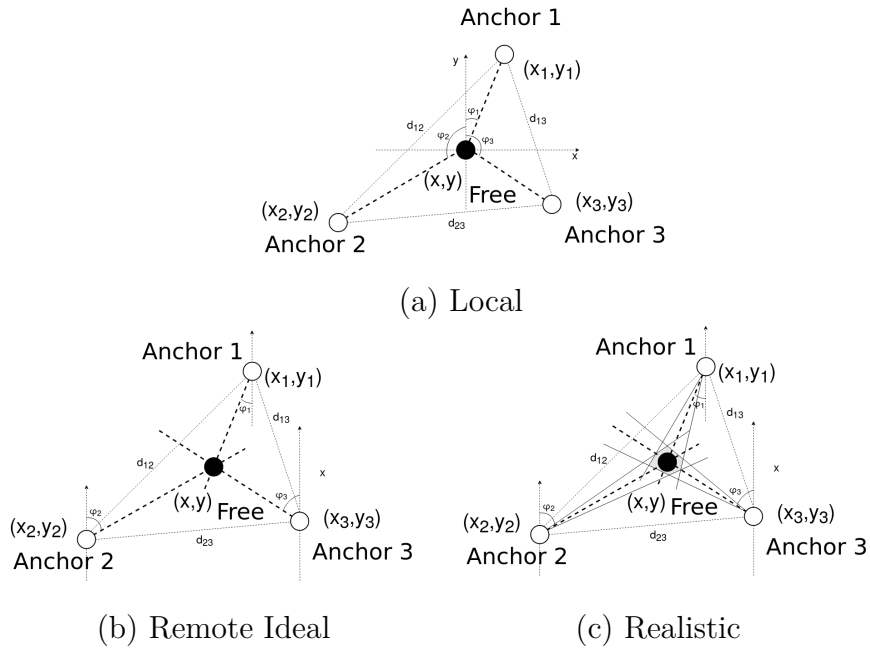


FIGURE 2.12: Triangulation examples

Αυτή η τεχνική εκτίμησης της θέσης του node, μπορεί να γίνει είτε από τοπικές μετρήσεις του ίδιου του node - Figure 2.12 (a) - είτε από μετρήσεις γωνιών που κάνουν τα anchors - Figure 2.12 (b) [44]. Φυσικά σε μία πραγματική εφαρμογή, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι μετρήσεις παρουσιάζουν αποκλίσεις από τα ιδανικά μοντέλα. Συνεπώς το Figure 2.12 (c) παρουσιάζει σε πιο ρεαλιστικά επίπεδα - συνυπολογίζοντας την ύπαρξη των τις αποκλίσεων - το χωρίο στο οποίο με μεγαλύτερη πιθανότητα βρίσκεται το node.

2.2.4 Multilateration

Η μέθοδος του Multilateration², έχει ως βάση την γεωμετρία των υπερβολικών καμπύλων και συχνά μπορεί να βρεθεί επίσης και ως hyperbolic positioning στην βιβλιογραφία [70] [71] [72]. Στο Section 2.1.1 έγινε αναφορά ότι η χρήση του TDoA βασίζεται στις υπερβολικές καμπύλες, συνεπώς μπορούμε εύκολα να χρησιμοποιήσουμε της μετρήσεις αυτές για τον υπολογισμό της θέσης του free node.

Η γενική ιδέα σε αυτήν την περίπτωση περιγράφεται στην εξίσωση (2.19) [45] [73] - και αυτό που θέλουμε, είναι να υπολογίσουμε την θέση του r_t (free node) γνωρίζοντας για κάθε δύο διαφορετικά r_i και r_j beacon nodes την χρονική στιγμή t_i και t_j που έφτασε το σήμα στο καθένα - εάν αυτό κινούταν με ταχύτητα s και το $\|\cdot\|$ συμβολίζει την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους.

$$\Delta t_{ij} \triangleq t_i - t_j = \frac{1}{s} (\|r_i - r_t\| - \|r_j - r_t\|), \quad i \neq j \quad (2.19)$$

Αυτό που αναπαριστά ουσιαστικά η σχέση (2.19) δεν είναι τίποτα άλλο από την προσπάθεια εύρεσης του σημείου τομής των καμπύλων. Παράδειγμα αυτής της μεθόδου βρίσκεται στο Figure 2.13.

²Κάποιες φορές ο όρος αυτός χρησιμοποιείται επίσης σε αναφορά της χρήσης του Trilateration με πάνω από 3 beacons [44].

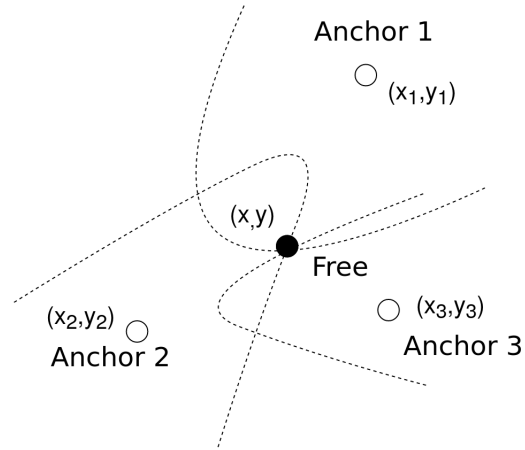


FIGURE 2.13: Multilateration example

2.2.5 Probabilistic approaches

TABLE 2.2: Distance/angle estimation techniques and position Computation overview

Method	Position Computetion	Advantages	Disadvantages	Applications
RSSI	Trila/Multilateration	Simple		
	Bounding box	No need for extra hardware	a	a
ToA	Trila/Multilateration	a	a	a
	Bounding box			
TDoA	Multilateration	a	Need for extra hardware	a
AoA	Triangulation	a	a	a

2.3 Localization Algorithm

2.3.1 Range-based vs Range-free

2.3.2 Distributed vs Centralized Position Computation

2.3.3 Relative vs Absolute Positioning

2.3.4 Indoor vs Outdoor

2.3.5 One-hop vs Multihop

2.3.6 With vs Without Infrastructure

Chapter 3

Related Work

“This is where technology is
now, imagine where we can go
in the future”

Timothy Chung

3.1 Thesis Approach

This should be the last section

Chapter 4

Design Features and Implementation

”

Chapter 5

Applications and Usage Examples

Chapter 6

Experiments and Results

Chapter 7

Conclusions and Future Work

References

- [4] Suraj G Gupta, Dr Ghonge, Pradip M Jawandhiya, et al. “Review of unmanned aircraft system (UAS)”. In: *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2* (2013). URL: [http://refhub.elsevier.com/S0376-0421\(16\)30134-8/sbref2](http://refhub.elsevier.com/S0376-0421(16)30134-8/sbref2).
- [7] M. Hassanalain and A. Abdelkefi. “Classifications, applications, and design challenges of drones: A review”. In: *Progress in Aerospace Sciences* 91 (2017), pp. 99–131. ISSN: 0376-0421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116301348>.
- [8] Anam Tahir, Jari Böling, Mohammad-Hashem Haghbayan, Hannu T. Toivonen, and Juha Plosila. “Swarms of Unmanned Aerial Vehicles — A Survey”. In: *Journal of Industrial Information Integration* 16 (2019), p. 100106. ISSN: 2452-414X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100106>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X18300086>.
- [25] S. Milani and A. Memo. “Impact of drone swarm formations in 3D scene reconstruction”. In: (2016), pp. 2598–2602. DOI: [10.1109/ICIP.2016.7532829](https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7532829).
- [39] Axel Bürkle, Florian Segor, and Matthias Kollmann. “Towards Autonomous Micro UAV Swarms”. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 61.1 (2011), pp. 339–353. ISSN: 1573-0409. DOI: [10.1007/s10846-010-9492-x](https://doi.org/10.1007/s10846-010-9492-x). URL: <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9492-x>.
- [40] Eleftheria Mitka and Spyros Mouroutsos. “Classification of Drones”. In: *American Journal of Engineering research* 6 (July 2017), pp. 36–41.
- [43] Muhammad Farooq i Azam and Muhammad Naeem Ayyaz. *Location and Position Estimation in Wireless Sensor Networks*. 2016. arXiv: [1611.03420](https://arxiv.org/abs/1611.03420) [cs.NI].
- [44] A. Boukerche, H. A. B. F. Oliveira, E. F. Nakamura, and A. A. F. Loureiro. “Localization systems for wireless sensor networks”. In: *IEEE Wireless Communications* 14.6 (2007), pp. 6–12. DOI: [10.1109/MWC.2007.4407221](https://doi.org/10.1109/MWC.2007.4407221).

- [45] Guoqiang Mao, Barış Fidan, and Brian D.O. Anderson. “Wireless sensor network localization techniques”. In: *Computer Networks* 51.10 (2007), pp. 2529–2553. ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.11.018>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128606003227>.
- [46] R. Peng and M. L. Sichitiu. “Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks”. In: *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. Vol. 1. 2006, pp. 374–382. DOI: [10.1109/SAHCN.2006.288442](https://doi.org/10.1109/SAHCN.2006.288442).
- [50] Brennan Yamamoto, Allison Wong, Peter Joseph Agcanas, Kai Jones, Dominic Gaspar, Raymond Andrade, and A Zachary Trimble. “Received Signal Strength Indication (RSSI) of 2.4 GHz and 5 GHz Wireless Local Area Network Systems Projected over Land and Sea for Near-Shore Maritime Robot Operations”. In: *Journal of Marine Science and Engineering* 7.9 (Aug. 2019), p. 290. ISSN: 2077-1312. DOI: [10.3390/jmse7090290](https://doi.org/10.3390/jmse7090290). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse7090290>.
- [52] K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic, and Z. Cucej. “Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee”. In: (2008), pp. 303–306. DOI: [10.1109/IWSSIP.2008.4604427](https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2008.4604427).
- [54] Miroslav Botta and Milan Simek. “Adaptive Distance Estimation Based on RSSI in 802.15.4 Network”. In: *Radioengineering* 22 (Dec. 2013), pp. 1162–1168.
- [69] A. M. H. KHALEL. “Position Location Techniques in Wireless Communication Systems”. In: (2010). URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-4796>.
- [70] R. Kaune, C. Steffes, S. Rau, W. Konle, and J. Pagel. “Wide area multilateration using ADS-B transponder signals”. In: *2012 15th International Conference on Information Fusion*. 2012, pp. 727–734.
- [73] Brian O’Keefe. “Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques”. In: *ECE Senior Capstone Project* (2017). URL: https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf.

External Links

- [1] Matt Satell. *Ultimate List of Drone Stats for 2020*. July 2020. URL: <https://www.phillybyair.com/blog/drone-stats/> (visited on 11/2020).
- [2] Business Insider Intelligence. *Drone market outlook: industry growth trends, market stats and forecast*. Mar. 2020. URL: <https://www.businessinsider.com/drone-industry-analysis-market-trends-growth-forecasts> (visited on 11/2020).
- [3] Concepción de León. *Drone Delivery? Amazon Moves Closer With F.A.A. Approval*. Aug. 2020. URL: <https://www.nytimes.com/2020/08/31/business/amazon-drone-delivery.html> (visited on 11/2020).
- [5] *Unmanned aerial vehicle*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle (visited on 11/2020).
- [6] *List of unmanned aerial vehicles*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unmanned_aerial_vehicles (visited on 11/2020).
- [9] *A Guide to Fixed Wing Drones*. URL: <https://www.coptrz.com/a-guide-to-fixed-wing-drones/> (visited on 11/2020).
- [10] *Aircraft principal axes*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_principal_axes (visited on 11/2020).
- [11] *Microcontroller*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller> (visited on 11/2020).
- [12] *Microprocessor*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microprocessor> (visited on 11/2020).
- [13] *Electronic speed control*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control (visited on 11/2020).
- [14] *Inertial measurement unit*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit (visited on 11/2020).
- [15] *SenseLAB Research*. URL: <http://senselab.tuc.gr/> (visited on 11/2020).
- [16] *TUC Researcher's Night 2020: Drones, Satellites, and more ...* Nov. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9ZZW-XQKGlw&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2VdxWuF0wiCbEdEGJcBDxapixuPtExsViDCoBEPQLnU8YQLg3hGRBn47w> (visited on 11/2020).

- [17] *Optimized flocking of autonomous drones in confined environments*. July 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=E4XpyG4eMKE> (visited on 11/2020).
- [18] *An autonomous swarm of flying robots*. Feb. 2014. URL: https://www.youtube.com/watch?v=W7yJx_IY9Mg (visited on 11/2020).
- [19] *Drone Swarm performance and applications*. June 2019. URL: <https://www.embention.com/news/drone-swarm-performance-and-applications/> (visited on 11/2020).
- [20] Malek Murison. *The Potential of Drone Swarms*. Apr. 2019. URL: <https://blog.dronebase.com/the-potential-of-drone-swarms> (visited on 11/2020).
- [21] *Swarm robotics*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_robotics (visited on 11/2020).
- [22] *Controlling Robotic Swarms*. Dec. 2014. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=stzQNjtDg0g> (visited on 11/2020).
- [23] *Kargu - The Kamikaze Drones Getting Ready For The Swarm Operation*. July 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=3d28APIfwSI> (visited on 11/2020).
- [24] *A Swarm of Nano Quadrotors*. Pennsylvania, Jan. 2012. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YQIMGV5vtd4> (visited on 11/2020).
- [26] *How Intel Made Its World Record-Breaking Drone Show*. July 2018. URL: https://www.youtube.com/watch?v=zdLjoqa_oUs (visited on 11/2020).
- [27] *Ford Motor Company | Firefly Drone Shows*. Aug. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Bdsr1cojSxo> (visited on 11/2020).
- [28] *A swarm of mini drones makes ... magic! | Marco Tempest*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=u2bQSKvZ2qI> (visited on 12/2020).
- [29] *Hollywood welcomes drones to the set*. Jan. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=GXhlgNHK14s> (visited on 12/2020).
- [30] *3D MAPPING with a DJI Phantom & Drone Deploy*. Aug. 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=SATijfXnshg> (visited on 12/2020).
- [31] *DJI – M300 RTK - Coordinating Police Missions from the Sky*. May 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FpkEsmU1NEo> (visited on 12/2020).
- [32] *Drones for Disaster Management (Nepal Earthquake)*. Aug. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xYrhAoX2H8I> (visited on 12/2020).
- [33] *Drone Search and Rescue - Wake Forest Fire Department*. June 2018. URL: https://www.youtube.com/watch?v=Ih_ayi318X0 (visited on 12/2020).

- [34] *Amazon gets FAA approval to operate a fleet of delivery drones*. Aug. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=beZ8iKGuDeo> (visited on 12/2020).
- [35] *Unmanned combat aerial vehicle*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_combat_aerial_vehicle (visited on 11/2020).
- [36] *Military robot*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Military_robot (visited on 11/2020).
- [37] *ISR Unmanned Aerial Vehicles*. URL: <https://www.militaryfactory.com/aircraft/uav-intelligence-surveillance-reconnaissance.asp> (visited on 12/2020).
- [38] *List of unmanned aerial vehicle applications*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unmanned_aerial_vehicle_applications (visited on 11/2020).
- [41] *Drone Swarms: The Buzz of the Future*. Nov. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0so5Fc6B7W4> (visited on 11/2020).
- [42] *Wireless sensor network*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network (visited on 12/2020).
- [47] *Research on Localization algorithms and technologies*. Nov. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XDFVtYEh0tM> (visited on 12/2020).
- [48] *Path loss*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Path_loss (visited on 12/2020).
- [49] *Free-space path loss*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Free-space_path_loss (visited on 12/2020).
- [51] *Friis transmission equation*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Friis_transmission_equation (visited on 12/2020).
- [53] *dBm*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/DBm> (visited on 12/2020).
- [55] *Kinematics*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinematics> (visited on 12/2020).
- [56] *An Introduction to Direction Findin*. Feb. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4> (visited on 12/2020).
- [57] *Speed of sound*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound (visited on 12/2020).
- [58] *Beamforming*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Beamforming> (visited on 12/2020).
- [59] *Directional antenna*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Directional_antenna (visited on 12/2020).
- [60] *Phase Difference*. Dec. 2015. URL: <https://www.miniphysics.com/phase-difference.html> (visited on 12/2020).

-
- [61] *FMCW Radars Lec 5: Angle Estimation*. May 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Ok2HarUxS8o> (visited on 12/2020).
 - [62] *How GPS works? Trilateration explained*. Mar. 2014. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=403ZVHVFhes> (visited on 12/2020).
 - [63] *Trilateration vs Triangulation – How GPS Receivers Work*. Dec. 2020. URL: <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/> (visited on 12/2020).
 - [64] *Omnidirectional antenna*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional_antenna (visited on 12/2020).
 - [65] *Isotropic radiator*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Isotropic_radiator (visited on 12/2020).
 - [66] *RSSI-based Accurate Indoor Localization Scheme for Wireless Sensor Networks*. Nov. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=CWvRJdF7oVE> (visited on 12/2020).
 - [67] John Wedding. *Find X location using 3 known (X,Y) location using trilateration*. July 2017. URL: <https://math.stackexchange.com/questions/884807/find-x-location-using-3-known-x-y-location-using-trilateration> (visited on 12/2020).
 - [68] *Hybrid Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks*. Oct. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kf-hXqZHkAA> (visited on 12/2020).
 - [71] Ipshita Biswas. *Triangulation vs Trilateration vs Multilateration – for Indoor Positioning Systems*. June 2019. URL: <https://www.pathpartnertech.com/triangulation-vs-trilateration-vs-multilateration-for-indoor-positioning-systems/> (visited on 12/2020).
 - [72] *Multilateration*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration> (visited on 12/2020).

Last Page