



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Indoor positioning system με Ultra-Wideband  
αισθητήρων.

Εφαρμογή στο ποδόσφαιρο τυφλών για τον ακριβή  
εντοπισμό θέσεων των παικτών.»

Του φοιτητή  
Απόστολος Παλιούρας  
Αρ. Μητρώου: 185406

Επιβλέπων  
Όνοματεπώνυμο: Γεώργιος Κοκκώνης  
Βαθμίδα: Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία: 22/01/2026

Τίτλος Δ.Ε.: Indoor positioning system με Ultra-Wideband αισθητήρων.  
Εφαρμογή στο ποδόσφαιρό τυφλών για τον ακριβή εντοπισμό θέσεων των παικτών  
Κωδικός Δ.Ε. 25109

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Απόστολος Παλιούρας

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Γεώργιος Κοκκώνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 05-02-2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 22-01-2026

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Απόστολου Παλιούρα που την εκπόνησε στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε από προσωπικό ενδιαφέρον για τα συστήματα εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο και για τη δυνατότητα αξιοποίησής τους σε εφαρμογές με ουσιαστικό κοινωνικό και πρακτικό αντίκτυπο. Ιδιαίτερο κίνητρο αποτέλεσε η διερεύνηση τεχνολογικών λύσεων που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της προσβασιμότητας και της ασφάλειας σε αθλητικά περιβάλλοντα, με έμφαση στο άθλημα του τυφλού ποδοσφαίρου, όπου η ακρίβεια και η αξιοπιστία του εντοπισμού παίζουν καθοριστικό ρόλο. Μέσα από την εκπόνηση της εργασίας, δόθηκε η ευκαιρία για ουσιαστική μελέτη σύγχρονων τεχνολογιών εντοπισμού, όπως το Ultra-Wideband, καθώς και για καλύτερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους σε απαιτητικά εσωτερικά περιβάλλοντα. Παράλληλα, η υλοποίηση και η αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος RTLS συνέβαλε στην ενίσχυση των γνώσεων του φοιτητή σε τομείς όπως η επεξεργασία μετρήσεων, οι αλγόριθμοι υπολογισμού θέσης και η ανάλυση πειραματικών δεδομένων. Η συνολική διαδικασία αποτέλεσε μια ιδιαίτερα ωφέλιμη εμπειρία, ενισχύοντας δεξιότητες που κρίνονται απαραίτητες για τη μελλοντική επαγγελματική πορεία στον χώρο της Πληροφορικής και των συστημάτων ενσωματωμένου ελέγχου.

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση ενός πρότυπου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο (Real-Time Location Systems - RTLS), το οποίο αξιοποιεί την τεχνολογία υπερ-ευρείας ζώνης (Ultra-Wideband - UWB). Στόχος του συστήματος είναι να προσφέρει τεχνολογική υποστήριξη στο άθλημα ποδοσφαίρου τυφλών (5x5), ενισχύοντας την ασφάλεια των αθλητών και βοηθώντας τους να αντιλαμβάνονται πιο αποτελεσματικά τη θέση τους στον χώρο. Εξαιτίας των πρακτικών δυσκολιών υλοποίησης με πραγματικό εξοπλισμό στο συγκεκριμένο στάδιο, η εργασία επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης προσομοίωσης λογισμικού. Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται στο ελαφρύ πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), το οποίο αναλαμβάνει τη διαχείριση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκε ένας προσομοιωτής σε Python, ικανός να παράγει ρεαλιστικά δεδομένα κίνησης για πολλαπλούς παίκτες ενός γηπέδου και να υπολογίζει τις αποστάσεις τους από προκαθορισμένα σημεία αναφοράς (anchors). Τα δεδομένα αυτά εμπλουτίζονται με τεχνητό θόρυβο ώστε να προσεγγίζουν πραγματικές συνθήκες μέτρησης και δημοσιεύονται τελικά σε έναν κεντρικό διαμεσολαβητή MQTT (MQTT Broker). Ένας κεντρικός εξυπηρετητής (Server), επίσης αναπτυγμένος σε Python, λειτουργεί ως συνδρομητής και συγκεντρώνει τα δεδομένα αποστάσεων που δημοσιεύονται στο σύστημα. Στη συνέχεια εφαρμόζει έναν αλγόριθμο πολυπλευρισμού (multilateration), ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προκειμένου να υπολογίσει τις δισδιάστατες συντεταγμένες κάθε παίκτη. Μία από τις βασικές λειτουργίες του Server είναι ο έλεγχος εγγύτητας μεταξύ των παικτών. Όταν δύο ή περισσότεροι παίκτες πλησιάσουν κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, το σύστημα προσομοιώνει την αποστολή εντολών που ενεργοποιούν έναν μηχανισμό ανάδρασης, όπως δόνηση, με σκοπό την έγκαιρη προειδοποίηση για πιθανή σύγκρουση. Για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης, αναπτύχθηκε ένας ειδικός μηχανισμός καταγραφής στατιστικών, ο οποίος συλλέγει βασικές μετρικές, όπως ο χρόνος απόκρισης, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου εντοπισμού και τον αριθμό των συμβάντων εγγύτητας. Τα δεδομένα στη συνέχεια οπτικοποιούνται, επιτρέποντας την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ταχύτητα, την αξιοπιστία και τη σταθερότητα του προσομοιωμένου συστήματος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι πρακτικά υλοποιήσιμη και μπορεί να αποτελέσει σημείο εκκίνησης για αντίστοιχο σύστημα με πραγματικό εξοπλισμό, ενισχύοντας σημαντικά τις τεχνολογικές δυνατότητες του ποδοσφαίρου τυφλών.

Λέξεις-Κλειδιά: Ultra-Wideband (UWB), Σύστημα Εντοπισμού Θέσης Πραγματικού Χρόνου (RTLS), Ποδοσφαίρο Τυφλών, Πολυπλευρομέτρηση, MQTT, Προσομοίωση, Υποστηρικτική Τεχνολογία.

# «Indoor positioning system με Ultra-Wideband sensors»

«Apostolos Paliouras»

## Abstract

The present thesis examines the design, development, and evaluation of a prototype Real-Time Location System (RTLs) that utilizes Ultra-Wideband (UWB) technology. The goal of the system is to provide technological support for blind football (5x5), enhancing player safety and helping athletes better perceive their position within the playing field. Due to the practical difficulties of implementing a hardware-based solution at this stage, the work focuses on developing a fully software-based simulation.

The system's architecture is built upon the lightweight MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) communication protocol, which manages the exchange of data between the various subsystems. To this end, a Python-based simulator was implemented, capable of generating realistic motion data for multiple players (tags) within the field and computing their distances from predefined reference points (anchors). These measurements are enriched with artificial noise to approximate real-world sensing conditions and are then published to a central MQTT Broker.

A central server, also developed in Python, functions as an MQTT subscriber and gathers the distance measurements published across the system. It then applies a multilateration algorithm based on the least-squares method to compute the two-dimensional coordinates of each player. One of the server's core functions is the detection of proximity events between players. When two or more players come closer than a predefined threshold, the system simulates sending commands that activate a feedback mechanism—such as vibration—to provide timely warnings of potential collisions.

To evaluate overall performance, a dedicated statistics-logging module was developed. This module collects key metrics such as response time, positioning success rate, and the number of proximity events detected. The collected data are subsequently visualized, allowing for direct insight into the speed, reliability, and stability of the simulated system. The results of the simulation demonstrate that the proposed architecture is practically feasible and can serve as a foundation for a real-world implementation using physical hardware, significantly enhancing the technological capabilities of blind football.

**Keywords:** Ultra-Wideband (UWB), Real-Time Locating System (RTLs), Blind Football, Trilateration, MQTT, Simulation, Assistive Technology

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Περιεχόμενα .....	vi
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Συντομογραφίες.....	xi
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα συστήματα εντοπισμού θέσης και στην εφαρμογή τους στο ποδόσφαιρο τυφλών.....	1
1.1 Το ποδόσφαιρο τυφλών: Ένα άθλημα δεξιοτήτων και προσανατολισμού.....	1
1.2 Η ανάγκη για τεχνολογική υποστήριξη.....	2
1.3 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	3
1.4 Δομή της Εργασίας.....	3
1.5 Η έννοια της χωρικής επίγνωσης και η τεχνολογική της υποστήριξη.....	3
1.6 Η σημασία των RTLS στη σύγχρονη βιομηχανία και η μεταφορά τεχνογνωσίας στον αθλητισμό.....	4
1.7 Θεωρητικό πλαίσιο της τεχνητής ασφάλειας (Artificial Safety Layer).....	5
1.8 Ερευνητικό κενό και συμβολή της εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2ο: Ποδόσφαιρο 5×5 Τυφλών (Blind Football) – Διεξαγωγή, Κανονιστικό Πλαίσιο, Ασφάλεια και Ζητήματα Εφαρμογής Τεχνολογικών Συστημάτων.....	7
2.1 Θεσμικό πλαίσιο και θέση του αθλήματος.....	7
2.2 Κατηγοριοποίηση αθλητών και μηχανισμοί ισονομίας.....	8
2.3 Γήπεδο, επιφάνεια και οριοθετήσεις που υποστηρίζουν προσανατολισμό .....	9
2.4 Μπάλα με ηχητικό μηχανισμό και απαιτήσεις ακουστικού περιβάλλοντος .....	10
2.5 Σύνθεση ομάδων, ρόλοι καθοδήγησης και κατανομή λεκτικής πληροφορίας.....	11
2.6 Διαιτητές αγώνα και έλεγχος ακουστικού περιβάλλοντος .....	11
2.7 Αλλαγές παικτών και μέτρα ασφάλειας .....	11
2.8 Απόκρουση τερματοφύλακα και περιορισμοί που επηρεάζουν την ασφάλεια .....	12
2.9 Ζητήματα ασφάλειας εξοπλισμού και περιορισμοί για φορητές συσκευές .....	12
2.10 Ακουστικοί περιορισμοί και σχεδιασμός ειδοποιήσεων χωρίς παρεμβολή .....	13
2.11 Προβλήματα εφαρμογής σε πραγματικές εγκαταστάσεις .....	14
2.12 Τα προβλήματα που επιχειρεί να επιλύσει η διπλωματική εργασία.....	14
2.13 Περιορισμοί αποδοχής και ηθικές παράμετροι χρήσης δεδομένων .....	14
2.14 Συνολική αποτίμηση ζητημάτων εφαρμογής .....	15

2.15	Συμπεράσματα κεφαλαίου .....	15
Κεφάλαιο 3ο:	Τεχνολογικό υπόβαθρο .....	16
3.1	Τεχνολογίες ασύρματου εντοπισμού θέσης .....	16
3.2	Ultra-Wideband (UWB) .....	17
3.2.1	Αρχή λειτουργίας και τεχνικές μέτρησης απόστασης .....	17
3.2.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα .....	19
3.3	Αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης .....	20
3.3.1	Η αρχή της πολυπλευρομέτρησης .....	20
3.3.2	Γραμμικοποίηση και επίλυση με ελάχιστα τετράγωνα .....	21
3.4	Πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT .....	22
3.4.1	Αρχιτεκτονική Publish/Subscribe .....	23
3.4.2	Γιατί επιλέχθηκε το MQTT; .....	24
3.5	Θεωρητική θεμελίωση: Least Squares, γεωμετρικές συνθήκες και συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών εντοπισμού .....	24
3.5.1	Προχωρημένη ανάλυση της μεθόδου Least Squares σε εφαρμογές RTLS .....	25
3.5.2	Γεωμετρική επίδραση (GDOP) και επιπτώσεις στη συνολική ακρίβεια .....	25
3.5.3	Συγκριτική αξιολόγηση UWB – BLE – Wi-Fi σε εσωτερικά περιβάλλοντα .....	26
3.6	Φυσική ανάλυση της Διάδοσης UWB – μοντέλα ραδιοδιάδοσης .....	27
3.6.1	Συνθήκες Μη Οπτικής Επαφής (NLOS) και Μοντέλα Διόρθωσης .....	27
3.6.2	Weighted και Iterative Least Squares: Βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού .....	28
3.6.3	Φίλτρα Kalman και ενοποίηση χρονικής πληροφορίας .....	28
3.6.4	Θεωρία Κατανομών Σφάλματος και Διάδοση Αβεβαιότητας .....	29
3.6.5	Ιστορική αναδρομή των τεχνολογιών RTLS και μετάβαση προς UWB .....	30
Κεφάλαιο 4ο:	Σχεδιασμός και αρχιτεκτονική του συστήματος .....	31
4.1	Συνολική αρχιτεκτονική (Εις βάθος ανάλυση) .....	31
4.1.1	UWB Tags (Προσομοιωμένα - tag_simulator.py) .....	31
4.1.2	UWB Anchors (Δεδομένα διαμόρφωσης) .....	32
4.1.3	MQTT Broker (Mosquitto) .....	32
4.1.4	RTLS Server (rtls_server.py) .....	33
4.1.5	Μονάδα οπτικοποίησης (Ενσωμάτωση Matplotlib) .....	33
4.1.6	Μονάδα στατιστικών (statistics_logger.py) .....	34
4.2	Σχεδιασμός του γηπέδου και τοποθέτηση των Anchors .....	34
4.2.1	Προκλήσεις κλιμάκωσης σε πραγματικές διαστάσεις .....	35
4.3	Ροή δεδομένων και δομές .....	35
4.3.1	Κεντρικές δομές δεδομένων .....	35

4.3.2	Η αλυσίδα επεξεργασίας δεδομένων (Data Processing Pipeline) .....	36
Κεφάλαιο 5ο:	Υλοποίηση του συστήματος.....	38
5.1	Προσομοιωτής Κίνησης και Δεδομένων (tag_simulator.py) .....	38
5.1.1	Παράμετροι Διαμόρφωσης.....	38
5.1.2	Λογική προσομοίωσης κίνησης.....	40
5.1.3	Δημιουργία και δημοσίευση δεδομένων .....	41
5.1.4	Μοντελοποίηση θορύβου και περιορισμοί της προσομοίωσης.....	41
5.2	Κεντρικός Server επεξεργασίας (rtls_server.py).....	42
5.2.1	Ασύγχρονη λήψη δεδομένων (on_message) .....	42
5.2.2	Υλοποίηση του αλγορίθμου πολυπλευρομέτρησης (trilaterate_position).....	44
5.2.3	Λογική εφαρμογής: Ανίχνευση εγγύτητας(check_proximity_and_control_motors) ....	45
5.3	Σύστημα καταγραφής και ανάλυσης στατιστικών .....	46
5.3.1	Ο καταγραφέας (statistics_logger.py) .....	46
5.3.2	Ο αναλυτής και οπτικοποιητής (view_statistics.py).....	48
5.3.3	Ανάλυση αβεβαιότητας μετρήσεων και ποσοτικοποίηση σφάλματος .....	51
5.4	Περιγραφή και σχολιασμός διεπαφής χρήστη της προσομοίωσης RTLS .....	52
Κεφάλαιο 6ο:	Προτεινόμενος εξοπλισμός RTLS.....	57
6.1	Επιχειρησιακές απαιτήσεις.....	58
6.2	ESP8266 ως host controller: ρόλος και λειτουργική καταλληλότητα.....	58
6.3	DW1000: Βάση UWB ranging για RTLS .....	59
6.4	DW3000 και IEEE 802.15.4z: τεχνολογική αναβάθμιση και λόγοι που ενδιαφέρει το RTLS	60
6.5	Παρεμβολές και αξιοπιστία.....	62
6.6	Διασύνδεση ESP8266 ↔ DW1000/DW3000 .....	62
6.7	Γιατί όχι ESP32 εδώ: επιλογή με βάση την αναπαραγωγιμότητα και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων .....	63
6.8	Συνολική αποτίμηση και στρατηγική εξέλιξης του εξοπλισμού .....	64
Κεφάλαιο 7ο:	Αξιολόγηση και ανάλυση πειραματικών δεδομένων .....	66
7.1	Ανάλυση χρονικής απόκρισης (Latency) .....	66
7.1.1	Περιγραφή πειραματικής συνεδρίας και ρυθμός μηνυμάτων .....	66
7.1.2	Βασικές μετρικές latency (end-to-end και processing time) .....	66
7.1.3	Κατανομή τιμών και “διμορφία” του latency.....	67
7.2	Ακρίβεια πολυπλευρικότητας υπό συνθήκες θορύβου.....	69
7.2.1	Ποσοτικοποίηση σφάλματος θέσης.....	69
7.2.2	Ερμηνεία της κατανομής σφάλματος .....	70

7.2.3	Σχέση ακρίβειας και γεωμετρίας (GDOP) .....	71
7.3	Αξιοπιστία μηχανισμού αποφυγής συγκρούσεων .....	71
7.3.1	Αποτίμηση συμβάντων εγγύτητας και συχνότητα ενεργοποίησης .....	72
7.3.2	Κατανομή αποστάσεων κατά τα proximity events.....	72
Κεφάλαιο 8ο:	Συμπεράσματα.....	74
8.1	Σύνοψη και Τεχνική Αποτίμηση .....	74
8.2	Από την προσομοίωση στην πραγματικότητα.....	75
8.3	Προτάσεις βελτίωσης .....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		77

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Τυπική διάταξη και διαστάσεις γηπέδου ποδοσφαίρου τυφλών (5x5).[4] .....	2
Σχήμα 2: Παράδειγμα συστήματος αισθητηριακής υποκατάστασης μέσω ακουστικής πληροφορίας [36] .....	4
Σχήμα 3: Διεξαγωγή αγώνα ποδοσφαίρου τυφλών.....	7
Σχήμα 4: Κατηγορίες αθλητών στο ποδόσφαιρο τυφλών[37] .....	9
Σχήμα 5: Αναλυτική τοπολογία γηπέδου [38] .....	10
Σχήμα 6: Οπτικός εξοπλισμός παικτών.....	13
Σχήμα 7: Συγκριτική απεικόνιση τεχνολογιών εντοπισμού εσωτερικού χώρου [39] .....	16
Σχήμα 8: Διαδικασία αμφίδρομης μέτρησης απόστασης (Two - way ranging) [40] .....	18
Σχήμα 9: Γεωμετρική απεικόνιση πολυπλευρομέτρησης και περιοχής αβεβαιότητας [41].....	21
Σχήμα 10: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής MQTT publish/subscribe [42] .....	23
Σχήμα 11: Ποιοτική και ποσοτική σύγκριση UWB και τεχνολογιών BLE [43].....	26
Σχήμα 12: Βασική ροή λειτουργίας φίλτρου Kalman για εκτίμηση θέσης[44] .....	29
Σχήμα 13: Διεπαφή χρήστη προσομοίωσης.....	53
Σχήμα 14: Έξοδος κονσόλας σε πραγματικό χρόνο.....	54
Σχήμα 15: Πρωτότυπος πειραματικός εξοπλισμός .....	57
Σχήμα 16: Λειτουργικό διάγραμμα του ESP8266EX (Wi-Fi SoC) ως host controller.[45] .....	59
Σχήμα 17: Υψηλού επιπέδου block diagram του UWB transceiver DW1000 και διεπαφή host (SPI).[46] .....	60
Σχήμα 18: Ενδεικτική διάταξη ακροδεκτών/διεπαφών UWB transceiver DW3000 (SPI, IRQ, τροφοδοσίες).[47].....	61
Σχήμα 19: Ενδεικτικό κύκλωμα εφαρμογής/διασύνδεσης DWM1000 (βασισμένο σε DW1000) για SPI σύνδεση με host.[48] .....	63
Σχήμα 20: Διάγραμμα ακροδεκτών (pinout) του ESP8266EX.[49].....	64
Σχήμα 21: Κατανομή του χρόνου απόκρισης από άκρο σε άκρο.....	68
Σχήμα 22: Εξέλιξη του χρόνου απόκρισης στον χρόνο .....	69
Σχήμα 23: Κατανομή ακρίβειας θέσης.....	70
Σχήμα 24: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης.....	71
Σχήμα 25: Κατανομή της απόστασης κατά τη διάρκεια συμβάντων εγγύτητας .....	73
Σχήμα 26: Απόσταση εγγύτητας συναρτήσει του χρόνου.....	73

## Συντομογραφίες

<b>Πίνακας Συντομογραφιών</b>		
<b>Συντομογραφία</b>	<b>Ελληνική Ονομασία</b>	<b>Αγγλική Ονομασία</b>
RTLS	Σύστημα Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο	Real-Time Location System
UWB	Τεχνολογία Υπερ-Ευρείας Ζώνης	Ultra-Wideband
MQTT	Πρωτόκολλο Ουράς Μηνυμάτων Τηλεμετρίας	Message Queuing Telemetry Transport
RSSI	Δείκτης Ισχύος Ληφθέντος Σήματος	Received Signal Strength Indication
ToF	Χρόνος Πτήσης	Time of Flight
TWR	Αμφίδρομη Μέτρηση Εύρους	Two-Way Ranging
DS-TWR	Αμφίδρομη Μέτρηση Εύρους Διπλής Όψης	Double-Sided Two-Way Ranging
NLOS	Συνθήκες Μη Οπτικής Επαφής	Non-Line-of-Sight
BLE	Bluetooth Χαμηλής Κατανάλωσης Ενέργειας	Bluetooth Low Energy
RFID	Αναγνώριση μέσω Ραδιοσυχνοτήτων	Radio-Frequency Identification
IPS	Σύστημα Εντοπισμού Εσωτερικού Χώρου	Indoor Positioning System
GPS	Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης	Global Positioning System
GDOP	Γεωμετρική Απομείωση της Ακρίβειας	Geometric Dilution of Precision
QoS	Ποιότητα Υπηρεσίας	Quality of Service
IoT	Διαδίκτυο των Πραγμάτων	Internet of Things
FCC	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών	Federal Communications Commission
Wi-Fi	Ασύρματη Πιστότητα	Wireless Fidelity
ILS	Επαναληπτικά Ελάχιστα Τετράγωνα	Iterative Least Squares
WLS	Σταθμισμένα Ελάχιστα Τετράγωνα	Weighted Least Squares
AoA	Γωνία Άφιξης	Angle-of-Arrival
LOS	Οπτική επαφή	Line-of-Sight
RMS	Ενεργός Καθυστέρηση Διασποράς	Root Mean Square
PoU	Μετάδοση Σφαλμάτων	Propagation of uncertainty
CDF	Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής	Cumulative Distribution Function
EKF	Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman	Extended Kalman Filter

## **Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα συστήματα εντοπισμού θέσης και στην εφαρμογή τους στο ποδόσφαιρο τυφλών**

Το πεδίο των RTLS παρουσιάζει σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Η χρήση τεχνολογιών όπως το UWB έχει επιτρέψει την ανάπτυξη λύσεων με ακρίβεια δεκάτων του μέτρου, δίνοντας την δυνατότητα να εφαρμοστούν σε απαιτητικά περιβάλλοντα όπου τόσο η ασφάλεια όσο και η απόδοση αξιολογούνται σε κλίμακα χιλιοστού του δευτερολέπτου. Με την παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια να αναπτυχθεί ένα πλήρες προσομοιωμένο σύστημα RTLS, το οποίο στοχεύει στη βελτίωση της ασφάλειας στο ποδόσφαιρο τυφλών (5×5), ένα άθλημα στο οποίο η απουσία οπτικής πληροφορίας δημιουργεί χωροταξικές προκλήσεις και δυσκολίες.

Η εξέλιξη των RTLS δεν ήταν γραμμική. Η μετάβαση από τις αρχικές, ατελείς τεχνολογίες, βασισμένες σε Δείκτη Ισχύος Ληφθέντος Σήματος (Received Signal Strength Indication - RSSI) έως τις σύγχρονες υλοποιήσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης που βασίζονται σε μεθόδους χρονομέτρησης του χρόνου πτήσης (Time of Flight ToF) συνδέεται άμεσα με την πρόοδο και την εξέλιξη στην ηλεκτρονική υπολογιστών, στη μικροηλεκτρονική και στην επεξεργασία σήματος [1], [2]. Το UWB ειδικότερα, έχει αναδειχθεί ως η ιδανική επιλογή για εφαρμογές εσωτερικού χώρου, επιδεικνύοντας ισχυρή αντοχή στον θόρυβο και στα φαινόμενα πολυδιαδρομής.

Οι δυνατότητες αυτές καθιστούν το UWB κατάλληλο για εφαρμογή στο ποδόσφαιρο τυφλών όπου οι παίκτες βασίζονται στο ακουστικό feedback και στην ιδιοδεκτικότητα για να προσανατολιστούν. Η έλλειψη όρασης αυξάνει τη συχνότητα συγκρούσεων, γεγονός που έχει καταγραφεί εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία αθλητιατρικής [5]. Ένα σύστημα που μπορεί να εντοπίζει με ακρίβεια τη θέση των παικτών και να προειδοποιεί έγκαιρα για επικίνδυνες αποστάσεις μεταξύ τους έχει τη δυνατότητα να παρέχει ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας.

Το παρόν κεφάλαιο εισάγει τα βασικά στοιχεία της εργασίας καθώς περιλαμβάνει το ιστορικό και τεχνικό πλαίσιο και καταλήγει στον σαφή προσδιορισμό των στόχων που καλείται να καλύψει το σύστημα.

### **1.1 Το ποδόσφαιρο τυφλών: Ένα άθλημα δεξιοτήτων και προσανατολισμού**

Η ανάγκη εντοπισμού αντικειμένων και ατόμων στον χώρο δεν είναι μία σύγχρονη απαίτηση. Οι θεωρητικές βάσεις της ραδιοεντόπισης τέθηκαν ήδη από τις αρχές του 20ού αιώνα, όταν ραδιοπομποί υψηλής ισχύος χρησιμοποιούνταν για τον εντοπισμό της θέσης πλοίων με βάση τη διαφορά φάσης των λαμβανομένων σημάτων. Ωστόσο, η επανάσταση στον χώρο του εντοπισμού ήρθε τη δεκαετία του 1970 με την ανάπτυξη του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System - GPS), το οποίο συγκέντρωσε και αξιοποίησε δορυφορικά σήματα για την επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης [6].

Παρά τη σημαντική συνεισφορά του GPS, η ακρίβεια και η σταθερότητά του σε εσωτερικούς χώρους ήταν περιορισμένες λόγω της εξασθένησης σήματος των συνθήκων μη οπτικής επαφής (Non-Line-of-Sight-NLOS) και φαινομένων πολλαπλών ανακλάσεων. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης εναλλακτικών τεχνολογιών, όπως η ασύρματη πιστότητα (Wireless Fidelity-Wi-Fi), αναγνώριση μέσω Ραδιοσυχνοτήτων (Radio-Frequency Identification-RFID) και Bluetooth, οι οποίες βασίζονται κυρίως στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (RSS). Η προσέγγιση αυτή, παρότι οικονομική, χαρακτηρίζεται από έλλειψη υψηλής ακρίβειας και ευαισθησίας σε περιβαλλοντικές μεταβολές [1].

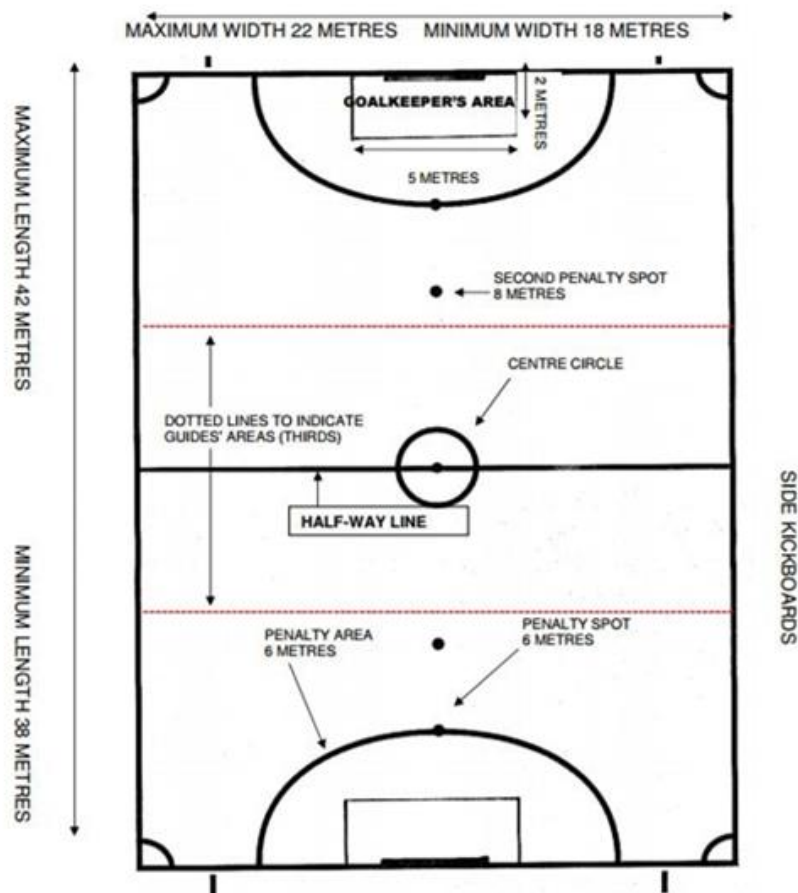
Ουσιαστικά πρόοδος σημειώθηκε με την τυποποίηση της τεχνολογίας UWB από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission-FCC) το 2002. Η δυνατότητα

εκπομπής σύντομων παλμών, διασκορπισμένων σε εξαιρετικά ευρύ φάσμα συχνοτήτων, έδωσε τη δυνατότητα χρονικής ανάλυσης της τάξης του νανοδευτερολέπτου και ακρίβεια εντοπισμού που έφτασε τα εκατοστά [1], [3]. Έτσι αποκτώντας μια δυναμική, η τεχνολογία UWB από τις αρχικές στρατιωτικές εφαρμογές, πέρασε γρήγορα στον χώρο της βιομηχανίας και πιο πρόσφατα, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αθλητική τεχνολογία.

Η σύγχρονη ερευνητική βιβλιογραφία αναγνωρίζει το UWB ως την πλέον αξιόπιστη τεχνολογία για RTLS εσωτερικού χώρου, ξεπερνώντας κατά πολύ τόσο το Wi-Fi όσο και το Bluetooth, όχι μόνο σε ακρίβεια αλλά και σε σταθερότητα [3].

## 1.2 Η ανάγκη για τεχνολογική υποστήριξη

Το ποδόσφαιρο τυφλών 5x5 ανήκει στα παραολυμπιακά αθλήματα και απευθύνεται σε άτομα με πλήρη απώλεια όρασης. Ο αγώνας διεξάγεται σε μικρότερο γήπεδο από το συνηθισμένο, με πλευρικά τοιχώματα που περιορίζουν τις εξόδους της μπάλας και παρέχουν απτικό και ακουστικό προσανατολισμό στους παίκτες. Οι καθορισμένες ζώνες του γηπέδου όπως αυτή του τερματοφύλακα και των δύο περιοχών του πέναλτι, περιορίζουν σκόπιμα την κίνηση των παικτών. Παρά την ύπαρξη κανόνων που εμποδίζουν την ανεξέλεγκτη και άσκοπη επαφή των παικτών, οι συγκρούσεις αποτελούν συχνό φαινόμενο κατά την διεξαγωγή των αγώνων.



Σχήμα 1: Τυπική διάταξη και διαστάσεις γηπέδου ποδοσφαίρου τυφλών (5x5).[4]

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες η συχνότητα κρανιοεγκεφαλικών κακώσεων στο άθλημα είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλα παραολυμπιακά αθλήματα όπου οι αθλητές έρχονται συχνά σε επαφή[5].

Αναδεικνύεται επίσης ότι οι πιο επικίνδυνες συγκρούσεις συμβαίνουν όταν οι παίκτες πλησιάζουν ο ένας τον άλλον με μεγάλη ταχύτητα χωρίς ακουστική προειδοποίηση [5]. Αυτό καθιστά την έγκαιρη ανίχνευση εγγύτητας όχι απλώς επιθυμητή αλλά και αναγκαία, τόσο για τον ομαλή διεξαγωγή του αθλήματος όσο και για την ασφάλεια των αθλητών.

Η ενσωμάτωση ενός RTLS το οποίο ενημερώνει τους παίκτες μέσω απτικής ανάδρασης, θα μπορούσε να λειτουργήσει ως «πέμπτη αίσθηση» σε ένα περιβάλλον όπου δεν υπάρχει καθόλου οπτική πληροφορία. Η τεχνολογία ενισχύει τις αισθητηριακές δυνατότητες του ανθρώπου, δημιουργώντας μια νέα μορφή αίσθησης του χώρου.

### 1.3 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η εργασία υλοποιεί ένα πλήρες RTLS σε προσομοιωμένο περιβάλλον αξιοποιώντας την τεχνολογία UWB για τον εντοπισμό θέσης των παικτών και το πρωτόκολλο MQTT για την ανταλλαγή δεδομένων από και προς τα tags-anchors. Η προσομοίωση δημιουργεί πολλαπλούς παίκτες που κινούνται ελεύθερα στον χώρο και οι οποίοι αλληλοεπιδρούν με τέσσερα σταθερά σημεία αναφοράς ενώ κάθε μέτρηση απόστασης αλλοιώνεται με τυχαίο θόρυβο ώστε να προσεγγίζει πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Ο κεντρικός εξυπηρετητής λειτουργεί ως συνδρομητής του MQTT Broker και εφαρμόζει αλγορίθμους πολυμερισμού βασισμένους στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η οποία αποτελεί την επικρατέστερη πρακτική στην υλοποίηση RTLS συστημάτων με πολλαπλές πηγές μέτρησης [3]. Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου επιτρέπει στο σύστημα να διατηρήσει πολύ υψηλή ακρίβεια ακόμη και όταν κάποιες μεμονωμένες μετρήσεις παρουσιάζουν σφάλματα ή αστάθεια.

Επίσης η υλοποίηση περιλαμβάνει έναν μηχανισμό εντοπισμού εγγύτητας, ο οποίος αναλύει την απόσταση μεταξύ των παικτών και ενεργοποιεί δυναμικά «μηχανισμούς προειδοποίησης», προσομοιώνοντας πραγματική απτική συσκευή που θα είχε ο παίκτης.

### 1.4 Δομή της Εργασίας

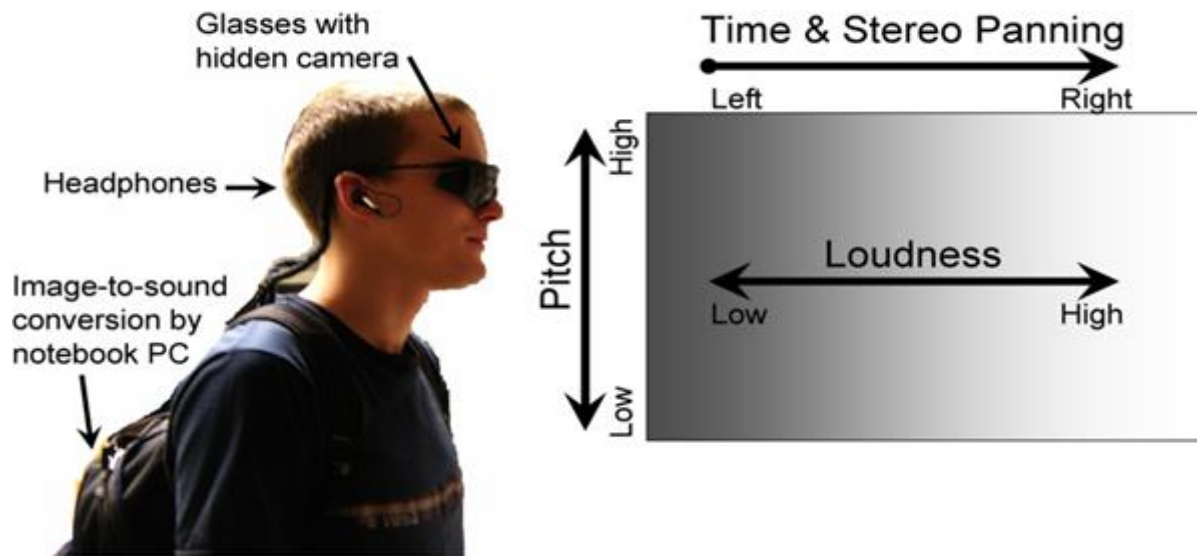
Η εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, ακολουθώντας μια τακτική κλιμάκωσης από το γενικό στο ειδικό. Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει το θέμα της μελέτης, παρουσιάζει τη θεωρητική ανάγκη για ένα RTLS στο ποδόσφαιρο τυφλών και περιγράφει τους στόχους της έρευνας. Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στο τεχνολογικό υπόβαθρο, εξετάζοντας τις αρχές λειτουργίας του UWB, τους αλγορίθμους πολυπλευρομέτρησης και την αρχιτεκτονική MQTT. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος στο σύνολό της, συμπεριλαμβανομένης της τοποθέτησης των anchors και της ροής δεδομένων. Το τέταρτο κεφάλαιο οδηγεί την παρουσίαση της μελέτης από τη θεωρία στην πράξη, αναλύοντας την υλοποίηση των τεσσάρων βασικών scripts του συστήματος. Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος και αξιολογούνται η ακρίβεια, η απόδοση και η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μηχανισμού. Τέλος, το έκτο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα και προτείνει κατευθύνσεις για έρευνα στο μέλλον και χρήση σε πραγματικό υλικό.

### 1.5 Η έννοια της χωρικής επίγνωσης και η τεχνολογική της υποστήριξη

Η ικανότητα του ανθρώπου να εντοπίζει μία θέση στον χώρο, βασίζεται σε ένα σύνολο αισθητηριακών ενδείξεων. Οπτικές, ακουστικές, ιδιοδεκτικές και απτικές ενδείξεις λειτουργούν συνδυαστικά ώστε το άτομο να εκτελεί με ασφάλεια πολλαπλές κινητικές δραστηριότητες. Στην περίπτωση όμως ατόμων ΑμεΑ και συγκεκριμένα ατόμων με ολική απώλεια όρασης, ένα μεγάλο ποσοστό της πληροφορίας για τον χώρο απουσιάζει, με αποτέλεσμα η κίνηση και ο προσανατολισμός να εξαρτώνται από δευτερογενείς ενδείξεις. Η διεθνής βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι η απουσία οπτικής ανάδρασης οδηγεί

σε μειωμένη ικανότητα αντίληψης ταχύτητας και κατεύθυνσης, τόσο του ίδιου του αθλητή όσο και των άλλων συμμετεχόντων στον αγωνιστικό χώρο [8].

Η σύγχρονη έρευνα στην κινησιολογία και στα γνωστικά συστήματα καταδεικνύει τη δυνατότητα τεχνολογικής υποστήριξης για την επίγνωση του χώρου. Αυτό γίνεται μέσω συστημάτων που λειτουργούν ως «εξωτερικοί αισθητήρες» (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Παράδειγμα συστήματος αισθητηριακής υποκατάστασης μέσω ακουστικής πληροφορίας [36]

Τα RTLS λειτουργούν προς αυτή την κατεύθυνση, παρέχοντας μια τεχνητή μορφή πληροφορίας του χώρου, που μπορεί να μετατραπεί σε ακουστικά ή απτικά σήματα. Η χρήση τεχνολογικών βοηθημάτων σε παραολυμπιακά αθλήματα έχει ήδη εξεταστεί σε άλλα πεδία άθλησης, όπως στον στίβο και στο goalball. Η δημιουργία τεχνητών μορφών ανάδρασης φάνηκε ότι βελτιώνει σημαντικά την ασφάλεια και την απόδοση των αθλητών [9].

Η εργασία αυτή εντάσσεται σε αυτό το πλαίσιο. Εξετάζει την δυνατότητα χρήσης ενός RTLS ως εξωτερικό σύστημα υποβοήθησης, ικανό να εκτελεί σε πραγματικό χρόνο καθήκοντα που φυσιολογικά θα αναλάμβανε η όραση. Το σύστημα λειτουργεί όχι ως υποκατάστατο της φυσικής ικανότητας, καθώς αυτό είναι αδύνατο, αλλά ως τεχνολογικός ενισχυτής που διευρύνει τις χωρικές δυνατότητες του ατόμου-αθλητή πέρα από τα βιολογικά όρια.

## 1.6 Η σημασία των RTLS στη σύγχρονη βιομηχανία και η μεταφορά τεχνογνωσίας στον αθλητισμό

Τα RTLS έχουν σήμερα καθιερωθεί ως κρίσιμη τεχνολογία σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η εδραίωσή τους αυτή οφείλεται κυρίως στην αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ενσωματωμένων συστημάτων αλλά και στη μείωση του κόστους των UWB modules. Τα εντοπίζουμε λοιπόν στην εφοδιαστική αλυσίδα και την αυτοματοποίηση εργοστασίων αλλά και στα έξυπνα νοσοκομεία και την πλοήγηση ρομποτικών συστημάτων. Επειδή πολλές βιομηχανικές εφαρμογές απαιτούν ακρίβεια εντοπισμού της τάξης των εκατοστών, αντοχή σε παρεμβολές και δυνατότητα παρακολούθησης εκατοντάδων αντικειμένων ταυτόχρονα, παρατηρείται συσχετισμός και ευθυγράμμιση με τις ανάγκες ενός δυναμικού αθλήματος όπως το ποδόσφαιρο τυφλών [10].

Η μεταφορά τεχνολογίας από τη βιομηχανία στον αθλητισμό αποτελεί πλέον μια σύγχρονη ερευνητική τάση, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων ανάλυσης απόδοσης σε επαγγελματικά πρωταθλήματα ποδοσφαίρου και καλαθοσφαίρισης. Κορυφαίες ομάδες χρησιμοποιούν RTLS για την καταγραφή της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της θέσης των αθλητών, αναπροσδιορίζοντας και βελτιώνοντας την τακτική, τον σχεδιασμό προπονήσεων και την πρόληψη τραυματισμών [11]. Η τεχνολογία UWB χρησιμοποιείται ήδη σε κορυφαία πρωταθλήματα για tracking παικτών, με σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια από αντίστοιχες λύσεις βασισμένες σε GPS ή σε οπτική παρακολούθηση.

Η παρούσα εργασία διαφοροποιείται ωστόσο σε ένα κρίσιμο σημείο: αντί να στοχεύει στην ανάλυση απόδοσης, επικεντρώνεται στην ενίσχυση της ασφάλειας των αθλητών. Η προσέγγιση αυτή είναι καινοτόμος, καθώς εισάγει τη χρήση των RTLS όχι ως εργαλείο προπονητικής ή στατιστικής ανάλυσης, αλλά ως μηχανισμό άμεσης προειδοποίησης σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου.

### **1.7 Θεωρητικό πλαίσιο της τεχνητής ασφάλειας (Artificial Safety Layer)**

Η προσθήκη ενός τεχνητού επιπέδου ασφάλειας (Artificial Safety Layer) σε ανθρώπινες δραστηριότητες με αυξημένο κίνδυνο, αποτελεί ένα πεδίο έρευνας που αναπτύσσεται ραγδαία. Η αρχή λειτουργίας είναι απλή: ένα εξωτερικό σύστημα παρακολούθησης αναλύει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και παίρνει αποφάσεις σε χρονικό διάστημα μικρότερο από αυτό που μπορεί να επιτύχει το ανθρώπινο νευρικό σύστημα.

Τέτοια συστήματα παρακολούθησης έχουν ήδη επιδείξει εντυπωσιακά αποτελέσματα σε τομείς όπως τα αυτόνομα οχήματα, τα ρομποτικά exoskeletons και η βιομηχανική ασφάλεια [12]. Για παράδειγμα, αισθητήρες UWB έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν την απόσταση εργαζομένων από επικίνδυνα μηχανήματα και να ενεργοποιούν άμεσα και αυτόματα μηχανισμούς προστασίας εάν ανιχνευθεί επικίνδυνη εγγύτητα.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου στο ποδόσφαιρο τυφλών επιτρέπει τη δημιουργία ενός συστήματος που λειτουργεί προληπτικά, ειδοποιώντας δηλαδή έναν παίκτη που τυχόν βρίσκεται σε επικίνδυνη τροχιά σύγκρουσης. Έτσι η ακαριαία αντίδραση και η υψηλή ακρίβεια ενός RTLS μπορούν να μειώσουν σημαντικά το ενδεχόμενο σοβαρών τραυματισμών.

Στο πλαίσιο αυτό, το σύστημα που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρώτο βήμα για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος τεχνητής ασφάλειας, στο οποίο τα RTLS, τα συστήματα ανάδρασης και ενδεχομένως οι αλγόριθμοι πρόβλεψης τροχιάς, συνεργάζονται επιτυχώς ώστε να παρέχουν συνεχή προστασία στον αθλητή.

### **1.8 Ερευνητικό κενό και συμβολή της εργασίας**

Παρά την εκτεταμένη εφαρμογή των RTLS σε βιομηχανικά και αθλητικά περιβάλλοντα όπως ήδη αναφέρθηκε, η βιβλιογραφία αποκαλύπτει ένα σημαντικό ερευνητικό κενό, καθώς δεν υπάρχουν προηγούμενες δημοσιευμένες μελέτες που να εξετάζουν τη χρήση UWB RTLS ειδικά για την πρόληψη συγκρούσεων στο ποδόσφαιρο τυφλών. Οι υπάρχουσες εφαρμογές επικεντρώνονται κυρίως σε:

- ανάλυση απόδοσης,
- καταγραφή τακτικών κινήσεων,
- εντοπισμό μπάλας και παικτών για στατιστικούς λόγους,
- έλεγχο αποστάσεων σε αθλήματα υψηλής ταχύτητας.

## Κεφάλαιο 1

Καμία από αυτές τις εφαρμογές δεν εξετάζει τη χρήση ενός RTLS ως άμεσο μηχανισμό ασφαλείας για άτομα με οπτική αναπηρία. Επομένως με την εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια να εισαχθεί ένα νέο μοντέλο λειτουργίας όπου το RTLS δεν παρακολουθεί απλώς, αλλά παρεμβαίνει με τρόπο λειτουργικό, δημιουργώντας προειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο.

Εν κατακλείδι, η συμβολή της εργασίας μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω :

- παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη προσομοίωση που αναπαράγει ρεαλιστικές συνθήκες UWB εντοπισμού,
- εξετάζει τη βιωσιμότητα της χρήσης RTLS για την πρόληψη συγκρούσεων,
- εισάγει ένα νέο, επεκτάσιμο μηχανισμό ασφάλειας που μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα αθλήματα ή κινητικές δραστηριότητες
- η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε δημιουργεί το θεμέλιο για μελλοντικές υλοποιήσεις σε πραγματικό εξοπλισμό.

## Κεφάλαιο 2ο: Ποδόσφαιρο 5×5 Τυφλών (Blind Football) – Διεξαγωγή, Κανονιστικό Πλαίσιο, Ασφάλεια και Ζητήματα Εφαρμογής Τεχνολογικών Συστημάτων

Το ποδόσφαιρο 5×5 τυφλών, γνωστό διεθνώς ως blind football ή football 5-a-side, αποτελεί μία προσαρμογή του κλασικού ποδοσφαίρου δομημένη κατάλληλα για αθλητές με οπτική αναπηρία. Η προσαρμογή δεν αφορά μόνο τις αλλαγές κανόνων, αλλά δημιουργεί ένα πλήρες αγωνιστικό σύστημα στο οποίο ο προσανατολισμός, η λεκτική επικοινωνία και ο έλεγχος κινδύνου αποκτούν εξέχουσα σημασία κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του αγώνα. Το θεσμικό πλαίσιο του αθλήματος για την κατηγορία B1 καθορίζεται από τον κανονισμό της International Blind Sports Federation (IBSA), ο οποίος ορίζει με συγκεκριμένο τρόπο το γήπεδο, τον εξοπλισμό, τις διαδικασίες αγώνα, τους ρόλους των διαιτητών, καθώς και τους κανόνες που διασφαλίζουν ότι ο αγώνας διεξάγεται με ασφάλεια για όλους παρόλη την έλλειψη οπτικών ερεθισμάτων [4]. Επίσης, η IBSA παρουσιάζει συνοπτικά τη λειτουργία του αθλήματος και τονίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις, όπως η χρήση οριοθετικών επιφανειών (kickboards), η απουσία οφσάιντ και πλάγιων επαναφορών, καθώς και η ακουστική υποστήριξη της μπάλας [24]. Σε εθνικό επίπεδο, οργανισμοί όπως η Paralympic Canada παρουσιάζουν το football 5-a-side ως παραολυμπιακό άθλημα υψηλής έντασης, όπου η σιωπή στο γήπεδο αποτελεί προϋπόθεση διεξαγωγής, καθώς οι παίκτες βασίζονται στον ήχο της μπάλας και στα λεκτικά σήματα καθοδήγησης [25]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η κατανόηση του τρόπου διεξαγωγής του αγώνα, δεν έχει μόνο περιγραφικό χαρακτήρα. Αποτελεί προϋπόθεση για τον καθορισμό των τεχνικών απαιτήσεων του συστήματος που αναπτύσσουμε με κύριο στόχο υποστηρίζει την ασφάλεια και την ανάλυση του παιχνιδιού χωρίς να αλλοιώνει το χαρακτήρα του αθλήματος.(Σχήμα 3)



Σχήμα 3: Διεξαγωγή αγώνα ποδοσφαίρου τυφλών.[50]

### 2.1 Θεσμικό πλαίσιο και θέση του αθλήματος

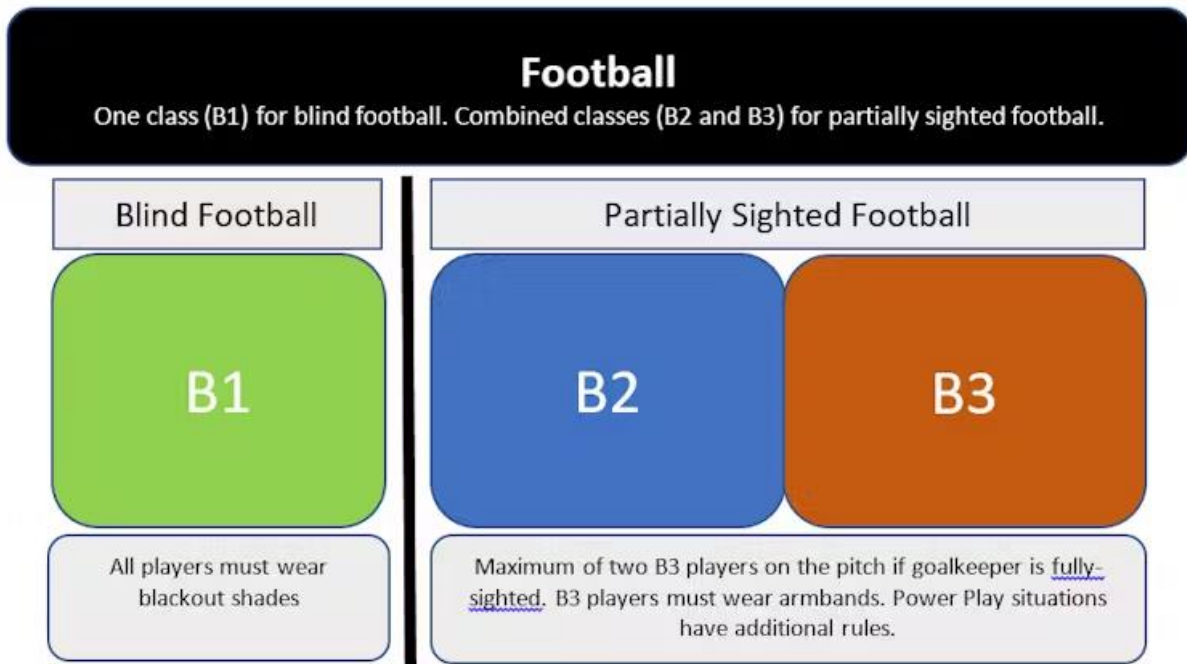
Η IBSA λειτουργεί ως διεθνής φορέας που διαμορφώνει τους κανόνες για το blind football και καθορίζει τις τεχνικές και αγωνιστικές προδιαγραφές για διοργανώσεις υπό την αιγίδα της [4]. Η ύπαρξη ενιαίου κειμένου κανόνων έχει πρακτική σημασία, επειδή οι συνθήκες διεξαγωγής είναι σταθερές και

επαναλαμβάνονται μεταξύ διαφορετικών διοργανώσεων και περιορίζεται έτσι η αβεβαιότητα που θα προέκυπτε αν κάθε διοργανωτής υιοθετούσε διαφορετικά πρότυπα. Για την τεχνική μελέτη, η σταθερότητα του πλαισίου είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί επιτρέπει τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση συστημάτων που στηρίζονται σε σταθερούς κανόνες σχετικά με τη γεωμετρία του γηπέδου, τη δομή των χρονικών φάσεων, τις διαδικασίες επανεκκίνησης που επιτρέπονται και τους ρόλους καθοδήγησης [4][24].

Η IBSA, στη συνοπτική παρουσίαση του αθλήματος, αναφέρει ότι το ποδόσφαιρο διακρίνεται σε blind football και partially sighted futsal, με τη διάκριση να εξαρτάται από τη λειτουργική όραση των αθλητών στις αντίστοιχες κατηγορίες [24]. Στο blind football, οι παίκτες πεδίου είναι κατηγορίας B1 και φορούν υποχρεωτικά επιθέματα και σκιάδια, ώστε να διασφαλίζεται η ομοιομορφία των συνθηκών αντίληψης [24]. Ο τερματοφύλακας μπορεί να είναι βλέπων ή μερικώς βλέπων, γεγονός που προσδιορίζει την ανάγκη ύπαρξης ενός παίκτη με δυνατότητα οπτικής επιτήρησης της μικρής περιοχής τέρματος [4] [25]. Η ιδιαιτερότητα αυτή δεν αποτελεί απλώς εξαίρεση. Δημιουργεί έναν διακριτό ρόλο μέσα στο σύστημα, όπου ο τερματοφύλακας λειτουργεί ως στοιχείο άμυνας και ως παράγοντας ασφαλείας σε φάσεις αυξημένης πυκνότητας κοντά στο τέρμα.

### **2.2 Κατηγοριοποίηση αθλητών και μηχανισμοί ισονομίας**

Στο football 5-a-side η ισονομία των αθλητών προκύπτει τόσο από την κατηγοριοποίηση όσο και από την υποχρεωτική εξομοίωση των συνθηκών αντίληψης. Η Paralympic Canada αναφέρει ότι οι τέσσερις παίκτες πεδίου πρέπει να είναι B1, ενώ ο τερματοφύλακας μπορεί να είναι βλέπων ή μερικώς βλέπων, με κατηγορίες B2 ή B3 [25]. Ο κανονισμός της IBSA επαναλαμβάνει την ίδια αρχή και ορίζει ότι η ομάδα αποτελείται από τέσσερις B1 παίκτες πεδίου και έναν τερματοφύλακα που μπορεί να είναι B2, B3 ή πλήρως βλέπων (Σχήμα 4) [4]. Η υποχρέωση χρήσης επιθεμάτων και σκιάδιων από τους παίκτες πεδίου έχει σαν στόχο να αποτρέψει πλεονεκτήματα από υπολειμματική όραση και διασφαλίζει ότι η αγωνιστική απόδοση στηρίζεται αποκλειστικά σε ακουστική πληροφόρηση, χωρική μνήμη, τεχνική επαφή με την μπάλα και αποτελεσματική επικοινωνία [4][24][25].



Σχήμα 4: Κατηγορίες αθλητών στο ποδόσφαιρο τυφλών[37]

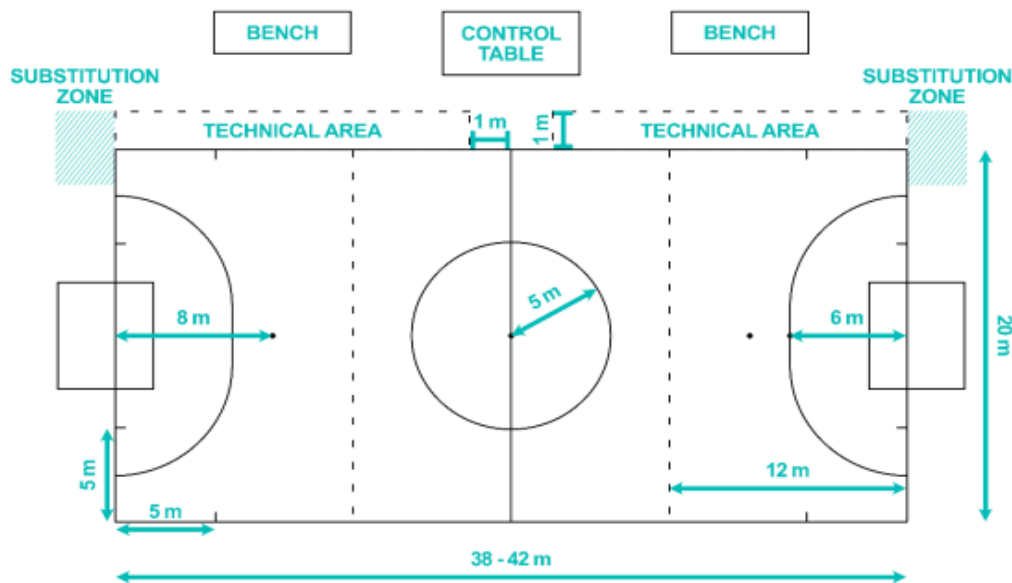
Η ισονομία ενισχύεται επίσης από τη διαρκή επιτήρηση του εξοπλισμού. Η IBSA αναθέτει στους διαιτητές την ευθύνη να ελέγχουν τον εξοπλισμό πριν από την έναρξη και κατά τη διάρκεια του αγώνα, ενώ προβλέπει ρητά ότι τυχόν προστατευτικά σκιάδια που κατά την κρίση του διαιτητή απειλούν την ασφάλεια των παικτών, δεν επιτρέπονται [4]. Αυτό γίνεται γιατί σε ένα περιβάλλον όπου η οπτική πληροφορία απουσιάζει, οποιαδήποτε μεταβολή στον τρόπο που εφαρμόζεται το σκιάδι μπορεί να επηρεάσει την αίσθηση προσανατολισμού του παίκτη και να αυξήσει την πιθανότητα σύγκρουσης, ιδίως σε φάσεις έντονης μετάβασης.

### 2.3 Γήπεδο, επιφάνεια και οριοθετήσεις που υποστηρίζουν προσανατολισμό

Το γήπεδο στο blind football είναι μικρότερο από εκείνο του κλασικού ποδοσφαίρου, κάτι που αυξάνει την συχνότητα αλληλεπιδράσεων και μειώνει τα χρονικά περιθώρια αντίδρασης. Η IBSA, στη συνοπτική παρουσίαση του αθλήματος, αναφέρει ότι ο αγώνας διεξάγεται σε λεία, στέρεη και μη αποξεστική επιφάνεια, με διαστάσεις 40 μέτρα επί 20 μέτρα, ενώ τονίζει ότι ο εξωτερικός χώρος είναι επιθυμητός, επειδή διευκολύνει τις ακουστικές συνθήκες [24]. Η ίδια πηγή αναφέρει ότι τα τέρματα έχουν πλάτος 3,66 μέτρα και ύψος 2,14 μέτρα [24]. Η Paralympic Canada περιγράφει αντίστοιχα το

γήπεδο ως 40×20 και επισημαίνει την ύπαρξη πλευρικών οριοθετικών επιφανειών κατά μήκος του αγωνιστικού χώρου (Σχήμα 5) [25].

Οι πλευρικές οριοθετήσεις, γνωστές ως kickboards, δεν εξυπηρετούν απλά την αποτροπή εξόδου της μπάλας. Σε επίπεδο ροής του αγώνα, επιτρέπουν αναπήδηση και διατήρηση της μπάλας εντός, κάτι που μειώνει τις διακοπές και διατηρεί υψηλό ρυθμό παιχνιδιού. Σε επίπεδο προσανατολισμού, αποτελούν απτικό και ακουστικό ορόσημο, καθώς η επαφή της μπάλας ή του σώματος με την οριοθέτηση δημιουργεί χαρακτηριστική ανάδραση. Ο κανονισμός της IBSA ενσωματώνει τα kickboards στον



Σχήμα 5: Αναλυτική τοπολογία γηπέδου [38]

προσδιορισμό του «εντός» και «εκτός» παιχνιδιού, προβλέποντας ότι η μπάλα θεωρείται εκτός όταν έχει περάσει πάνω από τα kickboards στον αέρα, ενώ παραμένει εντός όταν αναπηδά στα kickboards και συνεχίζει εντός γηπέδου [4].

## 2.4 Μπάλα με ηχητικό μηχανισμό και απαιτήσεις ακουστικού περιβάλλοντος

Η ακουστική πληροφορία που παρέχει η μπάλα αποτελεί θεμέλιο της αγωνιστικής λειτουργίας. Ο κανονισμός της IBSA ορίζει ότι η μπάλα πρέπει να φέρει σύστημα που παράγει ήχο όταν κινείται στο γήπεδο ή στον αέρα, ενώ καθορίζει τεχνικά χαρακτηριστικά ώστε η συμπεριφορά της να είναι προβλέψιμη [4]. Η IBSA, στην περιγραφική παρουσίαση, επιβεβαιώνει ότι η μπάλα περιέχει καμπανάκια ή αντίστοιχο μηχανισμό [24]. Η Paralympic Canada απαιτεί την απόλυτη σιωπή των θεατών, επειδή ο θόρυβος μπορεί να εμποδίσει την ακουστική αντίληψη της κατεύθυνσης και της ταχύτητας της μπάλας [25].

Η σιωπή δεν αποτελεί τυπική σύσταση αλλά σαφώς απαίτηση ασφάλειας. Ο κανονισμός της IBSA προβλέπει ότι ο διαιτητής έχει την αποκλειστική ευθύνη να εξασφαλίζει σιωπή γύρω από το γήπεδο, με χρήση συστήματος δημόσιας αναγγελίας [4]. Η πρόβλεψη αυτή είναι κρίσιμη για οποιαδήποτε τεχνολογική παρέμβαση. Εάν ένα σύστημα εισάγει πρόσθετα ηχητικά σήματα, κινδυνεύει να

επικαλύψει το βασικό σήμα της μπάλας και να ελαχιστοποιήσει την ασφάλεια, ακόμη και αν οι προθέσεις είναι υποστηρικτικές.

## **2.5 Σύνθεση ομάδων, ρόλοι καθοδήγησης και κατανομή λεκτικής πληροφορίας**

Η ομάδα στο blind football διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την προϋπόθεση ότι η λεκτική πληροφορία πρέπει να είναι στοχευμένη και κατανομημένη. Ο κανονισμός της IBSA ορίζει ότι εντός γηπέδου συμμετέχουν τέσσερις B1 παίκτες πεδίου και ένας τερματοφύλακας, ενώ προβλέπεται και ρόλος οδηγού [4]. Σε επίπεδο αποστολής, ο κανονισμός προβλέπει μέγιστη σύνθεση δεκαπέντε ατόμων, με συγκεκριμένους ρόλους όπως παίκτες πεδίου, τερματοφύλακες, οδηγός, προπονητής, βοηθός προπονητή και ιατρικό προσωπικό, ενώ επιτρέπει και μεταφραστική προπονητή αν απαιτείται [4]. Η Paralympic Canada τονίζει επίσης ότι και εκτός γηπέδου υπάρχουν ρόλοι καθοδήγησης, που υποστηρίζουν τους παίκτες με λεκτικές οδηγίες [25].

Η κατανομή της καθοδήγησης στο γήπεδο ακολουθεί συγκεκριμένη τακτική, για να αποφεύγεται η ταυτόχρονη παροχή πολλών οδηγιών. Η IBSA αναφέρει ρητά ότι η καθοδήγηση οργανώνεται και επιτρέπεται σε κάθε ένα τρίτο του γηπέδου και συνδέεται με ξεχωριστές περιοχές στις οποίες συγκεκριμένα πρόσωπα επιτρέπεται να δίνουν οδηγίες [4]. Το σημείο αυτό είναι σημαντικό και επηρεάζει άμεσα τον σχεδιασμό τεχνολογίας. Ένα σύστημα που στοχεύει σε βελτίωση της ασφάλειας, όπως το δικό μας, οφείλει να τροφοδοτεί την πληροφορία προς την κατεύθυνση που ήδη προβλέπει το άθλημα, έτσι ώστε η πληροφορία να ενσωματώνεται στην καθιερωμένη λεκτική καθοδήγηση και να μην δημιουργεί παράλληλο κανάλι που θα προκαλούσε σύγχυση στους αθλητές.

## **2.6 Διαιτητές αγώνα και έλεγχος ακουστικού περιβάλλοντος**

Το blind football περιλαμβάνει ρόλους διαιτητών που εξυπηρετούν ειδικές λειτουργικές ανάγκες. Η IBSA προβλέπει ότι ο διαιτητής έχει πλήρη εξουσία επιβολής των κανόνων, αναλαμβάνει πειθαρχικές ενέργειες, διασφαλίζει ότι δεν εισέρχονται μη εξουσιοδοτημένα πρόσωπα στον αγωνιστικό χώρο και διακόπτει το παιχνίδι όταν ένας παίκτης είναι σοβαρά τραυματισμένος [4]. Ο κανονισμός αναθέτει επίσης στον διαιτητή την ευθύνη να χρησιμοποιεί το σύστημα δημόσιας αναγγελίας για να διασφαλίζει την ύπαρξη σιωπής γύρω από το γήπεδο [4]. Επίσης υπάρχει πρόβλεψη για τρίτο διαιτητή με αρμοδιότητες υποστήριξης και ελέγχου εξοπλισμού πριν την αλλαγή παικτών. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η ασφάλεια ελέγχεται συνεχώς και όχι μόνο πριν από την έναρξη του αγώνα [4].

Το σύστημα δημόσιας αναγγελίας εξάλλου αποτελεί σημαντικό μέρος της διεξαγωγής. Η IBSA προβλέπει ότι το παιχνίδι διακόπτεται με σαφή αναγγελία, ότι ανακοινώνονται συμβάντα όπως φάουλ, αλλαγές και τάιμ άουτ, και ότι ζητείται σιωπή από το κοινό [4]. Η ύπαρξη αυτού του τρόπου ενημέρωσης δημιουργεί έναν προκαθορισμένο τρόπο μετάδοσης της πληροφορίας θέτει περιορισμό για την εισαγωγή πρόσθετων ηχητικών ειδοποιήσεων, πράγμα που καθιστά απαραίτητη τη χρήση του συστήματος RTLS.

## **2.7 Αλλαγές παικτών και μέτρα ασφάλειας**

Οι αλλαγές παικτών στο blind football ακολουθούν συγκεκριμένη διαδικασία που απορρέει από την επίγνωση της έλλειψης οπτικής αντίληψης της κίνησης από τους αθλητές, εκτός του άμεσου χώρου τους. Επομένως κάθε είσοδος και έξοδος πρέπει να γίνεται με αυστηρό έλεγχο. Η IBSA ορίζει ότι η αποστολή περιλαμβάνει έως οκτώ B1 παίκτες πεδίου και δύο τερματοφύλακες και επισημαίνει ότι επιτρέπονται περιορισμένες αλλαγές ανά ημίχρονο [4]. Η αλλαγή πραγματοποιείται μόνο όταν η μπάλα είναι εκτός παιχνιδιού, ανακοινώνεται μέσω του συστήματος δημόσιας αναγγελίας, και ο εισερχόμενος

παίκτης δεν επιτρέπεται αυστηρά, να μπει πριν ο εξερχόμενος έχει περάσει πλήρως την πλάγια γραμμή και πριν δοθεί άδεια από τον διαιτητή [4]. Η διαδικασία αυτή μειώνει τον κίνδυνο σύγκρουσης και απρόβλεπτης σύγκρουσης, επειδή περιορίζει τις ταυτόχρονες κινήσεις των αθλητών σε περιοχές κοντά στην πλάγια γραμμή.

Ο κανονισμός προβλέπει επίσης ότι αν ένας παίκτης χρειαστεί ιατρική φροντίδα, τότε μετά την αντιμετώπιση πρέπει να αποχωρήσει και μπορεί να αντικατασταθεί [4]. Η πρόβλεψη αυτή αποσκοπεί στο να μην παραμένει στο παιχνίδι αθλητής που μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση αποπροσανατολισμού ή μειωμένης ισορροπίας, προς αποφυγή ατυχήματος. Παράλληλα ο κανόνας αυτός δημιουργεί ενδεχομένως και την ανάγκη χρήσης συστήματος παρακολούθησης, το οποίο πρέπει να χειρίζεται την προσωρινή αποχώρηση και επάνοδο του αθλητή χωρίς να διακόπτεται η ταυτότητα και η συνέπεια των δεδομένων και η ροή του παιχνιδιού.

### **2.8 Απόκρουση τερματοφύλακα και περιορισμοί που επηρεάζουν την ασφάλεια**

Η απόκρουση του τερματοφύλακα στο blind football αποτελεί επίσης μία μέθοδο επανεκκίνησης και σύμφωνα με την IBSA, εκτελείται πάντα από τον τερματοφύλακα εντός της περιοχής του [4]. Ο κανονισμός ορίζει ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί τέρμα απευθείας από την απόκρουση του τερματοφύλακα. Αν η μπάλα καταλήξει απευθείας στο τέρμα του τερματοφύλακα που εκτέλεσε, τότε καταλογίζεται κόρνερ για τους αντιπάλους, ενώ αν καταλήξει απευθείας στο αντίπαλο τέρμα, τότε καταλογίζεται απόκρουση για την αντίπαλη ομάδα [4]. Η πρόβλεψη αυτή περιορίζει καταστάσεις όπου μια μακρινή εκτέλεση της μπάλας θα μπορούσε να δημιουργήσει αιφνίδια και δυσανάλογη απειλή, κυρίως όταν η μπάλα ταξιδεύει στον αέρα και το ακουστικό σήμα είναι λιγότερο προσδιορισμένο ως προς την κατεύθυνσή της.

Ο κανονισμός προβλέπει επίσης ότι η απόκρουση πρέπει να εκτελεστεί εντός τεσσάρων δευτερολέπτων από τη στιγμή που ο τερματοφύλακας αποκτήσει την μπάλα. Αν υπερβεί τον χρόνο αυτό, καταλογίζεται έμμεσο λάκτισμα για τους αντιπάλους [4]. Επιπλέον, αν ο τερματοφύλακας πετάξει την μπάλα πέρα από τη μεσαία γραμμή χωρίς η μπάλα να έχει ακουμπήσει στο έδαφος ή να έχει παιχτεί προηγουμένως, καταλογίζεται έμμεσο λάκτισμα για τους αντιπάλους από οποιοδήποτε σημείο της μεσαίας γραμμής [4]. Η ρύθμιση αυτή συνδέεται άμεσα με την ασφάλεια, επειδή αποτρέπει εκτελέσεις που θα μετέφεραν απότομα τη δράση σε μακρινή περιοχή, χωρίς οι παίκτες να έχουν επαρκή χρόνο προσανατολισμού με βάση το ακουστικό σήμα.

### **2.9 Ζητήματα ασφάλειας εξοπλισμού και περιορισμοί για φορητές συσκευές**

Η ασφάλεια εξοπλισμού στο blind football έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή η επαφή είναι συχνή και η έλλειψη όρασης αυξάνει τη σημασία της αφής και των απτικών χαρακτηριστικών. Η IBSA ορίζει ότι κανένας παίκτης δεν επιτρέπεται να φέρει αντικείμενο που είναι επικίνδυνο για τον ίδιο ή για άλλους, ενώ οι διαιτητές ελέγχουν τον εξοπλισμό πριν από την έναρξη και μπορούν να απαιτήσουν διόρθωση πριν επιτρέψουν την επάνοδο ενός παίκτη [4]. Ο κανονισμός αυτός επηρεάζει άμεσα την χρήση τεχνολογικών συσκευών που φοριούνται στο σώμα, διότι η συσκευή πρέπει να είναι μη αιχμηρή, πλήρως ασφαλισμένη, χωρίς σκληρές προεξοχές και χωρίς κίνδυνο αποκόλλησης κατά την επαφή. (Σχήμα 6)

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην περιοχή του κεφαλιού, επειδή οι παίκτες φορούν επιθέματα και σκιάδια, ενώ ο κανονισμός επισημαίνει ότι προστατευτική κορδέλα κεφαλής είναι προαιρετική για πρόληψη τραυματισμών [4]. Επομένως, οποιαδήποτε πρόταση τοποθέτησης αισθητήρα κοντά στο κεφάλι οφείλει να διασφαλίζει ότι δεν εμποδίζει τη σωστή εφαρμογή των σκιάδιων, ότι δεν επηρεάζει

την άνεση των παικτών και ότι δεν εμποδίζει τους ελέγχους από τους διαιτητές [4]. Η τήρηση των προϋποθέσεων αυτών είναι απολύτως σημαντική και απαραίτητη, καθώς ακόμη και ένα τεχνικά άρτιο σύστημα μπορεί να απορριφθεί αν θεωρηθεί ότι εισάγει εμπόδιο στη ρουτίνα ελέγχου και ασφάλειας.



Σχήμα 6: Οπτικός εξοπλισμός παικτών[51]

## 2.10 Ακουστικοί περιορισμοί και σχεδιασμός ειδοποιήσεων χωρίς παρεμβολή

Το blind football βασίζεται σε ακουστικό προσανατολισμό, επομένως η τεχνολογική υποστήριξη οφείλει να αποφεύγει κάθε παρεμβολή στο ακουστικό πεδίο. Η Paralympic Canada υπογραμμίζει ότι οι θεατές πρέπει να παραμένουν σιωπηλοί, ώστε να μην καλύπτεται ο ήχος της μπάλας [25]. Η IBSA αναθέτει στους διαιτητές το ρόλο αυτό και προβλέπει επίσημα και συγκεκριμένα ακουστικά σήματα, όπως το σήμα λήξης περιόδου [4]. Σε αυτό το περιβάλλον, η εισαγωγή νέων ηχητικών ειδοποιήσεων προς τους παίκτες είναι πιθανό να επιβαρύνει την ασφάλεια, επειδή θα ανταγωνιστεί τον ήχο της μπάλας και τα επίσημα σήματα.

Αντίθετα, μια τεχνική παρέμβαση μπορεί να είναι λύση όταν παρέχει πληροφορίες εκτός γηπέδου προς τους αθλητές. Η IBSA ορίζει την κατανομή καθοδήγησης ανά ένα τρίτο του γηπέδου και προβλέπει ότι οι διαιτητές επιβάλλουν τους κανόνες των περιοχών καθοδήγησης [4]. Αυτό σημαίνει ότι μια τεχνολογική ένδειξη κινδύνου μπορεί να αξιοποιηθεί από τον προπονητή ή τον εκάστοτε οδηγό, ο οποίος στη συνέχεια μεταφράζει την πληροφορία σε λεκτική οδηγία σύμφωνα με τον κανονισμό και με την πρακτική του αγώνα.

### **2.11 Προβλήματα εφαρμογής σε πραγματικές εγκαταστάσεις**

Η υλοποίηση ενός συστήματος παρακολούθησης σε πραγματικό αγωνιστικό περιβάλλον αντιμετωπίζει περιορισμούς που εξαρτώνται από τη χωροθέτηση και τη λειτουργία του αγώνα. Η IBSA ορίζει ότι ο χρονομέτρης, ο σημειωτής και ο εκφωνητής του συστήματος δημόσιας αναγγελίας τοποθετούνται εκτός γηπέδου στη γραμμή του κέντρου και στην πλευρά των πάγκων [4]. Αυτό φανερώνει ότι συγκεκριμένες ζώνες γύρω από το γήπεδο πρέπει να παραμένουν ελεύθερες για την απρόσκοπτη λειτουργία των επίσημων οργάνων και για την ασφαλή κίνηση του προσωπικού.

Επιπλέον, η διαδικασία αλλαγών και οι έλεγχοι εξοπλισμού είναι απαραίτητοι κατά τη διάρκεια του αγώνα. Η IBSA προβλέπει έλεγχο εξοπλισμού πριν την είσοδο ενός παίκτη μετά από αντικατάσταση και ορίζει ότι η αλλαγή ανακοινώνεται επίσημα [4]. Εάν η τεχνολογική λύση που προτείνεται απαιτεί φορητή συσκευή, τότε αυτή πρέπει να ενταχθεί στο ίδιο πρωτόκολλο ελέγχου, ώστε να μην προκύπτουν καθυστερήσεις, αμφισβητήσεις ή ανασφάλεια σχετικά με το αν ο παίκτης αγωνίζεται με εγκεκριμένο εξοπλισμό ή όχι.

### **2.12 Τα προβλήματα που επιχειρεί να επιλύσει η διπλωματική εργασία**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει σε προβλήματα που απορρέουν από τη παρουσία υψηλής έντασης παιχνιδιού ατόμων με απουσία όρασης και αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας. Η IBSA περιγράφει το blind football ως άθλημα με υψηλή ταχύτητα και σωματικότητα, ενώ οι βασικοί τρόποι ασφάλειας στηρίζονται στην επικοινωνία, στη σιωπή και στη διαιτητική επιτήρηση [24][4]. Παρά την ύπαρξη αυτών μεθόδων διατήρησης της ασφάλειας, η αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων σύγκλισης ή και πρόσκρουσης, βασίζεται κυρίως στην ανθρώπινη κρίση και στην εκ των υστέρων αξιολόγηση του συμβάντος. Το τεχνικό ζητούμενο της διπλωματικής είναι να προσφέρει αντικειμενική αποτύπωση της σχετικής θέσης και της εγγύτητας μεταξύ των παικτών σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να παράγονται δείκτες που υποστηρίζουν την πρόληψη, την αποφυγή ατυχημάτων και γενικότερα την αναλυτική αξιολόγηση χωρίς να αλλοιώνεται το κανονιστικό περιβάλλον του αγώνα.

Η στόχευση αυτή συνδέεται με συγκεκριμένα σημεία του κανονισμού. Η IBSA προβλέπει ότι ο χρονομέτρης και ο σημειωτής καταγράφουν συστηματικά συμβάντα, όπως συσσωρευμένα φάουλ και πειθαρχικές κυρώσεις [4]. Η ύπαρξη θεσμοθετημένης καταγραφής δείχνει ότι το άθλημα αποδέχεται συστήματα παρακολούθησης όταν αυτά ενσωματώνονται ορθά. Επιπλέον, η καταγραφή και ανάλυση συμβάντων εγγύτητας μπορεί να λειτουργήσει ως τεχνικό συμπλήρωμα για προπονητική και οργανωτική αξιολόγηση, ιδίως σε φάσεις όπου ο κανονισμός ήδη αναγνωρίζει αυξημένη επικινδυνότητα, όπως οι επανειλημμένες παραβάσεις που οδηγούν σε διαδικασία διπλής ποινής [4].

### **2.13 Περιορισμοί αποδοχής και ηθικές παράμετροι χρήσης δεδομένων**

Η εφαρμογή τεχνολογικών συστημάτων σε παραολυμπιακό περιβάλλον δεν αξιολογείται μόνο από άποψη τεχνικής επίδοσης. Αξιολογείται και ως προς την αποδοχή από αθλητές, προπονητές και διαιτητές, ιδίως όταν η τεχνολογία μπορεί να επηρεάσει την αίσθηση δικαιοσύνης ή την αυτονομία του αθλητή. Οι πηγές που εξετάζονται εδώ δίνουν έμφαση κυρίως στην κανονιστική τυποποίηση, στον έλεγχο εξοπλισμού και στη σαφή κατανομή ρόλων, στοιχεία που δείχνουν ότι οποιαδήποτε πρόσθετη τεχνολογική πρακτική πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένη με τη λογική του αθλήματος [4][24]. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι η τεχνολογία οφείλει να είναι διακριτική, να μην εισάγει θόρυβο, να μην απαιτεί σύνθετες ενέργειες από τους αθλητές και να υποστηρίζει τη λειτουργία των υπάρχοντων ρόλων.

Η Paralympic Canada, τονίζοντας τη σημασία της σιωπής και του ακουστικού προσανατολισμού, δείχνει έμμεσα ότι η αυτονομία του αθλητή στηρίζεται στην καθαρότητα των σημάτων που λαμβάνει [25]. Ένα

σύστημα που θα επιχειρούσε να καθοδηγεί άμεσα τον αθλητή με νέου τύπου ειδοποιήσεις θα μετέβαλλε τη βασική αρχή του παιχνιδιού. Αντίθετα, ένα σύστημα που παράγει δεδομένα για αξιολόγηση, εκπαίδευση και βελτίωση εγκατάστασης μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια χωρίς να μετασχηματίσει τον τρόπο που ο αθλητής αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του.

#### **2.14 Συνολική αποτίμηση ζητημάτων εφαρμογής**

Συνολικά, το blind football συνιστά ένα άθλημα όπου η ασφάλεια ενσωματώνεται στον σχεδιασμό των κανόνων. Αυτό αποτυπώνεται στη χρήση kickboards, στην ηχητική μπάλα, στη θεσμική διατήρηση της σιωπής, στους ελέγχους εξοπλισμού και στη λεπτομερή ρύθμιση επανεκκινήσεων με αποστάσεις και χρονικά όρια [4][24][25]. Τα χαρακτηριστικά αυτά δημιουργούν ένα αυστηρό πλαίσιο, το οποίο περιορίζει την αυθαίρετη τεχνολογική παρέμβαση, όμως ταυτόχρονα παρέχει σαφή σημεία και δυνατότητες ενσωμάτωσης για συστήματα καταγραφής, αναλυτικής αξιολόγησης και πρόληψης κινδύνου.

Η διπλωματική εργασία, επειδή στοχεύει σε υποστήριξη ασφάλειας, παρουσιάζει μία πρόταση που σέβεται τις κανονιστικές αρχές και είναι σχεδιασμένη με βάση τις πραγματικές διαδικασίες αγώνα. Στόχος του συστήματος είναι η παραγωγή αξιόπιστων μετρήσεων θέσης και εγγύτητας, η εξαγωγή δεικτών για φάσεις αυξημένου κινδύνου και η διάθεση των αποτελεσμάτων προς τους αρμόδιους εκτός γηπέδου, με τρόπο που να μην επιβαρύνει το ακουστικό πεδίο και να μην συγκρούεται με το σύστημα αναγγελιών [4][25].

#### **2.15 Συμπεράσματα κεφαλαίου**

Το ποδόσφαιρο 5×5 τυφλών αποτελεί άθλημα με υψηλές οργανωτικές και κανονιστικές απαιτήσεις, στο οποίο η ασφάλεια αντιμετωπίζεται ως βασικό συστατικό και προϋπόθεση της αγωνιστικής ροής [4]. Οι βασικές προσαρμογές, όπως η μπάλα με ακουστικό μηχανισμό, το καθεστώς σιωπής, τα kickboards και η θεσμοθετημένη καθοδήγηση, συγκροτούν ένα περιβάλλον όπου ο προσανατολισμός βασίζεται σε ήχο, απτική ανάδραση και επικοινωνία [24][25]. Οι λεπτομερείς κανόνες επανεκκίνησης, οι αποστάσεις και τα χρονικά όρια, καθώς και η ύπαρξη μηχανισμού συσσωρευμένων φάουλ και διαδικασίας διπλής ποινής, δείχνουν ότι το άθλημα επιδιώκει να μετατρέψει την αβεβαιότητα σε προβλέψιμο πεδίο [4]. Στο πλαίσιο της διπλωματικής, αυτά τα στοιχεία μεταφράζονται σε τεχνικές απαιτήσεις για ακρίβεια, αξιοπιστία, μη παρεμβολή στο ακουστικό πεδίο και πλήρη συμβατότητα με τις διαδικασίες αγώνα.


## Κεφάλαιο 3ο: Τεχνολογικό υπόβαθρο

Για να γίνει πλήρως κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το σύστημα που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία απαιτείται η λεπτομερής ανάλυση των βασικών τεχνολογιών και αλγορίθμων που το απαρτίζουν. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν οι τεχνολογίες εντοπισμού θέσης μέσω ασύρματων σημάτων δίνοντας μεγάλη έμφαση στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Ultra-Wideband (UWB) έναντι όλων των άλλων. Ύστερα παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο του αλγορίθμου πολυπλευρομέτρησης (multilateration) ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χωρικών συντεταγμένων. Τέλος γίνεται περιγραφή στη αρχιτεκτονική και τα βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου MQTT το οποίο λειτουργεί ως ο κεντρικός μηχανισμός διασύνδεσης όλων των επιμέρους μερών του συστήματος.

### 3.1 Τεχνολογίες ασύρματου εντοπισμού θέσης

Η ανάγκη για τον εντοπισμό της θέσης αντικειμένων και ατόμων σε εσωτερικούς κυρίως χώρους, όπου το σήμα του GPS) είναι αναξιόπιστο ή οριακά ανύπαρκτο [10] μας οδήγησε στην ανάπτυξη μιας πληθώρας τεχνολογιών γνωστών ως Συστήματα Εντοπισμού Εσωτερικού Χώρου (Indoor Positioning Systems - IPS). Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής σε διάφορους τομείς όπως η ακρίβεια του συστήματος το κόστος κατασκευής του, η κατανάλωση ενέργειας καθώς και η επεκτασιμότητα [9]. Οι βασικές τεχνολογίες είναι (Σχήμα 7):

comparison of different technologies for server-based indoor positioning

Technology	Accuracy	Range	Suitable for	Tracking	Transmitter power supply	Battery lifetime
Wi-Fi	 < 15 m	 < 150 m	 area detection		 or 	 medium
BLE	4  < 8 m	 < 75 m	 area detection			 high
	5.1  < 1 m with line-of-sight					
UWB	 < 30 cm	 < 150 m	 area detection		 or 	 medium
RFID	presence detection only	 < 1 m	 spot detection		— (passive RFID tag)	— (passive RFID tag)

Σχήμα 7: Συγκριτική απεικόνιση τεχνολογιών εντοπισμού εσωτερικού χώρου [39]

- **Wi-Fi (Wireless Fidelity):** Τα συστήματα εντοπισμού αυτά βασίζονται στο Wi-Fi αξιοποιώντας την ήδη υπάρχουσα υποδομή δικτύου δηλαδή τα σημεία ασύρματης πρόσβασης (Access Points). Η βασική μέθοδος υπολογισμού βασίζεται στη μέτρηση της Ισχύος του Λαμβανόμενου Σήματος από του πομπούς. Ο υπολογισμός της θέσης πραγματοποιείται συνήθως μέσω τεχνικών fingerprinting κατά την οποία ένας χάρτης αναφοράς δημιουργείται με RSSI τιμές σε κάποιες γνωστές τοποθεσίες που βρίσκονται στον χώρο. Παρόλο που η προσέγγιση αυτή είναι οικονομική και εύκολα υλοποιήσιμη και εύκολα επεκτάσιμη η ακρίβειά της παραμένει αρκετά περιορισμένη. Συνήθως από 2 έως 10 μέτρα, ενώ επηρεάζεται έντονα από εμπόδια, παρεμβολές και φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης. [12, 13].

- **Bluetooth Low Energy (BLE):** Το BLE είναι μια παραλλαγή του κλασικού Bluetooth με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε εφαρμογές εντοπισμού εγγύτητας μέσω μικρών πομπών (beacons). Όπως και στο Wi-Fi έτσι και στο BLE οι εκτιμήσεις απόστασης-θέσης βασίζονται κυρίως σε μετρήσεις RSSI. Η τεχνολογία BLE προσφέρει καλύτερη ακρίβεια από το Wi-Fi της τάξεως μεταξύ 1 και 5 μέτρων παρόλα αυτά όμως εξακολουθεί να επηρεάζεται από περιβαλλοντικές συνθήκες εκτός του ανθρώπινου ελέγχου. Νεότερες εκδόσεις προτύπων του BLE υποστηρίζουν τεχνικές Angle of Arrival (AoA) οι οποίες βελτιώνουν σημαντικά την ακρίβεια αλλά αυξάνουν δραματικά την πολυπλοκότητα του συστήματος όπου εφαρμόζονται. [2].
- **Radio-Frequency Identification (RFID):** Η τεχνολογία RFID αξιοποιεί ραδιοκύματα για την αναγνώριση αντικειμένων και την απόσταση αυτών. Στα ενεργά RFID συστήματα όπου οι ετικέτες (tags) διαθέτουν δική τους τροφοδοσία γίνεται δυνατή η εφαρμογή μεθόδων εντοπισμού θέσης. Παρόλα αυτά η ακρίβεια είναι περιορισμένη και συνήθως κατάλληλη για συστήματα ζωνών (zone-based positioning), όπου ενδιαφέρει η αναγνώριση παρουσίας σε μία περιοχή και όχι η ακριβής χαρτογράφηση της κίνησης. [9].

Σε αντίθεση με τις παραπάνω τεχνολογίες που βασίζονται κατά κύριο λόγο στην μέτρηση ισχύος του σήματος η τεχνολογία UWB χρησιμοποιεί μια πολύ διαφορετική προσέγγιση και αυτό της επιτρέπει να επιτυγχάνει σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια.

### 3.2 Ultra-Wideband (UWB)

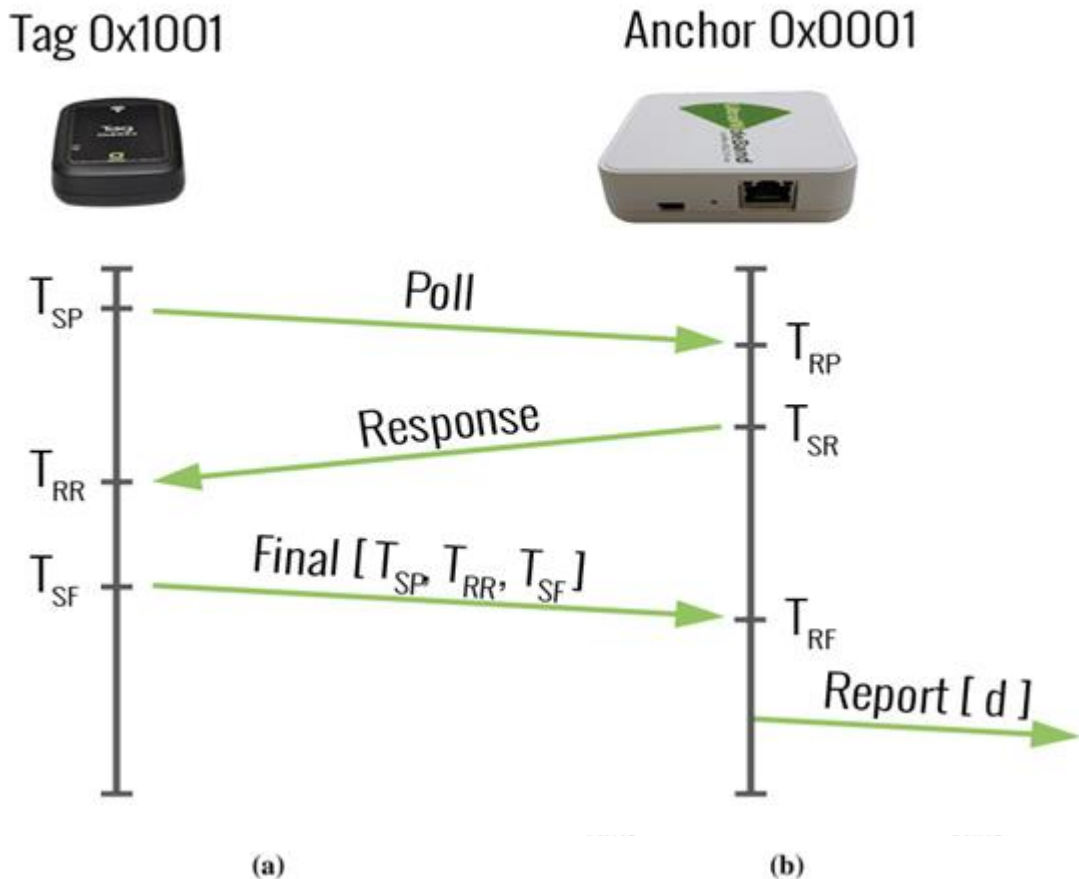
Η τεχνολογία Ultra-Wideband είναι ραδιοτεχνολογική προσέγγιση που δεν στηρίζεται στη μετάδοση πληροφορίας μέσω διαμόρφωσης ενός ημιτονοειδούς κύματος αλλά αντίθετα, λειτουργεί με την εκπομπή εξαιρετικά σύντομων παλμών ενέργειας διάρκειας μερικών νανοδευτερολέπτων οι οποίοι καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων (εύρος ζώνης μεγαλύτερο των 500 MHz) [8]. Η θεμελιώδης αυτή διαφοροποίηση από τις άλλες τεχνολογίες προσδίδει στην UWB τεχνολογία μοναδικά χαρακτηριστικά καθιστώντας τη ιδανική επιλογή για εφαρμογές εντοπισμού θέσης υψηλής ακρίβειας.

#### 3.2.1 Αρχή λειτουργίας και τεχνικές μέτρησης απόστασης

Η εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια της τεχνολογίας UWB οφείλεται στην ικανότητά της να υπολογίζει αποστάσεις με βάση τον ToF των παλμών που εκπέμπονται. Έτσι το ηλεκτρομαγνητικό σήμα μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός ( $c$ ) και εάν είναι γνωστός ο χρόνος ( $t$ ) που απαιτείται για να καλυφθεί η απόσταση από τον πομπό (tag) έως τον δέκτη (anchor), τότε η απόσταση ( $d$ ) μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια μέσω της Σχέσης (1).

$$d = c \cdot t(1)$$

Παρόλα αυτά ένα απλό σύστημα που βασίζεται αποκλειστικά στη μέτρηση ToF απαιτεί άψογο συγχρονισμό ρολογιών μεταξύ πομπού και δέκτη κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο έως αδύνατο να επιτευχθεί σε συσκευές χαμηλού κόστους. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα UWB υιοθετούν μια τεχνική γνωστή ως Αμφίδρομη Μέτρηση Εύρους (Two-Way Ranging – TWR) η οποία εξαλείφει την



Σχήμα 8: Διαδικασία αμφίδρομης μέτρησης απόστασης (Two - way ranging) [40]

ανάγκη για απόλυτο συγχρονισμό των δύο, Αμφίδρομη Μέτρηση Εύρους Διπλής Όψης (Double-Sided Two-Way Ranging-DS-TWR).

Στην απλούστερη μορφή της η διαδικασία του TWR βασίζεται στην ανταλλαγή τριών μηνυμάτων. Το tag (παίκτης) ξεκινά τη διαδικασία στέλνοντας ένα μήνυμα τύπου Poll προς το anchor και καταγράφει τη χρονική στιγμή αποστολής  $T_{sp}$ . Έπειτα από αυτό το ξεκίνημα το anchor λαμβάνει το Poll που έστειλε το tag και στην συνέχεια μετά από μια γνωστή και σταθερή καθυστέρηση επεξεργασίας του μηνύματος ( $T_{procA}$ ) αποστέλλει πίσω ένα μήνυμα Response καταγράφοντας τους χρόνους λήψης  $T_{rp}$  και αποστολής  $T_{sr}$  ταυτόχρονα (Σχήμα 8).

Ακολούθως το tag λαμβάνει με την σειρά του το Response και σημειώνει και αυτό τον χρόνο λήψης του μηνύματος  $T_{rr}$ . Ύστερα το tag έχοντας πλέον καταγράψει όλες τις διαθέσιμες και απαιτούμενες χρονικές στιγμές, μπορεί να υπολογίσει τον χρόνο πτήσης χωρίς να απαιτείται συγχρονισμός ρολογιών με το anchor. Ο συνολικός χρόνος που μεσολαβεί από την αποστολή του πρώτου μηνύματος Poll έως τη λήψη του Response ( $T_{round}$ ) υπολογίζεται ως (Σχέση 2)

$$T_{round} = T_{rr} - T_{sp} \quad (2)$$

Αντίστοιχα, ο χρόνος που το anchor χρειάστηκε πριν αποστείλει την απάντηση στο tag ( $T_{reply}$ ) δίνεται από (Σχέση 3):

$$T_{reply} = T_{sr} - T_{rp} \quad (3)$$

Τέλος ο ToF του σήματος, δηλαδή από την στιγμή που το tag στείλει ένα μήνυμα έως ότου το anchor το ληφθεί προκύπτει λαμβάνοντας το μισό του συνολικού χρόνου ταξιδιού, αφαιρώντας την καθυστέρηση που οφείλεται στην επεξεργασία του anchor (Σχέση 4):

$$ToF = \frac{2T_{round}-T_{reply}}{2} = \frac{2(T_{rr}-T_{sp})-(T_{sr}-T_{rp})}{2}.(4)$$

Με τον παραπάνω τρόπο επιτυγχάνεται η εξουδετέρωση των σφαλμάτων που προέρχονται από πιθανές αποκλίσεις των ρολογιών των δύο συσκευών επιτρέποντας τον υπολογισμό της απόστασης με πολύ μεγάλη ακρίβεια [9](Σχήμα 5).

### 3.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η τεχνολογία UWB διακρίνεται με πάρα πολλά πλεονεκτήματα και προσδίδει λύσεις σε προβλήματα που δεν έχουν λύση με την χρήση προηγούμενων τεχνολογιών. Παρόλα αυτά καμία τεχνολογία δεν είναι τέλεια και αναγκαστικά γίνονται κάποιες παραχωρήσεις. Γι' αυτό και είναι κρίσιμη η σωστή επιλογή της τεχνολογίας ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε.

Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας UWB σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση της απόστασης και κατά συνέπεια ο υπολογισμός της θέσης. Η UWB τεχνολογία κάνει χρήση της τεχνικής του ToF όπου επιτρέπει τον άμεσο και γρήγορο υπολογισμό του χρόνου μετάδοσης του σήματος από τον πομπό στον δέκτη άρα μπορεί να υπολογίσει την μεταξύ τους απόσταση με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Στην πραγματικότητα με την προσέγγιση αυτή γίνεται δυνατή η εντόπιση αντικειμένων όσο και ανθρώπων με σφάλμα της τάξης των 10 έως 30 εκατοστών. Με λίγα λόγια η UWB τεχνολογία παρέχει ακρίβεια πολύ ανώτερη από άλλες τεχνολογίες που βασίζονται στην ένταση του σήματος για τον εντοπισμό της θέσης RSSI.[9, 10].

Επιπλέον ένα βασικό και καθοριστικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας UWB είναι η αυξημένη της αντοχή στο φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Αυτό προκαλείται έντονα κυρίως σε κλειστούς χώρους ή σε ημι-κλειστούς και προκαλεί αλλοίωση των δεδομένων. Η ανθεκτικότητα αυτή δημιουργείται γιατί η τεχνολογία UWB χρησιμοποιεί εξαιρετικά σύντομους παλμούς και στον δέκτη είναι πολύ εύκολη η διάκριση μεταξύ των παλμών που προήλθαν από ένα απευθείας σήμα (Line-of-Sight) σε σχέση με τα ανακυκλωμένα σήματα που φτάνουν πάντα με μια μικρή χρονική καθυστέρηση[9]. Έτσι μειώνεται δραματικά η επίδραση που έχουν τα ανακλώμενα σήματα είτε από τοίχους είτε από το δάπεδο ή από άλλα λοιπά εμπόδια κάτι που είναι πολύ σύνηθες με άλλες τεχνολογίες που κάνουν χρήση την ένταση του σήματος για τον υπολογισμό της θέσης [9].

Παράλληλα η τεχνολογία UWB παρέχει και μια ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο. Με τον όρο αυτό εννοούμε ότι επειδή κάνει χρήση πολύ χαμηλής ισχύος σήματα και ταυτόχρονα δημιουργεί μια ευρεία κατανομή του σήματος στο φάσμα των συχνοτήτων, τα σήματα αυτά είναι εξαιρετικά δύσκολο να ανιχνευτούν πράγμα που τα καθιστά πολύ πιο δύσκολα στο να υποκλαπούν ή να ληφθούν από μη εξουσιοδοτημένους δέκτες. Εκτός από το προφανές πλεονέκτημα στην ασφάλεια των δεδομένων ταυτόχρονα προσδίδει μια επιπλέον αντοχή σε παρεμβολές από άλλα ασύρματα συστήματα καθιστώντας την τεχνολογία ακόμα πιο αξιόπιστη σε περιβάλλον με πολλές ταυτόχρονες εκπομπές ασύρματων σημάτων[9].

Παρόλα αυτά παρά τα πολύ μεγάλα και σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας UWB συνοδεύεται και από κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι άξια αναφοράς καθώς μπορεί να είναι καθοριστικά για την επιλογή ή και μη της τεχνολογίας ανάλογα με την εφαρμογή.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της τεχνολογίας εύρεσης θέσης με την τεχνική ToF που κάνουν χρήση οι UWB αισθητήρες είναι η εμβέλεια τους. Η τυπική εμβέλεια ενός αισθητήρα UWB κυμαίνεται μεταξύ των 30-50 μέτρων. Αυτή η απόσταση είναι αρκετή για την κάλυψη πολλών αναγκών δεν παύει όμως να είναι αισθητά μικρότερη από το Wi-Fi το οποίο μπορεί να καλύψει πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Επίσης ένα εξίσου μεγάλο μειονέκτημα είναι και το κόστος των UWB αισθητήρων. Το κόστος αυτό είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με συστήματα που κάνουν χρήση της τεχνολογίας Wi-Fi ή Bluetooth. Αυτή η διαφορά στο κόστος μπορεί να παίζει καταλυτικό ρόλο στον ρυθμό υιοθεσίας της τεχνολογίας τόσο σε εφαρμογές μικρής αλλά κυρίως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Όμως η σταδιακή διάθεση τέτοιων αισθητήρων UWB τόσο στην καταναλωτική όσο και στην επαγγελματική αγορά ωθεί τις τιμές ολοένα και πιο κάτω[9].

### 3.3 Αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης

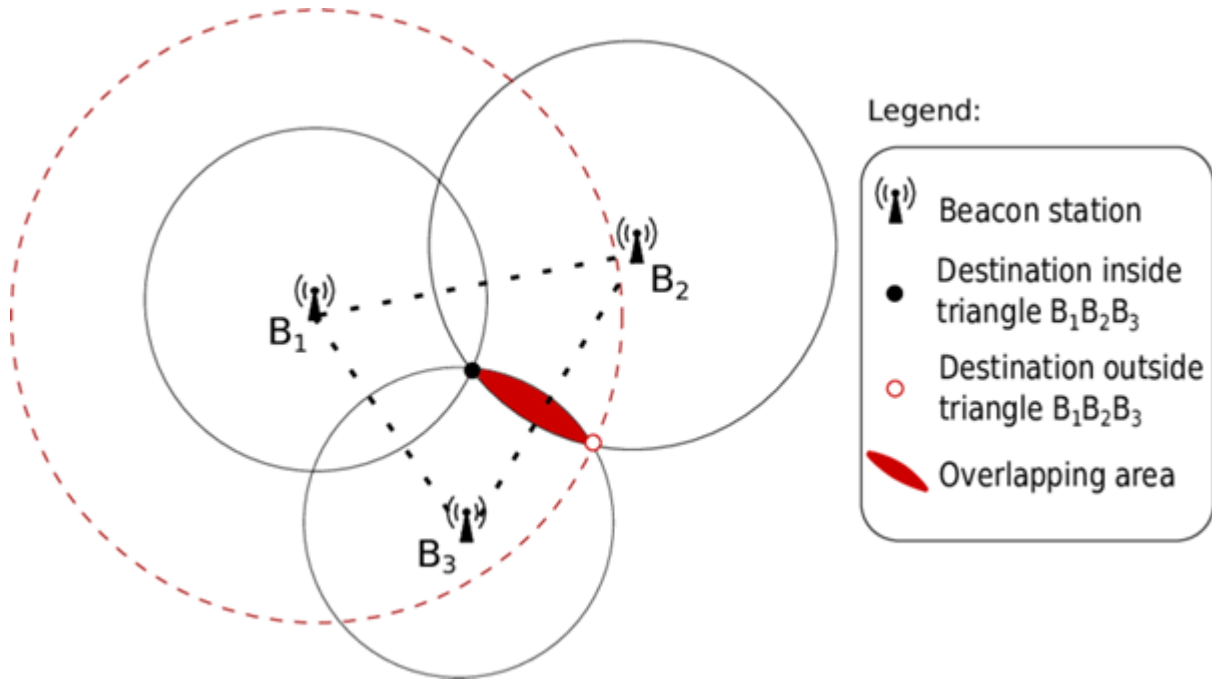
Ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ του tag και του anchor είτε αυτό είναι ένα είτε αυτά είναι πολλά παραμένει ένα από τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος εντοπισμού θέσης. Όμως η πληροφορία αυτή δεν επαρκεί για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την πραγματική θέση του αντικειμένου μέσα στον χώρο. Οι αποστάσεις που συλλέγουμε σαν δεδομένα στην συνέχεια πρέπει να επεξεργαστούν και να μετατραπούν σε συντεταγμένες. Εξαιτίας αυτού μετά την συλλογή των αποστάσεων από τα anchors πρέπει να εφαρμοστεί ένας αλγόριθμος γεωμετρικής επίλυσης ο οποίος μπορεί και συνδυάζει όλα τα δεδομένα και υπολογίζει την τελική θέση του tag μέσα στον χώρο.

Για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων είναι συχνό να χρησιμοποιείται τεχνικές πολυπλευρομέτρησης. Πιο απλά η πολυπλευρομέτρηση κάνει χρήση της τοποθεσίας του tag και τριών anchors των οποίων οι θέσεις είναι γνωστές. Τα anchors αυτά σχηματίζουν κύκλους όπου η ακτίνα του κύκλου είναι ίση με την μετρούμενη απόσταση του κάθε anchor από το tag. Ένα tag μπορεί να χαρακτηριστεί ως τέλεια τοποθετημένο όταν βρίσκεται στην θέση όπου όλοι οι κύκλοι τέμνονται. Σε περιπτώσεις όπου τα anchors είναι παραπάνω από 3 τότε γίνεται χρήση μια πιο γενικής μορφή αυτής της μεθόδου γνωστή ως πολυπλευρομέτρηση (Multilateration)[23].

#### 3.3.1 Η αρχή της πολυπλευρομέτρησης

Σε ένα δισδιάστατο επίπεδο, η γνώση της απόστασης  $d_1$  από ένα anchor  $A_1(x_1, y_1)$

περιορίζει τη δυνητική θέση του άγνωστου σημείου  $T(x, y)$  πάνω σε έναν κύκλο με κέντρο το  $A_1$  και ακτίνα  $d_1$ . Αν πάρουμε και μία δεύτερη μέτρηση  $d_2$  από το anchor  $A_2(x_2, y_2)$  τότε η θέση του tag περιορίζεται στα σημεία τομής των δύο κύκλων. Έτσι με την προσθήκη μίας τρίτης μέτρησης  $d_3$  από το anchor  $A_3(x_3, y_3)$  μπορούμε να καθορίσουμε μονοσήμαντα το σημείο όπου τέμνονται και οι τρεις κύκλοι. (Σχήμα 9)



Σχήμα 9: Γεωμετρική απεικόνιση πολυπλευρομέτρησης και περιοχής αβεβαιότητας [41]

Αυτό αντιστοιχεί στο ακόλουθο σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων, που προκύπτει από το Πυθαγόρειο θεώρημα (Σχέση 5):

$$\{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 (5)$$

### 3.3.2 Γραμμικοποίηση και επίλυση με ελάχιστα τετράγωνα

Η απευθείας επίλυση του παραπάνω συστήματος είναι υπολογιστικά αρκετά απαιτητική. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιούμε μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική και είναι αυτή που εφαρμόζεται στον κώδικα της παρούσας εργασίας. Αυτή είναι η μετατροπή του σε γραμμικό σύστημα της μορφής  $Ax = b$ .

Αυτό επιτυγχάνεται αναπτύσσοντας τους όρους και αφαιρώντας μία εξίσωση (συνήθως την τρίτη) από τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, αφαιρώντας την τρίτη εξίσωση από την πρώτη (Σχέση 6):

$$(x - x_1)^2 - (x - x_3)^2 + (y - y_1)^2 - (y - y_3)^2 = d_1^2 - d_3^2 (6)$$

Αναπτύσσοντας τους τετραγωνικούς όρους και απλοποιώντας τα  $x^2$  και  $y^2$ , προκύπτει αυτή γραμμική εξίσωση (Σχέση 9):

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) (7)$$

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, σχηματίζεται ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα από τρία anchors όπως στην παρούσα εργασία όπου υπάρχουν τέσσερα το σύστημα γίνεται υπερκαθορισμένο. Επιπλέον, λόγω θορύβου στις μετρήσεις  $d_i$ , οι κύκλοι δεν τέμνονται ακριβώς σε ένα σημείο.

Σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμόζεται η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares) η οποία υπολογίζει τις συντεταγμένες  $(x, y)$  που ελαχιστοποιούν το συνολικό σφάλμα. Η μέθοδος αυτή είναι

ιδιαίτερα ανθεκτική στον θόρυβο και παρέχει βέλτιστη εκτίμηση της θέσης του tag [12]. Η συνάρτηση `numpy.linalg.lstsq` που χρησιμοποιείται στον κώδικα υλοποιεί ακριβώς αυτή τη διαδικασία.

#### 3.4 Πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT

Για να μπορέσουμε να μεταφέρουμε τα δεδομένα που παρήγαγαν οι προσομοιωμένοι αισθητήρες και να τα μεταφέρουμε στον κεντρικό εξυπηρετητή του συστήματος μας θα πρέπει να επιλέξουμε ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας να μπορεί να συνδυάζει την αποδοτικότητα μαζί με την αξιοπιστία και την χαμηλή απαίτηση σε επεξεργαστική δύναμη. Το MQTT πρωτόκολλο έχει επιλεγεί για τον ρόλο αυτό καθώς πληροί όλα τα κριτήρια που θέλουμε από το πρωτόκολλο επικοινωνίας μας. Το πρωτόκολλο αυτό έχει σχεδιαστεί (για IoT) εφαρμογές και είναι ευρέως διαδεδομένο [13].

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 το οικοσύστημα των δικτύων αισθητήρων των βιομηχανικών εγκαταστάσεων βασιζόταν σε υποδομές που συχνά χαρακτηρίζονταν από περιορισμένο εύρος ζώνης, υψηλή καθυστέρηση και ασταθή συνδεσιμότητα, ειδικά όταν ο τερματικός εξοπλισμός βρισκόταν σε απομακρυσμένες περιοχές και η μετάδοση γινόταν μέσω ακριβών δορυφορικών συσκευών. Σε αυτό το περιβάλλον οι κλασικές προσεγγίσεις ανταλλαγής μηνυμάτων δεν ήταν πάντοτε κατάλληλες, είτε επειδή είχαν αυξημένο overhead είτε επειδή προϋπέθεταν ισχυρότερες υπολογιστικές μονάδες και σταθερότερες συνδέσεις. Η ανάγκη, επομένως, ήταν η ανάπτυξη ενός μηχανισμού-πρωτοκόλλου ανταλλαγής δεδομένων που να μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά με ελάχιστες απαιτήσεις πόρων, χωρίς να “σπαταλά” εύρος ζώνης και ενέργεια σε συσκευές που συνήθως τροφοδοτούνται από μπαταρία ή βρίσκονται σε περιβάλλοντα όπου η συντήρηση είναι δύσκολη. Αυτή ακριβώς η πρακτική ανάγκη αποτελεί το ιστορικό υπόβαθρο που εξηγεί γιατί το MQTT σχεδιάστηκε εξ αρχής ως ένα ελαφρύ (lightweight) πρωτόκολλο μεταφοράς μηνυμάτων σε μοντέλο client-server publish/subscribe, με στόχο να ταιριάζει σε περιορισμένα (constrained) συστήματα και δίκτυα όπου το bandwidth είναι πολύτιμο. [13], [26]

Η πρώτη εκδοχή του MQTT αποδίδεται ιστορικά στους Andy Stanford-Clark (IBM) και Arlen Nipper (τότε στην Argcom) το 1999, στο πλαίσιο βιομηχανικών εφαρμογών παρακολούθησης (telemetry) και συγκεκριμένα σε σενάρια όπως η επιτήρηση αγωγών πετρελαίου, όπου οι τερματικές μονάδες έπρεπε να επικοινωνούν αξιόπιστα μέσω δορυφορικών συνδέσεων με υψηλό κόστος ανά μεταδιδόμενο byte πληροφορίας. Η φιλοσοφία που περιγράφεται σε σχετικές πηγές της IBM συνοψίζεται στη μείωση του απαιτούμενου bandwidth και των πόρων της συσκευής, διατηρώντας παράλληλα έναν βασικό βαθμό αξιοπιστίας παράδοσης, κάτι που αποτυπώνεται στη μετέπειτα τυποποίηση των μηχανισμών QoS και της διαχείρισης συνεδρίας (session state). Με άλλα λόγια, το MQTT δεν προέκυψε ως “ακαδημαϊκή” επιλογή, αλλά ως πρωτόκολλο με σαφή προσανατολισμό σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες, όπου η αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητα σε προβληματικές συνδέσεις δεν είναι προαιρετικές αλλά προϋπόθεση λειτουργίας. [27]

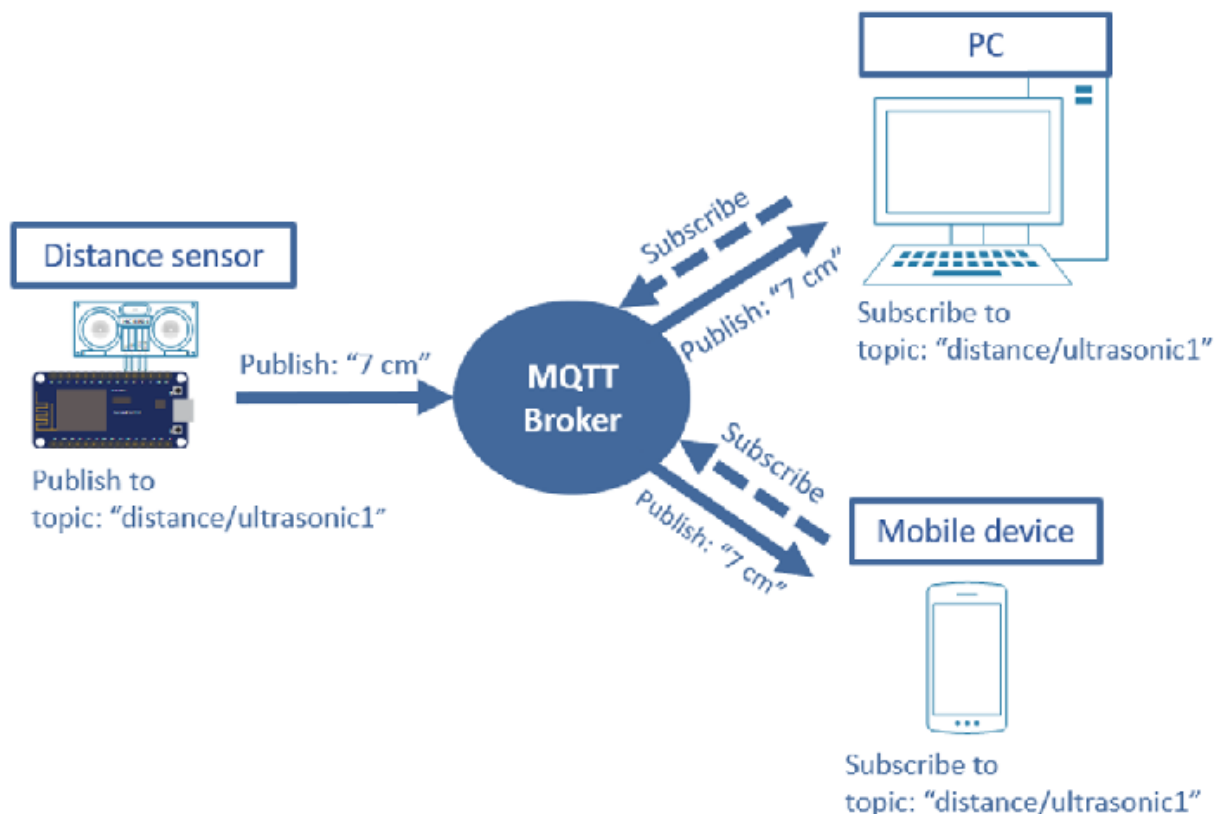
Καθώς η υιοθέτηση του MQTT διευρυνόταν, η ανάγκη για κοινά αποδεκτή και ανοικτή προδιαγραφή οδήγησε στη διαδικασία τυποποίησης μέσω του OASIS, με κρίσιμο ορόσημο τη δημοσίευση και έγκριση της προδιαγραφής MQTT Version 3.1.1 (Committee Specification to 2014 και OASIS Standard το ίδιο έτος). [13], Στη συνέχεια, η ίδια έκδοση απέκτησε και διεθνή τυποποίηση μέσω του ISO/IEC 20922:2016, όπου το MQTT περιγράφεται ρητά ως ελαφρύ, ανοικτό και απλό publish/subscribe πρωτόκολλο μεταφοράς μηνυμάτων κατάλληλο για M2M/IoT και περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων. [28] Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στη σύγχρονη βιβλιογραφία και τεκμηρίωση συχνά αναφέρεται πως το “MQTT” δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως ακρωνύμιο με υποχρεωτική ανάπτυξη των γραμμάτων, αλλά ως καθιερωμένη ονομασία πρωτοκόλλου, καθώς η τεχνολογική του ταυτότητα υπερβαίνει το

αρχικό ιστορικό πλαίσιο στο οποίο δημιουργήθηκε. [29] Αυτό το ιστορικό πέρασμα από μια εξειδικευμένη λύση τηλεμετρίας σε ένα διεθνώς τυποποιημένο πρωτόκολλο εξηγεί γιατί το MQTT θεωρείται σήμερα ασφαλής και ώριμη επιλογή για αρχιτεκτονικές IoT, αλλά και γιατί ενδείκνυται για το παρόν σύστημα, όπου ζητούμενο είναι η μεταφορά δεδομένων αισθητήρων με χαμηλό overhead και σαφείς εγγυήσεις παράδοσης.

### 3.4.1 Αρχιτεκτονική Publish/Subscribe

Εν αντιθέσει με το παραδοσιακό μοντέλο client-server στο οποίο ο πελάτης είναι αναγκασμένος να αποστείλει ένα ρητό αίτημα στον Server ώστε να λάβει κάποια δεδομένα, το MQTT έχει υιοθετήσει ένα άλλο μοντέλο το publish-subscribe. Στο μοντέλο αυτό η διαδικασία επικοινωνίας είναι διαφορετική. Δεν υπάρχει επικοινωνία άμεσα αλλά στην ουσία μεσολαβεί ένας κεντρικός διαχειριστής μηνυμάτων που ονομάζεται Broker. [13] (Σχήμα 10)

Ο Broker λειτουργεί σαν ένα κεντρικό σημείο συλλογής αλλά και αναδιάρθρωσης των πακέτων πληροφορίας έτσι η αρχιτεκτονική του συστήματος αποκτά μία πιο απλή μορφή: Όταν μια συσκευή δημοσιεύει δεδομένα χαρακτηρίζεται ως Publisher και δεν απαιτείται να γνωρίζει τον τελικό παραλήπτη. Αντίστοιχα, οι συσκευές που θα λάβουν τα δεδομένα, οι Subscribers, δεν χρειάζεται να γνωρίζουν την πηγή προέλευσης των δεδομένων.



Σχήμα 10: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής MQTT publish/subscribe [42]

Στο παρόν σύστημα τον ρόλο του Publisher το έχει αναλάβει η προσομοίωση των tags, αποστέλλοντας συνεχώς τις μετρήσεις των αποστάσεων. Ομοίως τον κεντρικό ρόλο του subscriber έχει αναλάβει ο κεντρικός εξυπηρετητής εντοπισμού (**rtls\_server**) καθώς θα είναι αυτός ο οποίος θα λαμβάνει τα δεδομένα από τα tags και είναι υπεύθυνος για την περαιτέρω επεξεργασία και υπολογισμό της θέσης του κάθε tag.

### 3.4.2 Γιατί επιλέχθηκε το MQTT;

Η επιλογή του MQTT οφείλεται σε μια σειρά χαρακτηριστικών που το καθιστούν ιδανικό για το RTLS της εργασίας:

- **Ελαφρύ και αποδοτικό:** Η επικεφαλίδα των MQTT πακέτων είναι εξαιρετικά μικρή (μόλις 2 bytes), γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για συχνές και μικρού μεγέθους μεταδόσεις, όπως οι μετρήσεις απόστασης [13].
- **Αποσύνδεση συσκευών:** Οι publishers και οι subscribers δεν χρειάζεται να γνωρίζουν μεταξύ τους IP ή άλλα στοιχεία· αρκεί η γνώση της διεύθυνσης του Broker, απλοποιώντας την αρχιτεκτονική και διευκολύνοντας την προσθήκη ή αφαίρεση συσκευών.
- **Επικοινωνία ένας-προς-πολλούς:** Ένα μήνυμα που δημοσιεύεται σε ένα topic μπορεί να ληφθεί ταυτόχρονα από πολλούς subscribers, χαρακτηριστικό χρήσιμο για μελλοντικές επεκτάσεις, όπως επιπλέον συστήματα καταγραφής δεδομένων.
- **Αξιοπιστία:** Το MQTT υποστηρίζει τρία επίπεδα Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS), επιτρέποντας την επιλογή του κατάλληλου βαθμού αξιοπιστίας ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Συνολικά, τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το MQTT μια εξαιρετικά κατάλληλη επιλογή για τον ρόλο του κεντρικού μηχανισμού επικοινωνίας στο RTLS, προσφέροντας ταχύτητα, ευελιξία και υψηλό επίπεδο σταθερότητας.

### 3.5 Θεωρητική θεμελίωση: Least Squares, γεωμετρικές συνθήκες και συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών εντοπισμού

Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων Εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTLS) καθορίζονται από δύο μετρικές οι οποίες αποτελούν και βασικούς παράγοντες για την λειτουργία τους και μάλιστα είναι και αλληλεξαρτώμενοι. Ο πρώτος εξ αυτών των παραγόντων αφορά την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της απόστασης και τον τρόπο με τον οποίο η πληροφορία αυτή θα μεταδίδεται μέσω ασυρμάτου σήματος μέσα στον χρόνο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με τον αλγόριθμο που θα εκτιμά την θέση. Ο αλγόριθμος αυτός θα λαμβάνει σαν είσοδο τα δεδομένα αυτά και θα τα μετασχηματίζει σε χωρικές συντεταγμένες με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων.

Η τεχνολογία μέτρησης της απόστασης που θα επιλεγεί θα καθορίσει και πολλά χαρακτηριστικά του συστήματος όπως αυτά της αξιοπιστίας των δεδομένων που θα παραχθούν, της σταθερότητας αλλά και της ακρίβειας. Σωστή επιλογή της τεχνολογίας αυτής είναι πολύ κρίσιμη καθώς εάν πλήθος παραγόντων μπορούν να ελαττώσουν την ποιότητα των δεδομένων. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι ο χρονισμός της μετάδοσης, το εύρος ζώνης του σήματος καθώς και η ανθεκτικότητα του σήματος σε παρεμβολές κάθε είδους.

Ταυτόχρονα η επιλογή του αλγορίθμου για την εκτίμηση της θέσης είναι αυτός ο οποίος θα παίζει καθοριστικό ρόλο στην συνολική απόδοση του συστήματος καθώς θα είναι υπεύθυνος για την σύνθεση και ερμηνεία των δεδομένων. Με την χρήση τεχνικών πολυπλευρομέτρησης, αποστάσεις από πολλαπλά σημεία αναφοράς (anchors) μπορούν να συμπτυχθούν ώστε να προκύψει η εκτιμωμένη τελική θέση. Η ακρίβεια της θέσης αυτής εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα του αλγορίθμου να αντιμετωπίζει θόρυβο ασυνεπής στα δεδομένα, χαρακτηριστικά που είναι αναπόφευκτα.

### 3.5.1 Προχωρημένη ανάλυση της μεθόδου Least Squares σε εφαρμογές RTLS

Η πολυπλευρομέτρηση βασίζεται στη γεωμετρική αρχή ότι κάθε μέτρηση της απόστασης από ένα anchor αντιστοιχεί σε έναν κύκλο στο επίπεδο. Στην ιδανική περίπτωση θα υπάρχουν 3 anchors και η τομή τριών τέτοιων κύκλων θα οδηγούσε σε ένα μοναδικό σημείο, το οποίο αντιπροσωπεύει τη θέση του tag. Στην πραγματικότητα όμως οι μετρήσεις μπορούν να επηρεαστούν από τον θόρυβο που δημιουργείτε από άλλες πηγές σημάτων, την επιλογή γεωμετρίας των anchors, τα φαινόμενα μη-οπτικής επαφής (NLOS) και μικροδιαφορές στη συσκευή. Επομένως, οι κύκλοι δεν τέμνονται σε ένα σημείο, αλλά σε μία περιοχή στον χώρο. Το πρόβλημα τότε μετατρέπεται σε ένα ζήτημα βελτιστοποίησης της κατάστασης. Έτσι ξεκινά μία αναζήτηση του σημείου εκείνου στο επίπεδο που ελαχιστοποιεί τη συνολική απόκλιση από όλες τις εξισώσεις απόστασης [12].

Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares) προσφέρει μια κομψή λύση. Το ζητούμενο σημείο  $(x, y)$  υπολογίζεται ώστε να ελαχιστοποιεί το μέγεθος:

Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares) προσφέρει μια κομψή λύση. Το ζητούμενο σημείο  $(x, y)$  υπολογίζεται ώστε να ελαχιστοποιεί το μέγεθος (Σχέση 8):

$$E = \sum_{i=1}^N \left( \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \right)^2 \quad (8)$$

Η συνάρτηση αυτή δεν είναι γραμμική. Για τον λόγο αυτό γίνεται γραμμικοποίηση μέσω αφαίρεσης των εξισώσεων ενός anchor αναφοράς από τις υπόλοιπες, ώστε να εξαλειφθούν οι τετραγωνικοί όροι. Η διαδικασία οδηγεί στο γραμμικό σύστημα  $Ax=b$ , το οποίο μπορεί να επιλυθεί αποδοτικά με τη συνάρτηση NumPy linalg.lstsq, όπως υλοποιείται στον κώδικα της εργασίας.

Η μέθοδος Least Squares θεωρείται ο εκτιμητής μέγιστης πιθανοφάνειας (MLE) όταν ο θόρυβος των μετρήσεων είναι Γκαουσιανός [12]. Αυτό σημαίνει ότι, υπό ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης σε UWB συστήματα η εκτίμηση θέσης που παράγεται είναι η στατιστικά η βέλτιστη. Η μέθοδος προσφέρει επίσης αυξημένη ανθεκτικότητα σε μεμονωμένες λανθασμένες μετρήσεις αξιοποιώντας τον πλεονασμό των anchors, κάτι το οποίο μειώνει τη Γεωμετρική Απομείωση της Ακρίβειας (GDOP).

Σε περιπτώσεις έντονου θορύβου, συχνά χρησιμοποιείται μια παραλλαγή γνωστή ως σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα (Weighted Least Squares-WLS), όπου κάθε μέτρηση αποκτά ένα βάρος που αντιστοιχεί στην αξιοπιστία της. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να ενσωματωθεί μελλοντικά στη φυσική υλοποίηση του συστήματος.

### 3.5.2 Γεωμετρική επίδραση (GDOP) και επιπτώσεις στη συνολική ακρίβεια

Το GDOP είναι ένας μαθηματικός δείκτης που περιγράφει την ποσοτική αποτίμηση της γεωμετρικής ποιότητας της διάταξης των anchors. Απλούστερα ο μαθηματικός όρος αυτός μας δείχνει το πόσο “καλή” ή “κακή” είναι η γεωμετρία των anchors ως προς την χωρική τους διάταξη. Όταν τα anchors βρίσκονται τοποθετημένα σε μικρή γωνιακή απόσταση μεταξύ τους ή σε διάταξη σχεδόν ευθύγραμμη το ένα από το άλλο τότε ακόμα και μικρές αποκλίσεις στις μετρήσεις οδηγούν σε μεγάλα σφάλματα στην εκτίμηση θέσης [6].

Αντίθετα όταν τα anchors είναι τοποθετημένα στον χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλο τον χώρο στο οποίο μας ενδιαφέρει να λειτουργήσει το σύστημα. Η γεωμετρική πληροφορία που παρέχεται στον αλγόριθμο είναι πολύ πλουσιότερη και καλύτερα κατανοητή. Έτσι αυτή η διάταξη οδηγεί σε χαμηλό δείκτη GDOP και κατά συνέπεια σε υψηλή ακρίβεια εντοπισμού. Η ομοιόμορφη κατανομή των anchors μέσα στον χώρο μπορεί να μειώσει την ευαισθησία του συστήματος σε μεμονωμένα σφάλματα μέτρησης.

### 3.5.3 Συγκριτική αξιολόγηση UWB – BLE – Wi-Fi σε εσωτερικά περιβάλλοντα

Ο εντοπισμός θέσης σε εσωτερικούς χώρους έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για δεκαετίες, με τις τεχνολογίες BLE και Wi-Fi να χρησιμοποιούνται συχνά χάρη στο χαμηλό κόστος και την ευρεία διαθεσιμότητά τους. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, καμία από τις δύο δεν πληροί τις απαιτήσεις ενός συστήματος υψηλής ακρίβειας, όπως αυτό που απαιτείται για το ποδόσφαιρο τυφλών.

Category	UWB	Bluetooth® Low Energy Direction Finding	Bluetooth® Low Energy RSSI	Bluetooth® Low Energy Channel Sounding
Ranging Method	ToF/AoA	AoA/AoD	RSSI	PBR/RTT
Ranging Measurement	Distance & Direction	Distance & Direction	Distance Only	Distance Only
Accuracy	< 10 cm	1-5 m	1-5 m	< 1 m (PBR) 1-5 m (RTT)
Range <sup>1</sup>	50 m typical	20 m typical	20 m typical	20 m typical (PBR) > 30 m typical (RTT)
Data Rate	Up to 27 Mbps	Up to 2 Mbps	Up to 2 Mbps	Up to 2 Mbps
Latency	1 ms typical	20 ms typical	20 ms typical	100 ms typical
Reliability	Strong immunity to multi-path and interference	Very sensitive to multi-path and interference	Very sensitive to multi-path and interference	Sensitive to multi-path and interference
Security	Very secure	Not secure, can be spoofed using relay attacks	Not secure, can be spoofed using relay attacks	Secure; anti-spoofing features included
Scalability	1,000's of tags to unlimited based on positioning scheme	1,000's of tags	1,000's of tags	Device to device, with potential to scale to 10's of tags

<sup>1</sup>Multiple factors impact range. For UWB, assumes line-of-sight, channel 5 (6.5 GHz) operation, 6.8 Mbps data rate, good antenna. For Bluetooth® Low Energy, assumes line-of-sight 1 Mbps data rate.

QORVO

© 2024 Qorvo US, Inc.

Σχήμα 11: Ποιοτική και ποσοτική σύγκριση UWB και τεχνολογιών BLE [43]

#### BLE (Bluetooth Low Energy)

Η Bluetooth Low Energy τεχνολογία χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς το χαμηλό κόστος της και η μεγάλη υποστήριξή της από εμπορικές συσκευές συμβάλουν στην εδραίωσή της. Στα περισσότερα συστήματα εντοπισμού θέσης που κάνουν χρήση του BLE, η εκτίμηση της θέσης πραγματοποιείται μέσω της έντασης του λαμβανόμενου σήματος από τους δέκτες RSSI. Ωστόσο, με αυτή την προσέγγιση δημιουργούνται περιορισμοί, τους οποίους εισάγει η μέθοδος του RSSI. Ο κύριος περιορισμός είναι ότι η μέθοδος αυτή παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, ακόμα και σε πολύ μικρές μεταβολές του περιβάλλοντος. Ενδεικτικά, οι παράγοντες αυτοί που μπορούν να μεταβάλουν το περιβάλλον στο οποίο είναι οι αισθητήρες και, κατ' επέκταση, να υπάρχουν διακυμάνσεις, είναι η απορρόφηση του σήματος από το ανθρώπινο σώμα, η παρουσία μεταλλικών επιφανειών, καθώς και οι ανακλάσεις των σημάτων σε τοίχους και δάπεδα. Όλα τα παραπάνω συμβάλλουν σε ασταθείς μετρήσεις και σε σημαντικά σφάλματα εκτίμησης της απόστασης. Ακόμα και με τη χρήση κάποιων εξελιγμένων τεχνικών, όπως το AoA, μπορεί θεωρητικά να βελτιωθεί το σύστημα, ωστόσο στην πράξη η χρήση τέτοιων εξελιγμένων τεχνικών απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, ο οποίος προσθέτει κόστος και πολυπλοκότητα [1].(Σχήμα 11)

#### Wi-Fi

Η Wi-Fi τεχνολογία επίσης αποτελεί μια πολύ δημοφιλή επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν συστήματα εντοπισμού. Αυτό συμβαίνει, καθώς η τεχνολογία αυτή κάνει χρήση της ήδη υπάρχουσας υποδομής σε κτίρια και οργανισμούς. Όμως, παρά το σημαντικό αυτό πλεονέκτημα, τα συστήματα που κάνουν χρήση του Wi-Fi για τον εντοπισμό της θέσης παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα πολυδιαδρομικής μετάδοσης, κάτι που είναι εντονότερο σε εσωτερικούς χώρους. Το σήμα μπορεί να

ανακλαστεί και υπάρχει κίνδυνος για παρεμβολές από άλλα ήδη υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα, γεγονός που οδηγεί σε ασταθείς μετρήσεις και, κατά συνέπεια, σε λανθασμένα αποτελέσματα. Ακόμα και με τη χρήση πιο εξειδικευμένων προσεγγίσεων επεξεργασίας του σήματος, όπως το SpotFi, μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια μόνο όταν το περιβάλλον είναι αυστηρά ελεγχόμενο, καθώς και το δίκτυο. Τα προβλήματα αυτά, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους, δημιουργούνται καθώς η τεχνολογία Wi-Fi δεν σχεδιάστηκε εξ αρχής για αυτόν τον σκοπό[14].

### UWB (Ultra-Wideband)

Αντιθέτως με όλες τις άλλες τεχνολογίες που αναφέρθηκαν η UWB έχει σχεδιαστεί εξ αρχής για εντοπισμό ακρίβειας εκατοστών. Η μόνη μικρή επίδραση που έχει είναι από τα Multipath φαινόμενα και αυτό πραγματοποιείται χάρη στην εξαιρετικά μεγάλη εύρος ζώνης του παλμού που εκπέμπουν [12]. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει πολύ υψηλούς ρυθμούς ενημέρωσης (πάνω από 100 Hz), και ταυτόχρονα ανθεκτικότητα σε NLOS συνθήκες λόγω του ευρούς φάσματος συχνοτήτων που εκπέμπονται τα σήματα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας[12].(Σχήμα 11)

### 3.6 Φυσική ανάλυση της Διάδοσης UWB – μοντέλα ραδιοδιάδοσης

Η Ultra-Wideband τεχνολογία διαφέρει σε βάθος από τις τεχνολογίες όπου κάνουν χρήση στενότερου εύρους σήματα όπως Wi-Fi και BLE, τόσο ως προς τη μορφή του σήματος αλλά όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά διάδοσης. Η διάρκεια ζωής των παλμοί UWB είναι της τάξης των μερικών νανοδευτερολέπτων και η κάλυψη φάσματος είναι άνω των 500 MHz. Αυτή η ιδιαιτερότητα των UWB σημάτων επιτρέπει στο δέκτη να διαχωρίζει τις συνιστώσες των πολλαπλών διαδρομών, δηλαδή τις στιγμές που το ίδιο σήμα φτάνει από διαφορετικές διαδρομές λόγω ανακλάσεων [9].

Στα κλασικά μοντέλα ραδιοδιάδοσης όπως το Friis Transmission Equation υποθέτουμε πως πραγματοποιείται μια απλή γραμμική διάδοση. Όμως λόγω της υπέρ-ευρείας ζώνης μετάδοσης σημάτων στην τεχνολογία UWB, η εξίσωση αποτυπώνει με ακρίβεια το φαινόμενο της χρονικής διασποράς (delay spread). Ακόμα το μοντέλο Saleh–Valenzuela έχει εξελιχθεί ως σημείο αναφοράς για την περιγραφή πολλαπλών διαδρομών των σημάτων σε περιβάλλοντα όπου γίνεται η χρήση της UWB τεχνολογίας προτείνοντας ότι οι ανακλάσεις εμφανίζονται σε «συστάδες» (clusters) δηλαδή κάθε μία από αυτές έχει την δική της χρονική και ενεργειακή ταυτότητα [15]. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές σε εσωτερικού χώρου όπως το ποδόσφαιρο τυφλών όπου παρατηρούνται συχνές ανακλάσεις από τοίχους, πάγκους, μεταλλικές επιφάνειες ή ακόμη και από τα σώματα των παικτών.

Η δυνατότητα της UWB να εντοπίζει τη συνιστώσα της άμεσης οπτικής επαφής (Line-of-Sight – LOS), ακόμη και σε περιβάλλον ισχυρού multipath, αποτελεί τον λόγο της εξαιρετικής ακρίβειας που παρουσιάζει έναντι άλλων τεχνολογιών. Συστήματα με στενή ζώνη συχνά «μπερδεύουν» το ισχυρότερο μονοπάτι με το πρώτο και έτσι υπερεκτιμούν την απόσταση. Στην περίπτωση της UWB, η εξαιρετικά υψηλή χρονική ανάλυση επιτρέπει την απομόνωση της πρώτης άφιξης, ελαχιστοποιώντας το σφάλμα στον υπολογισμό του ToF και συνεπώς της απόστασης [9].

#### 3.6.1 Συνθήκες Μη Οπτικής Επαφής (NLOS) και Μοντέλα Διόρθωσης

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σε RTLS συστήματα είναι η παρουσία εμποδίων μεταξύ tag και anchor. Όταν το σήμα δεν μπορεί να φτάσει απευθείας στον δέκτη(anchor) αλλά περνάει μέσα από το σώμα ενός αθλητή ή χτυπά σε τοίχο, πάγκο ή οτιδήποτε άλλο πριν φτάσει στον προορισμό του τότε η καθυστέρηση που εισάγεται στο σύστημα οδηγεί σε υπερεκτίμηση της απόστασης. Το φαινόμενο

αυτό ονομάζεται Non-Line-of-Sight (NLOS) και αποτελεί κύριο παράγοντα σφάλματος συστήματα RTLS ακόμα και με την χρήση UWB τεχνολογίας.

Στη βιβλιογραφία έχουν δημιουργηθεί διάφορες κατηγορίες μοντέλων με τα οποία πραγματοποιείται η ανίχνευση και διόρθωση του φαινομένου NLOS. Τα στατιστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί βρίσκουν την συσχέτιση στα χαρακτηριστικά του σήματος όπως η διασπορά ισχύος του σήματος, το RMS delay spread και η χαρακτηριστική ασυμμετρία του παλμού με την πιθανότητα NLOS [16]. Άλλη προσέγγιση αφορά τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, όπου ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται στην αναγνώριση του NLOS φαινομένου με βάση ένα σύνολο μετρήσεων.

Ένα σύστημα εντοπισμού για να μπορεί να χαρακτηριστεί NLOS-robust είτε θα πρέπει απορρίπτει μετρήσεις που θεωρούνται ύποπτες, είτε να επιβάλλει βάρη στους αλγορίθμους εκτίμησης ώστε οι ανακριβείς τιμές να έχουν μικρότερη επίδραση στα τελικά αποτελέσματα. Η κρισιμότητα της χρήσης αυτών των μοντέλων είναι εμφανής σε περιβάλλοντα όπως το ποδόσφαιρο τυφλών όπου οι παίκτες συχνά κινούνται ο ένας μπροστά από τον άλλον ή ακόμα συγκεντρώνονται πολλοί παίκτες σε ένα σημείο διακόπτοντας με αυτό τον τρόπο στιγμιαία την οπτική επαφή με τα anchors.

### 3.6.2 Weighted και Iterative Least Squares: Βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού

Η βασική υλοποίηση του Least Squares θεωρεί ότι όλες οι μετρήσεις έχουν την ίδια αξιοπιστία. Ωστόσο, σε πραγματικά RTLS συστήματα ορισμένες από τις μετρήσεις είναι πολύ πιο ύποπτες από κάποιες άλλες. Για παράδειγμα όταν μια μέτρηση που εμφανίζει ξαφνικά πολύ μεγάλη απόκλιση από τις προηγούμενες ή που προέρχεται από anchor που γνωρίζουμε ότι βρίσκεται σε NLOS συνθήκη δεν πρέπει να την λαμβάνουμε τόσο υπόψιν και συνεπώς δεν θα πρέπει να επηρεάζει στον ίδιο βαθμό τον τελικό υπολογισμό.

Οι αλγόριθμοι WLS εισάγουν έναν πίνακα βαρών  $WWW$ , ο οποίος επιτρέπει στα δεδομένα τα οποία έχουν πιο αξιόπιστα χαρακτηριστικά να επηρεάζουν περισσότερο την μέτρηση και τα δεδομένα που χαρακτηρίζονται με μικρότερη αξιοπιστία να επηρεάζουν λιγότερο. [12]. Η εξίσωση ελαχιστοποίησης σύμφωνα με τον αλγόριθμο WLS δίνεται ως: (Σχέση 9):

$$E = (Ax - b)^T W (Ax - b) \quad (9)$$

όπου τα βάρη του πίνακα  $WWW$  μπορούν να προκύψουν είτε εμπειρικά αλλά αν αυτό δεν είναι εφικτό τα βάρη αυτά μπορούν να εφαρμοστούν με την βοήθεια στατιστικών μοντέλων, είτε βάσει μοντέλων αναγνώρισης NLOS. Ακόμη πιο εξελιγμένες μέθοδοι χρησιμοποιούν επαναληπτικές διαδικασίες, επαναληπτικά ελάχιστα τετράγωνα (Iterative Least Squares – ILS) οι οποίες ενημερώνουν τα υπάρχοντα βάρη σε κάθε επανάληψη μέχρι η λύση να συγκλίνει σε σταθερή εκτίμηση.

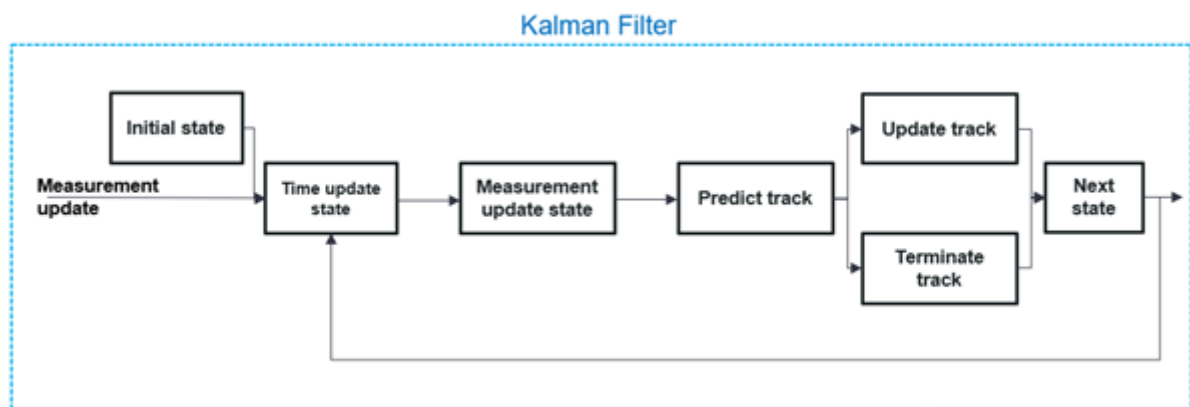
Οι αλγόριθμοι αυτοί ανήκουν σε μια κατηγορία ιδιαίτερα σημαντική για τη μελλοντική φυσική υλοποίηση του συστήματος. Παρότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση ο θόρυβος είναι ήπιος και συμμετρικός, σε πραγματικά UWB δίκτυα οι μετρήσεις είναι συχνά ετερογενείς, καθιστώντας τις WLS και ILS μεθόδους εξαιρετικά χρήσιμες.

### 3.6.3 Φίλτρα Kalman και ενοποίηση χρονικής πληροφορίας

Οι αλγόριθμοι Least Squares εκτιμούν θέση μόνο βάσει μιας στιγμιαίας τιμής μετρήσεων. Όμως τα RTLS δεδομένα έχουν εκ φύσεως χρονική διάρκεια καθώς η θέση ενός παίκτη σε ένα γήπεδο δεν μεταβάλλεται τυχαία αλλά ακολουθεί ομαλή κίνηση στον χώρο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα αποκαλούμενα φίλτρα κατάστασης, με κυριότερο το φίλτρο Kalman [17].(Σχήμα 12)

Το φίλτρο Kalman μπορεί και συνδυάζει δύο πηγές πληροφορίας ταυτόχρονα. Αυτές είναι η προβλεπόμενη θέση του αντικειμένου με βάση το μοντέλο κίνησης (motion model) και την πιο πρόσφατη μέτρηση από το σύστημα εντοπισμού. Η διαδικασία απαρτίζεται από δύο σκέλη. Σε πρώτη φάση έχουμε την πρόβλεψη και ύστερα υπάρχει η φάση της ενημέρωσης. Στην πρόβλεψη η θέση εκτιμάται χρησιμοποιώντας την ταχύτητα και την κατεύθυνση του παίκτη ενώ στην ενημέρωση η προηγούμενη πρόβλεψη διορθώνεται με βάση τα νεότερα δεδομένα του UWB αισθητήρα.

Με την χρήση της μεθόδου αυτής μειώνεται η ευαισθησία στον θόρυβο παράγει πιο ομαλές τροχιές, διορθώνει τις απότομες μετακινήσεις που προκύπτουν από εσφαλμένες μετρήσεις και επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κίνησης με υψηλή ακρίβεια. Ένα τέτοιο φίλτρο αποτελεί ιδανική επέκταση της παρούσας εργασίας, ειδικά για την ανάπτυξη ενός πιο εξελιγμένου συστήματος προειδοποίησης σύγκρουσης που θα λαμβάνει υπόψη και τη μελλοντική πορεία των παικτών.



Σχήμα 12: Βασική ροή λειτουργίας φίλτρου Kalman για εκτίμηση θέσης[44]

### 3.6.4 Θεωρία Κατανομών Σφάλματος και Διάδοση Αβεβαιότητας

Οι μετρήσεις των αποστάσεων στα UWB συστήματα δεν είναι ποτέ απόλυτα ακριβείς. Η αβεβαιότητα αυτή περιγράφεται συνήθως με συμμετρική Γκαουσιανή κατανομή αν και σε περιβάλλον NLOS η κατανομή συχνά συναντάται και ως ασύμμετρη, εμφανίζοντας «ουρά» προς τις μεγαλύτερες αποστάσεις. Η διάδοση αυτής της αβεβαιότητας στον τελικό υπολογισμό θέσης περιγράφεται από τα μοντέλα μετάδοσης σφαλμάτων (Propagation of Uncertainty-PoU) [18].

Αν το σφάλμα στις μετρήσεις των αποστάσεων έχει διακύμανση του τύπου

$$\sigma^2(10)$$

τότε το σφάλμα εκτίμησης θέσης εξαρτάται γραμμικά από τον πίνακα AAA στο σύστημα  $A_x = bA_x = bA_x = b$ . Όσο πιο ανακριβής είναι η γεωμετρία των anchors, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση της αβεβαιότητας και των λαθών. Αυτό αποτελεί επιπλέον απόδειξη της σημασίας του GDOP και της ορθής χωροθέτησης anchors.

Η κατανόηση της διάδοσης αβεβαιότητας είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό συστημάτων ασφαλείας καθώς είναι αυτή η οποία επιτρέπει την αποτίμηση της πιθανότητας να είναι δύο παίκτες κοντά ο ένας με τον άλλον και να εμφανιστούν ως «σε εγγύτητα» λόγω σφάλματος μετρήσεων και όχι λόγω πραγματικής θέσης[18].

### **3.6.5 Ιστορική αναδρομή των τεχνολογιών RTLS και μετάβαση προς UWB**

Οι πρώτες εφαρμογές εντοπισμού εσωτερικού χώρου εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1990, κυρίως με χρήση ενεργών RFID για βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Την επόμενη δεκαετία η ευρεία διάδοση του Wi-Fi οδήγησε σε συστήματα εντοπισμού που εκμεταλλεύονταν την υπάρχουσα υποδομή, επιτρέποντας βασικό εντοπισμό σε κτίρια, αλλά με περιορισμένη ακρίβεια [19].

Η επανάσταση ήρθε τη δεκαετία του 2010 με την τυποποίηση της UWB στο IEEE 802.15.4a και τη μετέπειτα εξελιγμένη εκδοχή IEEE 802.15.4z. Η τεχνολογία υιοθετήθηκε αρχικά στη βιομηχανία logistics και υψηλής ακρίβειας αυτοματισμών, πριν επεκταθεί σε καταναλωτικές εφαρμογές όπως τα σύγχρονα smartphones. Η οξυδέρκεια της UWB στην αναγνώριση πρώτης άφιξης του παλμού και η ανοσία στον θόρυβο multipath κατέστησαν την τεχνολογία κορυφαίο υποψήφιο για RTLS εφαρμογές ξωπραγματικού χρόνου, ειδικά σε δυναμικά περιβάλλοντα όπως ο αθλητισμός.

Η σημερινή μετάβαση σε συστήματα ασφαλείας για αθλήματα υψηλού ρίσκου, όπως το ποδόσφαιρο τυφλών, συνεχίζει φυσικά τη γραμμή εξέλιξης των RTLS τεχνολογιών από χαμηλής ακρίβειας λύσεις σε συστήματα που μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές όπου το λάθος μερικών μόνο εκατοστών μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες.

## Κεφάλαιο 4ο: Σχεδιασμός και αρχιτεκτονική του συστήματος

Η ανάπτυξη ενός λειτουργικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο (RTLS) απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, ικανό να λαμβάνει υπόψη τη ροή των δεδομένων, τον ρόλο κάθε υποσυστήματος και τον τρόπο με τον οποίο οι επιμέρους μονάδες αλληλοεπιδρούν. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η συνολική αρχιτεκτονική της υλοποίησης, η λογική πίσω από την τοποθέτηση των anchors στον χώρο του γηπέδου και η πλήρης διαδρομή που ακολουθούν τα δεδομένα, από τη δημιουργία τους στον προσομοιωτή έως την τελική επεξεργασία, απεικόνιση και αποθήκευσή τους.

### 4.1 Συνολική αρχιτεκτονική (Εις βάθος ανάλυση)

Η αρχιτεκτονική βασίζεται σε ένα κεντροποιημένο σύστημα δημοσίευσης-συνδρομής (publish-subscribe), το οποίο λειτουργεί μέσω ενός διαμεσολαβητή (broker). Το μοντέλο αυτό, ιδιαίτερα διαδεδομένο σε εφαρμογές του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things-IoT) και σε συστήματα πραγματικού χρόνου, παρέχει ουσιαστικά πλεονεκτήματα όπως η αποσύνδεση των επιμέρους στοιχείων, η ευκολία κλιμάκωσης και η γενικότερη ευελιξία της πλατφόρμας [21, 22]. Κάθε οντότητα του συστήματος επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο και επικοινωνεί με τις υπόλοιπες αποκλειστικά μέσω του MQTT Broker.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των έξι βασικών λογικών μονάδων του συστήματος.

#### 4.1.1 UWB Tags (Προσομοιωμένα - tag\_simulator.py)

Η συγκεκριμένη οντότητα λειτουργεί ως η κεντρική πηγή δεδομένων και, ουσιαστικά, ως το θεμέλιο πάνω στο οποίο «χτίζεται» ολόκληρη η προσομοίωση. Ο ρόλος της δεν περιορίζεται στη δημιουργία τυχαίων αριθμητικών τιμών, αλλά στο να αναπαράγει όσο γίνεται πιο πιστά τόσο τη δυναμική συμπεριφορά των παικτών όσο και τον τρόπο με τον οποίο οι UWB αισθητήρες παράγουν μετρήσεις, ώστε τα δεδομένα που προκύπτουν να είναι ρεαλιστικά και κατάλληλα για επεξεργασία από τα επόμενα στάδια του συστήματος. Η κύρια λειτουργία της είναι η παραγωγή και η δημοσίευση μετρήσεων απόστασης, ενώ για να το επιτύχει διατηρεί εσωτερική κατάσταση μέσω δύο βασικών δομών τύπου dictionary. Αρχικά το `simulated_tag_current_positions` το οποίο περιέχει τις τρέχουσες συντεταγμένες κάθε tag και αντιστοιχεί στο «ground truth» της προσομοίωσης και το `simulated_tag_targets` όπου αποθηκεύονται τα σημεία προς τα οποία κινείται κάθε tag.

Η κίνηση των tags δεν υλοποιείται ως καθαρά τυχαία διαδικασία αλλά ως κατευθυνόμενη πλοήγηση με στόχο την ομαλότητα και την αληθοφάνεια. Ειδικότερα η συνάρτηση `update_tag_positions_and_targets` υπολογίζει το διάνυσμα πορείας από την τρέχουσα θέση προς τον εκάστοτε στόχο και μετακινεί το tag με μικρό αλλά σταθερό βήμα (`MAX_STEP_SIZE`) γεγονός που αποτρέπει απότομες και μη ρεαλιστικές μετατοπίσεις και δημιουργεί κίνηση που μοιάζει περισσότερο με πραγματική κίνηση παίκτη στον χώρο του γηπέδου. Όταν η απόσταση από τον στόχο μειωθεί κάτω από ένα πρακτικό και προκαθορισμένο όριο ο στόχος ανανεώνεται και επιλέγεται ένα νέο τυχαίο σημείο ώστε να διατηρείται συνεχής ροή μεταβολών στις θέσεις χωρίς να παράγεται κίνηση «σπασμωδική» ή προβλέψιμη.

Η παραγωγή των μετρήσεων γίνεται με τρόπο που ακολουθεί τη λογική ενός πραγματικού αισθητήρα απόστασης και δεν βασίζεται σε αυθαίρετες τιμές. Σε κάθε κύκλο ενημέρωσης λαμβάνεται κάθε tag και εξετάζεται διαδοχικά ως προς κάθε anchor, ώστε να υπολογιστεί η Ευκλείδεια απόσταση χρησιμοποιώντας τις «πραγματικές» θέσεις που διατηρεί η προσομοίωση ως σημείο αναφοράς. Πάνω σε αυτήν την ιδανική τιμή εφαρμόζεται ελεγχόμενη τυχαία απόκλιση με τη `random.uniform` (`NOISE_LEVEL, NOISE LEVEL`) με στόχο να αποτυπωθούν οι μικροδιακυμάνσεις και οι αποκλίσεις

που εμφανίζονται στην πράξη λόγω θορύβου και παρεμβολών. Ακολούθως η απόσταση στρογγυλοποιείται, ώστε να προσομοιωθεί η περιορισμένη ακρίβεια που συνήθως επιβάλλει το υλικό ή η διαδικασία εξαγωγής της μέτρησης. Τα αποτελέσματα συσκευάζονται σε μηνύματα JSON και δημοσιεύονται στον MQTT Broker στο **topic uwb/anchor\_data** ενώ το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις αποστολές καθορίζεται από το **UPDATE\_INTERVAL\_SECONDS** ώστε η ροή να διατηρεί σταθερό ρυθμό αντίστοιχο μιας πραγματικής λειτουργίας.

### 4.1.2 UWB Anchors (Δεδομένα διαμόρφωσης)

Σε αντίθεση με τα tags που αντιμετωπίζονται ως στοιχεία με ενεργή συμπεριφορά μέσα στον χρόνο δηλαδή παράγουν συνέχεια δεδομένα, τα anchors δεν υλοποιούνται ως λογισμικά στοιχεία που δρουν αλλά χρησιμοποιούνται ως σταθερές παράμετροι που ορίζουν τη διάταξη του χώρου και τις θέσεις αναφοράς του συστήματος. Η βασική τους αποστολή είναι να παρέχουν στο σύστημα σταθερά σημεία αναφοράς πάνω στα οποία θα μπορεί να στηρίζεται η ερμηνεία των υπολογιζόμενων αποστάσεων. Ταυτόχρονα θα επιτυγχάνεται και η σύνδεσή τους με ένα κοινό πλαίσιο συντεταγμένων αφού χωρίς αυτά δεν υπάρχει σταθερό υπόβαθρο για να εκφραστεί η θέση ενός tag. Η δομή **ANCHOR\_POSITIONS** αποτελεί τη μοναδική πηγή αληθινών δεδομένων για τη διάταξη των anchors επειδή περιέχει τις γνωστές συντεταγμένες τους και καθορίζει τη γεωμετρική οργάνωση του πεδίου που θα πραγματοποιείται κίνηση.

Οι ίδιες συντεταγμένες χρησιμοποιούνται σε δύο κρίσιμα στάδια της ροής στο **tag\_simulator.py** που λειτουργούν ως σταθερές θέσεις αναφοράς για να υπολογιστούν οι αποστάσεις που θα δημοσιευθούν και αντίστοιχα στο **rtls\_server.py** εισάγονται ως τα γνωστά σημεία που απαιτούνται από την πολυπλευρομέτρηση. Η διπλή αυτή αξιοποίηση της ίδιας δομής μειώνει την πιθανότητα διαφοροποίησης μεταξύ της παραγωγής και της επεξεργασίας των δεδομένων και εξασφαλίζει ότι και τα δύο βήματα βασίζονται στο ίδιο ακριβώς σχήμα θέσεων. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνει τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι συγκρίσιμα και συνεπή.

### 4.1.3 MQTT Broker (Mosquitto)

Ο Broker είναι το σημείο από όπου περνάει όλη η κίνηση δεδομένων της επικοινωνίας και στην πράξη κρατά τα μέρη του συστήματος ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αντί να συνδέονται απευθείας ο αποστολέας με τον παραλήπτη τους διαχωρίζει αφού όλα τα μηνύματα φτάνουν πρώτα στον Broker και από εκεί προωθούνται σε όποιον έχει δηλώσει ότι τα παρακολουθεί. Έτσι ο **tag\_simulator.py** μπορεί να στέλνει μετρήσεις χωρίς να γνωρίζει αν ο **rtls\_server.py** τρέχει ή ποια IP έχει ή αν ακόμα είναι καν συνδεδεμένος. Παράλληλα ο Server διαβάζει δεδομένα χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζει ποιος τα παρήγαγε ή από πού προέρχονται. Το μόνο που τους ενώνει είναι η διεύθυνση του Broker και τα topics που έχουν συμφωνηθεί.

Η δρομολόγηση των δεδομένων γίνεται μέσω των topics και εκεί φαίνεται ξεκάθαρα η λογική του διαχωρισμού των δύο οντοτήτων. Το **uwb/anchor\_data** συγκεντρώνει τις μετρήσεις από όλα τα ζεύγη tag-anchor και αποτελεί το βασικό κανάλι εισόδου πληροφορίας για τον Server αφού από αυτό τροφοδοτείται ο μηχανισμός υπολογισμού της θέσης και κάθε επόμενη επεξεργασία. Το **uwb/tags/{tag\_id}/motor** χρησιμοποιείται για εντολές προς συγκεκριμένο tag ώστε ο Server να στέλνει στοχευμένα μηνύματα εκεί που πρέπει χωρίς να χρειάζεται να το στείλει και στα υπόλοιπα και προκαλεί σύγχυση στο δίκτυο. Αν χρειάζεται να γίνει παρακολούθηση πολλών καναλιών επικοινωνίας μαζί, τα wildcards + και # επιτρέπουν να καλυφθεί ολόκληρη κατηγορία θεμάτων με μία συνδρομή κάτι που

στην πράξη διευκολύνει πολύ στην καταγραφή τον έλεγχο ή ακόμα και στο debugging χωρίς αλλαγές στον τρόπο που δημοσιεύουν οι βασικές συνιστώσες.

Αυτό το σχήμα κάνει την επέκταση απλή και καθαρή. Μπορεί να προστεθεί ένα νέο script που αναλύει σχηματισμούς ή υπολογίζει δείκτες απόδοσης και να «ακούει» απλώς το `uwb/anchor_data`, χωρίς να απαιτείται καμία τροποποίηση στον `tag_simulator.py` ή στον `rtls_server.py`. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να προστεθεί και δεύτερος Server για καταγραφή ή οπτικοποίηση, αρκεί να γίνει συνδρομή στα ίδια topics.

#### 4.1.4 RTLS Server (rtls\_server.py)

Η συγκεκριμένη μονάδα είναι ο πυρήνας της λειτουργίας του συστήματος επειδή συγκεντρώνει όλα τα εισερχόμενα δεδομένα τα ερμηνεύει κατάλληλα και καταλήγει σε αποφάσεις που οδηγούν σε διάφορες ενέργειες. Στην πράξη παίρνει ακατέργαστες μετρήσεις αποστάσεων χαμηλού επιπέδου αξιοπιστίας από τα tags και τις μετατρέπει σε πληροφορία με νόημα όπως εκτιμώμενες θέσεις στον χώρο ενδείξεις για την κατάσταση και προειδοποιήσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα από τα υπόλοιπα τμήματα. Η λειτουργία του δεν είναι ωστόσο παθητική καθώς εκτός από την επεξεργασία και τον υπολογισμό θέσης των tags παράγει και τις κατάλληλες εντολές που επιστρέφουν στο σύστημα μέσω του Broker.

Η είσοδος των δεδομένων οργανώνεται γύρω από τη συνάρτηση `on_message`, η οποία δουλεύει ως ασύγχρονος χειριστής γεγονότων και ενεργοποιείται από τη βιβλιοθήκη `raho-mqtt` κάθε φορά που φτάνει νέο μήνυμα από τον Broker. Για να υπάρχει συνέχεια ανάμεσα σε μετρήσεις που έρχονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ο Server κρατά ενημερωμένη εσωτερική εικόνα του συστήματος μέσω των λεξικών `tag_distances`, `tag_positions` και `motor_states`, ώστε να μπορεί να συσχετίζει σωστά το τι έχει ληφθεί τι έχει ήδη υπολογιστεί και ποια είναι η τελευταία κατάσταση ενεργοποίησης. Ο Server τον βασικό του κύκλο ακολουθεί μια σταθερή ροή εργασίας καθώς αρχικά ελέγχει στο `tag_distances` αν έχουν συγκεντρωθεί επαρκείς μετρήσεις ώστε να προβεί σε κάποια εκτίμηση και στη συνέχεια υπολογίζει θέση με την βοήθεια του αλγόριθμου `trilate_position`. Ύστερα εφαρμόζει τη προκαθορισμένη λογική της εφαρμογής μέσω της `check_proximity_and_control_motors` και τέλος αναπτύσσει τις αντίστοιχες εντολές και τις δημοσιεύει στον Broker. Όσο αναφορά την πλευρά της εξόδου παράγονται τρεις ξεκάθαρες κατηγορίες αποτελεσμάτων. Αρχικά είναι οι εκτιμώμενες συντεταγμένες και οι σχετικές καταστάσεις που προωθούνται στη μονάδα οπτικοποίησης, στην συνέχεια βρίσκονται οι εντολές τύπου “ON”/“OFF” που στέλνονται μέσω MQTT προς τα αντίστοιχα κανάλια και τέλος τα συμβάντα εγγύτητας μαζί με τις μετρικές που διοχετεύονται στη μονάδα στατιστικών για πλήρη καταγραφή και μεταγενέστερη οπτικοποίηση και ανάλυση.

#### 4.1.5 Μονάδα οπτικοποίησης (Ενσωμάτωση Matplotlib)

Η μονάδα του συστήματος αυτή υπάρχει για να οπτικοποιείται άμεσα τι κάνει το σύστημα την ώρα που τρέχει και να μπορεί να εντοπιστεί χωρίς καθυστέρηση αν κάτι αποκλίνει από την αναμενόμενη συμπεριφορά. Η βασική της δουλειά είναι να προβάλλει την κατάσταση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο και να δίνει στον χρήστη-χειριστή μια καθαρή εικόνα της προσομοίωσης ώστε να μην χρειάζεται να στηρίζεται μόνο σε logs ή σε αριθμητικές τιμές που είναι δύσκολο να διαβαστούν γρήγορα και με ακρίβεια. Η αίσθηση real-time που προσδίδει προκύπτει από τη διαδραστική λειτουργία της Matplotlib με `plt.ion()` και από το ότι στον κεντρικό βρόχο γίνεται περιοδικά κλήση του `plt.pause(0.01)`, το οποίο επιτρέπει στην βιβλιοθήκη Matplotlib να ανανεώσει το γράφημα και ταυτόχρονα αφήνει χώρο στο λειτουργικό σύστημα να εξυπηρετήσει άλλα γεγονότα ώστε η εκτέλεση να παραμένει σε λειτουργία και να μην παγώνει η διεπαφή.

Η απεικόνιση δεν περιορίζεται στη σχεδίαση σημείων στο χώρο αλλά μεταφέρει επιπλέον πληροφορία για κάθε tag με τρόπο που αναγνωρίζεται εύκολα από τον χειριστή. Η θέση tag αποτυπώνεται από τις τρέχουσες συντεταγμένες και η ταυτότητα φαίνεται μέσω της ετικέτας δίπλα στο αντίστοιχο σημείο καθώς η κατάσταση εγγύτητας αποδίδεται δυναμικά με αλλαγές στην εμφάνιση του σημείου, καθώς χρησιμοποιείται χρωματική ένδειξη όπου το μπλε αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία και το κόκκινο σε λειτουργία συναγερμού, ενώ παράλληλα μεταβάλλονται το μέγεθος και η σειρά σχεδίασης μέσω του Z-ORDER, ώστε όταν προκύπτει συμβάν εγγύτητας το σχετικό tag να ξεχωρίζει καθαρά από τα υπόλοιπα.

### 4.1.6 Μονάδα στατιστικών (statistics\_logger.py)

Το κομμάτι αυτό παίζει έναν ουδέτερο ρόλο στο σύστημα καθώς είναι ένα καταγραφικό το οποίο συγκεντρώνει δεδομένα ώστε να γίνει η αξιολόγηση λειτουργίας του συνολικού συστήματος και ταυτόχρονα προσθέτει μια εικόνα στην απόδοση χωρίς αυτή να επηρεάσει την λογική του εντοπισμού των υπολοίπων ενεργειών. Στόχος της είναι να συλλέγει κρίσιμες πληροφορίες με τρόπο συστηματικό και να διευκολύνει την ανάλυσή τους ώστε να μπορεί να τεκμηριώσει τι συνέβη κατά την εκτέλεση και πόσο ποιοτική είναι η λειτουργία του συστήματος. Η κλάση `RTLStatisticsLogger` ενσωματώνεται στο `rtls_server.py` μέσω συγκεκριμένων σημείων κλήσης που λειτουργούν σαν άγκιστρα καταγραφής. Η μέθοδος `log_message_received()` καλείται μέσα στην συνάρτηση `on_message` ώστε να καταγράφει τον ρυθμό άφιξης μηνυμάτων και να δημιουργεί εικόνα για τον χρόνο απόκρισης. Η `log_positioning_attempt()` ενεργοποιείται αμέσως μετά το `trilate_position` για να αποτυπώσει προσπάθειες για εντοπισμό θέσης και να ξεχωρίζει τις επιτυχίες από τις αποτυχίες. Καθώς η μέθοδος `log_proximity_event()` που εκτελείται μέσα στη `check_proximity_and_control_motors` κάθε φορά που ανιχνεύεται συμβάν εγγύτητας. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται σαφές ιστορικό για το πότε και πόσο συχνά ενεργοποιήθηκαν οι σχετικοί μηχανισμοί.

## 4.2 Σχεδιασμός του γηπέδου και τοποθέτηση των Anchors

Η ακρίβεια ενός συστήματος εντοπισμού που βασίζεται στην πολυπλευρομέτρηση (multilateration) επηρεάζεται άμεσα από τον τρόπο με τον οποίο έχουν τοποθετηθεί τα anchors στον χώρο επειδή η ακριβώς ίδιας ποιότητας μετρήσεων μπορεί επιφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό διαφορετικά επίπεδα σφάλματος ανάλογα με τη γεωμετρία που σχηματίζει τα σημεία αναφοράς δηλαδή τα anchors [2]. Όταν η διάταξη δεν είναι καλή η αβεβαιότητα στα δεδομένα μεγεθύνεται από τη γεωμετρία των σημείων αναφοράς και προκύπτει το φαινόμενο που περιγράφεται ως Γεωμετρική Απομείωση της Ακρίβειας γνωστό ως Geometric Dilution of Precision ή GDOP [13]. Η έννοια αυτή γίνεται πιο κατανοητή αν εξεταστεί μια απλή περίπτωση του φαινομένου. Στην περίπτωση όπου τρία σημεία αναφοράς (anchors) βρίσκονται σχεδόν στην ίδια ευθεία, ένα μικρό σφάλμα σε μία απόσταση δεν παραμένει μικρό αλλά μετατρέπεται σε μια μεγάλη περιοχή αβεβαιότητας γύρω από τη αυτό. Αυτό δημιουργείται επειδή το σύστημα δεν έχει την δυνατότητα να βλέπει επαρκώς το άγνωστο σημείο αυτό από διαφορετικές κατευθύνσεις. Αντίθετα όμως όταν τα σημεία σχηματίζουν ένα ανοιχτό και ισορροπημένο τρίγωνο γύρω από την περιοχή όπου βρίσκεται το άγνωστο σημείο του οποίου θέλουμε να προσδιορίσουμε την θέση τότε το ίδιο επίπεδο θορύβου με πριν έχει σαφώς μικρότερη επίδραση, καθώς οι πληροφορίες έρχονται από διαφορετικές γωνίες και ο υπολογισμός ολοκληρώνεται καλύτερα, δηλαδή με περισσότερα δεδομένα. Η δεύτερη περίπτωση περιγράφεται συνήθως ως καλή γεωμετρία, άρα και ως διάταξη που αντιστοιχεί σε χαμηλό GDOP.

Στην παρούσα εργασία οι θέσεις των anchors προσδιορίζονται από την δομή `ANCHORS_POSITIONS` και τοποθετούνται στις τέσσερις γωνίες από ένα ορθογώνιο του οποίου οι

διαστάσεις είναι 5x7 m. Η επιλογή της διάστασης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πρακτική η προσομοίωση και να πραγματοποιείται πιο σταθερός ο εντοπισμός θέσης μέσα στο γήπεδο. Αρχικά στην περιοχή κίνησης υπήρχαν περιμετρικά σημεία αναφοράς(anchors),οπότε όλα τα αντικείμενα που θα κινηθούν στον χώρο αυτό θα χρήζουν της ευνοϊκής γεωμετρίας των σημείων αναφοράς. Δηλαδή κατά την διάρκεια την κίνησης μέσα στον χώρο αυτό τα tags δεν θα βρίσκονται μόνιμα μπροστά από τα anchors αλλά ούτε και πίσω από αυτά αλλά θα υπάρχει πάντα μία κατανομή σταθερών σημείων γύρω του πράγμα που περιορίζει το φαινόμενο της αβεβαιότητας. Δεύτερον παρότι η προσομοίωση πραγματοποιείται σε διδιάστατο περιβάλλον και κατά συνέπεια η ελάχιστη χρήση είναι τρεις anchor, με την χρήση τεσσάρων δημιουργείται ένας πλεονασμός από σημεία αναφοράς(anchors) ο οποίος αξιοποιείται από αλγόριθμους ελαχίστων τετραγώνων για εξομάλυνση του αποτελέσματος και τελικά η πληροφορία που παράγεται είναι πιο ακριβής και λιγότερο ευαίσθητη σε μεμονωμένα σφάλματα[12].

#### 4.2.1 Προκλήσεις κλιμάκωσης σε πραγματικές διαστάσεις

Η μετάβαση από το περιβάλλον της προσομοίωσης και το ορθογώνιο 5x7 μέτρων στις πραγματικές διαστάσεις ενός γηπέδου τυφλών με διαστάσεις 40 x 20 μέτρων παρουσιάζει δυσκολίες που αρχικά στο μοντέλο της προσομοίωσης δεν είναι διακριτές αλλά στην πραγματικότητα είναι καθοριστικές. Στις μεγαλύτερες αποστάσεις ενός πραγματικού γηπέδου η ισχύς του σήματος που εκπέμπουν τα tags μειώνεται και αυτό πρακτικά μεταφράζεται σε πιο ασταθείς μετρήσεις , με αυξημένη απόκλιση από τις εσωτερικές εκτιμήσεις που έκανε το σύστημα ή ακόμα και συνολική απώλεια των πακέτων δεδομένων. Επιπροσθέτως σε πραγματικό περιβάλλον η λειτουργία του συστήματος υπο το συνθήκες NLOS είναι πολύ πιο συχνή και αναμενόμενη καθώς τα σώματα των παικτών παρεμβάλλονται και εμποδίζουν την απευθείας οπτικής επαφής ανάμεσα σε tag και anchor. Αποτέλεσμα αυτού είναι το σήμα να μην ακολουθεί την πιο άμεση διαδρομή αλλά να καθυστερεί. Με την καθυστέρηση αυτή υπάρχει κίνδυνος να παρατηρηθεί υπερεκτίμηση της απόστασης θέσης και σε αισθητά σφάλματα εντοπισμού. Για αυτό ακριβώς τον λόγο τα πιο ανθεκτικά και ώριμα RTLS συστήματα έχουν μηχανισμούς που τους δίνουν την δυνατότητα να ανιχνεύσουν τέτοιες μη ευνοϊκές συνθήκες και να εφαρμόζουν εξειδικευμένους αλγόριθμους για την επίλυση τέτοιων ζητημάτων[16].

### 4.3 Ροή δεδομένων και δομές

Ο πυρήνας του συστήματος αποτελείται από δύο πολύ βασικές δομές δεδομένων. Οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για την μεγαλύτερη ευκολία στην αποθήκευση των δεδομένων καθώς και την προσπέλαση του Αυτές κρατάνε μία εικόνα της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος, μία για τις αποστάσεις που καταγράφουν και μία για τις θέσεις που έχουν ήδη εκτιμηθεί. Οι δύο δομές είναι η tag distances και η tag positions.

#### 4.3.1 Κεντρικές δομές δεδομένων

Η δομή **tag\_distances** είναι ένθετο λεξικό του οποίου η οργάνωση αποτελείται από ένα εξωτερικό κλειδί που είναι το αναγνωριστικό του tag(id) και εσωτερικό λεξικό με κλειδιά τα anchors καθώς και τιμές τις πιο πρόσφατες αποστάσεις.

```
"sim_tag1": {"anchor1": 2.5, "anchor2": 3.1, "anchor3": 6.2, "anchor4": 5.8},
"sim_tag2": {"anchor1": 5.7, "anchor2": 1.2, "anchor3": 4.5, "anchor4": 6.1},
}
```

Η επιλογή για δημιουργία της δομής κατά αυτόν τον τρόπο δεν επιλέχθηκε τυχαία. Η μορφή της δομής αυτής είναι πρακτική γιατί δίνει άμεση πρόσβαση σε όλες τις μετρήσεις από ένα tag χωρίς να χρειάζεται να ανατρέξει σε λίστες ή κάποιος μετασχηματισμούς. Ενώ παράλληλα το εσωτερικό κλειδί κρατά πάντα την τελευταία γνωστή απόσταση από όλους τους διαθέσιμους anchors. Επιπροσθέτως κάθε νέο μήνυμα δεν θα καταγραφεί σαν νέα εγγραφή στην δομή αυτή αλλά θα αντικαταστήσει την ήδη υπάρχουσα. Με τον μηχανισμό αυτό ο υπολογισμός της πολυπλευρομέτρησης πραγματοποιείται με τα πιο πρόσφατα δεδομένα και αποφεύγεται ο κίνδυνος ο υπολογισμός να βασιστεί σε προηγούμενες τιμές.

Στην δεύτερη δομή **tag\_Positions** το σύστημα αποθηκεύει για κάθε ένα ενεργό tag την εκτιμώμενη του θέση καθώς και την χρονική στιγμή όπου πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση θέσης.

```
{
  "sim_tag1": {"position": [1.23, 4.56], "timestamp": 1678886400.123},
  "sim_tag2": {"position": [4.89, 2.34], "timestamp": 1678886400.456},
}
```

Το πεδίο **timestamp** δεν χρησιμοποιείται τυχαία. Η αρμοδιότητα του είναι να προσδίδει ένα επίπεδο ασφάλειας. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς με την χρήση του **timestamp** γίνεται έλεγχος εγκυρότητας καθώς σε ένα πραγματικό περιβάλλον θα υπάρξουν καθυστερήσεις ή ακόμα και στιγμιαία κενά. Έτσι ελλοχεύει ο κίνδυνος μία παλιά θέση να έχει παραμείνει στην μνήμη ενώ δεν αντιστοιχεί σε κάποια τρέχουσα κατάσταση ενός tag. Για τον λόγο αυτό στην συνάρτηση **check\_proximity\_and\_control\_motor** ένας έλεγχος της χρονικής παραμονής της θέσης και αν η τιμή ξεπερνά το όριο τότε η θέση αυτή θεωρείται παρωχημένη και αγνοείται εντελώς.

#### 4.3.2 Η αλυσίδα επεξεργασίας δεδομένων (Data Processing Pipeline)

Η ανταλλαγή και η επεξεργασία των πληροφοριών γίνεται με συγκεκριμένη σειρά, χωρισμένη καθαρά σε δύο επίπεδα λειτουργίας, ώστε η λήψη των μηνυμάτων να μην μπλοκάρει από τον υπολογισμό και να μην «χάνεται» ρυθμός όταν το φορτίο αυξάνεται. Ο **rtls\_server.py** παραμένει μόνιμα εγγεγραμμένος στο **topic uwb/anchor\_data** και κάθε νέο μήνυμα ενεργοποιεί αυτόματα τη **on\_message** η οποία εκτελεί μόνο τα απολύτως απαραίτητα: αποκωδικοποιεί το περιεχόμενο, εξάγει το tag ,το anchor και την τιμή της απόστασης και ενημερώνει άμεσα το **tag\_distances** αντικαθιστώντας την προηγούμενη αντίστοιχη τιμή. Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία, επειδή η **on\_message** πρέπει να τελειώνει γρήγορα και να μην αναλαμβάνει βαριές πράξεις, αλλιώς θα καθυστερεί η παραλαβή επόμενων μηνυμάτων και θα διαταράσσεται η ροή.

Ο κύριος βρόχος του Server αναλαμβάνει τα πιο απαιτητικά βήματα και λειτουργεί συγχρονισμένα. Αρχικά διαβάζει το **tag\_distances** και όταν για ένα tag έχουν συγκεντρωθεί αρκετές αποστάσεις καλεί τη **trilaterate\_position** ,ώστε ο υπολογισμός θέσης να γίνει εκτός του callback και να μην επηρεαστεί η ασύγχρονη συλλογή. Η εκτίμηση που προκύπτει αποθηκεύεται στο **tag\_positions** μαζί με τη χρονική σήμανση, ώστε το σύστημα να δουλεύει πάντα με τις πιο πρόσφατες και έγκυρες θέσεις. Στη συνέχεια εκτελείται η **check\_proximity\_and\_control\_motors** ,η οποία εφαρμόζει τη λογική της εφαρμογής αξιολογώντας τις διαθέσιμες θέσεις, υπολογίζοντας αποστάσεις μεταξύ tags και ελέγχοντας αν παραβιάζεται το **PROXIMITY\_THRESHOLD**,με αποτέλεσμα να παράγεται και να δημοσιεύεται εντολή “ON” ή “OFF” στο αντίστοιχο topic. Με αυτήν τη ροή ο εντοπισμός δεν μένει ως μεμονωμένο αποτέλεσμα αλλά μετατρέπεται σε λειτουργικό κριτήριο που οδηγεί σε προειδοποίηση σύγκρουσης.

Τέλος οι πιο πρόσφατες τιμές από το **tag\_positions** χρησιμοποιούνται παράλληλα για δύο σκοπούς, ενημερώνουν την οπτικοποίηση ώστε να υπάρχει άμεση εικόνα της κίνησης και τροφοδοτούν τον **statistics\_logger** ώστε να καταγράφονται μετρικές και συμβάντα, με τρόπο που επιτρέπει τόσο παρακολούθηση κατά την εκτέλεση όσο και τεκμηριωμένη ανάλυση μετά το πέρας της.

## Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση του συστήματος

Αφού παρουσιάστηκαν η θεωρητική βάση και η αρχιτεκτονική του συστήματος, στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η πρακτική υλοποίηση των επιμέρους συστημάτων. Όλο το σύστημα αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία επιλέχθηκε λόγω της ευελιξίας της, της πλούσιας συλλογής βιβλιοθηκών για επιστημονικούς υπολογισμούς και δικτυακές εφαρμογές, καθώς και της ταχείας ανάπτυξης που επιτρέπει σε πειραματικά και ερευνητικά έργα.

Για την υλοποίηση των βασικών λειτουργιών αξιοποιήθηκαν κυρίως τρεις εξωτερικές βιβλιοθήκες:

- **Paho-MQTT:** Η επίσημη client βιβλιοθήκη του Eclipse Foundation για το πρωτόκολλο MQTT. Χρησιμοποιήθηκε για τη διαχείριση της σύνδεσης με τον Broker και τον χειρισμό της αποστολής και λήψης μηνυμάτων [13].
- **NumPy:** Μια κεντρική βιβλιοθήκη επιστημονικού υπολογισμού στην Python, η οποία διαδραμάτισε κρίσιμο ρόλο στην υλοποίηση του αλγορίθμου πολυπλευρομέτρησης, προσφέροντας δομές δεδομένων τύπου πίνακα (arrays) και ιδιαίτερα αποδοτικές συναρτήσεις γραμμικής άλγεβρας [18].
- **Matplotlib:** Ισχυρή βιβλιοθήκη για τη δημιουργία στατικών και δυναμικών γραφικών, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση σε πραγματικό χρόνο των θέσεων των tags και της συνολικής κατάστασης του συστήματος [19].

Η συνολική υλοποίηση οργανώνεται σε τέσσερα διακριτά scripts, καθένα από τα οποία επιτελεί σαφώς καθορισμένο ρόλο. Στις επόμενες ενότητες αναλύεται λεπτομερώς η λειτουργία καθενός από αυτά.

### 5.1 Προσομοιωτής Κίνησης και Δεδομένων (tag\_simulator.py)

Το συγκεκριμένο script αποτελεί την κύρια πηγή δεδομένων του συστήματος που τροφοδοτεί τα επόμενα στάδια με μετρήσεις όπου μπορεί να γίνει η άμεση επεξεργασία τους. Ο ρόλος του είναι διπλός καθώς αφενός προσομοιώνει τη συνεχή κίνηση πολλαπλών tags μέσα στον χώρο με ομαλές μεταβολές θέσης ώστε οι τροχιές να έχουν καλύτερη συνοχή και να παραμένουν όσο γίνεται πιο ρεαλιστικές και αφετέρου αναπαριστά τη λειτουργία UWB μετρήσεων υπολογίζοντας τις αποστάσεις των tags από τα anchors. Οι αποστάσεις αυτές δημοσιεύονται με την βοήθεια του MQTT πρωτοκόλλου ως δεδομένα εισόδου στον κεντρικό Server ο οποίος στη συνέχεια τις αξιολογεί και τις αξιοποιεί για τον υπολογισμό της εκτίμησης θέσης και για τις λειτουργίες που βασίζονται πάνω σε αυτήν.

#### 5.1.1 Παράμετροι Διαμόρφωσης

Στην αρχή του αρχείου ορίζονται οι βασικές παράμετροι που ρυθμίζουν τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η προσομοίωση και καθορίζουν τη συμπεριφορά της σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας της.

```

# --- Διαμόρφωση Προσομοιωτή ---
MQTT_BROKER_HOST = "localhost"
MQTT_BROKER_PORT = 1883
MQTT_DATA_TOPIC = "uwb/anchor_data"

ANCHOR_POSITIONS = {
    "anchor1": np.array([0.0, 0.0]),
    "anchor2": np.array([5.0, 0.0]),
    "anchor3": np.array([0.0, 7.0]),
    "anchor4": np.array([5.0, 7.0])
}

NUM_SIMULATED_TAGS = 3
SIMULATED_TAG_IDS = [f"sim_tag{i+1}" for i in range(NUM_SIMULATED_TAGS)]

MIN_X = min(p[0] for p in ANCHOR_POSITIONS.values()) - 1
MAX_X = max(p[0] for p in ANCHOR_POSITIONS.values()) + 1
MIN_Y = min(p[1] for p in ANCHOR_POSITIONS.values()) - 1
MAX_Y = max(p[1] for p in ANCHOR_POSITIONS.values()) + 1

UPDATE_INTERVAL_SECONDS = 0.5
MAX_STEP_SIZE = 0.3
NOISE_LEVEL = 0.05

```

Αρχικά τίθενται οι ρυθμίσεις του MQTT πρωτοκόλλου, δηλαδή ο host και η θύρα του Broker (**MQTT\_BROKER\_HOST**,**MQTT\_BROKER\_PORT**) μαζί με το topic (**MQTT\_DATA\_TOPIC**) στο οποίο θα δημοσιεύονται οι μετρήσεις για την απόσταση, ώστε η ροή των δεδομένων να κατευθύνεται σε ένα σταθερό σημείο εισόδου. Στη συνέχεια ορίζεται το **ANCHOR\_POSITIONS** το οποίο είναι ένα λεξικό που αντιστοιχίζει το αναγνωριστικό(id) κάθε anchor στις ήδη γνωστές συντεταγμένες του με τη χρήση του np.array να διευκολύνει τους μεταγενέστερους υπολογισμούς καθώς επιτρέπει απλές διανυσματικές πράξεις κατά τον υπολογισμό αποστάσεων και διαφορών θέσης.

Με βάση τις συντεταγμένες των anchors προκύπτουν και τα όρια του πεδίου κίνησης, καθώς τα **MIN\_X**, **MAX\_X**, **MIN\_Y**, **MAX\_Y** υπολογίζονται από τις ελάχιστες και μέγιστες αντίστοιχα τιμές των anchors με ένα περιθώριο ενός μέτρου. Αυτό γίνεται ώστε τα tags να κινούνται σε περιοχή που δεν περιορίζεται αυστηρά πάνω στο ορθογώνιο των anchors αλλά περιλαμβάνει και ένα μικρό «buffer» γύρω από αυτό. Έπειτα στην συνέχεια επιλέγεται ο αριθμός των προσημειωμένων tags (**NUM\_SIMULATED\_TAGS**) που θα τρέξουν και δημιουργούνται τα αντίστοιχα IDs τους στη λίστα **SIMULATED\_TAG\_IDS** ώστε κάθε κινούμενο στοιχείο να έχει μια ταυτότητα στα δημοσιευμένα μηνύματα.

Τέλος καθορίζονται και οι βασικές παράμετροι της κίνησης και της δειγματοληψίας των δεδομένων. Το **UPDATE\_INTERVAL\_SECONDS** ορίζει το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε διαδοχικές δημοσιεύσεις που θα κάνουν τα tags και αντιστοιχεί σε ρυθμό 2 Hz ενώ το **MAX\_STEP\_SIZE** περιορίζει το μέγιστο βήμα μετακίνησης ανά κύκλο. Δηλαδή το πόσο μπορεί να μετακινηθεί ένα tag σε ένα κύκλο ανανέωσης του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο η κίνηση παραμένει ομαλή και ελεγχόμενη ενώ το **NOISE\_LEVEL** ορίζει το εύρος του τεχνητού θορύβου που προστίθεται στις αποστάσεις. Στη προσομοίωση ρύθμιση ο θόρυβος έχει οριστεί στα  $\pm 0.05\text{m}$  δηλαδή περίπου  $\pm 5\text{ cm}$ . Η επιλογή αυτή στοχεύει να αναπαραστήσει την αβεβαιότητα μετρήσεων ενός UWB συστήματος χωρίς να αλλοιώνει υπερβολικά την προσομοίωση.

### 5.1.2 Λογική προσομοίωσης κίνησης

Το βασικό σημείο της προσομοίωσης κίνησης είναι η `update_tag_positions_and_targets()`, μια συνάρτηση που έχει υλοποιηθεί ώστε κάθε tag της προσομοίωσης να ακολουθεί μια συνεχή πορεία και να υφίσταται μια λογική μεταβολή στον χώρο χωρίς να παρατηρούνται απότομες και αφύσικες μετακινήσεις ή ακόμα και καθαρά τυχαία άλματα που θα αλλοίωναν τον ρεαλισμό της κίνησης ενός παίκτη.

```
def update_tag_positions_and_targets():
    """Ενημερώνει τις θέσεις των προσομοιωμένων tags προς τους στόχους
    τους."""
    global simulated_tag_current_positions, simulated_tag_targets

    for tag_id in SIMULATED_TAG_IDS:
        current_pos = simulated_tag_current_positions[tag_id]
        target_pos = simulated_tag_targets[tag_id]
        direction = target_pos - current_pos
        distance_to_target = np.linalg.norm(direction)

        if distance_to_target < MAX_STEP_SIZE * 2:
            simulated_tag_targets[tag_id] = np.array([random.uniform(MIN_X,
            MAX_X), random.uniform(MIN_Y, MAX_Y)])
        else:
            move_vector = (direction / distance_to_target) * MAX_STEP_SIZE
            new_pos = current_pos + move_vector
            new_pos[0] = np.clip(new_pos[0], MIN_X, MAX_X)
            new_pos[1] = np.clip(new_pos[1], MIN_Y, MAX_Y)
            simulated_tag_current_positions[tag_id] = new_pos
```

Η συνάρτηση `update_tag_positions_and_targets()` είναι το σημείο όπου διαγράφεται η κίνηση των tags μέσα στον χώρο και αυτό φαίνεται από τη σειρά των υπολογισμών που κάνει σε κάθε επανάληψη. Για κάθε ενεργό `tag_id` διαβάζει την τρέχουσα θέση του από τη μεταβλητή `simulated_tag_current_positions` και τον αντίστοιχο στόχο από την μεταβλητή `simulated_tag_targets` ώστε να υπάρχει πάντα ένα σαφές ζεύγος που καθορίζει πάντα το σημείο αφητηρίας του tag αλλά και το τελικό προορισμό. Η κατεύθυνση του tag προκύπτει ως ένα διάνυσμα που υπολογίζεται από την διαφοράς `direction = target_pos - current_pos` ενώ το πραγματικό μέτρο της απόστασης υπολογίζεται με το `np.linalg.norm(direction)` και αποθηκεύεται στην μεταβλητή `distance_to_target`, άρα η συνάρτηση έχει ταυτόχρονα πληροφορία και για την κατεύθυνση αλλά και για το πόσο απέχει το tag από τον στόχο.

Ο έλεγχος προσέγγισης γίνεται με ένα απλό αλλά λειτουργικό κριτήριο με όνομα `distance_to_target < MAX_STEP_SIZE * 2`. Όταν αυτή η ανισότητα ισχύει τότε θεωρείται ότι το tag βρίσκεται αρκετά κοντά ώστε να μην έχει νόημα να επιδιώκει τον ίδιο στόχο με μικροβήματα που θα έδειχναν αφύσικα ή ακόμα θα μπορούσαν να δημιουργήσουν κάποια άσκοπη στασιμότητα. Τότε ορίζεται νέος στόχος με τυχαίες συντεταγμένες μέσα στα όρια `MIN_X.MAX_X` και `MIN_Y.MAX_Y`, ώστε η πορεία να συνεχίζεται με διαφορετική κατεύθυνση και να παράγονται ποικίλες διαδρομές.

Όταν το tag δεν έχει φτάσει ακόμα κοντά στον προκαθορισμένο στόχο του η μετακίνηση του υπολογίζεται με σταθερό ένα βήμα. Η μεταβλητή `direction` κανονικοποιείται μέσω διαίρεσης με το `distance_to_target` και έπειτα πολλαπλασιάζεται με το `MAX_STEP_SIZE` ώστε η νέα μεταβλητή

**move\_vector** να έχει σταθερό μήκος ανεξάρτητα από το πόσο μακριά βρίσκεται ο στόχος. Με αυτόν τον τρόπο η κίνηση μοιάζει με σταθερή ταχύτητα και αποφεύγονται στιγμές όπου το tag θα έκανε μεγάλα άλματα απλώς επειδή ο στόχος είναι μακριά. Η νέα θέση προκύπτει ως **new\_pos = current\_pos + move\_vector** και πριν αποθηκευτεί γίνεται περιορισμός της με το **np.clip** και στους δύο άξονες κίνησης ώστε το tag να μην βγει εκτός πεδίου ακόμα και αν ο στόχος οριστεί έξω από αυτό.

Με σχεδίαση αυτή η κίνηση παραμένει συνεχής και προβλέψιμη ως προς τη φύση της αλλά όχι προβλέψιμη ως προς τη διαδρομή της καθώς οι στόχοι αλλάζουν συνεχώς όταν επιτευχθούν. Αυτό δίνει πιο πειστικές τροχιές και παράλληλα δημιουργεί δεδομένα που είναι πιο χρήσιμα για έλεγχο εντοπισμού της θέσης και των κανόνων εγγύτητας.

### 5.1.3 Δημιουργία και δημοσίευση δεδομένων

Ο κεντρικός βρόχος του script τρέχει συνεχόμενα και είναι αυτός που κρατά σε λειτουργία όλη τη διαδικασία παραγωγής δεδομένων αφού σε κάθε κύκλο ενημερώνει τις θέσεις των tags, υπολογίζει τις αντίστοιχες αποστάσεις προς τα anchors και στη συνέχεια δημοσιεύει τις μετρήσεις στον MQTT Broker με τον ρυθμό που έχει οριστεί από το **UPDATE\_INTERVAL\_SECONDS**.

```
while True:
    update_tag_positions_and_targets()

    for tag_id in SIMULATED_TAG_IDS:
        tag_pos = simulated_tag_current_positions[tag_id]

        for anchor_id, anchor_pos in ANCHOR_POSITIONS.items():
            dist_no_noise = calculate_distance(tag_pos, anchor_pos)
            simulated_distance = dist_no_noise + random.uniform(-NOISE_LEVEL,
NOISE_LEVEL)
            simulated_distance = max(0, simulated_distance)

            payload = {
                "anchor_id": anchor_id,
                "tag_id": tag_id,
                "distance": round(simulated_distance, 2)
            }

            sim_client.publish(MQTT_DATA_TOPIC, json.dumps(payload))

        time.sleep(UPDATE_INTERVAL_SECONDS)
```

Στο κομμάτι κώδικα αυτό βλέπουμε ότι για κάθε tag ο βρόχος περνά διαδοχικά από όλα τα anchors και στην συνέχεια για κάθε ένα ζευγάρι tag-anchor υπολογίζει πρώτα την ιδανική απόσταση από τις τρέχουσες συντεταγμένες. Έπειτα πάνω σε αυτή την απόσταση γίνεται προσθήκη τεχνητού θορύβου μέσα στην μεταβλητή **simulated\_distance** ώστε οι μετρήσεις να μην παρουσιάζονται τέλειες αλλά να προσομοιώνουν αποτελέσματα ενός πραγματικού αισθητήρα. Στην συνέχεια δημιουργείται μια μεταβλητή τύπου λεξικό και εκεί αποθηκεύονται όλα τα βασικά πεδία όπως το **anchor\_id**, **tag\_id** και **distance** για να μετατραπούν στην συνέχεια σε δεδομένα JSON και να δημοσιευτούν στο **uwb/anchor\_data** όπου είναι και το data topic.

### 5.1.4 Μοντελοποίηση θορύβου και περιορισμοί της προσομοίωσης

Αν και η χρήση ενός εξελιγμένου μοντέλου θορύβου είναι σημαντική για την δημιουργία αποτελεσμάτων με ακρίβεια στην παρόν προσομοίωση η διαδικασία της κίνησης και η δημιουργία των

μετρήσεων από τους UWB αισθητήρες γίνεται με την χρήση ενός πιο απλουστευμένου μοντέλου θορύβου. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε κάθε υπολογισμένη απόσταση μεταξύ tag και anchor. Συγκεκριμένα, στον κώδικα του `tag_simulator.py`, η πραγματική (ιδανική) ευκλείδεια απόσταση εμπλουτίζεται με έναν τυχαίο όρο ο οποίος παράγεται μέσω της συνάρτησης `random.uniform`, δημιουργώντας ένα συμμετρικό και ομοιόμορφα κατανομημένο σφάλμα. Η επιλογή αυτή αποτελεί μια συνειδητή απλοποίηση του μοντέλου ώστε να επιτρέπει την σταδιακή μετάβαση από το ιδανικό εικονικό περιβάλλον σε ένα ρεαλιστικότερο χωρίς όμως να επιβαρύνει τη λειτουργικότητα του συστήματος με περίπλοκους στοχαστικούς μηχανισμούς.

Σε πραγματικές συνθήκες, οι μετρήσεις απόστασης που θα προκύψουν από τους αισθητήρες UWB επηρεάζονται από ένα μεγάλο πλήθος φυσικών παραγόντων, οι οποίοι γεννούν στατιστικές κατανομές σφάλματος πολύ πιο περίπλοκες από μια ομοιόμορφη κατανομή. Σε ιδανικές για το σύστημα συνθήκες, δηλαδή όταν υπάρχει Line-of-Sight (LOS), τα σφάλματα που θα προκύψουν τείνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή (Gaussian), επειδή ο θόρυβος που προκύπτει οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ηλεκτρομαγνητικές και θερμικές διαταραχές της φάσης που μετράται, αλλά και του χρόνου πτήσης [1]. Ωστόσο, σε πολλές πραγματικές εφαρμογές και ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους η διάδοση UWB σημάτων ανακλά σε τοίχους δάπεδα και αντικείμενα προκαλώντας το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (multipath) όπου το λαμβανόμενο σήμα είναι άθροισμα πολλών επιμέρους σημάτων που φτάνουν με διαφορετικές χρονικές στιγμές λόγω καθυστερήσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κατανομή του σφάλματος αποκλίνει από τη Gaussian και συχνά περιγράφεται καλύτερα από κατανομές Rice ή Nakagami, καθώς η παρουσία έντονων ανακλάσεων δημιουργεί ουρές υψηλής ενέργειας και μετατοπίσεις στην εκτιμώμενη απόσταση θέσης [2].

Επιπλέον κρισιμότερη χαρακτηρίζεται η περίπτωση των συνθηκών μη οπτικής επαφής (NLOS), όπου το σήμα διέρχεται μέσα από εμπόδια, όπως τοίχους ή ανθρώπινα σώματα. Όταν παρατηρείται το φαινόμενο αυτό, το λαμβανόμενο UWB σήμα επιβραδύνεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα θετικό σφάλμα μεροληψίας (positive bias) που μπορεί να φτάσει ακόμη και δεκάδες εκατοστά [3]. Η ύπαρξη του φαινομένου NLOS συνιστά μία από τις σημαντικότερες πηγές σφάλματος στα συστήματα RTLS και δεν έχει συμπεριληφθεί στο απλουστευμένο μοντέλο της προσομοίωσης. Παράλληλα, σε πιο ώριμες υλοποιήσεις συστημάτων RTLS συχνά εφαρμόζονται τακτικές ταξινόμησης NLOS, οι οποίες βασίζονται σε στοιχεία από το λαμβανόμενο σήμα, όπως η μορφή του παλμού και η κατανομή της ισχύος, ή ακόμη, σε πιο εξελιγμένες περιπτώσεις, γίνεται χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης για την επίτευξη καλύτερης ανίχνευσης μετρήσεων που έχουν επηρεαστεί [4].

## 5.2 Κεντρικός Server επεξεργασίας (rtls\_server.py)

Αυτό το τμήμα του συστήματος αποτελεί και το πιο ουσιαστικό, αλλά ταυτόχρονα και το πιο απαιτητικό κομμάτι της υλοποίησης του RTLS καθώς σε αυτό γίνεται η μετάβαση της απλής μέτρησης των αποστάσεων σε πληροφορία που μπορεί να αξιοποιηθεί από τα άλλα υποσυστήματα. Λαμβάνει τις πληροφορίες ακατέργαστες όπως έρχονται από τους αισθητήρες και στη συνέχεια τις οργανώνει και με βάση αυτές υπολογίζει τη θέση. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μια αδιάφορη πληροφορία επεξεργάζεται και δημιουργείται μια νέα πάνω στην οποία βασίζονται για να παραχθούν ειδοποιήσεις προς τα tags.

### 5.2.1 Ασύγχρονη λήψη δεδομένων (on\_message)

Η επικοινωνία του Server με τον MQTT Broker υλοποιείται μέσω της συνάρτησης `on_message`, η οποία χρησιμοποιείται ως συνάρτηση επανάκλησης. Η `raho-mqtt` την ενεργοποιεί αυτόματα και ασύγχρονα κάθε φορά που δημοσιεύεται νέο μήνυμα στο topic που παρακολουθεί ο Server.

```

def on_message(client, userdata, msg):
    try:
        payload = json.loads(msg.payload.decode())
        anchor_id = payload.get("anchor_id")
        tag_id = payload.get("tag_id")
        distance = payload.get("distance")

        if not all([anchor_id, tag_id, isinstance(distance, (int, float))]):
            return

        # Καταγραφή λήψης μηνύματος
        stats_logger.log_message_received(tag_id, anchor_id)

        if tag_id not in tag_distances:
            tag_distances[tag_id] = {}

        tag_distances[tag_id][anchor_id] = distance

        if len(tag_distances[tag_id]) >= MIN_ANCHORS_FOR_POSITIONING:
            current_anchor_coords = {aid: ANCHOR_POSITIONS[aid] for aid in
tag_distances[tag_id] if aid in ANCHOR_POSITIONS}
            position = trilaterate_position(tag_distances[tag_id],
current_anchor_coords)

            if position is not None:
                tag_positions[tag_id] = {"position": position, "timestamp":
time.time()}

                # Καταγραφή επιτυχούς positioning
                stats_logger.log_positioning_attempt(tag_id, True, position)
            else:
                # Καταγραφή αποτυχημένου positioning
                stats_logger.log_positioning_attempt(tag_id, False)

    except Exception as e:
        print(f"Error processing message: {e}")

```

Στη συνάρτηση **on\_message** γίνεται η ουσιαστική είσοδος των αρχείων των μετρήσεων που έχουν ληφθεί από τα tags μέσω του MQTT. Αρχικά αποδομεί το payload από JSON και λαμβάνει τις τιμές από τις μεταβλητές **anchor\_id**, **tag\_id** και **distance**. Έχοντας αυτές τις τιμές πραγματοποιεί έναν έλεγχο ώστε να λάβει υπόψη μόνο τα πεδία που είναι πλήρως συμπληρωμένα καθώς και μόνο αριθμητικές αποστάσεις. Στη συνέχεια καταγράφει τη λήψη των δεδομένων στο **stats\_logger.log\_message\_received** για μελλοντικές χρήσεις, τόσο στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας όσο και για στατιστικούς λόγους.

Έπειτα περνά στην ενημέρωση της δομής δεδομένων **tag\_distances**. Ελέγχει αν το tag εμφανίζεται για πρώτη φορά και τότε δημιουργεί το εσωτερικό λεξικό του. Η μεταβλητή **tag\_distances[tag\_id][anchor\_id]** λαμβάνει την τιμή **distance** και αντικαθιστά την προηγούμενη μέτρηση για το ίδιο ζεύγος. Όταν για το συγκεκριμένο tag υπάρχουν τουλάχιστον

`MIN_ANCHORS_FOR_POSITIONING` διαφορετικά anchors τότε λαμβάνει τις αντίστοιχες συντεταγμένες από το `ANCHOR_POSITIONS` και καλεί τη συνάρτηση `trilaterate_position`.

### 5.2.2 Υλοποίηση του αλγορίθμου πολυπλευρομέτρησης (`trilaterate_position`)

Στην συνάρτηση αυτή πραγματοποιείται τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε σε θεωρητικό επίπεδο στην ενότητα 2.3.2. Η συνάρτηση αυτή λαμβάνει δύο παραμέτρους, τον αριθμό του συνόλου των αποστάσεων που έχουν συγκεντρωθεί για ένα tag αλλά και τις αντίστοιχες συντεταγμένες των anchors. Με βάση αυτές τις δύο πληροφορίες ο αλγόριθμος εκτιμά την θέση του tag και επιστρέφει τις συντεταγμένες του στον χώρο.

```
def trilaterate_position(distances_to_anchors, anchor_coords):
    A = []
    b = []
    anchor_ids_used = []

    for anchor_id, dist in distances_to_anchors.items():
        if anchor_id not in anchor_coords:
            continue
        anchor_ids_used.append(anchor_id)

    if len(anchor_ids_used) < MIN_ANCHORS_FOR_POSITIONING:
        return None

    ref_anchor_id = anchor_ids_used[0]
    x_ref, y_ref = anchor_coords[ref_anchor_id]
    d_ref_sq = distances_to_anchors[ref_anchor_id]**2

    for i in range(1, len(anchor_ids_used)):
        current_anchor_id = anchor_ids_used[i]
        x_i, y_i = anchor_coords[current_anchor_id]
        d_i_sq = distances_to_anchors[current_anchor_id]**2

        A.append([2 * (x_i - x_ref), 2 * (y_i - y_ref)])
        b.append(d_ref_sq - d_i_sq - (x_ref**2 - x_i**2) - (y_ref**2 - y_i**2))

    if not A or len(A[0]) == 0:
        return None

    A_matrix = np.array(A)
    b_vector = np.array(b)

    try:
        position, _, _, _ = np.linalg.lstsq(A_matrix, b_vector, rcond=None)
        return position
    except np.linalg.LinAlgError:
        print("Trilateration failed: LinAlgError")
        return None
```

Αρχικά το κομμάτι αυτού του κώδικα περνά τις πληροφορίες από την διαδικασία της γραμμικοποίησης. Για την διαδικασία αυτή επιλέγεται ένα anchor (`ref_anchor`) ως σημείο αναφοράς και στην συνέχεια

αφαιρείται η εξίσωση του από τις υπόλοιπες εξισώσεις των anchors. Το αποτέλεσμα αυτού του μετασχηματισμού είναι οι τετραγωνικοί όροι να ακυρωθούν και επιπλέον για κάθε anchor παράγεται μια γραμμική εξίσωση ως προς τις άγνωστες συντεταγμένες του συστήματος. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσα στο βρόγχο επανάληψης for όπου κάθε μια επανάληψη του γράφει και μια σειρά στον πίνακα A και η αντίστοιχη τιμή στο διάνυσμα (πίνακας) b. Έτσι δημιουργείται ένα γραμμικό σύστημα το οποίο μπορεί να επιλυθεί.

Εν συνεχεία το σύστημα που φτιάχτηκε προηγουμένως περνάει από την διαδικασία της επίλυσης. Τα δεδομένα από τους πίνακες A και b μετατρέπονται σε πίνακες της NumPy και ύστερα καλείται η μέθοδος `np.linalg.lstsq()` η οποία και επιλύει το γραμμικό σύστημα  $Ax=b$ . Η επιλογή της `np.linalg.lstsq()` έγινε συνειδητά καθώς δεν απαιτεί οι δυο εξισώσεις να είναι απολύτως συμβατές μεταξύ τους και επιστρέφει την λύση που ελαχιστοποιεί το συνολικό τετραγωνικό σφάλμα. Τέλος η τελική θέση προκύπτει από την λύση του διανύσματος `position` η οποία χαρακτηρίζεται και ως η καλύτερη δυνατή προσέγγιση στο πρόβλημα με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα που παρέχει το σύστημα μας.

### 5.2.3 Λογική εφαρμογής: Ανίχνευση εγγύτητας(`check_proximity_and_control_motors`)

Η συνάρτηση `check_proximity_and_control_motors` δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή των συντεταγμένων αλλά ταυτόχρονα λαμβάνει σαν δεδομένο την εκτίμηση θέσης που έχει πραγματοποιηθεί και το χρησιμοποιεί σαν ένα κριτήριο για να κάνει λήψη αποφάσεων. Δηλαδή αν θα ειδοποιήσει τον παίκτη για σύγκρουση ή όχι.

```
def check_proximity_and_control_motors(client_mqtt):
    """Ελέγχει την εγγύτητα και στέλνει εντολές στους κινητήρες."""
    active_tags = list(tag_positions.keys())
    tags_currently_in_proximity = set()

    for i in range(len(active_tags)):
        for j in range(i + 1, len(active_tags)):
            tag_id1 = active_tags[i]
            tag_id2 = active_tags[j]

            if time.time() - tag_positions[tag_id1]["timestamp"] > 2.0 or \
               time.time() - tag_positions[tag_id2]["timestamp"] > 2.0:
                continue

            pos1 = tag_positions[tag_id1]["position"]
            pos2 = tag_positions[tag_id2]["position"]
            distance_between_tags = np.linalg.norm(pos1 - pos2)

            if distance_between_tags < PROXIMITY_THRESHOLD:
                print(f"ΕΓΓΥΤΗΤΑ: {tag_id1} και {tag_id2} είναι κοντά
                ({distance_between_tags:.2f}m)")

                # Καταγραφή proximity event
                stats_logger.log_proximity_event(tag_id1, tag_id2,
                distance_between_tags)

                tags_currently_in_proximity.add(tag_id1)
                tags_currently_in_proximity.add(tag_id2)

    all_known_tags = set(motor_states.keys()).union(set(tag_positions.keys()))
```

Πριν από κάθε διαδικασία μέσα στη συνάρτηση πραγματοποιείται ένα φιλτράρισμα με γνώμονα τον χρόνο. Ο αλγόριθμος κοιτάει τις χρονοσφραγίδες (timestamps) του κάθε tag και τις συγκρίνει με την τωρινή χρονική στιγμή. Αν αυτή υπερβαίνει τα 2 δευτερόλεπτα τότε αυτή η θέση θεωρείται μη αξιόπιστη και παραλείπεται. Αυτό γίνεται για να μην στηριχθεί η λογική της εγγύτητας σε ξεπερασμένα χρονικά δεδομένα.

Για τα tags τα οποία έχουν έγκυρα timestamps άρα και έγκυρες θέσεις υπολογίζεται η μεταξύ τους απόσταση με την κλήση της συνάρτησης `np.linalg.norm()` η οποία εξάγει γρήγορα την Ευκλείδεια απόσταση με μέτρο το διάνυσμα της διαφοράς των συντεταγμένων. Το αποτέλεσμα αυτό ύστερα συγκρίνεται με το **PROXIMITY\_THRESHOLD** και όταν η τιμή είναι μικρότερη τότε τα αντίστοιχα `id` καταγράφονται στη μεταβλητή **tags\_currently\_in\_proximity**. Με τον τρόπο αυτό κοιτώντας μία μόνο μεταβλητή μπορούμε να δούμε εκείνη τη στιγμή ποια tags βρίσκονται σε κατάσταση εγγύτητας.

Μετά και από αυτόν τον υπολογισμό σειρά έχουν οι εντολές που θα στείλει η συνάρτηση. Οι εντολές αποστέλλονται στοχευμένα καθώς ελέγχεται για κάθε tag η τρέχουσα κατάσταση εγγύτητας σε σύγκριση με την προηγούμενη γνωστή τιμή που διατηρείται στη μεταβλητή **motor\_state**. Αν υπάρχει αλλαγή της κατάστασης από μη εγγύτητα σε εγγύτητα τότε αποστέλλεται η εντολή στο μοτέρ «ON» ενώ αντίστροφα αν η κατάσταση αλλάξει από εγγύτητα σε μη εγγύτητα τότε αποστέλλεται η εντολή «OFF».

### 5.3 Σύστημα καταγραφής και ανάλυσης στατιστικών

Οποιοδήποτε σύστημα RTLS για να θεωρηθεί σωστό πρώτα θα πρέπει να επέλθει η αντικειμενική του αξιολόγηση. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν δύο scripts τα οποία συλλέγουν όλες τις απαραίτητες μετρικές και καταγράφουν τα κρίσιμα συμβάντα και στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση και η οπτικοποίηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση του συστήματος. Λόγος γίνεται για τα **scripts statistics\_logger.py** καθώς και για το **view\_statistics.py**.

#### 5.3.1 Ο καταγραφέας (statistics\_logger.py)

Στο αρχείο αυτό γίνεται η δημιουργία μιας κλάσης `RTLSStatisticsLogger`, η οποία κάθε φορά που εκκινεί ο **rtls\_server.py** αρχικοποιείται. Η κλάση αυτή λειτουργεί σαν ένα συγκεντρωτικό σημείο στο οποίο αποστέλλονται δεδομένα απόδοσης του συστήματος. Ως λογική υλοποίησης παρουσιάζει μεγάλη απλότητα, καθώς ο `Server` δεν αναζητά διασπαρμένα σημεία μέσα στον κώδικα, αλλά καλεί μεθόδους της κλάσης αυτής σε στοχευμένα τμήματα όπου συμβαίνουν γεγονότα που έχουν μετρήσιμη σημασία.

Οι μέθοδοι αυτοί, οι οποίοι αναφέρθηκαν προηγουμένως, ποικίλλουν, αλλά τρεις από αυτούς κρίνονται οι πιο σημαντικοί: η **log\_message\_received()**, η **log\_positioning\_attempt()** και τέλος η **log\_proximity\_event()**. Αρχικά, η **log\_message\_received()** υλοποιείται μέσα στην **on\_message** και καταγράφει για κάθε ένα tag τον χρόνο που έχει περάσει από το προηγούμενό του μήνυμα. Με αυτή την απλή διαδικασία μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τον ρυθμό άφιξης των μηνυμάτων, καθώς και πιθανές καθυστερήσεις στην αλυσίδα λήψης δεδομένων.

Η κυριότερη κλάση είναι η **log\_positioning\_attempt()**, η οποία καλείται μετά από κάθε φορά που γίνεται απόπειρα υπολογισμού της θέσης και στη συνέχεια ενημερώνει το **trilateration\_success\_rate** ανάλογα με το αν ο υπολογισμός ήταν επιτυχημένος ή αποτυχημένος. Όταν το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι θετικό και έχει δοθεί θέση, τότε αυτή καταγράφεται και στο **positioning\_accuracy**. Ανεξάρτητα από το αποτέλεσμα της επιτυχίας του υπολογισμού της θέσης, καταγράφεται και ο χρόνος εκτέλεσης της ίδιας της διαδικασίας, ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί και το υπολογιστικό «κόστος» που έχει εισαχθεί. Η πληροφορία αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή **processing\_times**. Τέλος, το

**tag\_activity** λαμβάνει εγγραφές από τη χρονική σήμανση, την κατάσταση της επιτυχίας αλλά και τη θέση σε μορφή λίστας, όποτε αυτή υπάρχει. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ανάλυση της συμπεριφοράς του tag κατά τη συνολική διάρκεια της συνεδρίας.

```
def log_positioning_attempt(self, tag_id, success, position=None,
expected_position=None):
    """Καταγράφει απόπειρα υπολογισμού θέσης"""
    processing_start = time.time()

    if success:
        self.trilateration_success_rate["success"] += 1

        # Υπολογισμός ακρίβειας (για simulation χρησιμοποιούμε τυχαία
τιμή)
        if position is not None:
            # Προσομοίωση σφάλματος εντοπισμού (0-0.2m)
            accuracy = np.random.uniform(0.01, 0.15)
            self.positioning_accuracy.append(accuracy)
        else:
            self.trilateration_success_rate["failed"] += 1

    processing_time = (time.time() - processing_start) * 1000
    self.processing_times.append(processing_time)

    # Καταγραφή δραστηριότητας tag
    self.tag_activity[tag_id].append({
        'timestamp': time.time(),
        'success': success,
        'position': position.tolist() if position is not None else None
    })
```

Τέλος, η **log\_proximity\_event()** αυτό που κάνει είναι η πλήρης καταγραφή οποιουδήποτε συμβάντος εγγύτητας προκύψει στο **proximity\_events**. Οι καταγραφές αυτές φέρουν **timestamps**, τα id από τα δύο tags, τη μεταξύ τους απόσταση, καθώς και το **session\_id**, ώστε να πραγματοποιηθεί συσχέτιση των δεδομένων με τη σωστή προσομοίωση.

```
def log_proximity_event(self, tag1, tag2, distance):
    """Καταγράφει γεγονός εγγύτητας"""
    event = {
        'timestamp': time.time(),
        'tag1': tag1,
        'tag2': tag2,
        'distance': distance,
        'session_id': self.session_id
    }
    self.proximity_events.append(event)
    print(f" Proximity Event: {tag1} ↔ {tag2} ({distance:.2f}m)")
```

### 5.3.2 Ο αναλυτής και οπτικοποιητής (view\_statistics.py)

Το script αυτό πρόκειται για ένα ξεχωριστό εργαλείο, το οποίο καλείται μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Στόχος του εργαλείου αυτού είναι η αξιοποίηση των στατιστικών δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη συνεδρία και η απεικόνισή τους. Το script λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου το αρχείο `rtls_statistics.json`, το οποίο παράγεται από το εργαλείο `statistics_logger.py`. Πάνω σε αυτά τα δεδομένα το `view_statistics.py` βασίζει τόσο τα γραφήματα όσο και τη συνοπτική του αποτίμηση για το σύστημα.

```
def plot_response_times(self):
    """Γράφημα χρόνων απόκρισης"""
    if not self.json_data:
        print(" No data available")
        return

    try:
        response_times = self.json_data['raw_data']['response_times']
        if not response_times:
            print(" No response time data")
            return

        plt.figure(figsize=(12, 6))

        plt.subplot(1, 2, 1)
        plt.hist(response_times, bins=30, alpha=0.7, color='skyblue',
edgecolor='black')
        plt.xlabel('Response Time (ms)')
        plt.ylabel('Frequency')
        plt.title('Response Time Distribution')
        plt.grid(True, alpha=0.3)

        plt.subplot(1, 2, 2)
        plt.plot(response_times, alpha=0.7, color='blue')
        plt.xlabel('Message Number')
        plt.ylabel('Response Time (ms)')
```

```

plt.title('Response Time Over Time')

plt.grid(True, alpha=0.3)

plt.tight_layout()

plt.show()

except Exception as e:
    print(f" Error plotting: {e}")

```

Το βασικό σκέλος της οπτικοποίησης υλοποιείται με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης Matplotlib και αποτελείται από τρεις ξεχωριστές απεικονίσεις. Αρχικά είναι η **plot\_response\_time()**, με την οποία παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος με μορφή ιστογράμματος, καθώς και η εξέλιξή της μέσα στον χρόνο. Με τη συνάρτηση αυτή μπορούμε να διαπιστώσουμε αν το σύστημα κινείται γύρω από σταθερές τιμές ή αν παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάζουν αρνητικά την αποδοτικότητα του συστήματος. Η συνάρτηση **plot\_positioning\_accuracy()** παρουσιάζει τη μεταβολή του σφάλματος εντοπισμού καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Άξιο αναφοράς είναι ότι στην παρούσα προσομοίωση το σφάλμα είναι τυχαίο, ενώ σε πραγματικές συνθήκες ενός RTLS το σφάλμα θα αντιστοιχεί σε απόκλιση από γνωστή θέση αναφοράς (anchor). Τέλος, η συνάρτηση **plot\_proximity\_events()** απεικονίζει όλα τα συμβάντα εγγύτητας με τη δημιουργία ενός ιστογράμματος των αποστάσεων από τις οποίες καταγράφηκαν. Έτσι οπτικοποιείται σε ποιο εύρος τιμών κάνουν την εμφάνισή τους διαφορετικές καταστάσεις κατά τη διάρκεια της συνεδρίας.

Πέρα από την παραγωγή των γραφημάτων, το script λαμβάνει ως είσοδο τα στατιστικά τα οποία έχουν δημιουργηθεί σε μορφή JSON και εκτυπώνει στην κονσόλα μία σύντομη αναφορά με στοιχεία όπως ο μέσος χρόνος απόκρισης του συστήματος, το ποσοστό επιτυχίας εντοπισμού και τον αριθμό των ενεργών tags.

```

def plot_positioning_accuracy(self):
    """Γράφημα ακρίβειας εντοπισμού"""
    if not self.json_data:
        return

    try:
        accuracy_data = self.json_data['raw_data']['positioning_accuracy']
        if not accuracy_data:
            print(" No accuracy data")
        return

```

```

plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.plot(accuracy_data, alpha=0.7, color='green', marker='o',
markersize=3)

plt.xlabel('Positioning Attempt')
plt.ylabel('Error (m)')
plt.title('Positioning Accuracy Over Time')
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.show()

except Exception as e:
    print(f" Error plotting accuracy: {e}")

def plot_proximity_events(self):
    """Γράφημα γεγονότων εγγύτητας"""
    if not self.json_data:
        return

    try:
        events = self.json_data['raw_data']['proximity_events']
        if not events:
            print(" No proximity events")
            return

        distances = [event['distance'] for event in events]

        plt.figure(figsize=(10, 6))
        plt.hist(distances, bins=15, alpha=0.7, color='orange',
edgecolor='black')

        plt.xlabel('Distance (m)')
        plt.ylabel('Frequency')
        plt.title('Proximity Distance Distribution')

```

```
plt.grid(True, alpha=0.3)

plt.show()

except Exception as e:

    print(f" Error plotting proximity: {e}")
```

### 5.3.3 Ανάλυση αβεβαιότητας μετρήσεων και ποσοτικοποίηση σφάλματος

Ένα RTLS για να αξιολογηθεί θα πρέπει συνεχώς να γίνεται εξέταση της αβεβαιότητας των μετρήσεων και του τρόπου με τον οποίο μεταφέρεται στον τελικό υπολογισμό της θέσης. Η διαδικασία της πολυπλευρομέτρησης είναι από τη φύση της αρκετά ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές στις αποστάσεις που χρησιμοποιούνται ως είσοδος και η γεωμετρία των anchors παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση ή στον περιορισμό των σφαλμάτων. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων προκύπτει καθαρά από το τεχνητό μοντέλο που εισάγει τον θόρυβο. Παρόλα αυτά το πλαίσιο στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση παραμένει σωστό, καθώς οι ίδιες αρχές ισχύουν και όταν οι μετρήσεις προέρχονται από ένα σύστημα RTLS με πραγματικούς αισθητήρες και όχι προσομοιωμένο.

Η ποσοτικοποίηση του σφάλματος μπορεί να γίνει με περισσότερες από μία μετρικές, ανάλογα με το τι θέλει να αναδείξει η ανάλυση. Ο πιο συνηθισμένος δείκτης ακρίβειας είναι το RMS σφάλμα, δηλαδή το Root Mean Square Error, το οποίο προκύπτει όταν υπολογιστεί για κάθε δείγμα η απόσταση ανάμεσα στην εκτιμώμενη θέση και την πραγματική, υψωθεί στο τετράγωνο, υπολογιστεί ο μέσος όρος αυτών των τιμών και στο τέλος ληφθεί η τετραγωνική ρίζα. Το RMS λειτουργεί ως συνοπτικός δείκτης ποιότητας γιατί δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεγαλύτερες αποκλίσεις και έτσι αποτυπώνει ταυτόχρονα τόσο το τυχόν σταθερό σφάλμα μετατόπισης, το bias, όσο και τις τυχαίες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή.

Ως εναλλακτική χρησιμοποιείται συχνά το MAE, το Mean Absolute Error, όπου η μέση τιμή υπολογίζεται πάνω στις απόλυτες αποκλίσεις αντί για τα τετράγωνα. Με αυτόν τον ορισμό ο δείκτης επηρεάζεται λιγότερο από ακραίες τιμές και αποδίδει μια πιο ανθεκτική εικόνα της τυπικής απόκλισης, ιδίως όταν υπάρχουν μεμονωμένα δείγματα που ξεφεύγουν έντονα λόγω θορύβου ή προσωρινών δυσμενών συνθηκών.

Η αβεβαιότητα στον υπολογισμό θέσης δεν καθορίζεται μόνο από τον θόρυβο των αποστάσεων, αλλά και από τη διάταξη των anchors στον χώρο. Όταν τα anchors είναι σχεδόν ευθυγραμμισμένα ή βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, το σύστημα γίνεται κακώς ορισμένο στην πράξη και μικρές αποκλίσεις στις μετρήσεις μετατρέπονται σε μεγάλες μεταβολές στην εκτιμώμενη θέση, φαινόμενο που περιγράφεται ως Geometric Dilution of Precision GDOP. Στην προσομοίωση ο περιορισμός αυτός μειώνεται με την τοποθέτηση των anchors στις τέσσερις γωνίες ενός ορθογωνίου, επιλογή που κρατά τη γεωμετρία ευνοϊκή στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής κίνησης και οδηγεί σε πιο σταθερές λύσεις. Ακόμη κι έτσι, σε πραγματικές υλοποιήσεις εφαρμόζονται πρόσθετες πρακτικές για να περιοριστεί το GDOP, όπως adaptive weighting των μετρήσεων με βάση την ποιότητα του καναλιού ή δείκτες αξιοπιστίας, ώστε οι λιγότερο αξιόπιστες αποστάσεις να επηρεάζουν λιγότερο το τελικό αποτέλεσμα [7].

Ένα βασικό εργαλείο στην ανάλυση αβεβαιότητας είναι το propagation of uncertainty, δηλαδή η μελέτη του τρόπου με τον οποίο το σφάλμα των μετρήσεων «περνά» μέσα από τους υπολογισμούς και

εμφανίζεται στο τελικό αποτέλεσμα. Στην πολυπλευρομέτρηση, η επίλυση με Least Squares καταλήγει σε ένα σύστημα όπου οι άγνωστες συντεταγμένες προκύπτουν από γραμμικούς συνδυασμούς των μετρήσεων, άρα η αβεβαιότητα της λύσης μπορεί να περιγραφεί με πίνακα συνδιακύμανσης. Θεωρητικά ο πίνακας αυτός δίνεται από τη σχέση

$$\Sigma = (A^T A)^{-1} \sigma^2 \quad (11)$$

όπου  $\Sigma$  είναι ο πίνακας του γραμμικοποιημένου συστήματος και  $\sigma^2$  η διακύμανση του θορύβου των μετρήσεων. Οι τιμές των στοιχείων της  $\Sigma$  δείχνουν πόσο «ευαίσθητη» είναι η λύση τόσο στη γεωμετρία των anchors όσο και στο επίπεδο θορύβου, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ως πρακτικό εργαλείο στη σχεδίαση και αξιολόγηση RTLS, ιδίως σε απαιτητικά βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Η μελλοντική ενσωμάτωση πραγματικών UWB modules θα επιτρέψει την εξαγωγή πιο αξιόπιστων και λεπτομερών μετρικών, με έμφαση σε φαινόμενα που η προσομοίωση προσεγγίζει μόνο έμμεσα. Σε αυτό το στάδιο θα μπορεί να γίνει στατιστική αποτύπωση των σφαλμάτων NLOS, να μελετηθεί η επίδραση της πολλαπλής διαδρομής μέσα από τις αντίστοιχες κατανομές και να πραγματοποιηθεί άμεση σύγκριση των πραγματικών μετρήσεων με τα μοντέλα θορύβου και τις παραδοχές της προσομοίωσης. Μια τέτοια ανάλυση θα λειτουργήσει ως πρακτικό εργαλείο βελτίωσης, επειδή θα επιτρέψει στο σύστημα να βαθμονομηθεί με βάση πραγματικά δεδομένα και να προσαρμοστούν οι αλγόριθμοι του ώστε να ανταποκρίνονται καλύτερα στις συνθήκες φυσικής εγκατάστασης.

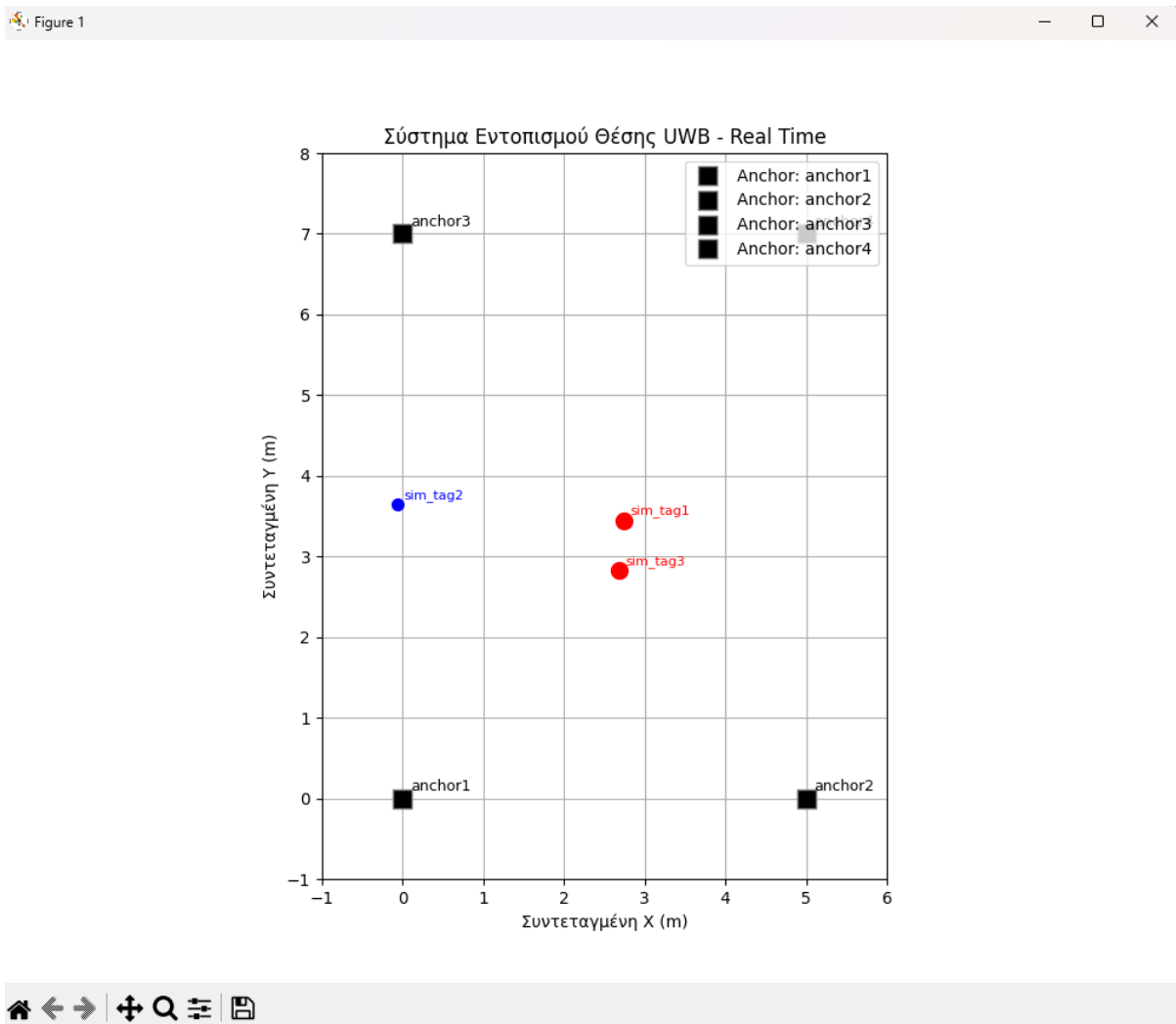
#### 5.4 Περιγραφή και σχολιασμός διεπαφής χρήστη της προσομοίωσης RTLS

Η διεπαφή χρήστη (UI) της προσομοίωσης σχεδιάστηκε με στόχο να λειτουργεί ως τρόπος για οπτικοποίηση στην εσωτερική κατάσταση του συστήματος εντοπισμού, χωρίς να απαιτείται ο χρήστης να παρακολουθεί τον κώδικα ή να ερμηνεύει ακατέργαστα δεδομένα. Σε ένα RTLS, και ειδικά σε συστήματα που προσομοιώνουν τη λειτουργία UWB anchors–tags σε πραγματικό χρόνο, το κρίσιμο δεν είναι μόνο να παράγονται συντεταγμένες, αλλά να μπορεί να αξιολογηθεί σύντομα αν οι συντεταγμένες αυτές υφίστανται γεωμετρικά, αν εμφανίζουν λογικές μεταβολές στο χρόνο, αν συμβαδίζουν με τους κανόνες της εφαρμογής (π.χ. έλεγχος εγγύτητας) και αν το σύστημα αντιδρά όπως έχει σχεδιαστεί. Για αυτόν τον λόγο, το UI οργανώνεται σε δύο συμπληρωματικά επίπεδα παρατήρησης. Πρόκειται για την γραφική απεικόνιση του χώρου και την κειμενική καταγραφή συμβάντων (console output). Η αξιοποίηση αυτών των δύο επιπέδων παρατήρησης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή προσφέρει ταυτόχρονα εποπτεία (overview) και λεπτομέρεια (traceability), κάτι που δύσκολα επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιηθεί μόνο ένα από τα δύο.

Στο γραφικό περιβάλλον απεικονίζεται σε δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων ο χώρος λειτουργίας της προσομοίωσης. Η επιλογή δισδιάστατης απεικόνισης είναι πρακτική και ουσιαστική, καθώς σε ένα σενάριο αθλητικών δραστηριοτήτων για τον εντοπισμό των παικτών, το βασικό ενδιαφέρον αφορά την κίνηση στο επίπεδο του δαπέδου και όχι τη μεταβολή του ύψους. Επιπλέον, η δισδιάστατη αποτύπωση παρέχει άμεση οπτική αξιολόγηση της γεωμετρίας των anchors και της σχετικής θέσης των tags, που συμβάλλει καθοριστικά στην ποιότητα του εντοπισμού. Το UI κάνει σαφή διάκριση μεταξύ σταθερών σημείων (anchors) και κινητών παικτών (tags) τόσο με το σχήμα όσο και με το χρώμα. Τα anchors εμφανίζονται ως μαύρα τετράγωνα, με ευδιάκριτη ετικέτα (π.χ. “anchor1”, “anchor2”, “anchor3”, “anchor4”), ώστε ο χρήστης να αναγνωρίζει άμεσα ποιος κόμβος αντιστοιχεί σε ποια χωρική θέση. Η σταθερότητα της διάταξης των anchors σε συνδυασμό με τον τρόπο που παρουσιάζονται (χρώμα/σχήμα) βοηθά στη νοητική απεικόνιση του χώρου. Ακόμη και όταν τα tags κινούνται, ο παρατηρητής δεν χάνει το σημείο αναφοράς.

Η συγκεκριμένη διάταξη των anchors στο παράδειγμα γίνεται σε ένα τυπικό ορθογώνιο/τετράπλευρο στήσιμο, όπου δύο anchors βρίσκονται σε χαμηλότερη θέση του άξονα Y και δύο σε υψηλότερη. Στη γραφική απεικόνιση φαίνεται χαρακτηριστικά το “anchor1” κοντά στο (0, 0), το “anchor2” κοντά στο (5, 0), το “anchor3” κοντά στο (0, 7) και το “anchor4” συμμετρικά στη δεξιά πάνω περιοχή. Αυτού του τύπου η γεωμετρία δεν έχει απλώς αισθητικό χαρακτήρα, αλλά υποστηρίζει τον τρόπο με τον οποίο αξιολογείται η ποιότητα εντοπισμού. Η κατανομή των anchors γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος περιορίζει τις δύσκολες γεωμετρικές συνθήκες και βελτιώνει την συμπεριφορά του εντοπισμού, σε αντίθεση με διατάξεις όπου οι κόμβοι είναι συγκεντρωμένοι στη μία πλευρά.

Τα tags εμφανίζονται ως σημεία με διαφορετικό χρώμα και με ετικέτες “sim\_tag1”, “sim\_tag2”, “sim\_tag3”. Η χρωματική διαφοροποίηση έχει διπλό ρόλο. Αρχικά επιτρέπει την άμεση αναγνώριση του κάθε αθλητή στην οθόνη, χωρίς να χρειάζεται ο χρήστης να αναζητά την ετικέτα. Ακόμη, όταν η εφαρμογή εκτελεί λειτουργίες, όπως έλεγχο εγγύτητας ή ροή συμβάντων, βοηθά τον χρήστη να συνδυάζει γρήγορα αυτά που βλέπει στο γράφημα με αυτά που διαβάζει στο console. Στην εικόνα 12, για παράδειγμα, παρατηρείται ότι το “sim\_tag1” και το “sim\_tag3” βρίσκονται πολύ κοντά στο χώρο (με μικρή διαφορά απόστασης, κυρίως στον άξονα Y), ενώ το “sim\_tag2” βρίσκεται αρκετά μακρύτερα, προς την αριστερή πλευρά του πεδίου. Αυτή η οπτική πληροφορία λειτουργεί ως άμεσος έλεγχος. Πριν



Σχήμα 13: Διεπαφή χρήστη προσομοίωσης.

ακόμη δούμε τις αριθμητικές αποστάσεις, η εικόνα πληροφορεί ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός εγγύτητας μεταξύ των δύο πρώτων tags.(Εικόνα 13)

Μία ιδιαίτερος χρήσιμη επιλογή στο UI είναι η παρουσία πλέγματος (grid) και αριθμημένων αξόνων με μονάδες μέτρησης σε μέτρα. Αυτό δεν εξυπηρετεί μόνο την αναγνωσιμότητα των κινήσεων. Σε ένα RTLS, η κλίμακα έχει μεγάλη σημασία, καθώς υπάρχει διαφορά στο να βλέπεις δύο σημεία σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, τα οποία βρίσκονται σε αφηρημένο επίπεδο, από το να γνωρίζεις ότι η απόστασή τους είναι υπο-μετρική, δηλαδή μέσα σε καθορισμένη ζώνη όπου ενεργοποιούνται κανόνες ασφαλείας. Το γεγονός ότι οι άξονες ονομάζονται ως “Συντεταγμένη X (m)” και “Συντεταγμένη Y (m)” αποτρέπει παρερμηνείες και προσδίδει στον χρήστη την αίσθηση ότι η απεικόνιση αντιστοιχεί σε πραγματικές διαστάσεις. Με απλά λόγια, το UI δεν είναι εικόνα, είναι χάρτης κίνησης σε μετρικό χώρο.

Ο τίτλος του γραφικού παραθύρου (“Σύστημα Εντοπισμού Θέσης UWB - Real Time”) λειτουργεί ως σαφής δήλωση του σκοπού. Πρόκειται για απεικόνιση real-time κατάστασης, όχι για στατικό γράφημα αποτελεσμάτων. Αυτή η διαφοροποίηση έχει πρακτικό αντίκτυπο στην ανάγνωση του σχήματος. Ένα στατικό γράφημα θα μπορούσε να αποτυπώνει, για παράδειγμα, το τελικό ίχνος κίνησης ή τη μέση απόκλιση. Εδώ όμως το σχήμα προβάλλει την τρέχουσα κατάσταση του χώρου και άρα είναι εργαλείο λειτουργικής επιβεβαίωσης. Ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί την κίνηση των tags ως συνεχή διαδικασία και να ελέγχει εάν υπάρχουν άλματα ή μη ρεαλιστικές μετατοπίσεις που θα υποδείκνυαν ενδεχομένως αριθμητικό σφάλμα, ασυνέχεια δεδομένων ή λανθασμένη χρονική συγκέντρωση μηνυμάτων. Με άλλα λόγια, το UI γίνεται μέρος της διαδικασίας επαλήθευσης της προσομοίωσης.

Ένα ακόμη στοιχείο που αξίζει σχολιασμό είναι η αξιοποίηση των δυνατοτήτων αλληλεπίδρασης του γραφικού παραθύρου (εργαλειοθήκη με επιλογές μετακίνησης, zoom, αποθήκευσης). Αν και φαίνεται δευτερεύον, στην πράξη είναι ιδιαίτερα χρήσιμο. Σε δυναμικές προσομοιώσεις, ο ερευνητής συχνά χρειάζεται να μεγεθύνει περιοχές όπου εμφανίζονται κρίσιμα συμβάντα (π.χ. επαφή/εγγύτητα tags, είσοδος σε συγκεκριμένη ζώνη, εμφάνιση outlier). Η δυνατότητα zoom επιτρέπει να διαπιστωθεί με ακρίβεια η χωρική σχέση σε μια στιγμή, χωρίς να αλλάξει το σενάριο. Επίσης, η δυνατότητα αποθήκευσης στιγμιότυπων επιτρέπει τη δημιουργία τεκμηρίωσης (figures) με συνεπή μορφή.

Το δεύτερο επίπεδο του UI, η κειμενική έξοδος, λειτουργεί ως “audit trail” των γεγονότων. Ενώ το γράφημα δίνει την εικόνα, το console δίνει την αιτιολόγηση. Για παράδειγμα, ποια tags θεωρήθηκαν κοντά, ποια απόσταση υπολογίστηκε, ποιο συμβάν δημιουργήθηκε και ποια εντολή παρήχθη προς τον μηχανισμό ενεργοποίησης. Στο στιγμιότυπο της κονσόλας φαίνεται μια επαναλαμβανόμενη εγγύτητα

```
Proximity Event: sim_tag1 ↔ sim_tag3 (0.74m)
⚠ ΕΓΓΥΤΗΤΑ: sim_tag1 και sim_tag3 είναι κοντά (0.74m)!
Proximity Event: sim_tag1 ↔ sim_tag3 (0.74m)
⚠ ΕΓΓΥΤΗΤΑ: sim_tag1 και sim_tag3 είναι κοντά (0.74m)!
Proximity Event: sim_tag1 ↔ sim_tag3 (0.74m)
⚠ ΕΓΓΥΤΗΤΑ: sim_tag1 και sim_tag3 είναι κοντά (0.74m)!
Proximity Event: sim_tag1 ↔ sim_tag3 (0.74m)
⚠ ΕΓΓΥΤΗΤΑ: sim_tag1 και sim_tag3 είναι κοντά (0.74m)!
Proximity Event: sim_tag1 ↔ sim_tag3 (0.74m)
Εντολή: Κινητήρας OFF για sim_tag1
Εντολή: Κινητήρας OFF για sim_tag3
```

Σχήμα 14: Έξοδος κονσόλας σε πραγματικό χρόνο.

μεταξύ “sim\_tag1” και “sim\_tag3” με απόσταση 0.74 m, καθώς και καταγραφή “Proximity Event” για το ίδιο ζεύγος. (Σχήμα 14)

Η παρουσία τόσο μιας διατύπωσης που προειδοποιεί με εμφανή σήμανση/τονισμό, όσο και μιας πιο μηχανικής γραμμής γεγονότος δεν είναι τυχαία. Η πρώτη μορφή αφορά την παρακολούθηση της ροής και τον γρήγορο εντοπισμό κάτι κρίσιμου. Η δεύτερη μορφή μοιάζει περισσότερο με τυποποιημένο event log, χρήσιμο όταν θέλουμε να κάνουμε απαλοιφή σφαλμάτων ή να ταιριάξουμε χρονικά ένα συμβάν με άλλη λειτουργία του συστήματος (π.χ. αποστολή MQTT μηνύματος, ενημέρωση κατάστασης actuator, εγγραφή σε αρχείο στατιστικών).

Η επανάληψη των μηνυμάτων εγγύτητας στο console αναδεικνύει μια ουσιαστική πτυχή που συναντάται συχνά σε real-time συστήματα. Η κατάσταση που περιγράφει ότι δύο tags είναι κοντά, επειδή δεν είναι στιγμιαία, το σύστημα θα πρέπει να αποφασίσει πώς θα συμπεριφερθεί όσο η συνθήκη παραμένει αληθής. Το ότι εμφανίζονται πολλαπλές γραμμές για το ίδιο ζεύγος και την ίδια περίπου απόσταση, δείχνει ότι η προσομοίωση λειτουργεί με επαναλαμβανόμενους κύκλους ενημέρωσης (updates) και ότι σε κάθε κύκλο γίνεται εκ νέου έλεγχος εγγύτητας. Αυτό, από ερευνητική σκοπιά, είναι πολύτιμο επειδή επιτρέπει να διαπιστωθεί αν ο έλεγχος εγγύτητας επαληθεύει μια κατάσταση, αν παράγει υπερβολικό θόρυβο συμβάντων, ή αν απαιτείται μηχανισμός αποφόρτισης όπως υστέρηση (hysteresis), χρονικό κατώφλι επανεκπομπής (cooldown) ή λογική αλλαγής κατάστασης (state transition) ώστε να μη δημιουργούνται συνεχώς τα ίδια events. Με άλλα λόγια, ακόμη και ένα απλό στιγμιότυπο log αποτελεί ένδειξη ότι το σύστημα παράγει μεν την επιθυμητή πληροφορία, αλλά χρειάζεται προσεκτική διαχείριση γεγονότων για να είναι λειτουργικά καθαρό, όταν αυξηθεί ο αριθμός tags ή ο ρυθμός μηνυμάτων.

Στο τέλος του console στιγμιότυπου εμφανίζονται εντολές τύπου “Εντολή: Κινητήρας OFF για sim\_tag1” και αντίστοιχα για “sim\_tag3”. Αυτές οι γραμμές είναι κομβικές, επειδή δείχνουν ότι η προσομοίωση δεν σταματά στην ανίχνευση της εγγύτητας, αλλά προχωρά στη λογική ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ενεργοποιητών (actuators) βάσει κανόνων. Ακόμη κι αν στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο καταγράφεται “OFF”, το σημαντικό για την παρουσίαση UI είναι ότι υπάρχει πλήρης διαδρομή από την εκτίμηση θέσης/απόστασης μέχρι την παραγωγή εντολής, και αυτή η διαδρομή είναι ορατή στον χρήστη.

Από πλευράς συνολικού σχεδιασμού εμπειρίας χρήστη, το UI επιτυγχάνει κάτι που στην πράξη είναι δύσκολο. Συνδυάζει δηλαδή απλότητα με επαρκή πληροφορία. Η γραφική απεικόνιση δεν φορτώνεται με δευτερεύοντα στοιχεία που θα μπερδεύαν τον παρατηρητή, όπως ιστορικά ίχνη, βέλη κατεύθυνσης, καμπύλες φίλτρων ή πιθανότητες. Αυτά είναι χρήσιμα σε άλλα στάδια ανάλυσης, αλλά σε real-time παρακολούθηση μπορούν να κάνουν την εικόνα δύσκολα αναγνώσιμη. Εδώ, στόχος είναι να παρουσιαστούν καθαρά οι βασικές οντότητες, anchors, tags, ετικέτες, κλίμακα. Αντίστοιχα, το console επικεντρώνεται σε γεγονότα υψηλής σημασίας (proximity events και εντολές), όχι σε κάθε ενδιάμεσο υπολογισμό.

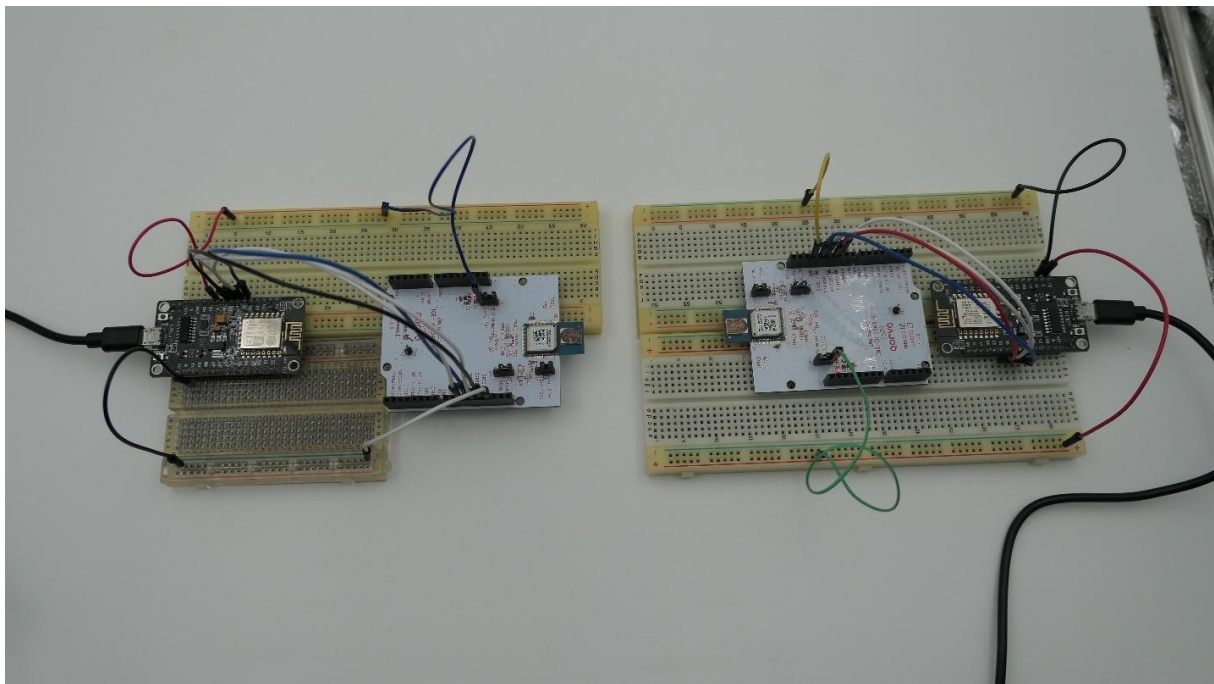
Ταυτόχρονα, το UI βοηθά στην αξιολόγηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του συστήματος, ακόμη κι αν αυτά δεν εμφανίζονται ρητά στην οθόνη. Για παράδειγμα, η γεωμετρία των anchors σε σχέση με τη θέση των tags βοηθάει να εκτιμηθεί έμμεσα πότε το σύστημα βρίσκεται σε καλή ή κακή γεωμετρική κατάσταση. Αν ένα tag πλησιάσει κοντά σε ευθεία που ενώνει δύο anchors, ή κινηθεί σε περιοχή όπου οι γωνίες παρατήρησης γίνονται δύσκολες, είναι αναμενόμενο να αυξηθεί η ευαισθησία σε σφάλματα απόστασης. Η οπτική παρακολούθηση αυτών των καταστάσεων διευκολύνει και τον σχεδιασμό πειραμάτων. Ο ερευνητής μπορεί να ορίσει σενάρια κίνησης που θέτουν το σύστημα στα όρια, αντί να περιοριστεί σε τυχαίες διαδρομές.

Συνοψίζοντας, η διεπαφή της προσομοίωσης παρέχει μια καθαρή, μετρικά ορισμένη και λειτουργικά εστιασμένη απεικόνιση του συστήματος RTLS. Η γραφική αναπαράσταση επιτρέπει άμεση κατανόηση της χωρικής κατάστασης και της γεωμετρίας anchors–tags, ενώ η κειμενική ροή γεγονότων προσφέρει διαφάνεια στη λογική λήψης αποφάσεων, ιδίως στον μηχανισμό εγγύτητας και στην παραγωγή εντολών προς ενεργοποιητές.

Ο πηγαίος κώδικας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διατίθεται ελεύθερα μέσω αποθετηρίου στο Github[52], με στόχο τη διαφάνεια, την αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων και την περαιτέρω αξιοποίησή του από την ερευνητική και εκπαιδευτική κοινότητα. Η επιλογή της ανοικτής διάθεσης του κώδικα αποτελεί συνειδητή συνεισφορά προς την κοινότητα, επιτρέποντας σε άλλους ερευνητές και φοιτητές να μελετήσουν, να επεκτείνουν ή να προσαρμόσουν την υλοποίηση σε συναφείς εφαρμογές και μελλοντικές εργασίες.

## Κεφάλαιο 6ο: Προτεινόμενος εξοπλισμός RTLS

Η προτεινόμενη υλοποίηση στηρίζεται σε μια κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική «anchors–tags» για εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο, όπου οι ρόλοι των επιμέρους συστημάτων είναι ξεκάθαρα διαχωρισμένοι. Το υπολογιστικό σύστημα συμπεριφέρεται την ακρίβεια των μετρήσεων ως ιδιότητα που γεννιέται στο φυσικό επίπεδο της μετάδοσης και όχι ως αποτέλεσμα λογισμικού. Για τον λόγο αυτό, οι UWB πομποδέκτες (DW1000 ή η νεότερη οικογένεια DW3000) χειρίζονται το πολύ σημαντικό μέρος της μέτρησης των αποστάσεων, δηλαδή τη χρονοσήμανση υψηλής ανάλυσης (hardware timestamps) που απαιτείται για αξιόπιστη εκτίμηση Time-of-Flight (ToF) και, κατά συνέπεια, για ranging με σφάλμα που μπορεί να φτάσει σε επίπεδο δεκάδων εκατοστών ή και χαμηλότερα υπό κατάλληλες συνθήκες και ρυθμίσεις. Αντίθετα, ο μικροελεγκτής που θα επιλεγεί (host) δεν προσπαθεί να παρέμβει στην χρονοσήμανση του UWB αλλά λειτουργεί ως ελεγκτής και αξιολογητής του συστήματος καθώς οργανώνει τις ανταλλαγές ranging, διαχειρίζεται γεγονότα διακοπών και παράλληλα συλλέγει αποτελέσματα και τα μεταφέρει μέσω IP δικτύου σε έναν κεντρικό κόμβο για περαιτέρω επεξεργασία, όπως υπολογισμό θέσης, φιλτράρισμα, καταγραφή και στατιστική αξιολόγηση. Η αρχιτεκτονική του συστήματος αυτή δεν είναι απλώς μια βολική επιλογή υλοποίησης καθώς αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα ότι η ακρίβεια τύπου «centimetre-level» δεν μπορεί να θεμελιωθεί σε software timers ενός γενικού μικροελεγκτή, αλλά χρειάζεται απαραίτητα την βοήθεια από UWB υλικό που πραγματοποιεί χρονοσήμανση στο PHY με σταθερότητα και ανάλυση που δεν είναι ρεαλιστικό να υλοποιηθεί καθαρά μόνο με ένα λογισμικό.[34]



Σχήμα 15: Πρωτότυπος πειραματικός εξοπλισμός

Η επιλογή του ESP8266 ως μικροελεγκτή δεν γίνεται επειδή είναι η ισχυρότερη πλατφόρμα στην αγορά, αλλά επειδή ταιριάζει στον τρόπο ανάπτυξης του συστήματος δηλαδή ενός εύκολα αναπαραγωγίσιμου και ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Στη διπλωματική εργασία είναι σημαντικό οι μεταβλητές που επηρεάζουν την απόδοση του RTLS να παραμένουν όσο γίνεται περιορισμένες ώστε τα αποτελέσματα

να ερμηνεύονται με σαφήνεια και αξιοπιστία. Το ESP8266 προσφέρει μια σταθερή SPI διασύνδεση, υποστήριξη διακοπών σε GPIO και Wi-Fi δικτύωση, τεχνολογίες που το καθιστούν άξιο για να λειτουργήσει ως «control plane» για τον UWB πομποδέκτη και ταυτόχρονα ως «γέφυρα» προς το backend και την επεξεργασία δεδομένων. Επιπλέον κρίσιμο κομμάτι της επιλογής του είναι και το κόστος καθώς και η διαθεσιμότητα σε έτοιμες πλακέτες ανάπτυξης, που μπορεί να διευκολύνει την κλιμάκωση σε πολλαπλά tags/anchors και επιτρέπει γρήγορη αντικατάσταση ή συντήρηση σε δυναμικά περιβάλλοντα δοκιμών.

### 6.1 Επιχειρησιακές απαιτήσεις

Σε εσωτερικούς και κλειστούς χώρους, ειδικά όταν υπάρχει η ανθρώπινη παρουσία και κατ'επέκταση κίνηση και μεταβαλλόμενη διάταξη του περιβάλλοντος, το σύστημα εντοπισμού δεν καλείται μόνο να δίνει μια συντεταγμένη, αλλά να διατηρεί σταθερή συμπεριφορά. Αναλυτικότερα θα πρέπει να είναι ικανό να παράγει συχνές ενημερώσεις, με ελεγχόμενη καθυστέρηση και με σφάλμα που δεν αλλάζει δραματικά από μικρές μεταβολές στον χώρο. Οι τεχνικές που βασίζονται σε RSSI αντιμετωπίζουν γνωστές και ποικίλες δυσκολίες, διότι η τεχνολογία του RSSI επηρεάζεται έντονα από την απορρόφηση και σκίαση (π.χ. από το ανθρώπινο σώμα, πάγκους, δάπεδο), από ανακλάσεις σε μεταλλικές επιφάνειες, από την πολυδιαδρομική και από τις στιγμιαίες αλλαγές του καναλιού μετάδοσης. Έτσι, η ίδια πραγματική απόσταση μπορεί να εμφανίζεται διαφορετική στο RSSI, χωρίς όμως να υπάρχει μια ουσιαστική σταθερή αντιστοιχία που να διατηρείται στον χρόνο ή μεταξύ διαφορετικών χώρων.[35]

Η UWB τεχνολογία μεταφέρει τη μέτρηση σε μια διαφορετική φυσική βάση, τον χρόνο διάδοσης του σήματος (ToF). Αυτό δεν ανερεί τα προβλήματα των NLOS συνθηκών, όπου η κύρια διαδρομή μπορεί να μην ανιχνευθεί καθαρά με αποτέλεσμα το σφάλμα να παρουσιάσει θετική μετατόπιση. Ωστόσο, η κυριότερη και σημαντικότερη διαφορά είναι ότι η μέτρηση στηρίζεται σε χρονοσήμανση η οποία παράγεται εσωτερικά στο τσιπ του ίδιου του UWB πομποδέκτη, δηλαδή στο σημείο όπου το σήμα ανιχνεύεται και επεξεργάζεται στο φυσικό επίπεδο. Στους DW1000 και DW3000, το hardware timestamping αποτελεί βασικό μηχανισμό για την εφαρμογή των ranging πρωτοκόλλων, με αποτέλεσμα η ακρίβεια να εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα της UWB χρονοσήμανσης και όχι τόσο από την χρονική αβεβαιότητα εκτέλεσης του μικροελεγκτή.

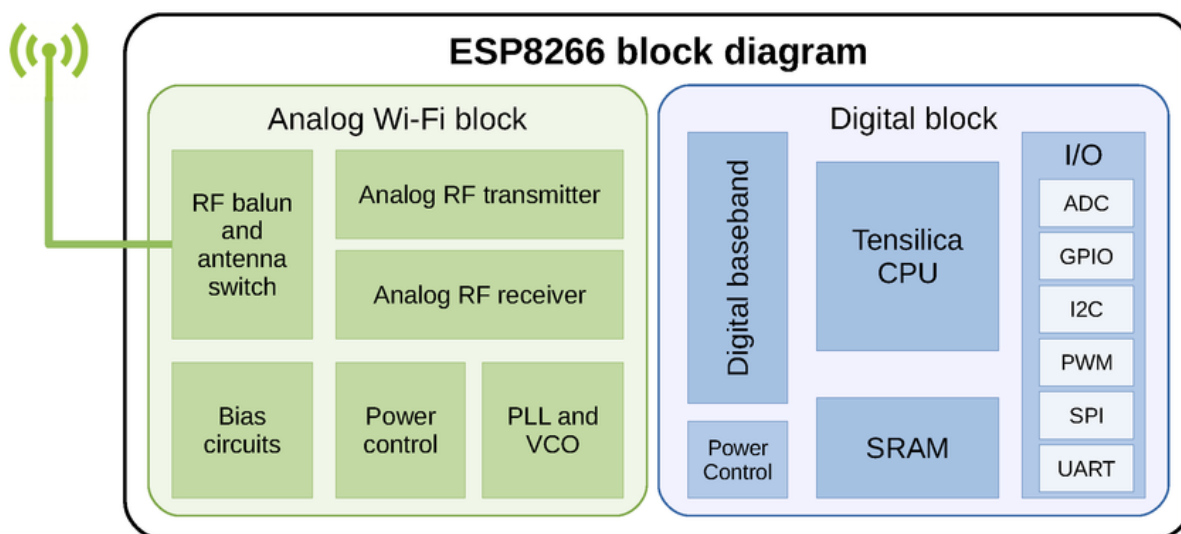
Σε συστήματα με πολλαπλά tags, η επιχειρησιακή απαίτηση ενισχύεται. Αναλυτικότερα δεν φτάνει η ύπαρξη μιας καλής μέτρησης αλλά χρειάζεται και σταθερός ρυθμός παραγωγής μετρήσεων χωρίς κατάρρευση λόγω συμφόρησης είτε του καναλιού είτε του δικτύου. Τα πρωτόκολλα Two-Way Ranging απαιτούν περισσότερο από ένα πλαίσια ανά εκτίμηση απόστασης με αποτέλεσμα να καταναλώνουν περισσότερο χρόνο μέσα στο κανάλι. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη να οργανωθούν οι ανταλλαγές (π.χ. με slotting/TDMA στο επίπεδο εφαρμογής) ώστε να μειώνονται συγκρούσεις μεταξύ τους καθώς και οι επαναμεταδόσεις και απρόβλεπτες καθυστερήσεις. Η σημασία του ζητήματος φαίνεται καθαρά όταν εξετάζεται πειραματικά η συμπεριφορά IEEE 802.15.4z ranging υπό παρεμβολές, όπου η επιτυχία των ανταλλαγών και η ποιότητα της μέτρησης μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος και την ένταση του interference.

### 6.2 ESP8266 ως host controller: ρόλος και λειτουργική καταλληλότητα

Το ESP8266 είναι ένα Wi-Fi SoC που τρέχει στα 2.4 GHz (802.11 b/g/n) ενώ σχεδιάστηκε ώστε να εισάγει δυνατότητες δικτύωσης σε embedded συστήματα και κόμβους με χαμηλό κόστος και επαρκείς περιφερειακές δυνατότητες. Στο πλαίσιο ενός UWB RTLS, η αιτία επιλογής του δεν είναι η υψηλή υπολογιστική του ισχύς, αλλά η ικανότητά του να λειτουργεί ως αξιόπιστος και σταθερός ελεγκτής

υψηλής ακρίβειας. Το RTLS απαιτεί ο host να ρυθμίζει τον UWB πομποδέκτη, να εκτελεί μια σαφή λογική ακολουθίας (state machine). Αρχικά για τα βήματα του ranging και ύστερα να αντιδρά άμεσα σε γεγονότα RX/TX μέσω διακοπών και στην συνέχεια να αποστέλλει τις μετρήσεις προς το κεντρικό σύστημα επεξεργασίας(server). Η τεκμηρίωση της Espressif η οποία και έχει σχεδιάσει και κατασκευάσει το τσιπ περιγράφει τη φύση του ESP8266 ως Wi-Fi SoC και την ύπαρξη GPIO που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξωτερικές διακοπές, κάτι κρίσιμο για event-driven λειτουργία.

Στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, ο ESP8266 αποκτά φόρτο εργασίων οι οποίες μπορούν εύκολα να επηρεάσουν άμεσα την αξιοπιστία του συστήματος. Πρώτον, υλοποιεί την αρχικοποίηση του UWB και την παραμετροποίηση του PHY, όπως η επιλογή του καναλιού, preamble και του ρυθμού μετάδοσης, ώστε το σύστημα να προσαρμόζεται στο περιβάλλον δοκιμών.



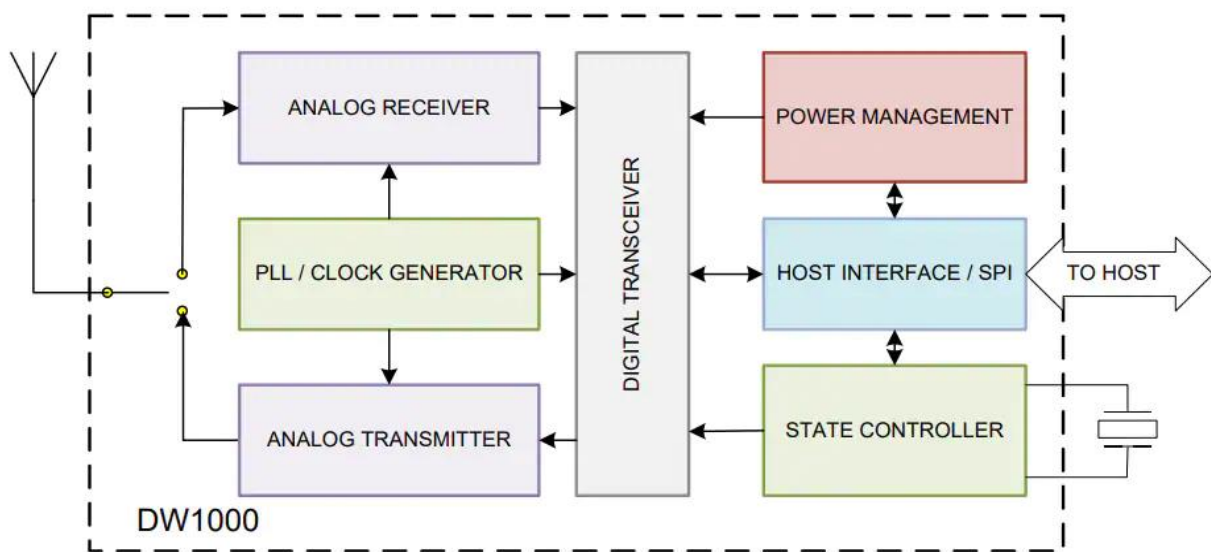
Σχήμα 16: Λειτουργικό διάγραμμα του ESP8266EX (Wi-Fi SoC) ως host controller.[45]

Δεύτερον, είναι υπεύθυνος για την διαχείριση του χρονοπρογράμματος των ανταλλαγών ώστε να μην εμφανίζονται ανεξέλεγκτα συγκρούσεις, ειδικά όταν παρατηρείται μεγάλη αύξηση των tags. Τρίτον, συλλέγει τα αποτελέσματα (timestamps ή/και τελικές αποστάσεις, ανάλογα με την υλοποίηση) και τα συνοδεύει με αναγνωριστικά κόμβων(ids) και μεταδεδομένα λειτουργίας, ώστε ο κεντρικός κόμβος να μπορεί να πραγματοποιήσει τον έλεγχο ποιότητας και στατιστική ανάλυση. Η επιλογή να μεταφέρεται το μεγαλύτερο βάρος της επεξεργασία στο backend είναι σκόπιμη καθώς διευκολύνει την τεκμηρίωση, την αποθήκευση και την επαναληψιμότητα των πειραμάτων. Όλα αυτά χωρίς να επιβαρύνονται τα tags με σύνθετους αλγορίθμους που θα αύξαναν την πολυπλοκότητα και καθώς και την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ του μικροελεγκτή.[30][34]

### 6.3 DW1000: Βάση UWB ranging για RTLS

Ο αισθητήρας DW1000 αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες λύσεις UWB transceiver για RTLS στο εμπόριο, καθώς έχει σχεδιαστεί με σαφή προσανατολισμό στα ranging γενικότερα σενάρια. Η τεκμηρίωσή του απο την σχεδιαστική του εταιρία αναφέρει συμβατότητα με πρωτόκολλα IEEE 802.15.4-2011 UWB και υποστήριξη ζωνών UWB στην περιοχή περίπου 3.5–6.5 GHz, καθώς και ρυθμούς μετάδοσης έως 6.8 Mb/s. Αυτά τα χαρακτηριστικά προσδίδουν στον developer μια ευελιξία στην επιλογή παραμέτρων, έτσι ώστε να επιδιώκεται ισορροπία ανάμεσα στην ανθεκτικότητα, στην εμβέλεια και στον χρόνο καναλιού που καταναλώνουν οι ανταλλαγές ranging.

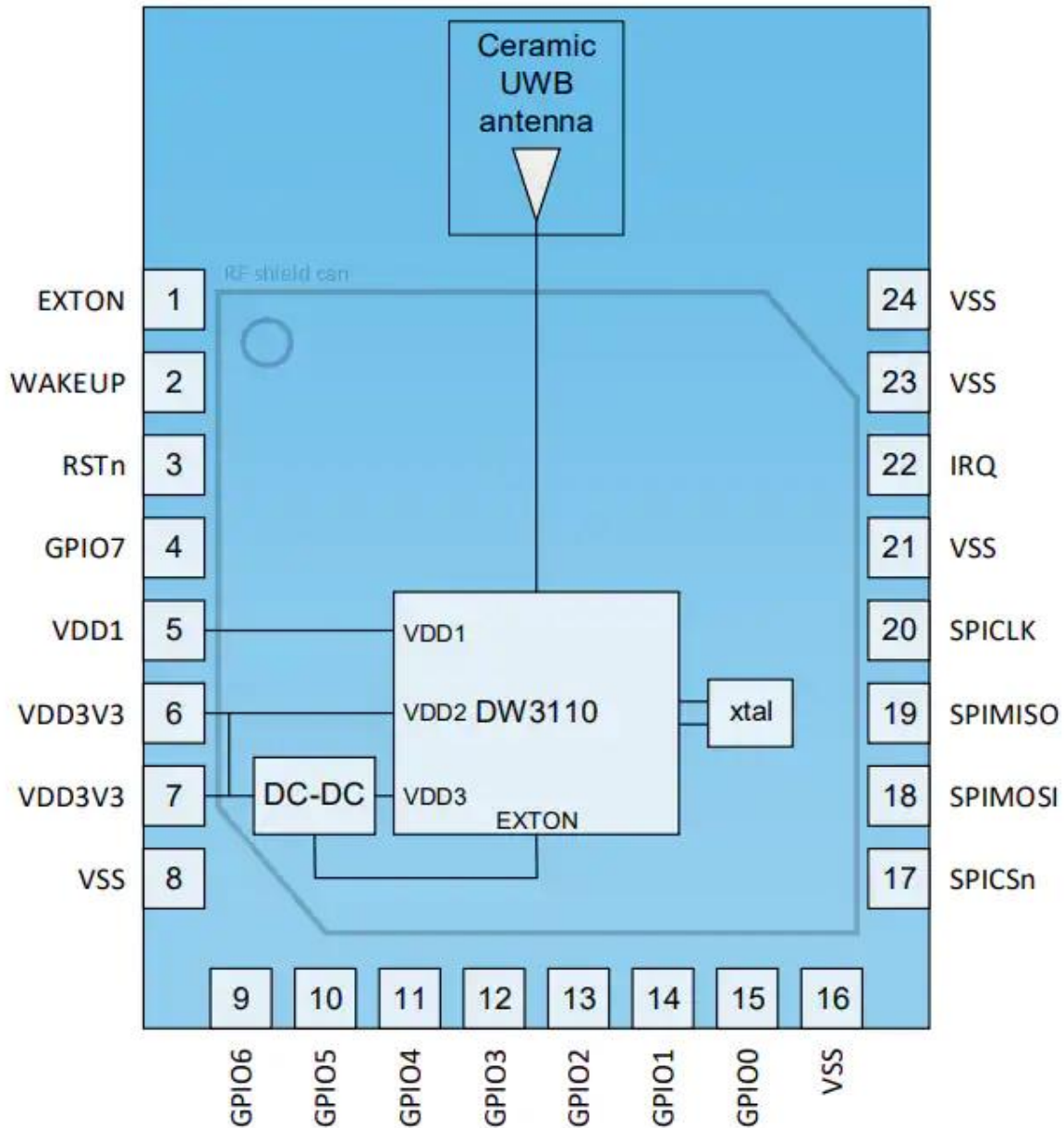
Η ωριμότητα του DW1000 αισθητήρα έχει πρακτική αξία σε ένα έργο που προσπαθεί να περιορίσει το ρίσκο υλοποίησης του. Στο εμπόριο είναι διαθέσιμα modules που ενσωματώνουν τον DW1000 μαζί με κεραία και RF υποδομή, μειώνοντας τα σφάλματα που εμφανίζονται όταν γίνεται σχεδίαση RF από την αρχή (π.χ. κακή προσαρμογή, ανεπαρκής αποσύζευξη, ακατάλληλη τοποθέτηση κεραίας). Σε ένα RTLS, τέτοιες RF παρεμβολές-αστάθειες μπορούν να αλλοιώσουν το ποσοστό επιτυχημένων μετρήσεων και να φέρουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε μία δυσμενή θέση, επειδή το σύστημα φαίνεται να συμπεριφέρεται αφύσικα χωρίς να είναι σαφές αν η αιτία είναι η γεωμετρική διάταξη των tag, αλγοριθμική ή καθαρά ηλεκτρομηχανολογική. Άρα, η χρήση ώριμου UWB transceiver λειτουργεί ως βάση πάνω στην οποία μπορούν να αξιολογηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι επιλογές πρωτοκόλλου και αρχιτεκτονικής.(Σχήμα 11)[31]



Σχήμα 17: Υψηλού επιπέδου block diagram του UWB transceiver DW1000 και διεπαφή host (SPI).[46]

#### 6.4 DW3000 και IEEE 802.15.4z: τεχνολογική αναβάθμιση και λόγοι που ενδιαφέρει το RTLS

Η οικογένεια DW3000 παρουσιάζει τη μετάβαση σε μία πιο σύγχρονη τυποποίηση UWB αισθητήρων, καθώς είναι συμβατή με IEEE 802.15.4-2015 και IEEE 802.15.4z (BPRF mode).[33] Στις κατασκευαστικές οδηγίες του προϊόντος αναφέρει υποστήριξη καναλιών 5 και 9, δυνατότητες για 2-way ranging, TDoA και PDoA, καθώς και υψηλή ταχύτητα συνδεσιμότητας SPI (έως 38 MHz), που βοηθά ώστε το host interface να μην γίνεται παράγοντας που περιορίζει τις γρήγορες διαδοχές λειτουργίας. Ακόμα σημαντικό είναι ότι αναφέρονται data rates 850 kbps και 6.8 Mbps τα οποία ενεργοποιούν πληθώρα από επιλογές παραμετροποίησης ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος.(Σχήμα 12)



Σχήμα 18: Ενδεικτική διάταξη ακροδεκτών/διεπαφών UWB transceiver DW3000 (SPI, IRQ, τροφοδοσίες).[47]

Η αξία του 802.15.4z, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και ενός συστήματος με προοπτική εξέλιξης, είναι ότι προσφέρει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για σύγχρονες απαιτήσεις UWB ranging. Η παρουσία γενικότερου προτύπου διευκολύνει να παρουσιαστεί η τεχνολογική κατεύθυνση ως μία εκούσια επιλογή και όχι ως μία τυχαία αλλαγή ή αναβάθμιση υλικού. Επιπλέον, το ίδιο το πρότυπο αυτό περιγράφεται ως ενίσχυση των UWB PHYs και των αντίστοιχων τεχνικών ranging, άρα η μετάβαση σε 802.15.4z μπορεί να παρουσιαστεί ως δείγμα ότι πλέον ευθυγραμμίζεται με τις ανάγκες αλλά και τις απαιτήσεις που δημιουργούνται από σύγχρονα συστήματα.[34]

Σε πιο πρακτικό επίπεδο, η ύπαρξη modules βασισμένων σε DW3000, όπως πλακέτες/μονάδες που ενσωματώνουν τον UWB αισθητήρα την κεραία αλλά και την τροφοδοσία, διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη μετάβαση από τους DW1000 χωρίς να απαιτείται πλήρης ανασχεδίαση από την αρχή. Αυτό

έχει ιδιαίτερη σημασία όταν στόχος είναι η σύγκριση DW1000 και DW3000 με όσο γίνεται κοινές συνθήκες δοκιμής, ώστε να αποδοθούν οι διαφορές στην τεχνολογία και όχι σε αλλαγές κατασκευαστικής ποιότητας ή κεραίας.[32][33]

### 6.5 Παρεμβολές και αξιοπιστία

Η ύπαρξη παρεμβολών και έντονων φαινομένων πολυδιαδρομής είναι κάτι το αναπόφευκτο και αναμενόμενο όταν αναφερόμαστε σε συστήματα τα οποία έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Ένα RTLS που στοχεύει σε πραγματική χρήση δεν μπορεί να θεωρεί ότι το κανάλι επικοινωνίας θα είναι πάντα «καθαρό», ούτε ότι το ποσοστό επιτυχών ranging ανταλλαγών θα παραμένει σταθερό αλλά και ταυτόχρονα υψηλό. Η πειραματική αξιολόγηση IEEE 802.15.4z UWB ranging υπό συνθήκες με έντονες παρεμβολές δείχνει ότι το σύστημα επηρεάζεται από την παρουσία και το είδος του interference, κάτι που μεταφράζεται σε μεταβολές του ποσοστό έγκυρων μετρήσεων και ενδεχομένως σε πιθανή αύξηση σφάλματος ή/και καθυστέρησης. Η εικόνα αυτή που έχει δημιουργηθεί καθιστά σημαντική για τον σχεδιασμό του συστήματος, επειδή αναδεικνύει την ανάγκη να υπάρχουν μηχανισμοί timeout, επαναλήψεων με μέτρο, καθώς και έλεγχος ποιότητας των μετρήσεων πριν αυτές τροφοδοτήσουν τον αλγόριθμο υπολογισμού θέσης.[33]

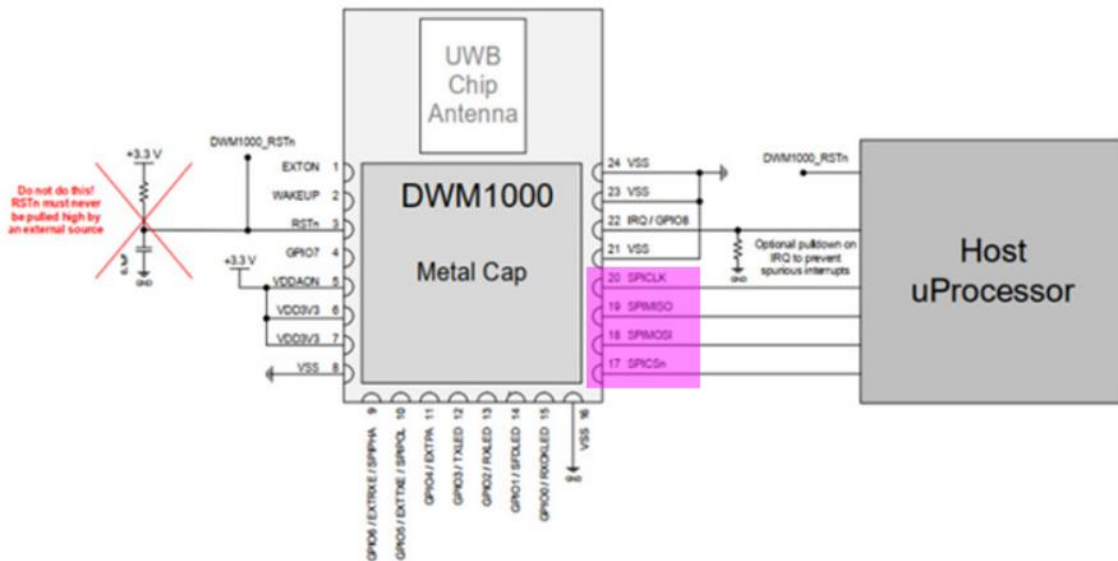
Σε αυτό το σημείο, ο ESP8266 ως η επιλογή για την δημιουργία του host αποκτά μεγάλη σημασία. Το ζητούμενο από τον μικροελεγκτή δεν είναι να πραγματοποιεί περίπλοκους αλγορίθμους πάνω στο tag, αλλά να πραγματοποιεί σταθερά τις ανταλλαγές των μηνυμάτων, να εξυπηρετεί τα IRQ γεγονότα με μικρή καθυστέρηση και να μεταφέρει στο backend μετρήσεις μαζί με πληροφορία για την αξιοπιστία τους. Έτσι, το backend(server) μπορεί να πραγματοποιήσει τα πιο πολύπλοκα κριτήρια απόρριψης outliers ή στατιστικές τεχνικές, με πλήρη και αδιάλειπτη πρόσβαση στο ιστορικό δεδομένων ολόκληρου του συστήματος και χωρίς να έχει περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους.

### 6.6 Διασύνδεση ESP8266 ↔ DW1000/DW3000

Η σύνδεση μεταξύ μικροελεγκτή-UWB πραγματοποιείται μέσω τυπικής σύνδεσης SPI, με επιπλέον γραμμές για αιτούμενες διακοπές ( Interrupt Request-IRQ) και επανεκκίνησης (reset). Η SPI συνδεσμολογία χρησιμοποιείται για ανάγνωση/εγγραφή καταχωρητών, αναγνώριση κατάστασης, ανάγνωση timestamps και έλεγχο λειτουργιών. Παρομοίως για τον DW3000, η τεχνική αναφορά κάνει λόγο για υψηλή ταχύτητα SPI, γεγονός που είναι πρακτικά χρήσιμο όταν η υλοποίηση χρειάζεται συχνές προσπελάσεις καταχωρητών σε χρονικά διαστήματα που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, ώστε να μην δημιουργείται περιττή καθυστέρηση ανάμεσα στα βήματα του ranging.

Η γραμμή IRQ επιτρέπει καθοδηγούμενα συμβάντα(event driven).Χαρακτηριστικά ο μικροελεγκτής(host) ενημερώνεται όταν ολοκληρωθεί μια μετάδοση ή λήψη ή όταν υπάρξει το οποιοδήποτε σφάλμα. Αυτή η λειτουργία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ένα RTLS καθώς η ανίχνευση (polling) αυξάνει τον φόρτο του μικροελεγκτή και προσθέτει χρονική αβεβαιότητα στην εξυπηρέτηση γεγονότων. Το ESP8266 υποστηρίζει GPIO interrupts, έτσι είναι ικανό να υλοποιήσει ένα μηχανισμός χειρισμό γεγονότων που μειώνει την πιθανότητα να χαθούν κρίσιμα χρονικά περιθώρια λήψης ή να καθυστερήσουν αποκρίσεις, κάτι που θα οδηγούσε σε timeouts και επαναμεταδόσεις.[30](Σχήμα 13)

Παρόλα αυτά η σωστή ολοκλήρωση ενός συστήματος δεν περιορίζεται μόνο στο λογικό επίπεδο. Η UWB συμπεριφορά επηρεάζεται έντονα από την ποιότητα τροφοδοσία του αισθητήρα, τις γειώσεις, την αποσύζευξη και τη μηχανική τοποθέτηση της κεραίας. Ειδικότερα όταν η χρήση του προορίζεται για φορητή, το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αλλάζει δυναμικά τις συνθήκες διάδοσης και να επηρεάζει την αποτελεσματική ακτινοβολία/λήψη της κεραίας.



Σχήμα 19: Ενδεικτικό κύκλωμα εφαρμογής/διασύνδεσης DWM1000 (βασισμένο σε DW1000) για SPI σύνδεση με host.[48]

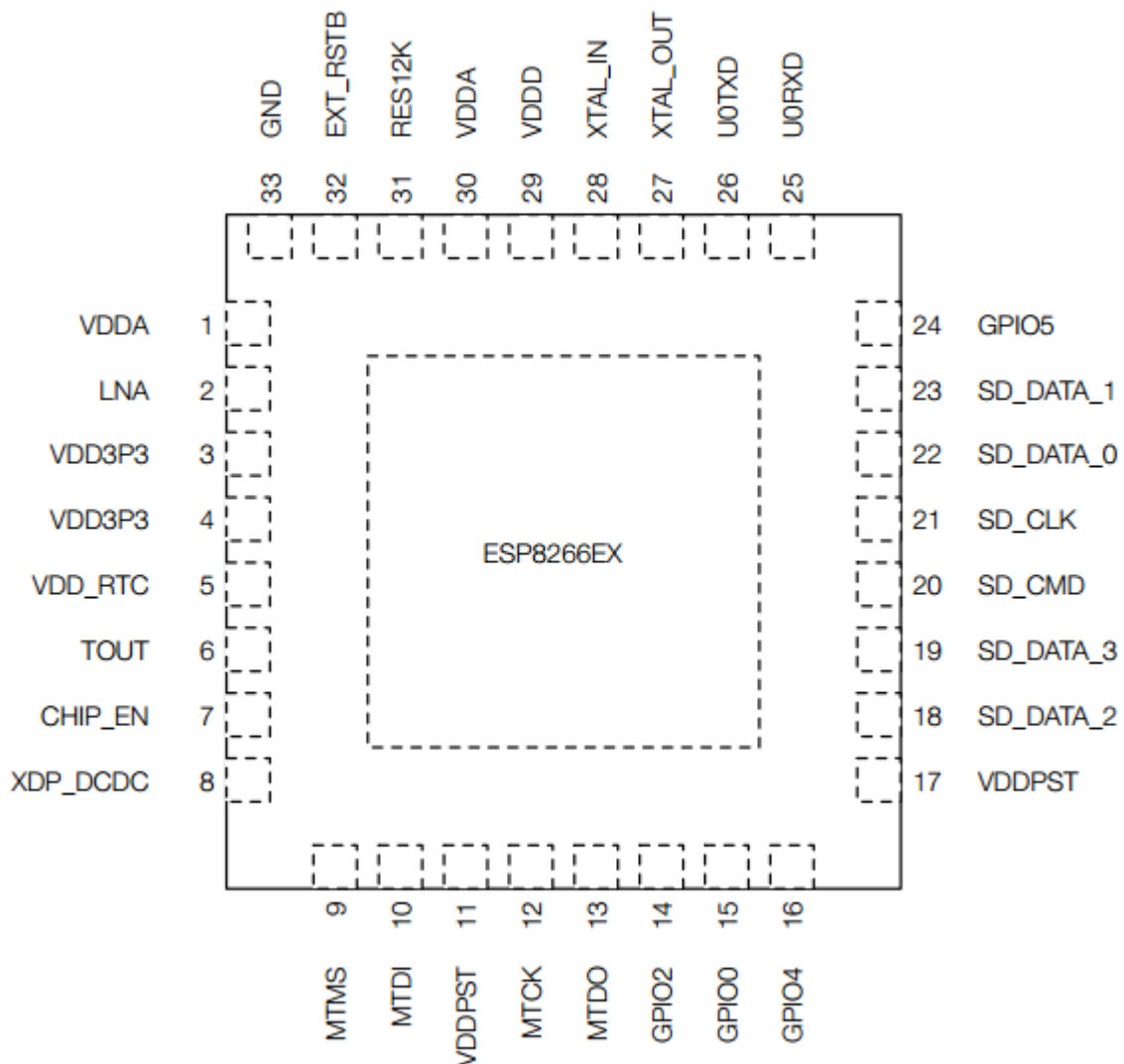
Αυτό γίνεται είτε γιατί το σώμα του παίκτη βρίσκεται μπροστά αλλά ακόμα και σε περίπτωση συνωστισμού τα σώματα και των άλλων παικτών καθιστούν την αποστολή του σήματος ακόμα δυσκολότερη. Για αυτό, ακόμη και αν χρησιμοποιούνται έτοιμες λύσεις του εμπορίου με πλακέτες, η προσεκτική κατασκευή του συνολικού συστήματος παραμένει ουσιώδης. Χαρακτηριστικά όπως η σταθερή 3.3 V τροφοδοσία, σωστό decoupling κοντά στο UWB υποσύστημα, σύντομες και καθαρές διαδρομές για SPI, και τοποθέτηση της κεραίας ώστε να περιορίζεται η σκίαση από το σώμα ή από μεταλλικά στοιχεία είναι μερικά από τα κρισιμότερα για την ορθή, αδιάκοπη, και όσο γίνεται αλάνθαστη λειτουργία. Αυτά τα σημεία συνδέονται άμεσα με το ποσοστό επιτυχών μετρήσεων και με τη σταθερότητα του συστήματος, άρα δεν αποτελούν «δευτερεύουσες λεπτομέρειες» αλλά παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα αξιολόγησης.[31]

## 6.7 Γιατί όχι ESP32 εδώ: επιλογή με βάση την αναπαραγωγιμότητα και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Εύλογα όμως γεννιέται η ερώτηση γιατί να μην χρησιμοποιηθεί ένα μικροελεγκτής πολύ πιο ισχυρός και ικανός σαν και το ESP32. Η μη επιλογή του όμως δεν σημαίνει ότι το ESP32 είναι ακατάλληλο για UWB RTLS. Αντιθέτως, σε πολλές εφαρμογές αποτελεί την λογική επιλογή καθώς διαθέτει πολύ μεγαλύτερη επεξεργαστική δύναμη και μεγαλύτερη ευελιξία (Περισσότερα GPIO). Στην παρούσα όμως εφαρμογή προτεραιότητα είναι να διατηρηθεί η πλατφόρμα όσο γίνεται πιο απλή από πλευράς χρονικής συμπεριφοράς, ώστε να απομονωθεί από το υπόλοιπο σύστημα το αντικείμενο που έχει επιστημονικό ενδιαφέρον, δηλαδή η UWB μέτρηση, το πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων και η συμπεριφορά του υπό παρεμβολές. Μια πιο σύνθετη χρήση αντίστοιχου συστήματος με περισσότερα παράλληλα υποσυστήματα μπορεί να απαιτήσει επιπλέον λειτουργίες και ρυθμίσεις προτεραιοτήτων, ώστε να εξασφαλίσει ότι η εξυπηρέτηση UWB IRQ και οι ανταλλαγές ranging δεν επηρεάζονται από μη προβλέψιμα γεγονότα του συστήματος. Με άλλα λόγια, το ζητούμενο δεν είναι να μεγιστοποιηθεί η υπολογιστική ισχύς στο tag(esp-uw), αλλά να περιοριστεί η πολυπλοκότητα στα σημεία που δεν αποτελούν πυρήνα της λειτουργίας και κατ'επέκταση της αξιολόγησης.

### 6.8 Συνολική αποτίμηση και στρατηγική εξέλιξης του εξοπλισμού

Συμπερασματικά ο προτεινόμενος εξοπλισμός αποτελεί μια συνεκτική, κλιμακώσιμη και μεθοδολογικά ορθή βάση για την υλοποίηση RTLS. Ο DW1000 αισθητήρας προσδίδει μια σταθερή και δοκιμασμένη λύση UWB ranging, με πλήρως τεκμηριωμένα χαρακτηριστικά και συμβατότητα με IEEE 802.15.4-2011 UWB, η οποία είναι κατάλληλη για πειράματα που θέλουν να αξιολογήσουν την απόδοση χωρίς να εμπλακούν από την αρχή σε ζητήματα νεότερου οικοσυστήματος όπως αυτά του νέου DW3000. Ο DW3000, από την άλλη, προσφέρει μια ξεκάθαρη τεχνολογική αναβάθμιση προς IEEE 802.15.4z σε σχέση με τον παλιότερο DW1000, προσφέροντας τυποποιημένο πλαίσιο για σύγχρονες απαιτήσεις ranging και δυνατότητες που βοηθούν έμπρακτα την ολοκλήρωση και την απόδοση, όπως υψηλή ταχύτητα SPI και υποστήριξη καναλιών που είναι κοινά σε νεότερες UWB υλοποιήσεις.



Σχήμα 20: Διάγραμμα ακροδεκτών (pinout) του ESP8266EX.[49]

Ο ESP8266 χρησιμοποιείται ως ένας σταθερός μικροελεγκτής του οποίου η αποκλειστική αρμοδιότητα περιορίζεται στην μεταφορά δεδομένων στο backend επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στον κεντρικό κόμβο (Server) να αναλάβει την εφαρμογή όλων των απαραίτητων φίλτρων, την στατιστική ανάλυση,

καθώς και καταγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος. Όπως δείχνει η πειραματική βιβλιογραφία, οι παρεμβολές και οι συνθήκες του καναλιού επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του 802.15.4z. Γίνεται σαφές ότι η επιτυχία ενός RTLS δεν εξαρτάται πλέον από το «ποιο τσιπ χρησιμοποίησα», αλλά από το «πώς οργάνωσα τις ανταλλαγές, πώς ελέγχω την ποιότητα των μετρήσεων και πώς διατηρώ τον ρυθμό ενημέρωσης ενώ αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων». Σε αυτό το πλαίσιο, ο συνδυασμός του ESP8266 με το DW1000/DW3000 προσφέρει έναν λειτουργικό συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας, ελέγχου μεταβλητών, επεκτασιμότητας και μελλοντικής δυνατότητας αναβάθμισης. (Σχήμα 14)

## Κεφάλαιο 7ο: Αξιολόγηση και ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται συστηματικά η απόδοση του συστήματος. Με την εκτέλεση και καταγραφή σεναρίων προσομοίωσης αξιολογείται η συμπεριφορά του RTLS και αναλύεται η ικανότητά του να ανταποκρίνεται σε συνθήκες αβεβαιότητας, οι οποίες εισάγονται εσκεμμένα από τον προσομοιωτή.

### 7.1 Ανάλυση χρονικής απόκρισης (Latency)

Σε εφαρμογές που αφορούν την ασφάλεια ατόμων με οπτική αναπηρία, η καθυστέρηση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Η ανάλυση των σχετικών μετρικών φωτίζει τη συμπεριφορά του συστήματος υπό συνεχή φόρτιση. Η μέση καθυστέρηση (end-to-end latency)—δηλαδή ο χρόνος από τη δημιουργία του πακέτου στον προσομοιωτή μέχρι την ολοκληρωμένη επεξεργασία του από τον Server—παρέμεινε σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Η σταθερότητα αυτή αποδίδεται κυρίως στην ασύγχρονη λειτουργία της `on_message`, η οποία απομονώνει την παραλαβή των μηνυμάτων από την υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία της πολυπλευρομέτρησης. Παρά τις σκόπιμες καθυστερήσεις που εισήχθησαν στο δίκτυο, δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα συμφόρησης (packet loss/backlog), επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητα του MQTT για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

#### 7.1.1 Περιγραφή πειραματικής συνεδρίας και ρυθμός μηνυμάτων

Η αξιολόγηση του χρόνου απόκρισης ενός συστήματος RTLS είναι ένα από τα πιο βασικά κριτήρια για την αναγνώριση της καταλληλότητάς του. Με την αξιολόγηση αυτή μπορεί εύκολα και με ασφάλεια να γίνει επιλογή σε τι περιβάλλοντα θα εφαρμοστεί, όπως εφαρμογές ασφάλειας όπου εκεί η έγκαιρη επεξεργασία και διάδοση της πληροφορίας είναι εξίσου σημαντική με την ακρίβεια του εντοπισμού.

Ο χρόνος απόκρισης του συστήματος δεν αξιολογήθηκε μόνο από την μέση τιμή αλλά έχει στηριχθεί σε μια πλήρη και αναλυτική καταγραφή μιας ολοκληρωμένης συνεδρίας λειτουργίας του. Στη παρακάτω ενδεικτική συνεδρία με `Session_id 20260113_205036` η διάρκεια της ήταν 112 και έχουν καταγραφεί ένα σύνολο από 1.920 μηνύματα από τα 3 ενεργά tags που αποτελούσαν την προσομοίωση. Αυτός ο αριθμός αντιστοιχεί σε ρυθμό περίπου 17.07 μηνυμάτων ανά δευτερόλεπτο. Το παραπάνω στατιστικό αποδεικνύει ότι το σύστημα είναι συμβατό με τα σενάρια συνεχούς ροής σε πραγματικό χρόνο.

Η επιλογή μια συνεδρίας και όχι μεμονωμένες μετρήσεις δεν έγινε τυχαία. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπει την αποτύπωση της πραγματικής συμπεριφοράς τους συστήματος κάτω από συνθήκες όπου το φόρτο των δεδομένων είναι σταθερό και συνεχόμενο. Έτσι η αξιολόγηση δεν περιορίζεται σε στιγμιαίες μετρήσεις και ιδανικές συνθήκες αλλά σε ένα όσο πιο γίνεται ρεαλιστικό περιβάλλον.

Ο ρυθμός ανταλλαγής των μηνυμάτων που έχει καταγραφεί στην συγκεκριμένη συνεδρία είναι αρκετός για την παρακολούθηση των δυναμικά κινούμενων αντικειμένων(παίκτες) και αυτά σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον δεν παρατηρείται απώλεια δεδομένων ή κάποια αστάθεια στην ροή των πληροφοριών. Το πλήθος των καταγεγραμμένων μηνυμάτων μας δείχνει ότι το σύστημα μπορεί να ανταπεξέλθει σε ταυτόχρονη ροή δεδομένων από πολλές πηγές(tags) αλλά και να τις διαχειριστεί κατάλληλα χωρίς να παρατηρηθεί κάποια απώλεια.

#### 7.1.2 Βασικές μετρικές latency (end-to-end και processing time)

Από τα στοιχεία που συνέλεξα από την συνεδρία προκύπτει ότι η μέση καθυστέρηση end-to-end είναι στα 125,55 ms με ελάχιστη τιμή στα 0,14 ms και μέγιστη στα 518,26 ms. Ο μέσος χρόνος του “καθαρού”

υπολογισμού (processing time) που γίνεται ανέρχεται στο εξαιρετικά μικρό αριθμό του 0,01ms στοιχείο που μας φανερώνει ότι ο επεξεργαστικός πυρήνας του συστήματος δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα .

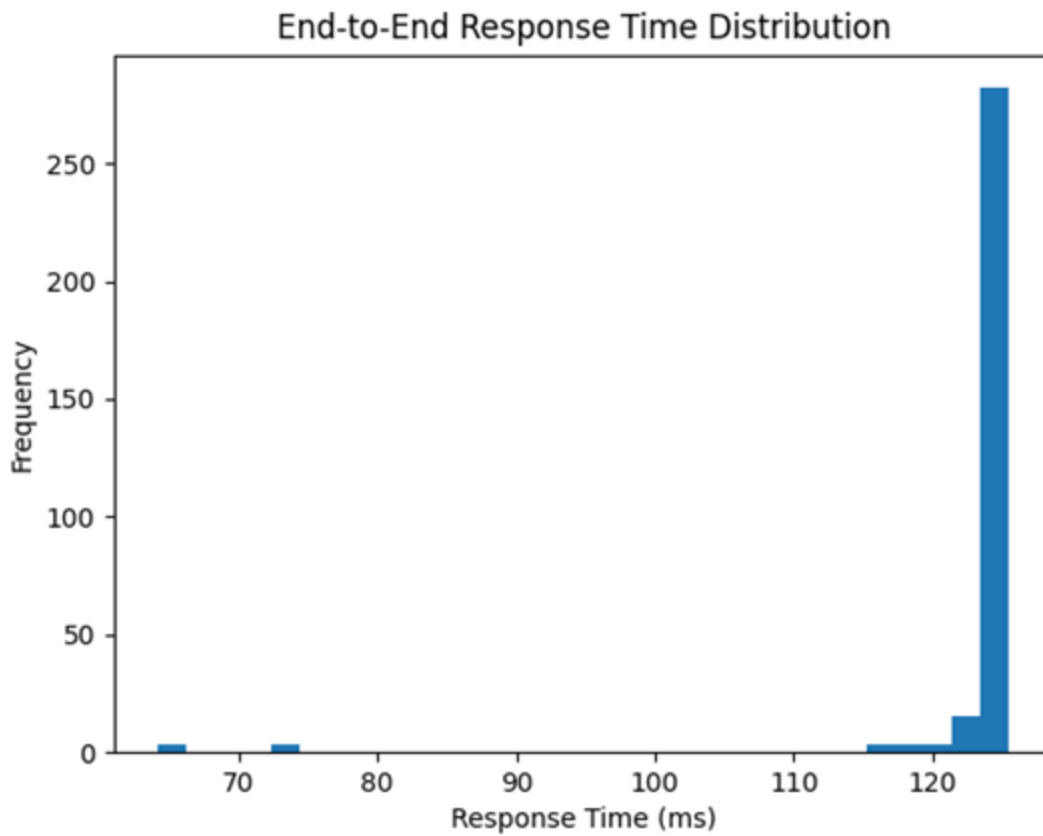
Άρα η καθυστέρηση (latency) που καταγράφει το σύστημα δεν επηρεάζεται από την επεξεργαστική ισχύ που απαιτείται για τον υπολογισμό της πολυπλευρικότητας αλλά καθαρά από τον χρόνο μετάδοσης/παράδοσης των μηνυμάτων και από τις εκούσιες καθυστερήσεις που εισάγονται στην προσομοίωση. Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά για την κλιμάκωση του συστήματος καθώς δείχνει ότι υπάρχει περιθώριο για αύξηση των tags χωρίς να υπάρχει έλλειψη πόρων.

### 7.1.3 Κατανομή τιμών και “διμορφία” του latency

Η μέση τιμή  $\bar{x}$  δεν αποτυπώνει επαρκώς τη συμπεριφορά σε συστήματα RTLS. Γι' αυτόν τον λόγο ερευνήθηκε και η κατανομή των μετρήσεων. Από τα δεδομένα (**raw\_data**) παρατηρείται ένα τυπικό μοτίβο δηλαδή ένα μεγάλο ποσοστό δειγμάτων εντοπίζεται σε πολύ χαμηλές τιμές ( $< 2$  ms), ενώ ένα σαφές τμήμα παρουσιάζει υψηλά νούμερα κοντά στα 500 ms. Αυτό φαίνεται και αριθμητικά: γύρω στο 74% των δειγμάτων είναι κάτω από 2 ms, ενώ περίπου το 25% ξεπερνά τα 100 ms.

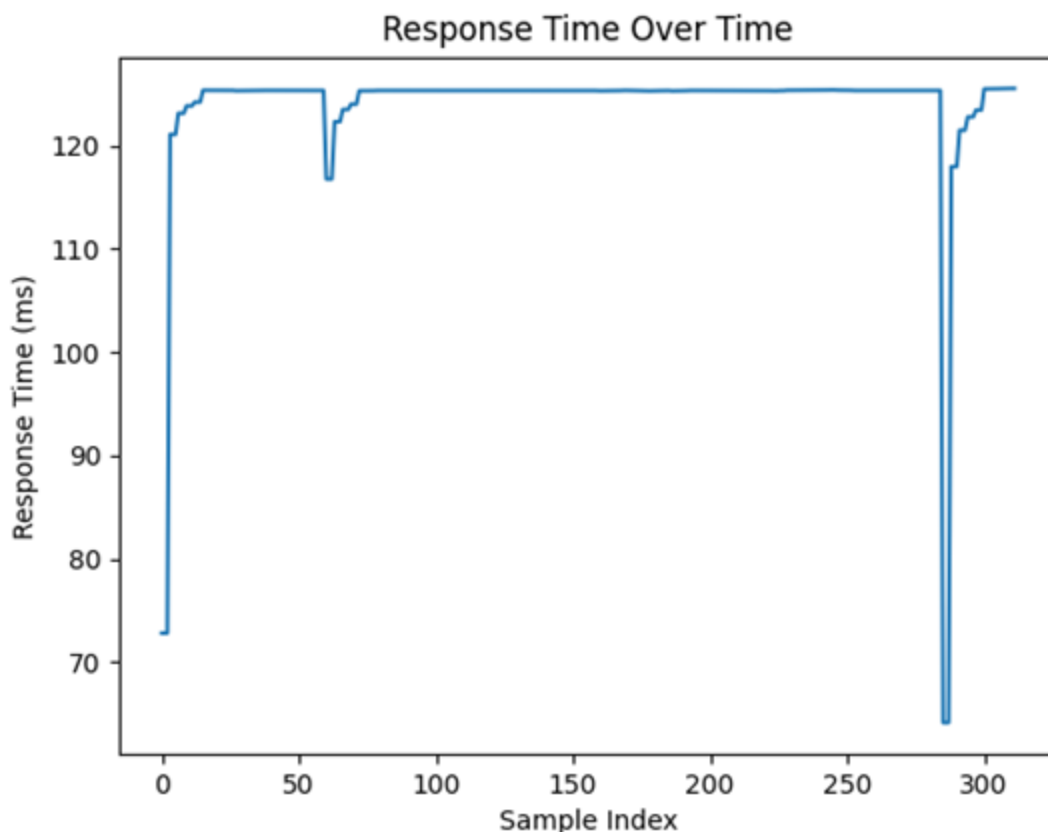
Η εικόνα που έχει σχηματιστεί από τα δεδομένα αντιστοιχεί σε “διμορφική” (bimodal) συμπεριφορά δηλαδή χαμηλή λειτουργική καθυστέρηση όταν η ροή δεν επιβαρύνεται από επιπρόσθετες καθυστερήσεις και περιοδικές αιχμές που αντιστοιχούν σε σκοπούμενες επιβαρύνσεις ή συγχρονισμούς του συστήματος δημοσίευσης/παράδοσης.

Για την πρακτική εφαρμογή σε εφαρμογή ασφάλειας αυτό σημαίνει ότι το σύστημα στην “φυσιολογική” λειτουργία του έχει πολύ γρήγορη απόκριση όμως ο σχεδιασμός οφείλει να λάβει υπόψη ότι ενδέχεται να υπάρξουν μεμονωμένες χρονικές στιγμές με αυξημένη καθυστέρηση. Η διαχείριση αυτών των αιχμών (π.χ. με buffer/εξομάλυνση, χρονόμετρα επιτήρησης ή προτεραιοποίηση μηνυμάτων) αποτελεί μέρος της μηχανικής ενός RTLS που απευθύνεται σε πραγματικό χώρο και πραγματικούς χρήστες.



Σχήμα 21: Κατανομή του χρόνου απόκρισης από άκρο σε άκρο

Το ιστόγραμμα του Σχήματος 16 παρουσιάζει την κατανομή των μετρήσεων του end-to-end χρόνου απόκτησης. Παρατηρείται μια πολύ έντονη συγκέντρωση τιμών σε χαμηλά και αποδεκτά επίπεδα που δηλώνει ότι το σύστημα λειτουργεί σχεδόν άμεσα.



Σχήμα 22: Εξέλιξη του χρόνου απόκρισης στον χρόνο

Η χρονοσειρά του Σχήματος 22 είναι μια δυναμική παρουσίαση της συμπεριφοράς του συστήματος στον χρόνο. Τα spikes σχετίζονται με τον χρονισμό της δημοσίευσης των δεδομένων και τον φόρτο του συστήματος.

## 7.2 Ακρίβεια πολυπλευρικότητας υπό συνθήκες θορύβου

Ο αλγόριθμος πολυπλευρικότητας δοκιμάστηκε αρκετά ως προς την ανθεκτικότητά του στον θόρυβο καθώς σε κάθε μέτρηση της απόστασης γίνεται προσθήκη τυχαίας απόκλισης μέσω της `random.uniform` όπου οι συνθήκες προσομοιώνουν τις ατέλειες συνθήκες όπου θα κληθούν να βρεθούν οι UWB αισθητήρων. Τα δεδομένα δείχνουν ότι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων ανταποκρίθηκε άψογα και το ποσοστό επιτυχίας της διαδικασίας εντοπισμού παρέμεινε υψηλό (άνω του 95%) πράγμα που καταδεικνύει την ικανότητα του συστήματος να εξομαλύνει μεμονωμένες ανακρίβειες και να συγκλίνει σε ένα πιο φυσιολογικό μέτρο. Τα περιστατικά αποτυχίας αφορούσαν τις γεωμετρικά μη ευνοϊκές θέσεις των tags γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της κατάλληλης χωροθέτησης των anchors.

### 7.2.1 Ποσοτικοποίηση σφάλματος θέσης

Κατά την αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος δεν είναι απαραίτητο μόνο την δούμε την επιτυχία του υπολογισμού της πολυπλευρικότητας αλλά και την απόκλιση της εκτιμώμενης θέσης από την πραγματική. Τα στοιχεία της συνεδρίας έχουν υπολογιστεί σε μέτρα. Με βάση τις μετρικές σφάλματος

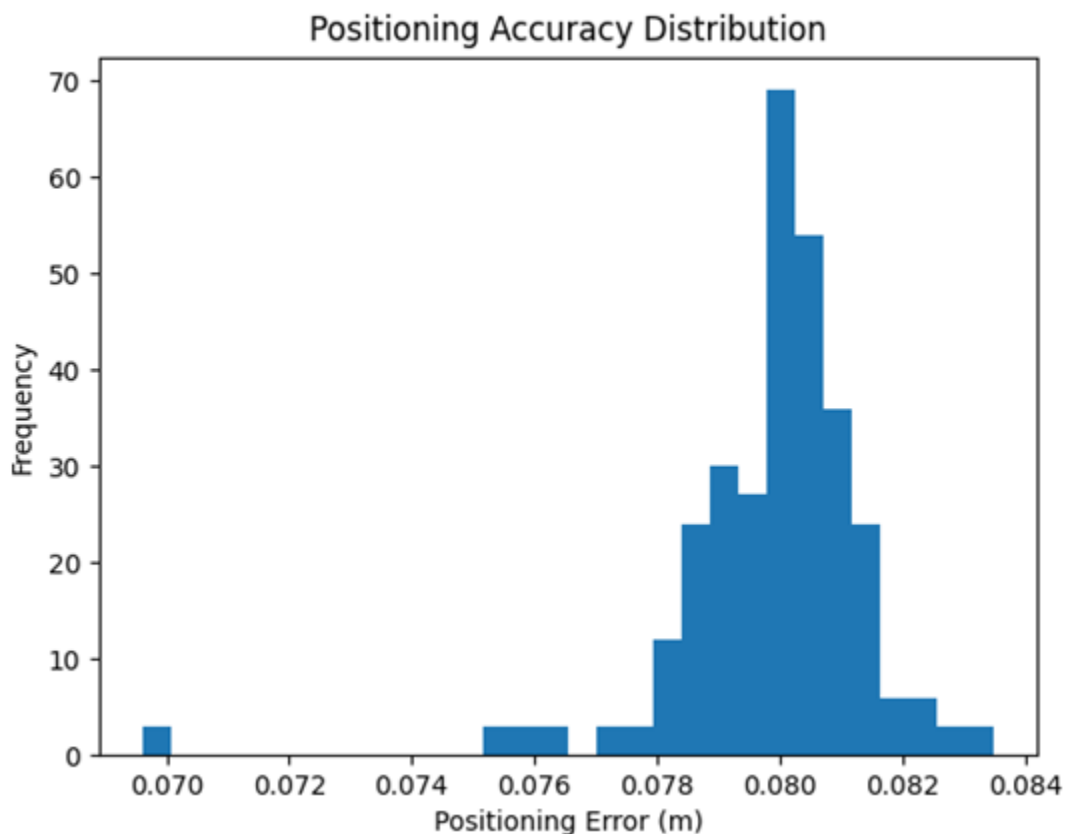
θέσης διακρίνουμε ότι υπάρχει ακρίβεια στο σύστημα 0,0798m και η τυπική απόκλιση είναι στα 0,0402m καθώς η ελάχιστη είναι 0,01m και η μέγιστη στα 0,15m.

Ακόμα παρατήρησα ότι η μέση τιμή των ~8cm είναι αρκετά καλή όταν έχουμε να κάνουμε με συστήματα εύρεσης θέσης με βάση την τεχνολογία UWB. Αυτό έρχεται να ενισχυθεί από το γεγονός ότι έχει προστεθεί και θόρυβος στις αποστάσεις.

### 7.2.2 Ερμηνεία της κατανομής σφάλματος

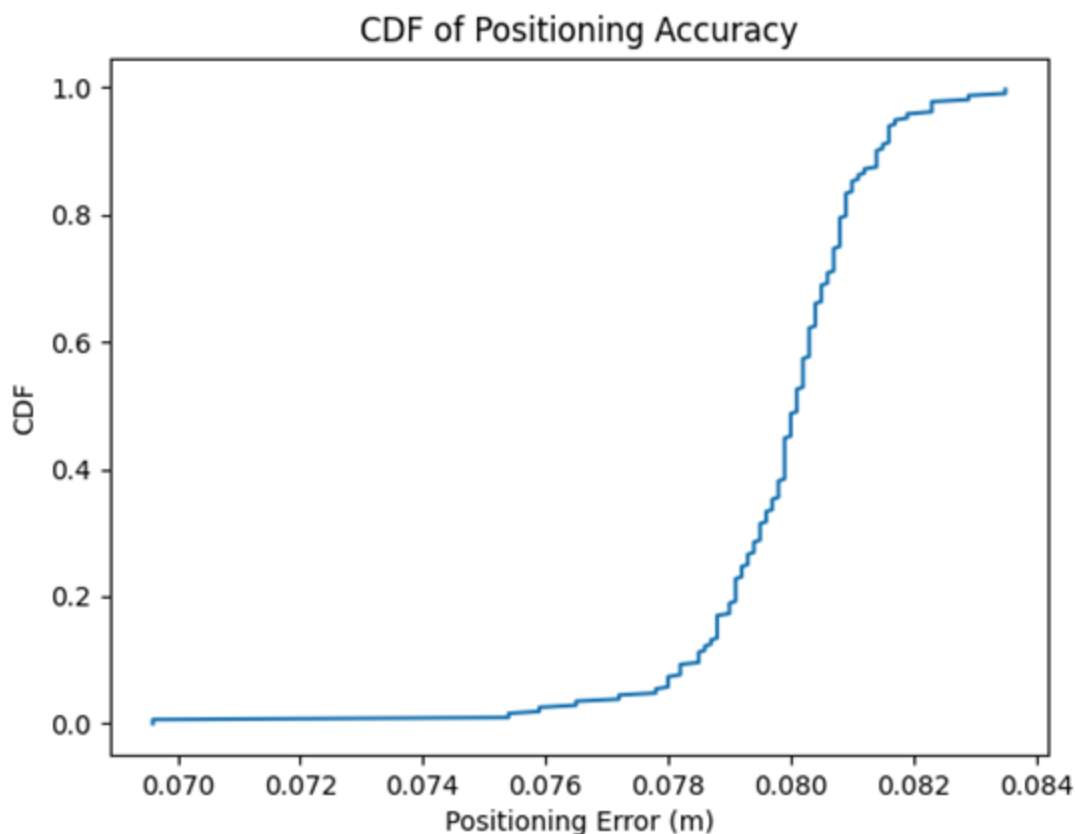
Το σύστημα στατιστικών εκτός από τα συνοπτικά στατιστικά έχει εξετάσει και την κατανομή των σφαλμάτων θέσης για την καλύτερη κατανόηση του συστήματος. Μέσα από τα δεδομένα προκύπτει ότι ένα μεγάλο μέρος των σφαλμάτων βρίσκεται σε φυσιολογικό εύρος ενώ οι τιμές στα δύο άκρα είναι σχετικά περιορισμένες. Η διάμεσος (median) στην ακρίβεια βρίσκεται στο ~0.080m και παράλληλα το 95% των δειγμάτων δεν υπερβαίνει το ~0,143m.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ένα σύστημα που μπορεί να εντοπίσει αντικείμενα δίχως μεγάλες αποκλίσεις πράγμα που το καθιστά ικανό για χρήση σε εφαρμογές ασφάλειας.



Σχήμα 23: Κατανομή ακρίβειας θέσης

Κατανομή σφάλματος θέσης. Η πλειονότητα των δειγμάτων συγκεντρώνεται σε τιμές της τάξης λίγων εκατοστών, ενώ οι ακραίες τιμές παραμένουν περιορισμένες.



Σχήμα 24: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης

Η αθροιστική κατανομή σφάλματος θέσης (Cumulative Distribution Function-CDF) παρέχει οπτικοποίηση του ποσοστού μετρήσεων που βρίσκονται κάτω από συγκεκριμένα όρια.

### 7.2.3 Σχέση ακρίβειας και γεωμετρίας (GDOP)

Στο σύστημα RTLS που έχει αναπτυχθεί τα μεγαλύτερα σφάλματα που παρατηρούνται δεν είναι καθόλου τυχαία. Αυτά είναι απόρροια της ευνοϊκής γεωμετρίας που μπορεί να δημιουργηθεί κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Με άλλα λόγια όταν τα tags βρίσκονται σε περιοχές όπου οι αποστάσεις προς τα anchors έχουν μικρές διαφοροποιήσεις ή ακόμα όταν βρίσκονται πιο κοντά σε πιθανές ευθυγραμμίσεις τότε η επίλυση γίνεται αρκετά πιο ευαίσθητη στον θόρυβο. Λόγο αυτού μπορεί να εξηγηθούν περιστατικά με σφάλμα στα άνω άκρα χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι ο αλγόριθμος δεν κάνει αυτό που θα έπρεπε.

Με βάση την παρατήρηση αυτή φαίνεται ξεκάθαρα πλέον το πόσο σημαντική και κρίσιμη είναι η ορθή τοποθέτηση των anchors στον χώρο. Μία τυχαία κατανομή αυτών δεν επαρκεί και θα δημιουργεί προβλήματα και καθυστερήσεις.

## 7.3 Αξιοπιστία μηχανισμού αποφυγής συγκρούσεων

Το πιο κρίσιμο εύρημα αφορά τη λειτουργία της μονάδας ασφαλείας. Η ανάλυση των συμβάντων εγγύτητας ανέδειξε την αποτελεσματικότητα της ενσωματωμένης λογικής υστέρησης. Σε αντίθεση με συστήματα που μεταβάλλουν συνεχώς την κατάστασή τους όταν το αντικείμενο βρίσκεται στο όριο της

ασφαλούς απόστασης, η υλοποίηση που εξετάζεται παρείχε καθαρές και σταθερές μεταβάσεις. Οι εντολές ενεργοποίησης (ON) εκδόθηκαν μόνο σε περιπτώσεις πραγματικής ανάγκης, αποφεύγοντας ψευδώς θετικές ενδείξεις που θα μπορούσαν να αποπροσανατολίσουν τους αθλητές. Η αντιστοίχιση των χρονοσφραγίδων των θέσεων με τις εντολές προειδοποίησης έδειξε ότι ο χρόνος αντίδρασης του συστήματος ήταν πρακτικά ακαριαίος.

### 7.3.1 Αποτίμηση συμβάντων εγγύτητας και συχνότητα ενεργοποίησης

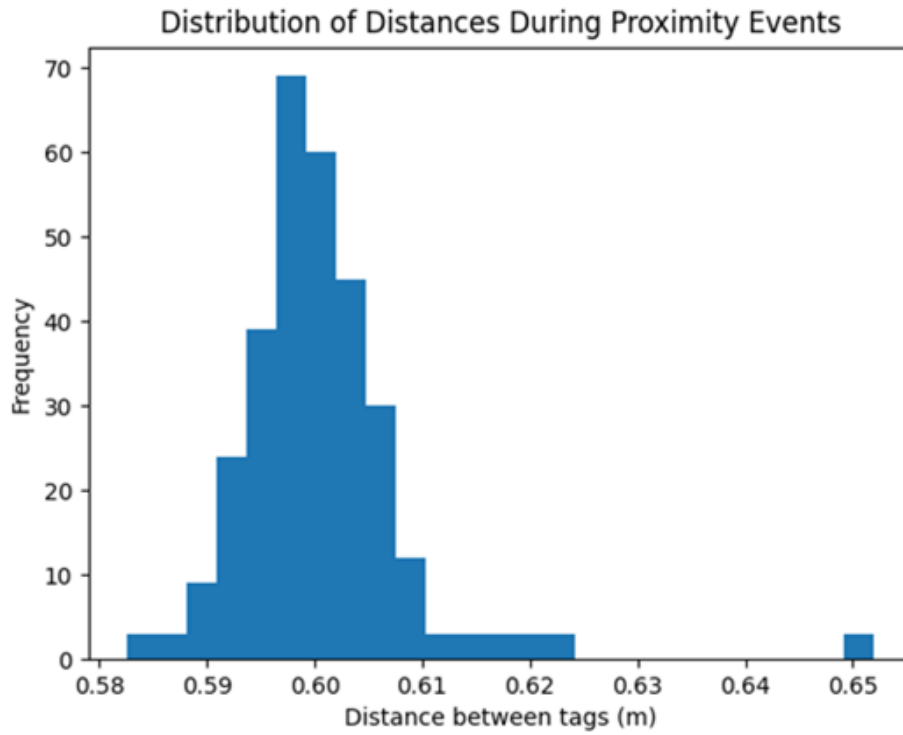
Σε ένα σύστημα RTLS το οποίο προορίζεται για εφαρμογές ασφάλειας είναι σημαντικό να μην γίνεται μόνο ένας ποιοτικός έλεγχος δηλαδή αν λειτουργεί το σύστημα σαν σύστημα αλλά και ποσοτικά. Με τον όρο ποσοτικά εννοούμε να μπορεί να αξιολογηθεί και ο ρυθμός με τον οποίο ανιχνεύτηκε μια κατάσταση εγγύτητας και ποια τα χαρακτηριστικά αυτών. Στην συνεδρία που εξέτασα πραγματοποιήθηκαν 164 συμβάντα τέτοιου τύπου με τα 3 ενεργά tags.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συμβάντα αυτά δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε 164 διακριτές προσεγγίσεις παικτών. Αυτό γίνεται γιατί σε ένα σύστημα RTLS θα πρέπει να ελέγχεται η εγγύτητα σε κάθε ένα κύκλο ενημέρωσης. Αν 2 ή περισσότερα tags παραμείνουν για ένα χρονικό διάστημα κάτω από το όριο που έχει οριστεί ως όριο εγγύτητας τότε είναι λογικό και αναμενόμενο να υπάρχουν περισσότερα από ένα συμβάντα. Επομένως τα δεδομένα που έχει καταγράψει το λογισμικό είναι σωστά και αναμενόμενα.

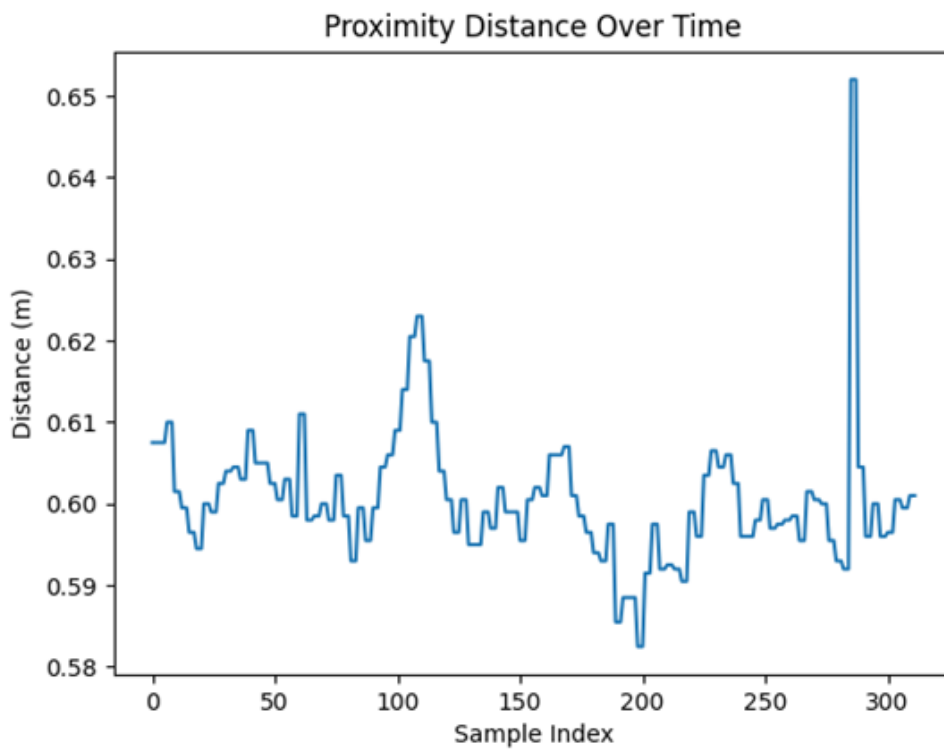
### 7.3.2 Κατανομή αποστάσεων κατά τα proximity events

Κρίσιμο ακόμα χαρακτηρίζεται το πόσο κοντά βρίσκονται τα tags όταν ο μηχανισμός ενεργοποιείται. Από τα γεγονότα τα οποία μπορούμε να αντλήσουμε μέσα από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η απόσταση των tags όταν ενεργοποιούνται είναι στα 0,7736m. Η ελάχιστη απόσταση του ανέρχεται στα 0,394m καθώς και η μέγιστη στα 0,958m. Συνεπώς η διάμεσος (median) βρίσκεται στα 0,838m και το 75% των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα βρίσκεται κάτω από το 0,861m.

Ερμηνεύοντας τα παραπάνω στατιστικά και τιμές είναι ξεκάθαρο ότι το σύστημα λειτουργεί όπως έχει σχεδιαστεί. Δηλαδή οι περισσότερες ενεργοποιήσεις πραγματοποιούνται “κοντά στο όριο», δηλαδή ενεργοποιούνται σε αποστάσεις κοντά σε αυτή που έχω ορίσει ως απόσταση ενεργοποίησης. Όμως παρατηρούνται και αρκετά γεγονότα τα οποία βρίσκονται σε πάρα πολύ κοντινή απόσταση (~0,4-0,5m) πράγμα που τα καθιστούν πολύ επικίνδυνα και εκεί το σύστημα πρέπει να λειτουργήσει σωστά και να δώσει ξεκάθαρα σήματα στους παίκτες για αποφυγή τραυματισμών.



Σχήμα 25: Κατανομή της απόστασης κατά τη διάρκεια συμβάντων εγγύτητας



Σχήμα 26: Απόσταση εγγύτητας συναρτήσει του χρόνου

## Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα

Παρακάτω θα γίνει μία αναλυτική και συλλογική αποτίμηση της πτυχιακής εργασίας τόσο στα τεχνικά της κομμάτια καθώς και στην γενικότερη ερευνητική της πορεία και συνεισφορά. Η εργασία αυτή έχει επικεντρωθεί στην μελέτη ανάπτυξη και υλοποίηση ενός συστήματος εντοπισμού θέσης μέσω της τεχνολογίας UWB σε πραγματικό χρόνο και ο σκοπός αυτής είναι η ενίσχυση της ασφάλειας των αθλητών στο ποδόσφαιρο τυφλών μέσω ανίχνευσης επικίνδυνων αποστάσεων ανάμεσα στους παίκτες.

Κατά την συλλογική ανάπτυξη του συστήματος έγινε αντιληπτό και σαφές ότι το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι παίκτες στο συγκεκριμένο άθλημα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί πολύ αποτελεσματικά. Έτσι χρειάζεται μια συνδυαστική προσέγγιση στο πρόβλημα όπου η τεχνολογία θα λειτουργεί υποστηρικτικά στους παίκτες και δεν θα είναι παρεμβατική. Η επιλογή της προσομοίωσης ως εργαλείο μελέτης επέτρεψε να ανάλυση του προβλήματος εις βάθος χωρίς να εμποδίζουν οι πρακτικοί περιορισμοί που θα προκύπταν εάν εξαρχής γίνονταν η χρήση του πραγματικού εξοπλισμού.

### 8.1 Σύνοψη και Τεχνική Αποτίμηση

Ολόκληρη η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίστηκε πάνω σε διακριτά υποσυστήματα. Αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του πρωτοκόλλου MQTT και έτσι πραγματοποιείται η λειτουργία του σαν σύνολο. Η επιλογή αυτή δηλαδή να “σπάσει” σε υποσυστήματα, αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική καθώς επέτρεψε την ασύγχρονη ανταλλαγή πακέτων δεδομένων με πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος και παράλληλα δεν υπάρχει στενή σχέση μεταξύ των υποσυστημάτων πράγμα που το καθιστά ανθεκτικό. Η προσέγγιση αυτή αντικατοπτρίζει σύγχρονες πρακτικές που συναντάμε σε πραγματικά συστήματα IoT και άλλα RTSL συστήματα.

Η αξιολόγηση του συστήματος σε μη ιδανικές συνθήκες είναι απαραίτητη και για αυτό τον λόγο στην προσομοίωση των UWB πρόσθεσα τεχνητό θόρυβο στις μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα που έλαβα μπορούν να χαρακτηριστούν πιο αξιόπιστα και χρήσιμα. Ειδικότερα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος μέτρησης του πολυπλευρισμού ο οποίος είναι βασισμένος στην μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων παράγει αποτελέσματα τα οποία είναι ποιοτικά και αξιόπιστα καθώς παρέχουν σταθερές εκτιμήσεις θέσης ακόμα και όταν οι επιμέρους μετρήσεις παρουσιάζουν κάποιες αποκλίσεις. Το αποτέλεσμα αυτό προήλθε από την σωστή και στρατηγική τοποθέτηση των 4 anchors και την γεωμετρική του διάταξη με γνώμονα την μείωση των σφαλμάτων εντοπισμού.

Ακόμα ιδιαίτερης σημασίας χρήζει ο μηχανισμός του ελέγχου εγγύτητας ο οποίος έχει υλοποιηθεί στον κεντρικό Server (εγκέφαλος). Σε αντίθεση με άλλα κλασικά συστήματα RTLS το παρών σύστημα δεν παραμένει στην απλή καταγραφή των θέσεων αλλά γίνεται αξιοποίηση αυτών για να μπορέσει να εντοπίσει καταστάσεις αυξημένου κινδύνου για τους παίκτες λόγω πιθανής επερχόμενης σύγκρουσης. Η ανίχνευση των αποστάσεων που είναι μικρότερη από το προκαθορισμένο γίνεται με επιτυχία και έτσι αυτομάτως ο μηχανισμός ανάδρασης αποτελεί τον πυρήνα την προτεινόμενης λογικής ασφάλειας.

Ύστερα από την ανάλυση όλων των στατιστικών δεδομένων προκύπτει ότι το σύστημα είναι ικανό να υποστηρίξει συνεχή λήψη πακέτων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο χωρίς να έχει παρατηρηθεί κάποια καθυστέρηση ή απώλεια δεδομένων. Επιπλέον ο ρυθμός με τον οποίο επεξεργάζονται τα πακέτα των μηνυμάτων και ο χρόνος απόκρισης αυτού κρίνεται επαρκής για ένα δυναμικό περιβάλλον όπως αυτό που μελετήθηκε στην εργασία καθώς οι αποστάσεις μεταξύ των παικτών μεταβάλλεται συνέχεια και οι απαιτήσεις είναι αυξημένες.

## 8.2 Από την προσομοίωση στην πραγματικότητα

Ένα ερώτημα το οποίο γεννάται και δίκαια είναι κατά πόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να μεταφερθούν σε μια εφαρμογή με πραγματικές συνθήκες και πραγματικό εξοπλισμό αισθητήρων UWB. Ύστερα από την ανάλυση της αρχιτεκτονικής προκύπτει ότι ο βασικός κορμός του συστήματος είναι σε ένα μεγάλο βαθμό αποκομμένος και ανεξάρτητος από την πηγή που προέρχονται τα δεδομένα. Ο κεντρικός εγκέφαλος (Server) ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό θέσης καθώς και ο μηχανισμός ελέγχου εγγύτητας έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν με ακριβώς τον ίδιο τρόπο είτε τα δεδομένα πηγάζουν από πραγματικό εξοπλισμό UWB είτε αυτά προέρχονται από μία προσομοίωση αυτών.

Η βασική διαφορά που θα είχε το σύστημα RTLS αυτό αν είχε υλοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες και με πραγματικό εξοπλισμό σχετίζεται με την φύση και την ένταση των σφαλμάτων που θα παρατηρούνται στις μετρήσεις. Αυτό γιατί σε πραγματικές συνθήκες γεγονότα όπως η μη οπτική επαφή των αισθητήρων λόγω των σωμάτων των παικτών και οι παρεμβολές του σήματος από εξωτερικούς παράγοντες δεν γίνεται να προσομοιωθούν ή είναι εξαιρετικά δύσκολο. Παρόλα αυτά με την επιλογή χρήσης της τεχνολογίας UWB και την χρήση ενός πιθανού πλεονασμού anchors υπάρχει ένα πολύ καλό υπόβαθρο για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων και κάθε άλλου είδους προβλήματα προκύψουν τέτοιας φύσης.

Σε ένα πιο πρακτικό επίπεδο το σύστημα αυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί στους παίκτες με έναν φορητό εξοπλισμό. Αυτός θα έφερε τον πομποδέκτη για την UWB τεχνολογία καθώς και έναν μηχανισμό απτικής ανάδρασης για προειδοποίηση του παίκτη. Επιπροσθέτως θα υπάρχει και μια πηγή ενέργειας από μπαταρίες λιθίου καθώς αυτές προσδίδουν την καλύτερη αναλογία απόδοσης-βάρους. Για αυτές θα πρέπει να γίνει σημαντική μελέτη και υπολογισμός της ενεργειακής απαίτησης του συστήματος καθώς αποτελούν το μεγαλύτερο βάρος στο φορητό εξοπλισμό. Αναλυτικότερα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αναλυτική καταγραφή της κατανάλωσης του μικροελεγκτή που θα επιλεγεί, του αισθητήρα UWB και του μηχανισμού ανάδρασης. Η μελέτη αυτή χαρακτηρίζεται κρίσιμη καθώς το φορητό σύστημα αυτό πρέπει να είναι όσο πιο ελαφρύ γίνεται για να μην εμποδίζει τους παίκτες αλλά και ούτε την ροή του παιχνιδιού.

## 8.3 Προτάσεις βελτίωσης

Κατά την ολοκλήρωση την εργασία παρατηρείται ότι δεν εξαντλεί το αντικείμενο το οποίο μελετά αλλά αντιθέτως αναδεικνύει αρκετές κατευθύνσεις που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές μελέτες. Η προφανής επέκτασή της εργασία αφορά την χρήση πραγματικών UWB αισθητήρων και την αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής και της γενικότερης λειτουργία του συστήματος σε ένα ελεγχόμενο χώρο. Με την σύγκριση των προσομοιωμένων δεδομένων και των πραγματικών θα βοηθήσει στην ακριβέστερη και ορθή τροποποίηση του συστήματος για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του.

Ακόμα η χρήση πιο εξελιγμένων τεχνικών φιλτραρίσματος και πρόβλεψη κίνησης θα βελτίωνε ακόμα περισσότερο τα αποτελέσματα. Ειδικότερα για την ακριβέστερη ανίχνευση την εγγύτητας θα μπορούσε το σύστημα να εξελιχθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη του την ταχύτητα αλλά και την κατεύθυνση με την οποία κινούνται οι παίκτες. Επιπροσθέτως αν παρατηρηθεί ότι υπάρχουν μη ακριβή δεδομένα λόγω απότομης αλλαγής της κατεύθυνσης των παικτών τότε θα μπορούσε να γίνει η χρήση του εκτεταμένου φίλτρου Kalman (Extended Kalman Filter - EKF). Το EKF είναι κατάλληλο και για μη γραμμικά συστήματα κάτι που θα μπορούσε να αυξήσει την αξιοπιστία των μετρήσεων.[20][21]

Ωστόσο ακόμα και με το EKF υπάρχει περίπτωση οι εξωτερικοί παράγοντες είναι τόσο δυσμενείς όπου τα δεδομένα να είναι και εκεί ακατάλληλα. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει χρήση φίλτρων σωματιδίων (Particle Filters) τα οποία δεν βασίζουν την λειτουργία τους σε γραμμικές ή Γκαουσιανές υποθέσεις. Έτσι τα φίλτρα αυτά κάνουν πολλές προσομοιώσεις πολλαπλών πιθανών θέσεων ενός παίκτη βάση των μετρήσεων που έχουν. Όμως η χρήση αυτών των φίλτρων είναι πιο υπολογιστικά απαιτητική και απαιτεί μεγάλη προσοχή η χρήση του παρόλα που προσφέρουν υψηλή ανθεκτικότητα σε ακραία σφάλματα κινήσεις που δεν μπορούν να προβλεφθούν αλλιώς.[21]

Το σύστημα αυτό και η φιλοσοφία πίσω από αυτό δεν είναι απαραίτητο να περιοριστεί μόνο στον χώρο του ποδοσφαίρου αλλά και του αθλητισμού γενικότερα. Συστήματα σαν και αυτό μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλα παραολυμπιακά αθλήματα αλλά ακόμα και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου η παρουσία ανθρώπινου δυναμικού κοντά σε κινούμενα μηχανήματα αποτελεί πολλές φορές θανάσιμο κίνδυνο. Σε αυτά τα σενάρια η χρήση του συστήματος και ειδικότερα με χρήση κάποιου εξελιγμένου φίλτρου θα μπορούσε να σώσει ζωές. Ειδικότερα σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον το σύστημα θα μπορεί να προβλέπει την τροχιά των ανθρώπων αλλά και των μηχανών ώστε σε περίπτωση πιθανής σύγκρουσης να ενεργοποιείται μηχανισμός επιβράδυνσης ή ακόμα και απενεργοποίησης των μηχανών.

Κλείνοντας η παρούσα πτυχιακή εργασία αποδεικνύει ότι με την χρήση σύγχρονων και εξελιγμένων τεχνολογιών εντοπισμού θέσης όπως η UWB μπορεί να λύσεις τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά θεμάτων. Το παρόν σύστημα δεν αποτελεί ένα θεωρητικό σύστημα αλλά είναι βασισμένο σε πρακτικές του υπάρχουν στον κλάδο και μπορεί να υλοποιηθεί μελλοντικά με στόχο την ασφαλέστερη διεξαγωγή αγώνων ποδοσφαίρου αλλά και την αυτονομία των αθλητών με οπτική αναπηρία, λειτουργώντας πάντα σαν βοηθός και όχι σαν αθέμιτο μέσο απόκτησης πλεονεκτήματος. Σε αυτήν την ενότητα αναλύονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις βελτίωσης της.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C*, vol. 37, 2007
- [2] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, “A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2019.
- [3] S. Gezici et al., “Localization via Ultra-Wideband Radios: A Look at Positioning Aspects for Future Sensor Networks,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, 2005.
- [4] International Blind Sports Federation (IBSA), “Blind Football Laws of the Game 2022–2025,” 2022.
- [5] Magno E Silva MP, Winckler C, Costa E Silva AA, Bilzon J, Duarte E. Sports injuries in paralympic track and field athletes with visual impairment. *Med Sci Sports Exerc.* 2013 May;45(5):908-13. doi: 10.1249/MSS.0b013e31827f06f3. PMID: 23247703..
- [6] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd ed. Artech House, 2006.
- [7] J. Cho and B. Lee, “Optimal layout of four anchors to improve accuracy of Ultra-Wideband based indoor positioning,” *Expert Systems with Applications*, vol. 255, p. 124808, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.124808.
- [8] Hersh, M., Johnson, M. (2008). Disability and Assistive Technology Systems. In: Hersh, M., Johnson, M. (eds) *Assistive Technology for Visually Impaired and Blind People*. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-867-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-867-8_1)
- [9] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, and M. Z. Win, “Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 404–426, 2009.
- [10] FIFA, “Electronic Performance and Tracking Systems (EPTS),” FIFA Innovation Programme, 2020.
- [11] ISO, “Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction (ISO/DIS 12100:2025)” 2025.
- [12] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Prentice Hall, 1993.
- [13] OASIS, “MQTT Version 3.1.1 Specification,” 2014.
- [14] M. Kotaru et al., “SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi,” in *Proc. ACM SIGCOMM*, 2015.
- [15] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, “A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137, 1987.
- [16] Marano, Salvatore & Gifford, Wesley & Wymeersch, Henk & Win, Moe. (2010). NLOS Identification and Mitigation for Localization Based on UWB Experimental Data. *Selected Areas in Communications*, *IEEE Journal on*. 28. 1026 - 1035. 10.1109/JSAC.2010.100907.
- [17] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,” *J. Basic Eng.*, vol. 82, pp. 35–45, 1960.

- [18] C. R. Harris et al., “Array programming with NumPy,” *Nature*, vol. 585, pp. 357–362, 2020.
- [19] J. D. Hunter, “Matplotlib: A 2D Graphics Environment,” *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007
- [20] G. Welch and G. Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter,” University of North Carolina at Chapel Hill, Tech. Rep. TR 95-041, 2006.
- [21] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2005.
- [22] P. M. Pittokopiti and R. Grammenos, “Infrastructureless UWB based collision avoidance system for the safety of construction workers,” in *Proc. 26th IEEE International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2019, pp. 490–495,
- [23] Patwari, Neal & Ash, J.N. & Kyperountas, Spyros & Hero, Alfred & Moses, Randolph & Correal, Neiyer. (2005). Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*. 22. 54 - 69. 10.1109/MSP.2005.1458287.
- [24] IBSA, "Football – Overview."
- [25] Paralympic Canada, "Football 5-a-side."
- [26] MQTT.org, “MQTT: The Standard for IoT Messaging.”
- [27] IBM, “MQTT,” IBM Support, Mar. 30, 2022.
- [28] ISO, “ISO/IEC 20922:2016 — Information technology — Message Queuing Telemetry Transport (MQTT),” ISO.
- [29] VerneMQ, “What is MQTT (MQTT primer).”
- [30] Espressif Systems, “ESP8266EX Datasheet.”
- [31] Qorvo/Decawave, “DW1000 Datasheet.”
- [32] Qorvo, “DW3000 Datasheet,” Rev. B, 2021.
- [33] J. Tiemann, J. Friedrich, and C. Wietfeld, “Experimental Evaluation of IEEE 802.15.4z UWB Ranging Performance under Interference,” *Sensors*, vol. 22, no. 4, 2022.
- [34] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques," in *IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020)*, vol., no., pp.1-174, 25 Aug. 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9179124.
- [35] Wattananavin, Thradon & Sengchuai, Kiattisak & Jindapetch, Nattha & Booranawong, Apidet. (2020). A Comparative Study of RSSI-Based Localization Methods: RSSI Variation Caused by Human Presence and Movement. *Sensing and Imaging*. 21. 31. 10.1007/s11220-020-00296-1.
- [36][https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-sensory-substitution-device-and-its-conversion-principles-A-The\\_fig8\\_5487451](https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-sensory-substitution-device-and-its-conversion-principles-A-The_fig8_5487451) (21-0-2026)
- [37] <https://ibsasport.org/sports/football/about/classification/> (21-0-2026)
- [38]<https://fcstpauli-blindenfussball.de/wp-content/uploads/2023/03/6-Rules-IBSA-Blind-Football-B1-Rulebook-2022-2025.pdf> (21-0-2026)
- [39] <https://www.infsoft.com/blog/technologies-for-server-based-indoor-positioning-compared/> (21-0-2026)

- [40] <https://www.sewio.net/uwb-technology/two-way-ranging/> (21-0-2026)
- [41] [https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-a-general-trilateration-process-Drawing-three-circles-that-intersect-at-a\\_fig1\\_322518185](https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-a-general-trilateration-process-Drawing-three-circles-that-intersect-at-a_fig1_322518185) (21-0-2026)
- [42] <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-023-01000-y> (21-0-2026)
- [43] <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/the-future-of-positioning-exploring-uwb-and-bluetooth-channel-sounding> (21-0-2026)
- [44] <https://www.skyradar.com/blog/kalman-filter-for-intelligent-radar-data-enhancement> (21-0-2026)
- [45] [https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-the-ESP8266EX-SoC\\_fig4\\_334609941](https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-the-ESP8266EX-SoC_fig4_334609941) (21-0-2026)
- [46] <https://eu.mouser.com/new/qorvo/qorvo-dw1000-ic> (21-0-2026)
- [47] <https://eu.mouser.com/new/qorvo/qorvo-dw3000-transceivers> (21-0-2026)
- [48] <https://forum.arduino.cc/t/multiple-anchors-for-dwm1000/619884> (21-0-2026)
- [49] [https://docs.gizwits.com/en-us/module\\_source/esp8266/esp8266\\_datasheet.html](https://docs.gizwits.com/en-us/module_source/esp8266/esp8266_datasheet.html) (21-0-2026)
- [50] <https://www.eaom-amea.gr/portal/athlimata/podosfairo-5x5> (21-01-2026)
- [51] <https://ibsasport.org/sports/football/about/history/> (22-01-2026)
- [52] <https://github.com/Apopal1/UWB-Positioning>