



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σύστημα εντοπισμού θέσης πραγματικού χρόνου με χρήση  
τεχνολογίας Ultra - Wideband**

Διπλωματική Εργασία

του

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΔΕΛΗΓΙΩΡΓΗ**

**Επιβλέπων:** Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ομάδα Κυκλωμάτων και Συστημάτων  
Αθήνα, 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σύστημα εντοπισμού θέσης πραγματικού χρόνου με χρήση  
τεχνολογίας Ultra - Wideband**

Διπλωματική Εργασία

του

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΔΕΛΗΓΙΩΡΓΗ**

**Επιβλέπων:** Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 08 Μαρτίου 2021

.....  
Πέτρος-Παυλος Σωτηριάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ομάδα Κυκλωμάτων και Συστημάτων  
Αθήνα, Ιούνιος 2021

**Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

.....  
**Κωνσταντίνος Δεληγιώργης**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών  
Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Δεληγιώργης, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



# Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, η τεχνολογία GPS είναι πολύ διαδεδομένη και βρίσκεται στο επίκεντρο συζήτησης και έρευνας. Οι δυνατότητες που μπορεί να έχει ένα τέτοιο σύστημα GPS είναι γνωστές, αλλά ακόμα δεν είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια οικονομική και εύκολη λύση πάνω στην υπάρχουσα υποδομή του GPS, για τη διασπορά του σήματος στο εσωτερικό κτιρίων καθώς και μέσα από εμπόδια. Ωστόσο, με την εμπειρία των τελευταίων ετών, η τεχνολογία UWB μπορεί να είναι ο ιδανικός υποψήφιος για την επίλυση του προβλήματος αυτού. Πρόκειται για ένα νέο πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας που λειτουργεί μέσω ραδιοκυμάτων. Αυτή η νέα τεχνολογία υποστηρίζει τη μεταβίβαση της ψηφιακής πληροφορίας και σε αντίθεση με παρόμοιες τεχνολογίες, λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες με χρήση χαμηλής ισχύος, συνεπώς και σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων της τάξης των GHz. Η τεχνολογία UWB μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη εξαιρετικά ακριβών χωρικών και κατευθυντικών δεδομένων.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός Συστήματος Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό χρόνο (RTLS), σε εσωτερικό χώρο με χρήση της τεχνολογίας UWB. Αρχικά, αναλύθηκαν οι εφαρμογές και οι υποψήφιες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα τέτοιο σύστημα. Επιλέχθηκε η τεχνολογία UWB, για τα οφέλη που την χαρακτηρίζουν και στη συνέχεια με τη χρήση των γνωστών αλγορίθμων εντοπισμού έγινε εφικτή η εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου στο χώρο με ακρίβεια.

Στη συνέχεια αφότου πραγματοποιήθηκε ανάλυση και μελέτη, βάσει του πρότυπου IEEE.802.15.4, της τεχνολογίας UWB και του πομποδέκτη DWM1000, που παρέχεται από την εταιρεία DecaWave, έγινε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικής και Συστημάτων του ΕΜΠ σχεδιασμός και κατασκευή ενός τυπωμένου κυκλώματος σε πλακέτα. Επιπλέον, σε αυτή τη διπλωματική εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος Two Way Ranging (TWR), από την τεχνική εντοπισμού Time of Arrival και οι παραλλαγές SS-TWR και DS-TWR που χρησιμοποιούνται μέσω του DWM1000 για την εκτίμηση της απόστασης μεταξύ δυο μονάδων. Στη συνέχεια, έγινε μια προσπάθεια ανάπτυξης λογισμικού με βάση αυτές τις δυο μεθόδους και τη κατάλληλη διαμόρφωση καναλιού.

Τέλος, παρουσιάζεται η λογική πίσω από το λογισμικό, με την βοήθεια διαγραμμάτων ροής καθώς και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τη πειραματική διαδικασία, η οποία έγινε σε προκαθορισμένο περιβάλλον.

## Λέξεις Κλειδιά:

Σύστημα Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο, Εντοπισμός Θέσης σε Εσωτερικούς χώρους, UWB, DWM1000, DW1000, Αμφίδρομη Εμβέλεια (TWR), SS\_TWR, DS\_TWR, Τεχνικές σχεδίασης PCB, Χρόνος Αφίξης (ToA), Χρόνος πτήσης (ToF)

# Abstract

The last decades, the GPS technology is extensively used and exists at the center of discussion and research. The capabilities of such a system are well known, but it is not yet possible to create an affordable and easy solution based on the existing GPS infrastructure, for signal dispersion inside buildings and through obstacles. However, the knowledge that has been acquired the recent years makes the UWB technology the ideal candidate to solve this problem, as it is a new short-range wireless communication protocol that works via radio waves. This new technology supports the transfer of digital information and unlike similar technologies, it operates at very high frequencies using low power, and therefore in a wide range of frequencies of the range of GHz. UWB technology can be used to obtain extremely accurate spatial and directional data.

The aim of this Thesis is the development of a Real Time Location System (RTLS) that is going to work indoors by using UWB technology. First, the analysis of the applications as well as the candidate technologies, that can be used in such a system, are presented. The UWB technology was chosen, based on the benefits that it offers and by using the known localization algorithms, the position of an object in space could accurately be estimated.

Once the UWB technology and the DWM1000 transceiver, which was provided by DecaWave, were analyzed and studied, following the IEEE.802.15.4 standard, a printed circuit board (PCB) was designed and manufactured at the NTUA Electronics and Systems Laboratory. Furthermore, the Two Way Ranging (TWR) method is presented, from the Time of Arrival localization technique and the SS-TWR and DS-TWR variants used by the DWM1000 transceiver to estimate the distance between two units. Subsequently, an attempt was made to develop software based on these two methods with the appropriate channel configuration.

Finally, the logic behind the software is presented, with the help of flowcharts, as well as the results obtained from the experimental process that was performed in a predefined environment.

## **Key Words:**

Real Time Location System (RTLS), Indoor positioning System, UWB, DWM1000, DW1000, Two-Way-Ranging (TWR), SS\_TWR, DS\_TWR, Hardware, PCB, Time of Arrival (ToA), Time of Flight (ToF)



# Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικής και Συστημάτων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά την ακαδημαϊκά έτη της χρονικής περιόδου Σεπτέμβρη 2020 - Ιούνιο 2021. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σωτηριάδη Πέτρο-Παύλο, για την ευκαιρία που μου έδωσε, να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία, σε ένα θέμα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό.

Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Ασημακόπουλο Κωνσταντίνο για την εξαιρετική συνεργασία, υπομονή και τη συνεχή καθοδήγηση κατά τη συγγραφή της εργασίας, όπως και τον υποψήφιο διδάκτορα Παπαφώτη Κωνσταντίνο για την βοήθεια στο κομμάτι της σχεδίασης PCB.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους φίλους και φίλες μου για όλες τις υπέροχες και άσχημες αναμνήσεις που μοιραστήκαμε μαζί όλα αυτά τα χρόνια. Συγκεκριμένα όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά, τα πιο κοντινά μου άτομα Α. Άγγελος, Κ. Γιώργος, Ε. Αλεξία, Μ. Νίκος και Ν. Φοίβος για τη δύναμη που μου δίνουν καθημερινά.

Τέλος , θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ στην οικογένεια μου, που μπορεί να απέχουμε πολλά χιλιόμετρα μεταξύ μας: Ηλίας-Κική (Καμερούν), Γιώργος-Βάλια (Σουηδία) και Αργυρώ (Ρόδος), αλλά είναι δίπλα μου σε κάθε επιλογή μου και βήμα μου.

# Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων	vi
Κατάλογος Πινάκων	vii
Κατάλογος Συντομογραφιών	viii
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 RTLS	1
1.2 Σύγκριση Πιθανών Τεχνολογιών για Εντοπισμό Θέσης	1
1.3 Εφαρμογές των RTLS	3
1.4 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας	3
1.5 Δομή της Διπλωματική Εργασίας	4
<b>2. Τεχνολογία UWB και DWM1000</b>	<b>5</b>
2.1 UWB	5
2.1.1 Λειτουργία και χαρακτηριστικά ενός UWB σήματος	5
2.1.2 Τεχνικές Εντοπισμού με UWB	6
2.1.3 Σύγκριση Τεχνικών Εντοπισμού με UWB	10
2.2 Trilateration	10
2.3 Δομή πλαισίου UWB με βάσει το πρότυπο IEEE.802.15.4a	12
2.4 DW1000	13
2.5 DWM1000	15
<b>3. Περιγραφή Υλικού (Hardware)</b>	<b>17</b>
3.1 Κύκλωμα Τροφοδοσίας	17
3.2 Επεξεργαστής και DWM1000	19
3.2.1 Μικροελεγκτής	19
3.2.2 EEPROM	20
3.2.3 DWM1000	21
3.3 Σύνδεση DWM1000 με τον MCU	22
3.4 Σχηματικό Διάγραμμα και PCB πλακέτας	24
3.4.1 Διάταξη κεραίας	28
<b>4. Two-Way Ranging</b>	<b>29</b>
4.1 Two-Way Ranging	29
4.1.1 Single Sided Two-Way Ranging (SS-TWR)	30
4.1.2 Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR)	32

4.1.3 Symmetric-Double-Sided Two-Way Ranging (SDS-TWR)	33
4.1.4 Σύγκριση Μεθόδων Εφαρμογής TWR	33
4.1.5 Υπολογισμός καθυστέρησης	35
4.2 Λειτουργίες του DW1000	36
4.2.1 Μετάδοση Μηνύματος (TX)	37
4.2.2 Λήψη Μηνύματος (RX)	39
4.2.3 Timestamps	41
4.3 Μηνύματα	42
4.3.1 Παράδειγμα Μηνύματος	43
4.4 Διαμόρφωση Καναλιού	43
4.4.1 Επιλογή Καναλιού και Εύρους Ζώνης	44
4.4.2 Επιλογή Ρυθμού Δεδομένων, Preamble και PRF	46
<b>5. Προγραμματισμός και Μετρήσεις</b>	<b>47</b>
5.1 Προγραμματισμός Μικροεπεξεργαστή	47
5.2 Διαγράμματα Ροής για την Ετικέτα και τις Άγκυρες	48
5.3 Μετρήσεις	52
5.4 Περιβάλλον Πειράματος	53
<b>6. Επίλογος και Μελλοντικές Επεκτάσεις</b>	<b>59</b>
6.1 Συμπεράσματα	59
6.2 Future Work	59
6.2.1 DS-TWR-Parallel	59
6.2.2 Low Power	60
6.2.3 EEPROM	60
<b>7. Βιβλιογραφία</b>	<b>61</b>

# Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 2.1:** Σήμα Στενής ζώνης και UWB Σήμα στο πεδίο του χρόνου [2]
- Εικόνα 2.2:** Δισδιάστατος Εντοπισμός Ετικέτας
- Εικόνα 2.3:** ΤοA
- Εικόνα 2.4:** AoA
- Εικόνα 2.5:** TDoA
- Εικόνα 2.6:** Trilateration
- Εικόνα 2.7:** Δομή Πλαισίου UWB [27]
- Εικόνα 2.8:** DWM1000 [29]
- Εικόνα 2.9:** High Level Block Diagram [29]
- Εικόνα 3.1:** Επισκόπηση Σχηματικού DWM1000
- Εικόνα 3.2:** USB Mini
- Εικόνα 3.3:** Buck/Boost
- Εικόνα 3.4:** Γραμμικός Φορτιστής Μπαταρίας
- Εικόνα 3.5:** Χαρακτηρίστηκα STM32L412CBUx [35]
- Εικόνα 3.6:** EEPROM
- Εικόνα 3.7:** Διάγραμμα Ακροδεκτών DWM1000 [29]
- Εικόνα 3.8:** DW1000 για SPIPHA = 0 Πρωτόκολλο Μεταφοράς [29]
- Εικόνα 3.9:** Σχηματικός Κυκλώματος Μέρος I
- Εικόνα 3.10:** Σχηματικός Κυκλώματος Μέρος II
- Εικόνα 3.11:** Σχηματικός Κυκλώματος Μέρος III
- Εικόνα 3.12:** PCB Layout Πλακέτας
- Εικόνα 3.13:** Πίνακας Εξαρτημάτων
- Εικόνα 3.14:** Διάταξη κεραίας DWM1000 σε μια πλακέτα [29]
- Εικόνα 4.1:** TWR [40]
- Εικόνα 4.2:** SS\_TWR [27]
- Εικόνα 4.3:** DS\_TWR με 3 μηνύματα [27]
- Εικόνα 4.4:** Διάγραμμα Ροής DW1000 [27]
- Εικόνα 4.6:** Βασική Ακολουθία Μετάδοσης [27]
- Εικόνα 4.7:** Βασική Ακολουθία Λήψης [27]
- Εικόνα 4.8:** Γενική Μορφή Μηνύματος
- Εικόνα 5.1:** Διάγραμμα Ροής Ετικέτας
- Εικόνα 5.2:** Διάγραμμα Ροής Άγκυρας B/C
- Εικόνα 5.3:** Διάγραμμα Ροής Άγκυρας A
- Εικόνα 5.4:** Διάγραμμα 11 Μηνυμάτων
- Εικόνα 5.5:** Τοποθέτηση Anchors στο CS LAB
- Εικόνα 5.6:** Εκτίμηση θέσης Ετικέτας με τον αλγόριθμο Trilateration
- Εικόνα 5.7:** Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.20
- Εικόνα 5.8:** Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.21
- Εικόνα 5.9:** Τοποθέτηση Anchors στο Σαλόνι
- Εικόνα 5.10:** Εκτίμηση θέσης Ετικέτας με τον αλγόριθμο Trilateration
- Εικόνα 5.11:** Εκτίμηση θέσης με Trilateration εντός μιας περιοχής
- Εικόνα 5.12:** Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.11
- Εικόνα 5.13:** Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.12
- Εικόνα 6.1:** Parallel TWR 3 Άγκυρών [27]

# Κατάλογος Πινάκων

**Πίνακας 1.1:** Χαρακτηρίστηκα Τεχνολογιών για RTLS [9]

**Πίνακας 2.1:** Σύγκριση Τεχνικών Εντοπισμού με UWB

**Πίνακας 2.2:** Υποστηριζόμενα UWB κανάλια του DW1000 [27]

**Πίνακας 3.1:** Λειτουργίες των Pin του DWM1000 [29]

**Πίνακας 3.2:** Λειτουργίες SPI [29]

**Πίνακας 4.1:** Τυπικά σφάλματα που προκαλούνται από το ρολόι κατά την εκτίμηση του χρόνου πτήσης σε SS-TWR [27]

**Πίνακας 4.2:** Τυπικό σφάλμα που προκαλείται από το ρολόι στην εκτίμηση χρόνου πτήσης του SS-TWR χρησιμοποιώντας πραγματικά μήκη IEEE.802.15.4-2011 UWB frame [27]

**Πίνακας 4.3:** Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Μεθόδων TWR

**Πίνακας 4.4:** Λειτουργίες DW1000 [27]

**Πίνακας 4.5:** Προτεινόμενο Μέγεθος PAC [27]

**Πίνακας 4.6:** Υποστηριζόμενα Κανάλια και προτεινόμενα preamble codes [27]

**Πίνακας 4.7:** Προτεινόμενο μέγεθος Preambe [27]

**Πίνακας 5.1:** Μετρήσεις DS-TWR και SS-TWR

# Κατάλογος Συντομογραφιών

**Anchor:** Fixed reference point

**Tag:** Searched object

**RTLS:** Real Time Location System

**BLE:** Bluetooth Low Energy

**WLAN:** Wireless Local Area Network

**IC:** Integrated Circuit

**LoS:** Line of Sight

**NLoS:** No Line of Sight

**RFID:** Radio Frequency IDentification

**RSSI:** Received Signal Strength Indicator RTLS Real Time Location Services

**SPI:** Serial Peripheral Interface

**Tag:** Searched object

**AoA:** Angle of Arrival

**TDoA:** Time Difference of Arrival

**ToA:** Time of Arrival

**PoA:** Phase of Arrival

**ToF:** Time of Flight

**UWB:** Ultra Wide Band

**SWD:** Seral Wire Debug

**EEPROM:** Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

**GPS:** Global Positioning System

# Κεφάλαιο 1

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 RTLS

Τις τελευταίες δυο δεκαετίες υπάρχει αυξημένη ανάγκη για δεδομένα προς επεξεργασία και χρήση σε ποικίλες εφαρμογές. Δεδομένα σαν και αυτά, είναι και η ακριβής τοποθεσία ενός άτομο, ζώου ή αντικείμενου σε εσωτερικούς χώρους. Η τοποθέτηση μπορεί να ταξινομηθεί σε δυο τύπους, ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο διεξάγεται σε α) Εξωτερική τοποθέτηση και β) Εσωτερική τοποθέτηση. Διαφορετικές εφαρμογές ενδέχεται να απαιτούν διαφορετικούς τύπους τεχνολογιών εντοπισμού θέσης που ταιριάζουν πιο πολύ στις ανάγκες τους. Μέχρι στιγμής το γνωστό σε όλους GPS (Global Positioning System) είναι μια τεχνολογία που είναι κατάλληλη και αποτελεσματική για εξωτερικούς χώρους και όχι για εσωτερικούς χώρους, καθώς τα δορυφορικά ραδιοσήματα δεν μπορούν να διεισδύσουν σε συμπαγείς τοίχους και εμπόδια. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για την ανάπτυξη συστημάτων εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία σε σύγκριση με αυτές που παρέχονται για εξωτερικούς χώρους. [1]

Τα συστήματα αυτά καθορίζουν τη θέση ενός αντικείμενου σε ένα φυσικό χώρο συνεχώς και σε πραγματικό χρόνο, για αυτό έχουν και ονομαστεί Συστήματα Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο (RTLS - Real Time Location System). Ένα RTLS επιτυγχάνεται με την βοήθεια μικρών ηλεκτρονικών συσκευών. Μικρές σε μέγεθος για να μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και χωρίς κάποιο σημαντικό βάρος πάνω σε άτομα ή αντικείμενα ανά πάσα στιγμή. Οι συσκευές αυτές μπορούν να έχουν κατασκευαστεί με βάσει διάφορες τεχνολογίες. Προς το παρόν υπάρχουν πολλές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους για τον εντοπισμό θέσης ενός ανθρώπου ή αντικείμενου - στόχου. Οι πιο κοινές τεχνολογίες από αυτές είναι το α) WiFi, β) το BLE (Bluetooth Low Energy), γ) το Zig-Bee, δ) UWB, ε) RFID, στ) Computer Vision κτλ.

### 1.2 Σύγκριση Πιθανών Τεχνολογιών για Εντοπισμό Θέσης

Πολλά συστήματα και τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί με την πάροδο των ετών από ερευνητές και εμπορικές εταιρείες για να παρέχουν την ακριβή θέση ατόμων, εξοπλισμού και άλλων στοιχείων στο εσωτερικό των κτιρίων. Ανάλογα με τις απαιτήσεις, όπως η ακρίβεια, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τα εταιρικά/μη-εταιρικά συστήματα, ο ρυθμός ενημέρωσης θέσης, το μέγιστο εύρος κ.τ.λ. μια τεχνολογία είναι πιο ελκυστική για τον τελικό χρήστη απ'οτι μια άλλη. [2]

Για την σύγκριση των πιθανών τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη ενός Συστήματος Εντοπισμού Θέσης σε πραγματικό χρόνο, παρακάτω θα αναφερθούν τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για κάποιες τεχνολογίες που προαναφέρθηκαν:

#### α) WiFi [3]

**Πλεονεκτήματα:** Η πλειονότητα των διαθέσιμων συσκευών σήμερα είναι εξοπλισμένα με συνδεσιμότητα WLAN, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε πολλά κτίρια και εσωτερικούς χώρους. Χαμηλός κόστος και δεν απαιτείται LOS (Line-Of-Sight).

**Μειονεκτήματα:** Επανυπολογισμός της προκαθορισμένης ισχύος του σήματος σε περίπτωση αλλαγών στο περιβάλλον (π.χ. ανοιχτές/κλειστές πόρτες ή μετακίνηση επίπλων).

### β) BLE (Bluetooth Low Energy) [4]

Πλεονεκτήματα: Δεν απαιτεί LOS μεταξύ των συσκευών επικοινωνίας. Εγκαταστημένο σχεδόν σε όλες τις σύγχρονες συσκευές. Χαμηλός κόστος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Μειονεκτήματα: Πιθανότητα ραδιοφωνικών παρεμβολών. Για καλύτερη ακρίβεια αυξάνεται πολύ το κόστος αφού απαιτούνται περισσότερες μονάδες BLE.

### γ) ZigBee [5] [6]

Πλεονεκτήματα: Χαμηλό κόστος εξοπλισμού και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Μειονεκτήματα: Αρκετά ευάλωτο σε παρεμβολές που προκαλούνται από ένα ευρύ φάσμα τύπων σήματος (χρησιμοποιώντας την ίδια συχνότητα).

### δ) UWB (Ultra Wideband) [7]

Πλεονεκτήματα: Υψηλή ακρίβεια, ακόμα και με την παρουσία σοβαρών πολλαπλών διαδρομών (Multipath propagation). Διέρχεται αποτελεσματικά μέσω των τοίχων και άλλων εμποδίων. Το UWB δεν παρεμβαίνει στα υπάρχοντα RF συστήματα εάν έχει σχεδιαστεί σωστά. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Μειονεκτήματα: Μεσαίο κόστος για τον εξοπλισμό. Το UWB είναι λιγότερο ευαίσθητο σε παρεμβολές, σε σχέση με άλλες τεχνολογίες και εξακολουθεί να υπόκειται σε παρεμβολές από μεταλλικά υλικά.

### ε) RFID [8]

Πλεονεκτήματα: Διαπέρνει τα στέρεα και μη μεταλλικά αντικείμενα. Δεν απαιτεί LOS μεταξύ των RF πομπών και δεκτών.

Μειονεκτήματα: Δεν μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε άλλα συστήματα. Καταναλώνει περισσότερη ισχύ σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Η κεραία επηρεάζει το σήμα RF.

### στ) Computer Vision [9]

Πλεονεκτήματα: Υψηλή ακρίβεια. Δεν είναι απαραίτητη η μεταφορά κάποιας συσκευής πάνω σε άτομα ή στον κεντρικό στόχο.

Μειονεκτήματα: Απαιτείται LOS. Εξάρτηση από το περιβάλλον και περιορισμένη κάλυψη. Υψηλό κόστος για κάμερες υψηλής ανάλυσης και ηλεκτρονικούς υπολογιστές υψηλής απόδοσης για την επεξεργασία των εικόνων.

Πίνακας 1.1

Τεχνολογία	Bandwidth	Ακρίβεια	Εμβέλεια	Κόστος
WLAN	40-160 MHz	1 - 10 m	50 - 100 m	\$
BLE	80 MHz	1 - 2 m	10 cm - 10 m	\$
RFID	5 MHz	0.02 - 1 m	10 - 40 m	\$\$\$
ZigBee	80 MHz	1 - 2 m	100 - 250 m	\$
Computer Vision	-	10 - 30 cm	Αναλόγως την εφαρμογή	\$\$\$
UWB	> 500 MHz	10 - 15 cm	80 - 150 m	\$\$
GPS	≈ 24 MHz	500 m - 30 cm	-	\$\$



Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 1.1**, υπάρχουν πολλές τεχνολογίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η απόφαση επιλογής μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή. Μεταξύ των προαναφερθεισών τεχνολογιών, η τεχνολογία UWB παρέχει έναν συνδυασμό κάλυψης μεσαίου εύρους, σταθερότητας σε περιπτώσεις χωρίς οπτική επαφή (LOS) και υψηλής ακρίβειας. Αυτοί είναι κάποιοι από τους λόγους που επιλέχθηκε η τεχνολογία UWB για την ανάπτυξη ενός RTLS στη παρούσα διπλωματική εργασία. [10]

## 1.3 Εφαρμογές των RTLS

Ένα RTLS μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμους υλικοτεχνικούς ή επιχειρησιακούς τομείς όπως:

- Ασφάλεια, Εντοπισμός και Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων μέσα σε μια εγκατάσταση και ένα σπίτι.
- Κατασκευαστικές εταιρείες ή εταιρείες ενοικίασης βαρέων εξοπλισμού που πρέπει να γνωρίζουν την ακριβές θέση του εξοπλισμού και των εργαλείων τους. [11]
- Σε Ξενοδοχεία και στο κλάδο της εστίασης, για την παρακολούθηση της ασφάλειας του προσωπικού και των πελατών αλλά και την καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών.
- Εγκατάστασης παραγωγής ή διανομής, δηλαδή σε εγκαταστάσεις που πρέπει (π.χ.) να παρακολουθούν τις παλέτες στην μεταφορά, παράδοση και αποθήκευση τους για λόγους ποιοτικού ελέγχου.
- Κλάδος Υγείας, όπου κάθε καθυστέρηση μπορεί να αποβεί μοιραία, τα RTLS μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την σπατάλη χρόνου για εντοπισμό εργαλείων ή άλλων ετικετών και να δώσουν λύσεις στην υγειονομική περίθαλψη. [12]
- Γεωργικές εγκαταστάσεις, που έχουν την ανάγκη να παρακολουθούν τον εξοπλισμό και τα ζώα τους για να διασφαλίσουν τόσο την ασφάλεια όσο και την υγεία τους.
- Αθλητισμός, τα δεδομένα που λαμβάνονται από ένα RTLS σε έναν αγώνα βοηθάνε στην ανάπτυξη μιας καλύτερης στρατηγικής παιχνιδιού και την παρακολούθηση της απόδοσης του αθλητή. [5]
- Αυτόματη απογραφή αποθεμάτων, σε λιανικό και χονδρικό εμπόριο.
- Παρακολούθηση αγωνιστικών οχημάτων σε προκαθορισμένη πίστα. [13]
- Τέλος, οπουδήποτε είναι ζητούμενο η εγγύτητα, μπορεί να αναπτυχθεί ένα RTLS για να την υπολογίσει και να συλλέγει δεδομένα εξ' αποστάσεως.

Να σημειωθεί ότι οι πληροφορίες τοποθεσίας και τα δεδομένα που παράγονται από τα RTLS συστήματα, συνήθως δεν περιλαμβάνουν ταχύτητα, κατεύθυνση ή χωρικό προσανατολισμό.

## 1.4 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της τεχνολογίας UWB και του πομποδέκτη DWM1000 της DecaWave. Η σχεδίαση και κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος για την αξιοποίηση των μονάδων DWM1000. Απαιτούνται τέσσερις πλακέτες με ενσωματωμένο τον πομποδέκτη DWM1000 και με τις κατάλληλες ρυθμίσεις καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της ακριβούς θέσης ενός αντικείμενου ή ατόμου σε προσαρμοσμένο χώρο με την καλύτερη ακρίβεια. Έπειτα το σύστημα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερους χώρους ρυθμίζοντας κάποιες παραμέτρους για χρήση σε άλλες εφαρμογές. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία θα εξεταστούν δύο διαφορετικοί μέθοδοι για την μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο διαφορετικών μονάδων και στο τέλος θα επιλεγεί αυτός με τα καλύτερα αποτελέσματα.

## 1.5 Δομή της Διπλωματική Εργασίας

Η παρούσα Εργασία είναι οργανωμένη σε 6 Κεφάλαια ως εξής:

**Κεφάλαιο 2:** Γίνεται πλήρης ανάλυση της τεχνολογίας UWB και των μεθόδων εντοπισμού θέσης με βάση αυτή τη τεχνολογία, καθώς και ανάλυση του πρότυπου IEEE 802.15.4. Στην συνέχεια αναλύονται τα χαρακτηριστικά του πομποδέκτη DWM1000 της DecaWave

**Κεφάλαιο 3:** Περιγράφεται το υλικό (Hardware) που χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση των πλακετών και παρατίθενται τα σχηματικά (PCB).

**Κεφάλαιο 4:** Αναλύεται η μέθοδος Διπλής Εμβέλειας (Two-Way Ranging) και οι λειτουργίες του DWM1000 για να επιτευχθεί. Παρουσιάζονται επίσης οι παράμετροι και οι ρυθμίσεις

**Κεφάλαιο 5:** Σχολιάζεται ο προγραμματισμός των μονάδων και παρουσιάζεται η διάταξη των μονάδων DWM1000 σε ένα προσαρμοσμένο χώρο και οι μετρήσεις που έχουν γίνει.

**Κεφάλαιο 6:** Γίνεται λόγος για πιθανές επεκτάσεις και βελτιστοποιήσεις της εφαρμογής .

Σημείωση: Ο πηγαίος κώδικας όλων των προγραμμάτων που συγγράφηκαν για τις ανάγκες της εργασίας παρατίθεται στην ηλεκτρονική διεύθυνση: [https://github.com/kdeligiorgis/UWB\\_DWM1000](https://github.com/kdeligiorgis/UWB_DWM1000)

# Κεφάλαιο 2

## 2. Τεχνολογία UWB και DWM1000

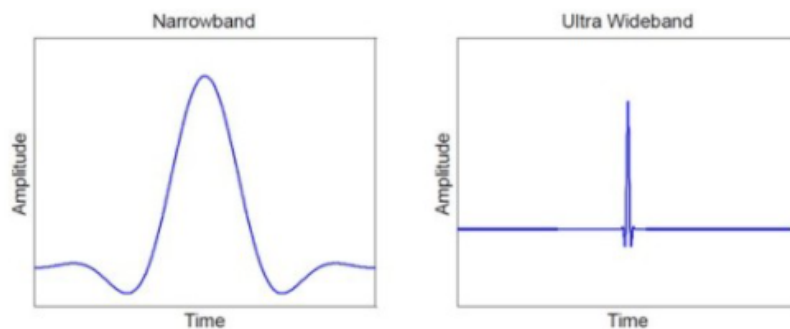
Η τεχνολογία Ultra Wideband (UWB) χρησιμοποιείται επιτυχώς σε Συστήματα Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο (RTLS). Το UWB είναι μια τεχνολογία ραδιοφώνου που κάνοντας χρήση ενέργειας χαμηλού επιπέδου σε επικοινωνίες μικρού εύρους και εύρους ζώνης σε μεγάλο μέρος του ραδιοφάσματος (spectrum) [14]. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών έχουν ως αποτέλεσμα δυνατότητες ακρίβειας και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, τα οποία καθιστούν την UWB την καταλληλότερη τεχνολογία για εφαρμογές RTLS σε εσωτερικούς χώρους σήμερα. [15]

### 2.1 UWB

#### 2.1.1 Λειτουργία και χαρακτηριστικά ενός UWB σήματος

Όπως έχει προαναφερθεί η UWB τεχνολογία είναι μια τεχνολογία ραδιοφώνου. Ένα ραδιοφωνικό σήμα χαρακτηρίζεται ως σήμα UWB εάν το εύρος ζώνης του είναι μεγαλύτερο από 500MHz ή μεγαλύτερο από το 20% της απόλυτης κεντρικής του συχνότητας. Αυτό επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλης ποσότητας ενέργειας σήματος χωρίς να παρεμβαίνει στη συμβατική μετάδοση στενής ζώνης (narrowband) και στη μετάδοση κυμάτων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. [16] Τα ρυθμιστικά όρια σε πολλές χώρες επιτρέπουν αυτήν την αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης του ραδιοφώνου και επιτρέπουν την ασύρματη μετάδοση με υψηλό ρυθμό σε προσωπικά δίκτυα (Personal Area Network - PAN). Αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά καθιστούν το UWB ιδανικό για τέτοιες εφαρμογές όπως τα RTLS. [15]

Ένας πομπός UWB λειτουργεί στέλνοντας δισεκατομμύρια παλμούς σε όλη τη συχνότητα του εύρους φάσματος. Δεδομένου ότι ο παλμός καταλαμβάνει μια τόσο ευρεία ζώνη συχνοτήτων, το άκρο του είναι πολύ απότομο και αυτό επιτρέπει στον δέκτη να μετρήσει με ακρίβεια το χρόνο άφιξης του σήματος. [17] Ο δέκτης μεταφράζει τους παλμούς σε δεδομένα “ακούγοντας” μια γνωστή ακολουθία παλμών που στέλνονται από τον πομπό. Οι παλμοί αποστέλλονται περίπου ένας ανά δύο νανοδευτερόλεπτα (ns), κάτι που βοηθά το UWB να επιτύχει την ακρίβεια του σε πραγματικό χρόνο. Λόγω της φύσης των σημάτων, οι παλμοί UWB διακρίνονται ακόμα και σε θορυβώδη περιβάλλον και τα σήματα είναι ανθεκτικά σε πολλαπλές διαδρομές (multipath). [18]



Εικόνα 2.1: Σήμα Στενής ζώνης και UWB Σήμα στο πεδίο του χρόνου [2]

Στην **Εικόνα 2.1** φαίνονται δύο σήματα, το ένα στενής ζώνης (narrowband) και το άλλο UWB. Σε μια αναπαράσταση ενός ηχητικού σήματος, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο πλάτος ή την ένταση του κύματος συναρτήσει του χρόνου και γενικά στο πεδίο του χρόνου. Στην πραγματικότητα τα ηχητικά σήματα είναι υπέρθεση κυμάτων, το καθένα με διαφορετική συχνότητα.[19] Ο μετασχηματισμός ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας για τους μηχανικούς στην ουσία είναι η καταγραφή της κατανομής των συχνοτήτων που αποτελούν το σήμα. Ο μετασχηματισμός που μεταφράζει ένα σήμα μεταξύ του πεδίου της συχνότητας και του χρόνου, είναι ο μετασχηματισμός Fourier. Το πεδίο του χρόνου και της συχνότητας λειτουργούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

Για ένα σήμα σε σύντομο χρονικό διάστημα είναι δύσκολο να διακριθούν οι συχνότητες που το αποτελούν, επομένως η κατανομή των συχνοτήτων θα ήταν πολύ μεγάλη. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι αντιστρέψιμος, έτσι και για ένα σήμα που βρίσκεται στο πεδίο της συχνότητας με μεγάλο εύρος συχνοτήτων (όπως ένα UWB σήμα), θα παρατηρηθεί μια απότομη αύξηση του χρόνου. Με λίγα λόγια, ένα συμπτωμένο κύμα σε σύντομο χρονικό διάστημα συσχετίζεται με ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (narrowband). Ένα κύμα που διαδίδεται για μεγάλο χρονικό διάστημα σχετίζεται με ένα συγκεντρωμένο εύρος συχνοτήτων. [16]

Το μεγάλο εύρος ζώνης είναι το κύριο χαρακτηριστικό των ασύρματων συστημάτων UWB. Αυτή η δυνατότητα προσφέρει βελτιωμένη χωρητικότητα καναλιού και επικοινωνία υψηλού ρυθμού δεδομένων σε συστήματα ψηφιακής επικοινωνίας. Η χωρητικότητα του καναλιού [20] ορίζεται από τον νόμο του Shannon και είναι ανάλογη με το εύρος ζώνης (B) και το λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N).

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

C: Χωρητικότητα καναλιού σε bits/s

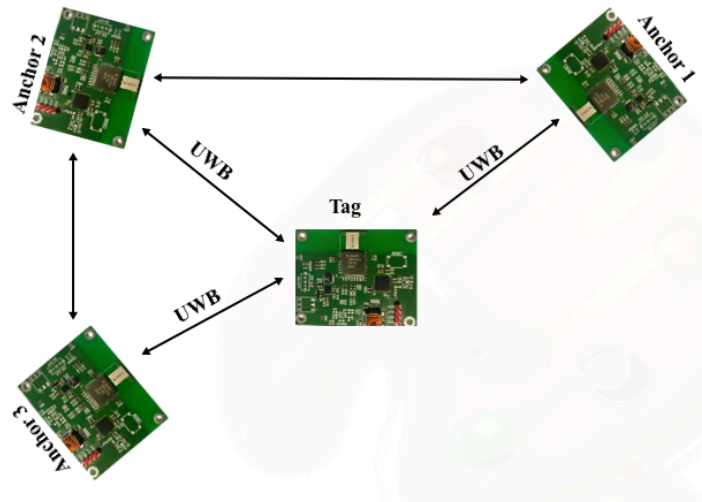
B: Εύρος ζώνης καναλιού

S/N: λόγος σήματος - θορύβου

Η διεύρυνση του εύρους συχνοτήτων αυξάνει τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων γρηγορότερα από την αύξηση του λόγου σήματος προς θορύβου όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση. Αυτό επιτρέπει στα συστήματα UWB να επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων εκμεταλλευόμενοι τη φύση της τεχνολογίας, αντί να χρησιμοποιούν πολύπλοκους αλγορίθμους για την αύξηση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο. [10]

## 2.1.2 Τεχνικές Εντοπισμού με UWB

Η τεχνολογία UWB όπως έχει προαναφερθεί είναι κατάλληλη για εφαρμογές εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνολογία, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικοί αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης όπου οι πληροφορίες θέσης εξάγονται από ραδιοσήματα που ταξιδεύουν μεταξύ των αγκυρών και της ετικέτας. Να αναφερθεί ότι για την εκτίμηση ενός στόχου σε δισδιάστατο (2D) χώρο, χρησιμοποιείται ένας αριθμός (τρεις για 2D - τέσσερις για 3D) σταθερών Αγκυρών (Anchors) σε γνωστές τοποθεσίες γύρω από την περιοχή στην οποία βρίσκεται η Ετικέτα (Tag), όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.2**.



**Εικόνα 2.2 Δισδιάστατος Εντοπισμός Ετικέτας**

Υπάρχουν πολλές τεχνικές εντοπισμού θέσης με χρήση της τεχνολογίας UWB και μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες βάσει ορισμένων μετρήσεων εκτίμησης: (1) Ώρα Άφιξης (Time of Arrival-ToA), (2) Γωνία Άφιξης (Angle of Arrival-AoA), (3) Φάση Άφιξης (Phase of Arrival-PhA) και (4) Διαφορά Ώρας Άφιξης (Time Difference of Arrival-TDoA).

### (1) ToA [21]

Η ώρα άφιξης είναι η απλούστερη και πιο κοινή τεχνική εντοπισμού θέσης. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη γνώση του ακριβούς χρόνου αποστολής ( $t_{sent}$ ) ενός σήματος από την ετικέτα (Tag), την ακριβή ώρα που η ετικέτα λαμβάνει ένα σήμα ( $t_{arrival}$ ) από την άγκυρα (Anchor) και την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει το σήμα (συνήθως η ταχύτητα του φωτός). Μόλις γίνουν γνωστοί αυτοί οι χρόνοι, η απόσταση από το σημείο αναφοράς μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$d = c \cdot (t_{arrival} - t_{sent}) ,$$

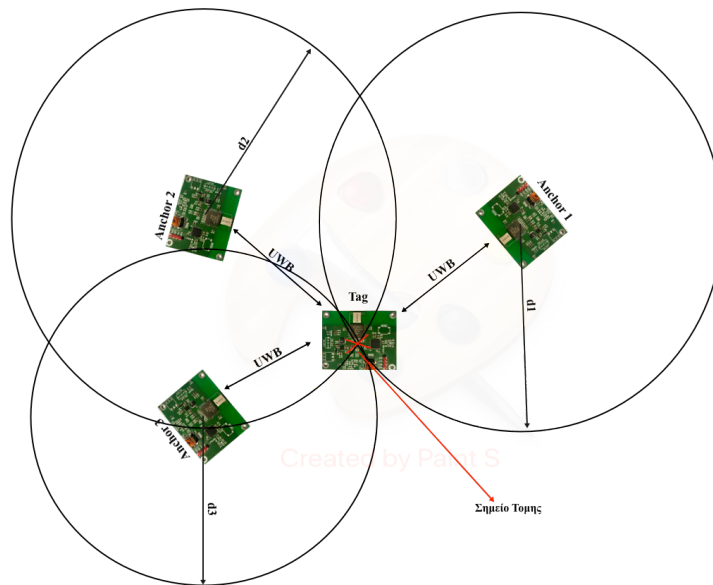
όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός.

Η διαφορά ( $t_{arrival} - t_{sent}$ ) είναι ο χρόνος πτήσης (Time of Flight-ToF) του σήματος. Κάνοντας χρήση αυτής της απόστασης, μπορεί να καθοριστεί το σύνολο των πιθανών τοποθεσιών του στόχου. Σε ένα δισδιάστατο (2D) χώρο, αυτό σημαίνει ένας κύκλος με εξίσωση:

$$d = \sqrt{(x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2} ,$$

όπου  $x_{ref}, y_{ref}$  είναι η γνωστή θέση της άγκυρας.

Όταν υπολογιστούν οι αποστάσεις  $d_1, d_2$  και  $d_3$  τότε θα έχουν σχηματιστούν και οι αντίστοιχοι “εικονικοί” κύκλοι γύρω από τις άγκυρες με ακτίνα  $d$ . Όπως φαίνεται παρακάτω στην **Εικόνα 2.3**, η ακριβής τοποθεσία της ετικέτας είναι το σημείο τομής των τριών κύκλων.

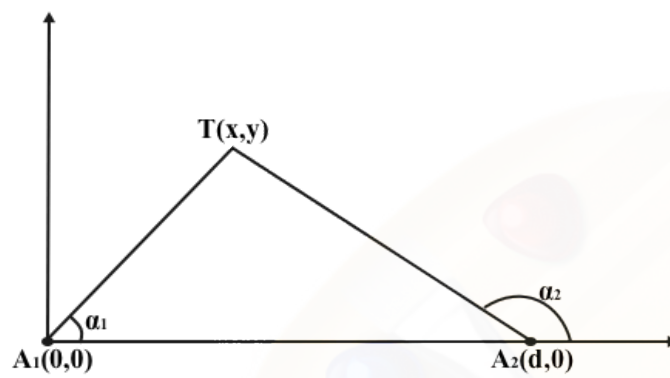


Εικόνα 2.3 - ToA

## (2) AoA

Στην τεχνική Γωνία Άφιξης (AoA), χρησιμοποιείται το πλεονέκτημα της συστοιχίας κεραιών για τον υπολογισμό της κατεύθυνσης διάδοσης ενός κύματος ραδιοσυχνότητας που φθάνει σε αυτές, συγκρίνοντας είτε το πλάτος σήματος, είτε με τη σύγκριση της φάσης του φορέα των κεραιών. Η απόδοση της μεθόδου AoA είναι καλύτερη σε μικρές αποστάσεις, ωστόσο η ακρίβεια των μετρήσεων μειώνεται με την αύξηση της απόστασης. [11] [22]

Για να προσδιοριστεί η θέση ενός στόχου απαιτούνται τουλάχιστον δύο σταθεροί κόμβοι με γνωστές συντεταγμένες. Το σημείο τομής των γραμμών από τις άγκυρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 είναι η τοποθεσία του στόχου.



Εικόνα 2.4 - AoA

Αν θεωρηθεί ότι η μια κεραία βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και η άλλη απέχει απόσταση  $d$  από την πρώτη, τότε οι συντεταγμένες του στόχου  $(x, y)$ , με γωνίες  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  έως τις άγκυρες 1 και 2 αντίστοιχα, μπορούν να υπολογιστούν με τις παρακάτω εξισώσεις [16]:

$$x = \frac{d \cdot \tan(\alpha_2)}{\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)} \quad \text{και} \quad y = \frac{d \cdot \tan(\alpha_1) \cdot \tan(\alpha_2)}{\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)}$$

### (3) PoA

Σε αυτήν την προσέγγιση, η διαφορά της φάσης φορέα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Ένα κοινό σήμα φορέα σε αυτήν την προσέγγιση είναι ένα συνεχές σήμα ή ένας διαμορφωμένος τόνος συγχρονισμένος με ακρίβεια τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Το μεταδιδόμενο σήμα θα κλειδωθεί σταδιακά στον δέκτη και θα αντανακλάται πίσω στον πομπό. Στον πομπό, η διαφορά της φάσης μεταξύ του αρχικού σήματος και του ληφθέντος θα εκτιμηθεί και θα μετατραπεί σε πληροφορίες απόστασης σύμφωνα με το τύπο [16]:

$$d = \lambda \cdot \left( \frac{\Delta\varphi}{2\pi} + n \right),$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων,  $\Delta\varphi$  είναι η διαφορά φάσης του λαμβανόμενου σήματος με το αρχικό μεταδιδόμενο,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος και  $n$  είναι ο αριθμός κύκλων που περνούν μεταξύ της μετάδοσης και της λήψης του σήματος. [23]

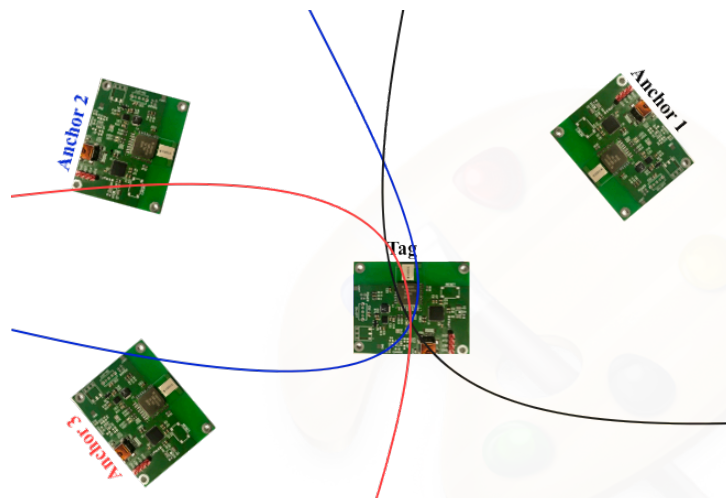
### (4) TDoA

Η μέθοδος Διαφορά Ωρας Άφιξης (TDoA) είναι η δεύτερη πιο δημοφιλής τεχνική εντοπισμού θέσης και είναι μια παραλλαγή της τεχνικής ToA. Το TDoA βασίζεται στη μέτρηση της χρονικής διαφοράς άφιξης ενός σήματος που αποστέλλεται από ένα πομπό και λαμβάνεται από τρεις ή περισσότερους δέκτες. Σε αυτή τη μέθοδο δεν απαιτείται ο χρόνος αποστολής του σήματος, παρά μόνο ο χρόνος λήψης του σήματος και η ταχύτητα που ταξιδεύει το σήμα. Συνήθως, ένας μόνο δέκτης αρκεί για τον προσδιορισμό της θέσης του πομπού, να συνεργάζεται με τα δεδομένα που μοιράζονται οι υπόλοιποι δέκτες. Ο υπολογισμός της διαφοράς της απόστασης μεταξύ των δύο δεκτών γίνεται ανά ζεύγη αγκυρών. [16]

Μόλις ληφθεί το σήμα σε δύο άγκυρες, θα είναι γνωστή η διαφορά μεταξύ αυτών των δυο χρονικών στιγμών και γνωρίζοντας την ταχύτητα που διαδίδονται τα σήματα, είναι εφικτό ο υπολογισμός της διαφοράς της απόστασης των δύο δεκτών από τον πομπό, μέσω του τύπου  $\Delta d = c \cdot \Delta t$ , όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός. Σε ένα δισδιάστατο (2D) χώρο, η εξίσωση [23]:

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}$$

δηλώνει τις πιθανές τοποθεσίες του στόχου, όπου  $(x_1, y_1)$  και  $(x_2, y_2)$  είναι οι γνωστές συντεταγμένες των αγκυρών. Με τη χρήση μη γραμμικής παλινδρόμησης, αυτή η εξίσωση μπορεί να μετατραπεί σε μορφή υπερβολής. Η απόσταση του κινητού κόμβου έως ένα ζευγάρι αγκυρών οπουδήποτε στην υπερβολική γραμμή είναι σταθερή.



Εικόνα 2.5 - TDoA

Η θέση του κινητού στόχου μπορεί να εκτιμηθεί με την εύρεση του σημείου τομής των υπερβολικών γραμμών για δύο διαστάσεις ή υπερβολικές επιφάνειες σε τρεις διαστάσεις, όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 2.5**.

### 2.1.3 Σύγκριση Τεχνικών Εντοπισμού με UWB

Οι τεχνικές εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση της τεχνολογίας UWB που αναφέρθηκαν στην **Ενότητα 2.1.2** δεν καλύπτουν όλες τις πιθανές λύσεις. Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές και συνδυασμοί των παραπάνω μεθόδων. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γίνεται με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής. Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται κάποια από τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για καθεμία από τις παραπάνω τεχνικές. [24] Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος Two-Way Ranging (TWR) η οποία αναλύεται στο **Κεφάλαιο 4**.

**Πίνακας 2.1**

	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>ToA</b>	Καλή ακρίβεια	Μετατόπιση ρολογιού μεταξύ πομπού και δέκτη, απαιτείται όλοι οι κόμβοι του συστήματος να συγχρονιστούν με ακρίβεια
<b>AoA</b>	Δεν απαιτείται συγχρονισμός ρολογιών, προσφέρει πρόσθετες πληροφορίες γωνίας	Υψηλότερο κόστος, μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, μικρά σφάλματα στη μέτρηση της γωνίας επηρεάζουν την ακρίβεια σε μεγάλο βαθμό
<b>PoA</b>	Καλή ακρίβεια σε εφαρμογές με χαμηλότερη συχνότητα	Εφαρμόζεται σε περιορισμένες υποδομές, πολύπλοκος αλγόριθμος
<b>TdoA</b>	Μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, συγχρονισμού των αγκυρών με καλώδια, δυνατότητα ασύρματου συγχρονισμού (με κόστος στην ακρίβεια)	Χαμηλή ακρίβεια (0.1m - 0.5m)

#### **Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα τεχνικών εντοπισμού θέσης με UWB**

## 2.2 Trilateration

Οι εφαρμογές που ασχολούνται με τον εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTLS), βασίζονται στην απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων. Τα δεδομένα συλλέγονται από το Hardware, ενώ η επεξεργασία γίνεται μέσω λογισμικού. Όπως θα αναλυθεί και στο **Κεφάλαιο 3**, η προσαρμοσμένη πλακέτα που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι εξοπλισμένη με σειριακή θύρα USB, όχι μόνο για την τροφοδοσία της πλακέτας αλλά και για τη μεταφορά δεδομένων στον κεντρικό υπολογιστή. Επομένως, ο σχεδιασμός ενός σωστού συστήματος υλικού είναι η προϋπόθεση για να εξασφαλιστεί η επιτυχής μεταφορά των δεδομένων στον κεντρικό υπολογιστή. Ο υπολογιστής διαβάζει τα εισερχόμενα δεδομένα και τα προωθεί στους αλγόριθμους εντοπισμού που εκτιμούν μια θέση. Η έλλειψη ενός βελτιστοποιημένου αλγόριθμου εντοπισμού θέσης



επηρεάζει την εκτίμηση της θέσης. Αναλόγως με την τεχνική εντοπισμού, ο αλγόριθμος τοποθέτησης είναι διαφορετικός. Για την μέθοδο ToA, η οποία παρέχει στο σύστημα τους χρόνους αφίξεις των μηνυμάτων και κατά συνέπεια τις αποστάσεις των αγκυρών από το στόχο, χρησιμοποιείται η μέθοδος Trilateration. [25] Ο δισδιάστατος εντοπισμός απαιτεί τουλάχιστον τρεις άγκυρες για να δώσει μια μοναδική λύση. Το Trilateration είναι η μέθοδος υπολογισμού της θέσης ενός αντικείμενου, γνωρίζοντας την απόσταση του από τρία σημεία αναφοράς (άγκυρες). [19] [26]

Η απόσταση μεταξύ μιας άγκυρας και της ετικέτας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r_i$$

όπου  $x$  και  $y$  είναι οι συντεταγμένες της ετικέτας, ενώ  $x_i$  και  $y_i$  είναι οι συντεταγμένες της  $i$  άγκυρας. Επίσης, το  $r_i$  είναι η υπολογισμένη απόσταση μεταξύ της άγκυρας  $i$  και της ετικέτας. Στο 2D, δύο αποστάσεις δίνουν δύο κύκλους που τέμνονται σε δύο διαφορετικά σημεία (εάν η ετικέτα δεν είναι ακριβώς μεταξύ των δύο αγκυρών, τότε υπάρχει μόνο ένα σημείο). Επομένως, χρειάζονται τρεις άγκυρες για να υπολογιστεί η θέση της ετικέτας. Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των αγκυρών  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  και  $(x_3, y_3)$  και τις αποστάσεις  $r_1$ ,  $r_2$  και  $r_3$ , από τις εξισώσεις κύκλου:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3$$

προκύπτει το Σχήμα στην **Εικόνα 2.6**.



**Εικόνα 2.6 - Trilateration**

Δυστυχώς όμως οι μετρήσεις δεν είναι πάντα ακριβείς, επομένως δεν αντιστοιχούν όλες οι αποστάσεις ακριβώς σε ένα σημείο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.6** αλλά σε μια περιοχή που περιλαμβάνει το στόχο. Για να βρεθεί η σωστή θέση της ετικέτας, επιλύεται ένα πρόβλημα γραμμικού ελάχιστου τετραγώνου (LLS). [6] Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος, χρησιμοποιώντας γραμμικοποίηση, επιλέγεται μία άγκυρα, ως άγκυρα αναφοράς στην οποία το

σύστημα είναι γραμμικό. [11] Σε αυτήν την περίπτωση η άγκυρα  $i = 1$  είναι η άγκυρα αναφοράς. Αυτό οδηγεί στις παρακάτω εξισώσεις:

$$(x_2 - x_1) \cdot x + (y_2 - y_1) \cdot y = r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2$$

$$(x_3 - x_1) \cdot x + (y_3 - y_1) \cdot y = r_1^2 - r_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2$$

που είναι ένα σύστημα της μορφής:

$$A \cdot \bar{x} = B$$

με  $A = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \end{bmatrix}$ ,  $\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$

και  $B = \begin{bmatrix} r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2 \end{bmatrix}$

Για το γραμμικό σύστημα, το πρόβλημα LLS έχει λύση το  $\bar{x}$ :

$$(A^T A) \cdot \bar{x} = A^T \cdot B \Rightarrow \bar{x} = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot B$$

όπου δίνει τις συντεταγμένες του στόχου  $(x, y)$  εντός της περιοχής που έχουν καθορίσει οι κύκλοι στα σημεία που τέμνονται. [11]

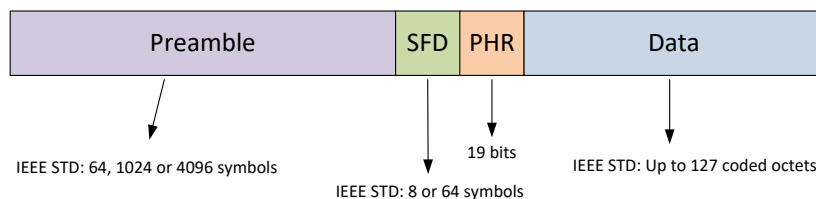
Στην περίπτωση όμως που οι τρεις κύκλοι τέμνονται σε ένα σημείο, η λύση του συστήματος δίνει τις συντεταγμένες του στόχου  $(x, y)$  από τις απλές εξισώσεις:

$$x = \frac{\begin{vmatrix} (r_1^2 - r_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) & 2(y_2 - y_1) \\ (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad \text{και}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2(y_2 - y_1) & (r_1^2 - r_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ 2(y_3 - y_1) & (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}$$

## 2.3 Δομή πλαισίου UWB με βάση το πρότυπο IEEE.802.15.4a

Η επικοινωνία UWB βασίζεται κυρίως στη μετάδοση και τη λήψη πλαισίων μηνυμάτων. Το πρότυπο IEEE 802.15.4a παρέχει μια γενική μορφή μηνύματος για πλαίσια δεδομένων. Στην **Εικόνα 2.7** παρουσιάζεται η γενική δομή ενός πλαισίου επικοινωνίας UWB. [27]



**Εικόνα 2.7 - Δομή Πλαισίου UWB [27]**

Το πλαίσιο επικοινωνίας ξεκινάει με μια επικεφαλίδα συγχρονισμού SHR που αποτελείται από το προοίμιο και το SFD (Start of Frame Delimiter), έπειτα ακολουθεί η κεφαλίδα PHY (PHR) που καθορίζει το μήκος και το ρυθμό δεδομένων, του τμήματος δεδομένων (Data) του πλαισίου. Ο ρόλος του προοιμίου SHR είναι ο συγχρονισμός του πομπού και του δέκτη και η ανίχνευση της πρώτης διαδρομής. Στο τέλος του προοιμίου (preamble) μέρος μεταδίδεται το SFD για να δείξει το τέλος του preamble και την έναρξη του PHR. Το PHR τμήμα περιέχει τη ρύθμιση πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση των δεδομένων συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού δεδομένων του πλαισίου και του μήκους των δεδομένων. Το τελευταίο τμήμα είναι τα δεδομένα επικοινωνίας που μπορούν να μεταφέρουν 127 byte σύμφωνα με το πρότυπο IEEE. [28]

- **Preamble:** Αυτό είναι το μέρος του πλαισίου που χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό μεταξύ του δέκτη και του πομπού. Το μήκος του preamble καθορίζει την ικανότητα των δεκτών να ανιχνεύουν ένα εισερχόμενο σήμα και γενικά ένα μεγαλύτερο προοίμιο αυξάνει το εύρος λειτουργίας των μονάδων. Τα πιθανά μήκη του προοιμίου είναι 16, 64, 1024 ή 4096 σύμβολα. Το μήκος του προοιμίου, αποφασίζεται από την εφαρμογή ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του καναλιού και τις δυνατότητες του δέκτη. Το πρότυπο ορίζει 8 διαφορετικούς κωδικούς μήκους-31 προοίμιο για χρήση σε PRF 16 MHz και 16 διαφορετικούς κωδικούς μήκους-127 προοίμιο για χρήση στα PRF 64 MHz. [27]
- **Start Frame Delimiter (SFD):** Αυτό το μέρος του πλαισίου, όπως έχει ήδη αναφερθεί νωρίτερα δηλώνει το τέλος του preamble και την έναρξη του PHR που έχει διαφορετική διαμόρφωση. Επιπλέον, αυτό το πεδίο χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του χρόνου άφιξης του σήματος σε εφαρμογές εμβέλειας (ranging). Το τμήμα SFD αποτελείται από 8 ή 64 σύμβολα. Η ρύθμιση 8 συμβόλων είναι η προεπιλεγμένη επιλογή που υποστηρίζεται από το πρότυπο και χρησιμοποιείται για όλους τους ρυθμούς δεδομένων εκτός από τον 110Kbits/s. Η περίπτωση των 64 συμβόλων είναι προαιρετική και χρησιμοποιείται για 110Kbits/s ως επί το πλείστον είναι κατάλληλη για εφαρμογές επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας. [27]
- **PHR:** Το PHR είναι ένα τμήμα 19 bit του τυπικού πλαισίου επικοινωνίας IEEE802.15.4a UWB. Το PHR περιέχει τις πληροφορίες διαμόρφωσης του πεδίου δεδομένων (data). [27] Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν το ρυθμό δεδομένων, το μήκος πλαισίου των δεδομένων, ranging σημαία, σημαία επέκτασης κεφαλίδας, διάρκεια προοιμίου και έναν μηχανισμό ανίχνευσης σφαλμάτων και διόρθωσης γνωστό ως single error correction double error detection (SECCDED).

## 2.4 DW1000

Η τεχνολογία UWB έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί μια από τις κυρίαρχες επιλογές στις εφαρμογές Εντοπισμού Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο (RTLS). Πολλές από τις εφαρμογές απαιτούν ο στόχος παρακολούθησης να έχει ενσωματωμένο κατάλληλο Hardware (υλικό) που να επικοινωνεί με το υπόλοιπο σύστημα για την αναμετάδοση των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης των στόχων. Αυτό το γεγονός έχει οδηγήσει πολλές εταιρείες μικροηλεκτρονικής στην έρευνα για να δημιουργήσουν ολοκληρωμένα κυκλώματα που να εκμεταλλεύονται τα προτερήματα του UWB. Μια από αυτές τις εταιρείες είναι η Decawave Company. Η Decawave έχει αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit-IC) ραδιοσυχνότητας UWB βάσει του προτύπου επικοινωνίας IEEE.802.15.4a με στόχο την ασύρματη τοποθέτηση με όνομα DW1000 με χαμηλός κόστος ανά μονάδα.

Το DW1000 αποτελεί έναν πλήρως ενσωματωμένο πομποδέκτη CMOS RF ενός chip χαμηλής ισχύος και περιέχει ενσωματωμένο κρύσταλλο αναφοράς στα 38.4 MHz. [29] Το συγκεκριμένο chip έχει ορισμένες λειτουργικές ρυθμίσεις που αποθηκεύονται στην εσωτερική του μνήμη, όπως είναι ο ρυθμός δεδομένων του πλαισίου, το μέγεθος του preamble, η επιλογή καναλιού και της

συχνότητας επανάληψης των παλμών (Pulse Repetition Frequency-PRF), καθώς και άλλες λειτουργίες για τη διαχείριση πληροφοριών. Αυτές οι ρυθμίσεις επηρεάζουν το εύρος λειτουργίας καθώς και τη διάδοση του σήματος.

Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του DW1000 [29]:

- Συμβατό με το πρότυπο IEEE.802.15.4(a)
- Υποστηρίζει 4 ζώνες RF από 3.5 GHz έως 6.5 GHz
- Προγραμματιζόμενη ισχύ εξόδου για τον πομπό
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Υψηλοί ρυθμοί δεδομένων 110 kbps, 850 kbps και 6,8 Mbps
- Εξαιρετική εμβέλεια επικοινωνίας έως 300m
- Μέγιστο μήκος πακέτου 1023 byte για εφαρμογές υψηλής απόδοσης δεδομένων
- Ενσωματωμένες δυνατότητες υποστήριξης MAC
- Τάση τροφοδοσίας 2,8 V έως 3.6 V
- Επικοινωνία μέσω SPI με τον κεντρικό επεξεργαστή
- Υποστηρίζει αμφίδρομη εμβέλεια (TWR) και TDoA
- 23mm x 13mm x 2.9mm 24-pin side castellation package

Τα χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν ακριβή χρονική σήμανση (timestamp) των ληφθέντων και μεταδιδόμενων πλαισίων. Η ακρίβεια της χρονικής σήμανσης είναι περίπου 15ps το οποίο εξασφαλίζει ακριβείς μετρήσεις ToF (χρόνος πτήσης του μηνύματος), επομένως και σφάλματα υπολογισμού απόστασης μικρότερα των 10cm.

- Πως λειτουργεί η χρονική σήμανση (timestamp);  
Το DW1000 IC σημειώνει το ρολόι του συστήματος κατά την έναρξη της μετάδοσης του PHR, προσθέτει την καθυστέρηση κεραίας και αποθηκεύει την προκύπτουσα χρονική σήμανση σε ένα καταχωρητή. Ο κεντρικός επεξεργαστής είναι υπεύθυνος για την ανάγνωση του καταχωρητή για τη λήψη της χρονικής σήμανσης μετάδοσης. Στη λήψη ενός μηνύματος, η χρονική σήμανση λαμβάνεται κατά την αναγνώριση του SFD από το DW1000 IC. Η χρονική σήμανση κατά τη λήψη αποθηκεύεται σε ένα καταχωρητή και ο κεντρικός επεξεργαστής είναι υπεύθυνος για την ανάγνωση του συγκεκριμένου καταχωρητή για τη λήψη της χρονικής σήμανσης κατά τη λήψη του μηνύματος, ακριβώς όπως γίνεται και στην περίπτωση της αποστολής ενός μηνύματος. Τα Timestamps αυτά επιτρέπουν στον MCU να υπολογίζει εύρη μεταξύ δυο συσκευών που συμμετέχουν στην ανταλλαγή εύρους. [27]

Τέλος όπως προαναφέρθηκε το DW1000 υποστηρίζει 4 ζώνες συχνότητας, τις οποίες κατανέμει σε 6 RF κανάλια όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2.2**, με κεντρικές συχνότητες από 3.5 GHz έως 6.5 GHz. Το μέγιστο εύρος ζώνης του DW1000 δέκτη είναι 900 MHz, αν και ο πομπός υποστηρίζει υψηλότερα εύρη ζώνης (πάνω από 1 GHz). [27]

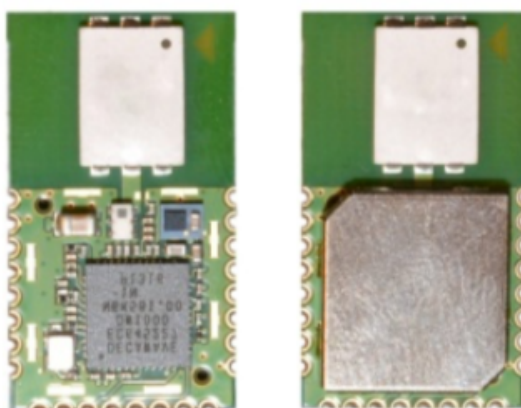
**Πίνακας 2.2**

Channel Number	Centre Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)
1	3494.4	499.2
2	3993.6	499.2
3	4492.8	499.2
4	3993.6	1331.2
5	6489.6	499.2
7	6489.6	1081.6

**Υποστηριζόμενα UWB κανάλια του DW1000 [27]**

## 2.5 DWM1000

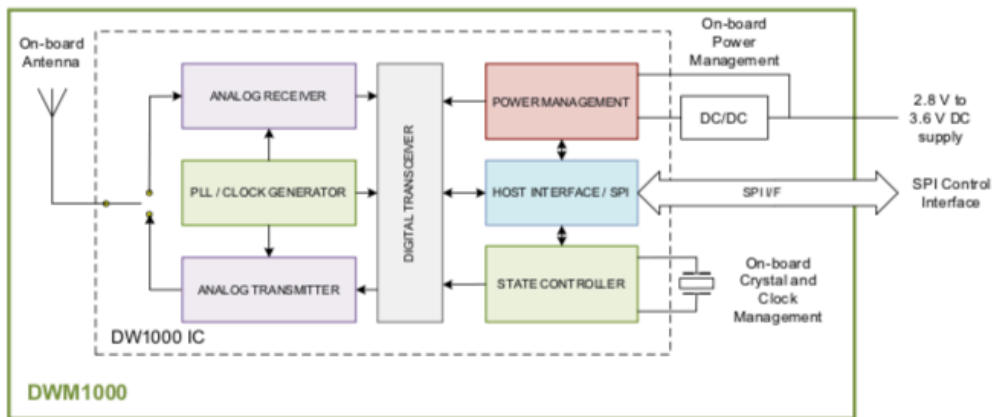
Ένα RTLS επιτυγχάνεται με την βοήθεια μικρών ηλεκτρονικών συσκευών. Μικρές σε μέγεθος για να μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και χωρίς κάποιο σημαντικό βάρος πάνω σε άτομα ή αντικείμενα ανά πάσα στιγμή. Σε αντίθεση με ήδη υπάρχοντα συστήματα εντοπισμού θέσης με UWB, τα οποία απαιτούν εξειδικευμένο υλικό, η Decawave έχει κυκλοφορήσει στην αγορά την μονάδα DWM1000 (**Εικόνα 2.8**) που είναι βασισμένη στο πρότυπο IEEE.802.15.4(a). [30] Το DWM1000 έχει χαμηλό κόστος αγοράς και μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης των επικοινωνιών UWB και των δυνατοτήτων της, σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το DWM1000 βασίζεται στον ολοκληρωμένο πομποδέκτη DW1000, καθώς περιέχει εξαρτήματα RF (κεραία) και αλλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα ενσωματωμένα στην μονάδα αυτή.



**Εικόνα 2.8 - DWM1000 [29]**

Στην **Εικόνα 2.9**, φαίνεται ότι το DWM1000 αποτελείται από έναν ταλαντωτή κρυστάλλου, μια κεραία και ορισμένα άλλα κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας. Το DW1000 IC είναι σχεδιασμένο ειδικά για συστήματα εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTLS) και ενσωματώνει λειτουργίες για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων όπως έχει ήδη προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 2. Από τη στιγμή που η κεραία είναι ενσωματωμένη δεν απαιτείται σχεδιασμός RF και αυτό κάνει την εφαρμογή του προϊόντος αρκετά απλή. Όλα τα παθητικά εξαρτήματα και ο κρύσταλλος

ταλάντωσης είναι τοποθετημένα σε 23 mm x 13 mm x 2,9 mm με 24 pin side castellation package.  
[29]



Εικόνα 2.9 - High Level Block Diagram [29]

#### Γιατί επιλέχθηκε για DWM1000;

- Ικανός εντοπισμός του στόχου με ακρίβεια έως και 10cm
- Έχει εμβέλεια έως 290m
- Ρυθμό δεδομένων έως και 6.8 Mbps
- Χαμηλό κόστος και
- Μικρό φυσικό μέγεθος

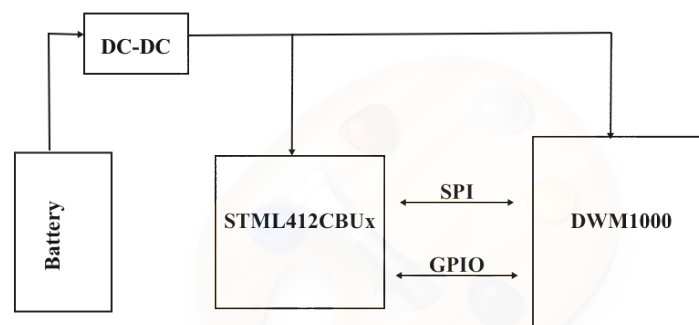
Τα παραπάνω προτερήματα βοήθησαν στην επιλογή του για την εφαρμογή που ασχολείται η παρούσα διπλωματική (RTLS με UWB).

# Κεφάλαιο 3

## 3. Περιγραφή Υλικού (Hardware)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το υλικό (Hardware) το οποίο σχετίζεται με τους κόμβους που σχεδιαστήκαν και χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν σύστημα εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTLS) με UWB. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται το ίδιο υλικό για πομπό και δέκτη, καθώς η επιλογή και η διαμόρφωση γίνεται μέσω λογισμικού.

Το βασικό κύκλωμα χωρίς επιπλέον περιφερειακά και εξαρτήματα αποτελείται κυρίως από ένα κύκλωμα ισχύος, ένα κύκλωμα επαναφοράς, το τμήμα ελέγχου δηλαδή τον κεντρικό ελεγκτή και τον πομποδέκτη DWM1000 UWB. Ένα απλό κύκλωμα εφαρμογής που ενσωματώνει τη μονάδα DWM1000 χρειάζεται μόνο τη τροφοδοσία της συσκευής και σύνδεση της συσκευής σε κεντρικό ελεγκτή (**Εικόνα 3.1**). [31] Το MCU επικοινωνεί με το DWM1000 για να διαβάσει δεδομένα και στέλνει τα δεδομένα στον υπολογιστή μέσω διεπαφής USB για να υπολογίσει τη θέση του στόχου. [32] [27]



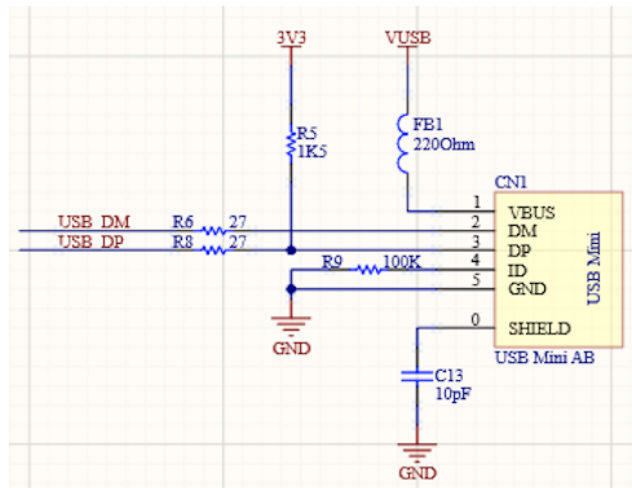
Εικόνα 3.1 - Επισκόπηση Σχηματικού DWM1000

### 3.1 Κύκλωμα Τροφοδοσίας

Για την τροφοδοσία του κυκλώματος υπάρχουν δύο επιλογές, είτε μέσω μιας θύρας USB είτε μέσω μπαταρίας. Η θύρα USB περιορίζει αρκετά τις εφαρμογές καθώς απαιτεί την διαρκή σύνδεση με καλώδιο μεταξύ του κυκλώματος και κάποιας μονάδα φόρτισης σταθερής ή φορητής, ενώ με την μπαταρία δεν υπάρχουν τέτοιοι περιορισμοί και αποφεύγεται η προσθήκη περιττού βάρους.

#### - USB Mini-B

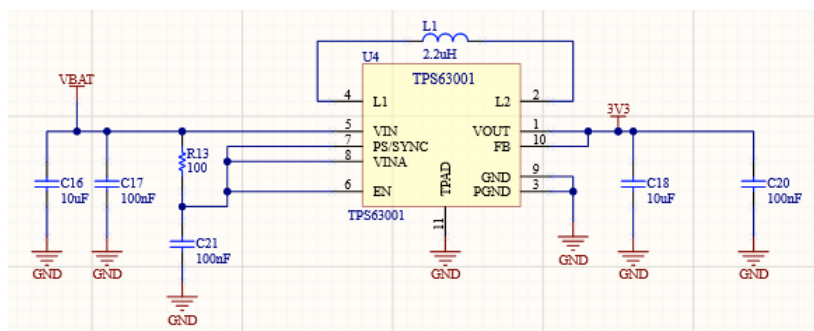
Για την θύρα USB έχει χρησιμοποιηθεί ένα κοινό USB τύπου Mini-B (**Εικόνα 3.2**). Σε αυτό το σημείο είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι η τιμή της αντίστασης  $R_5$  στην γραμμή δεδομένων (DP) είναι 1.5 k $\Omega$ , για να σηματοδοτεί στον υπολογιστή ότι συνδέθηκε η συσκευή και τι γενιάς είναι είναι το USB. Η αναγνώριση ταχύτητας των συσκευών USB γίνεται με pull-up σε μία από τις δύο γραμμές δεδομένων (DP ή DM). Μια συσκευή με δυνατότητα χαμηλής ταχύτητας αναγνωρίζεται από μια αντίσταση pull-up 1,5 k $\Omega$  στη γραμμή DP όπως αναφέρθηκε.



Εικόνα 3.2 - USB Mini

- Μπαταρία ή άλλη πηγή τάσης (μεταξύ 1.8 Volt και 5.5 Volt)

Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρθηκε ότι η τάση τροφοδοσίας του DWM1000 είναι 3.3 Volt. Οι πιθανές τάσεις των μπαταριών είναι μεταξύ 1.8 Volt - 5.5 Volt ή κάποιας άλλης πηγής τάσης, επομένως είναι απαραίτητος ένας μετατροπέας για την τροφοδοσία του DWM1000. Ο μετατροπέας buck-boost (Εικόνα 3.3) είναι ένας τύπος μετατροπέα DC-σε-DC ο οποίος έχει πλάτος τάσης εξόδου που είναι είτε μεγαλύτερο ή μικρότερο από το πλάτος τάσης εισόδου. Ο μετατροπέας buck-boost μπορεί να παράγει ένα εύρος τάσεων εξόδου, που κυμαίνεται από πολύ μεγαλύτερο (σε απόλυτο πλάτος) από την τάση εισόδου, έως σχεδόν μηδέν. [33]



Εικόνα 3.3 - Buck/Boost

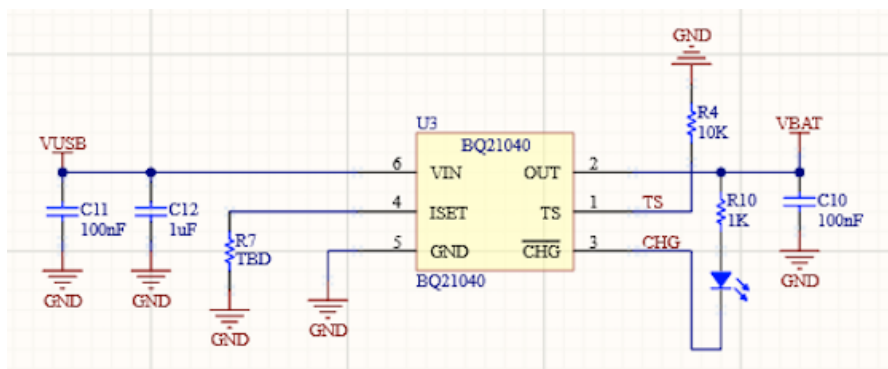
- Η τάση εξόδου έχει συνήθως την ίδια πολικότητα της εισόδου και μπορεί να είναι χαμηλότερη ή υψηλότερη από την είσοδο. Ένας τέτοιος μετατροπέας buck-boost μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν μόνο επαγωγέα (πηνίο) που χρησιμοποιείται τόσο για τη λειτουργία buck όσο και για τη λειτουργία boost, χρησιμοποιώντας διακόπτες αντί για διόδους. Για να ρυθμιστεί σωστά η τάση εξόδου σε όλες τις πιθανές συνθήκες τάσης εισόδου, η συσκευή αλλάζει αυτόματα από τη λειτουργία buck στην boost λειτουργία και προς τα πίσω όπως απαιτείται από τη διαμόρφωση. Χρησιμοποιεί πάντα έναν ενεργό διακόπτη, έναν διακόπτη διόρθωσης, έναν διακόπτη μόνιμα ενεργοποιημένο και έναν διακόπτη μόνιμα απενεργοποιημένο. Επομένως, λειτουργεί ως μετατροπέας buck όταν η τάση εισόδου είναι υψηλότερη από την τάση εξόδου και ως μετατροπέας boost όταν η τάση εισόδου είναι χαμηλότερη από την τάση εξόδου. Ο έλεγχος των διακοπών με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει στον μετατροπέα να διατηρεί υψηλή απόδοση στο πιο σημαντικό σημείο λειτουργίας, όταν η τάση εισόδου είναι κοντά στην τάση εξόδου. [33]



## - Γραμμικός Φορτιστής Μπαταρίας

Όταν γίνεται χρήση μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας σε ένα κύκλωμα, ο φορτιστής είναι απαραίτητος. Ο φορτιστής είναι πολύ ευέλικτος, επιτρέποντας τον προγραμματισμό του ρεύματος γρήγορης φόρτισης και ελέγχει επίσης εάν είναι συνδεδεμένη μια μπαταρία. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα φορτιστών μπαταριών προσφέρονται σε γραμμικές ή μεταβαλλόμενες τοπολογίες και είναι εντελώς αυτόνομα στη λειτουργία τους. Τα IC φόρτισης μπαταριών προσφέρουν πολλές τυπικές λεπτοουργίες για τη διαχείριση και την ασφάλεια της μπαταρίας, όπως την προετοιμασία της μπαταρίας στο τσιπ, περιορισμό ρεύματος, φόρτιση ελεγχόμενη από την θερμοκρασία, προστασία, παρακολούθηση και υποστήριξη για μπαταρίες υψηλής τάσης με μια μόνο συσκευή. Ένας φορτιστής μπαταρίας όπως ο BQ21040 (Εικόνα 3.4) έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με σύνδεση USB ή μετασχηματιστή, επιπλέον ενσωματώνει κύκλωμα προστασίας υπερφόρτισης, υπέρ-εκφόρτισης και υψηλής έντασης για να αποτρέψει την καταστροφή της μπαταρίας υπό συνθήκες βλάβης. [34]

Ένας τρόπος για να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του φορτιστή είναι να χρησιμοποιηθεί ένας γραμμικός φορτιστής. Ο γραμμικός φορτιστής χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ διέλευσης για να μειώσει την τάση του μετασχηματιστή AC στην τάση της μπαταρίας. Η κύρια παγίδα ενός γραμμικού φορτιστή είναι η απόρριψη ισχύος. Ο φορτιστής απλώς μειώνει την τάση του μετασχηματιστή AC στην τάση της μπαταρίας. [34]



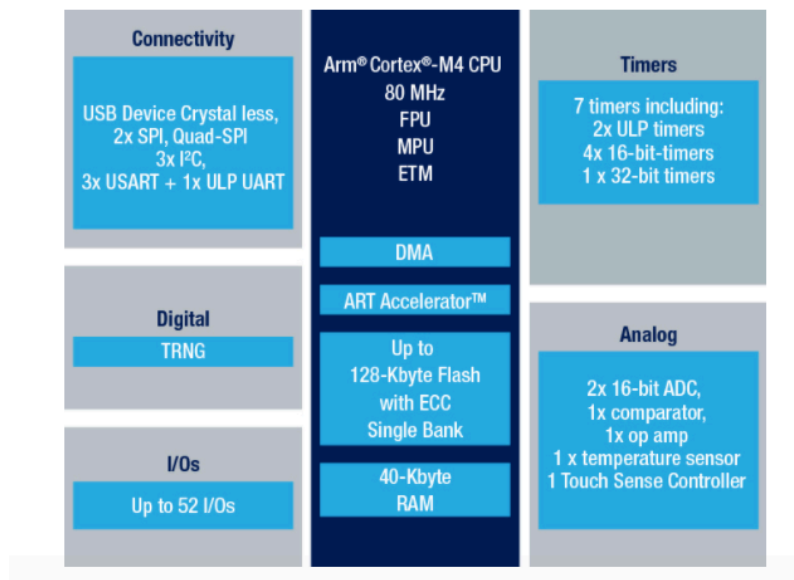
Εικόνα 3.4 - Γραμμικός Φορτιστής Μπαταρίας

## 3.2 Επεξεργαστής και DWM1000

### 3.2.1 Μικροελεγκτής

Η επιλογή του μικροελεγκτή έγινε με βάση τις απαιτήσεις του κυκλώματος. Το DWM1000 έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαρακτηριστικό που μειώνει την ανάγκη αντικατάστασης μπαταριών και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του συστήματος. [6] Επομένως θα συνέφερε και ο μικροελεγκτής να έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τέτοιοι μικροελεγκτές παρέχονται από την εταιρεία STMicroelectronics, μέσω της σειράς STML4. Πρόκειται για μικροελεγκτές εξαιρετικά χαμηλής ισχύος με υψηλή απόδοση.

Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής STM32L412CBUx [35] κατασκευασμένος από την ST και συνδυάζει την αρχιτεκτονική ενός πυρήνα ARM-Cortex-M4 της ARM με αρκετά περιφερειακά. Ο επεξεργαστής διαθέτει 128 KB ROM, 40 KB RAM εκ των οποίων 8 KB είναι για parity check υλικού και με συχνότητα λειτουργίας έως και 80 MHz. Μία σύνοψη των χαρακτηριστικών και στοιχείων που ενσωματώνει ο μικροελεγκτής αυτός δίνονται στην Εικόνα 3.5.



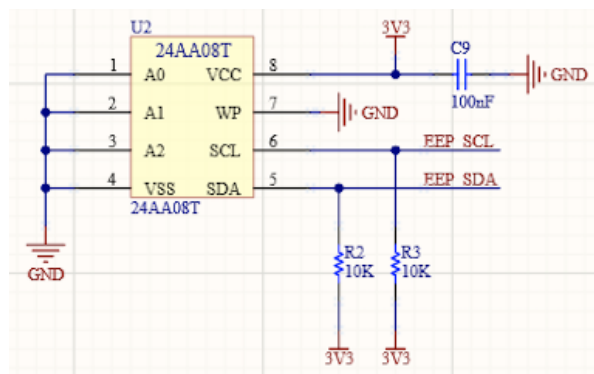
Εικόνα 3.5 - Χαρακτηρίστηκα STM32L412CBUx [35]

Επιπλέον στον μικροελεγκτή έχει συνδεθεί ένα κουμπί για τη χειροκίνητη επαναφορά του συστήματος και ένας διάυλος Serial Wire Debug (SWD) 4 ακροδεκτών, το οποίο χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό επεξεργαστών ARM και δίνει την δυνατότητα στο πρόγραμμα εντοπισμού σφαλμάτων (Debugger) να έχει πρόσβαση στη μνήμη του συστήματος και σε περιφερειακούς καταχωρητές.

### 3.2.2 EEPROM

Ο μικροελεγκτής συνδέεται μέσω του  $I^2C$  πρωτόκολλου επικοινωνίας με μια μνήμη τύπου EEPROM των 8 kbit. Ο διάυλος  $I^2C$  είναι ένας σειριακός διάυλος που χρησιμοποιείται για την σύνδεση περιφερειακών μικρής ταχύτητας με μητρικές πλακέτες και ενσωματωμένα συστήματα. Συγκεκριμένα για στο σχεδιασμό έχει χρησιμοποιηθεί το εξάρτημα 24AA08T (Εικόνα 3.6). Η συσκευή είναι οργανωμένη σε τέσσερα μπλοκ μνήμης 256 x 8-bit με σειριακή διεπαφή δύο καλωδίων. Το 24AA08T έχει επίσης δυνατότητα εγγραφής σελίδας έως και 16 Byte δεδομένων.[36]

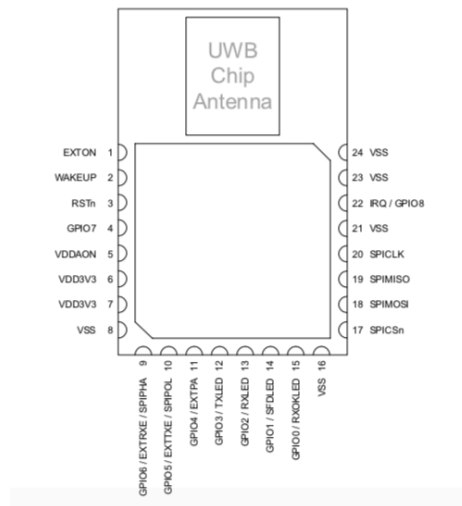
Το EEPROM σημαίνει ηλεκτρικά διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη ROM και χρησιμοποιείται συνήθως για αποθήκευση σχετικά μικρών ποσοτήτων δεδομένων επιτρέποντας τη διαγραφή και τον επαναπρογραμματισμό μεμονωμένων byte. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μνήμη EEPROM είναι σαν την μνήμη ROM, δηλαδή δεν χάνει τα δεδομένα της μετά την διακοπή της τροφοδοσίας και συνήθως χρησιμοποιείται για την αποθήκευση παραμέτρων διαμόρφωσης και ρυθμίσεων.



Εικόνα 3.6 - EEPROM

### 3.2.3 DWM1000

Το DWM1000 παρέχει 8 ρυθμιζόμενους ακροδέκτες. Κατά την επαναφορά, όλοι οι ακροδέκτες GPIO είναι προεπιλεγμένοι ως input. Οι είσοδοι GPIO, όταν διαμορφωθούν κατάλληλα, είναι ικανοί να δημιουργούν διακοπές στον κεντρικό επεξεργαστή μέσω του σήματος IRQ. Τα GPIO0, 1, 2, & 3, ως μία από τις προαιρετικές λειτουργίες τους, μπορούν να οδηγήσουν τις λυχνίες LED για να υποδείξουν την κατάσταση των διαφόρων λειτουργιών του chip. Τα GPIO5 & 6 χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του τρόπου λειτουργίας του SPI. [29] Στην **Εικόνα 3.7** παρουσιάζεται το διάγραμμα ακροδεκτών του DWM1000.



**Εικόνα 3.7 - Διάγραμμα Ακροδεκτών DWM1000 [29]**

Οι ακροδέκτες  $V_{DD}3V3$  και  $V_{DD}AON$  συνδέονται με την τροφοδοσία των 3.3 Volt και οι ακροδέκτες  $V_{SS}$  με την γείωση. Το  $V_{DD}AON$  είναι μια εξωτερική τροφοδοσία για το τμήμα Always-On (AON) του chip, που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των διαμορφώσεων σε καταστάσεις χαμηλής ισχύος. Επίσης γίνεται η χρήση των ακροδεκτών IRQ, WAKEUP, EXTON και RESET. Στον **Πίνακα 3.1** παρουσιάζονται οι ακροδέκτες που έχουν χρησιμοποιηθεί και η λειτουργία τους. [29]

**Πίνακας 3.1**

Όνομα	Ακροδέκτης	Λειτουργία
EXTON	1	Ενεργοποίηση εξωτερικής συσκευής. Υποστηρίζεται κατά τη διαδικασία αφύπνισης και διατηρείται ενεργή έως ότου η συσκευή εισέλθει σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο εξωτερικών μετατροπέων DC-DC ή άλλων κυκλωμάτων που δεν απαιτούνται όταν η συσκευή βρίσκεται σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας.
WAKEUP	2	Ο ακροδέκτης WAKEUP φέρνει το DW1000 από τις καταστάσεις SLEEP ή DEEPSLEEP σε κατάσταση λειτουργίας.
RSTn	3	Επαναφορά του DW1000 από τον MCU.

Όνομα	Ακροδέκτης	Λειτουργία
GPIO6/ SPIPHA	9	Ακροδέκτης γενικής χρήσης I/O. Κατά την ενεργοποίηση του DWM1000 λειτουργεί ως ακροδέκτης SPIPHA (επιλογή φάσης SPI) για τη διαμόρφωση του τρόπου λειτουργίας SPI.
GPIO5/ SPIPOL	10	Ακροδέκτης γενικής χρήσης I/O. Κατά την ενεργοποίηση του DWM1000 λειτουργεί ως ακροδέκτης SPIPOL (επιλογή πολικότητας SPI) για τη διαμόρφωση του τρόπου λειτουργίας SPI.
GPIO3/ TXLED	12	Ακροδέκτης γενικής χρήσης I/O. Μπορεί να διαμορφωθεί για χρήση ως ακροδέκτης TXLED που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανάψει ένα LED κατά τη λειτουργία μετάδοσης.
GPIO2/ RXLED	13	Ακροδέκτης γενικής χρήσης I/O. Μπορεί να διαμορφωθεί για χρήση ως ακροδέκτης RXLED που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανάψει ένα LED κατά τη λειτουργία λήψης.
GPIO8/IRQ	22	Αίτημα διακοπής από το DWM1000 στον κεντρικό επεξεργαστή. Όταν η λειτουργικότητα IRQ δεν χρησιμοποιείται, ο ακροδέκτης μπορεί να αναδιαμορφωθεί ως γραμμή γενικής χρήσης I/O, GPIO8.

### 3.3 Σύνδεση DWM1000 με τον MCU

Ένας μικροελεγκτής κεντρικού υπολογιστή (MCU) επεξεργάζεται τα δεδομένα και ελέγχει το DWM1000 μέσω της Σειριακής Περιφερειακής Διεπαφής (SPI) και των GPIO με ταχύτητα έως και 20 MHz. Η επικοινωνία του DWM1000 με τον κεντρικό επεξεργαστή γίνεται μέσω ενός Slave-only SPI. Υποστηρίζονται τόσο οι πολικότητες του ρολογιού (SPIPOL = 0/1) όσο και οι φάσεις (SPIPHA = 0/1). [37]

#### Ανάλυση SPI

Το SPI είναι ένα πολύ κοινό πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για αμφίδρομη (Full-duplex) επικοινωνία μικρών αποστάσεων μεταξύ δυο συσκευών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μεταξύ του κεντρικού μικροελεγκτή (STM32L412CBUx) και του DWM1000. Ο επεξεργαστής λειτουργεί ως Master και το DWM1000 ως Slave.

Ο κεντρικός διάυλος SPI αποτελείται από 4 σήματα:

1. Master Out Slave In (MOSI)
2. Master In Slave Out (MISO)
3. Σειριακό ρολόι (SCK)
4. Chip Select (SPICSn)

Το MOSI σε έναν Master συνδέεται με το MOSI του Slave και το MISO του Master με το MISO του Slave. Ένα SPI έχει έναν κύριο Master και έναν ή περισσότερους Slaves. Ο Master μπορεί να μιλήσει με οποιονδήποτε Slave στο δίαυλο του, αλλά κάθε Slave μπορεί να μιλήσει μόνο με τον Master. Επομένως κάθε Slave πρέπει να έχει το δικό του μοναδικό σήμα (SS) επιλογής στον δίαυλο για την επιλογή του από τον Master. Δεδομένου ότι το SPI περιλαμβάνει επίσης σήμα ρολογιού, οι δυο συσκευές δεν χρειάζονται να συμφωνήσουν για τον ρυθμό δεδομένων, η μόνη απαίτηση είναι το ρολόι να έχει μικρότερη συχνότητα από τη μέγιστη συχνότητα των συσκευών που εμπλέκονται

στο κύκλωμα αυτό. Όταν ο Master του SPI θέλει να ξεκινήσει μια μεταφορά, πρέπει πρώτα να τραβήξει το σήμα SPICSn χαμηλά (pull-down) για τον σκλάβο που θέλει να επικοινωνήσει. Μόλις το σήμα SPICSn είναι χαμηλό, ο Slave περιμένει τη μεταφορά και ο Master είναι ελεύθερος να ξεκινήσει την αποστολή δεδομένων. Μια μεταφορά τερματίζεται όταν το SPICSn έχει τραβηχτεί ψηλά (pull-high).

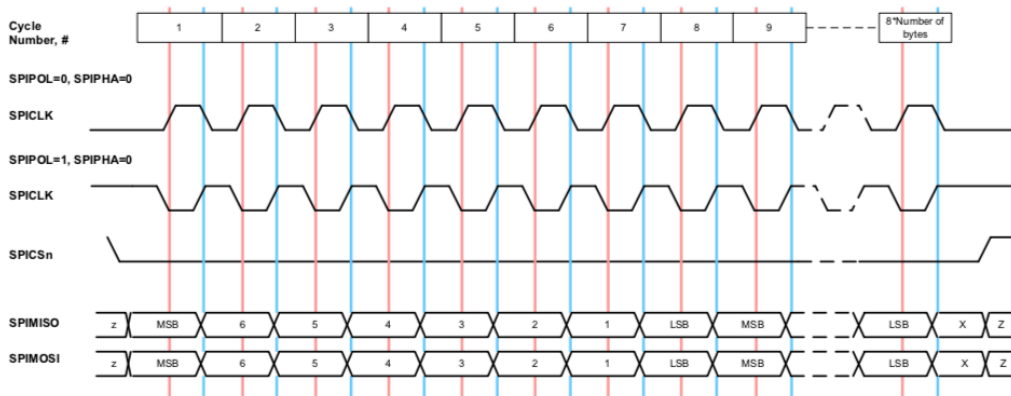
Το SPI υποστηρίζει τέσσερις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, με βάση το σήμα SCK. Το ζεύγος παραμέτρων SPIPOL και SPIPHA, καθορίζει τη λειτουργία του SPI (**Πίνακας 3.2**) [29]:

- Το SPIPOL είναι η πολικότητα του ρολογιού (Polarity) και καθορίζει την προεπιλεγμένη τιμή (high/low) του σήματος όταν ο διάυλος είναι αδρανής (IDLE).
- Το SPIPHA καθορίζει σε ποια ακμή δεδομένων ρολογιού γίνεται η δειγματοληψία (rising/falling).

**Πίνακας 3.2 - Λειτουργίες SPI [29]**

GPIO 5 (SPIPOL)	GPIO 6 (SPIPHA)	SPI Mode	Description (from the master / host point of view)
0	0	0	Data is sampled on the rising (first) edge of the clock and launched on the falling (second) edge.
0	1	1	Data is sampled on the falling (second) edge of the clock and launched on the rising (first) edge.
1	0	2	Data is sampled on the falling (first) edge of the clock and launched on the rising (second) edge.
1	1	3	Data is sampled on the rising (second) edge of the clock and launched on the falling (first) edge.

Το πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων υποστηρίζει προσβάσεις ανάγνωσης / εγγραφής ενός και πολλαπλών byte. Όλα τα byte μεταφέρονται πρώτα το MSB και τελευταίο το LSB. Παρακάτω είναι ένα παράδειγμα της επικοινωνίας του DW1000 με τον κύριο επεξεργαστή.

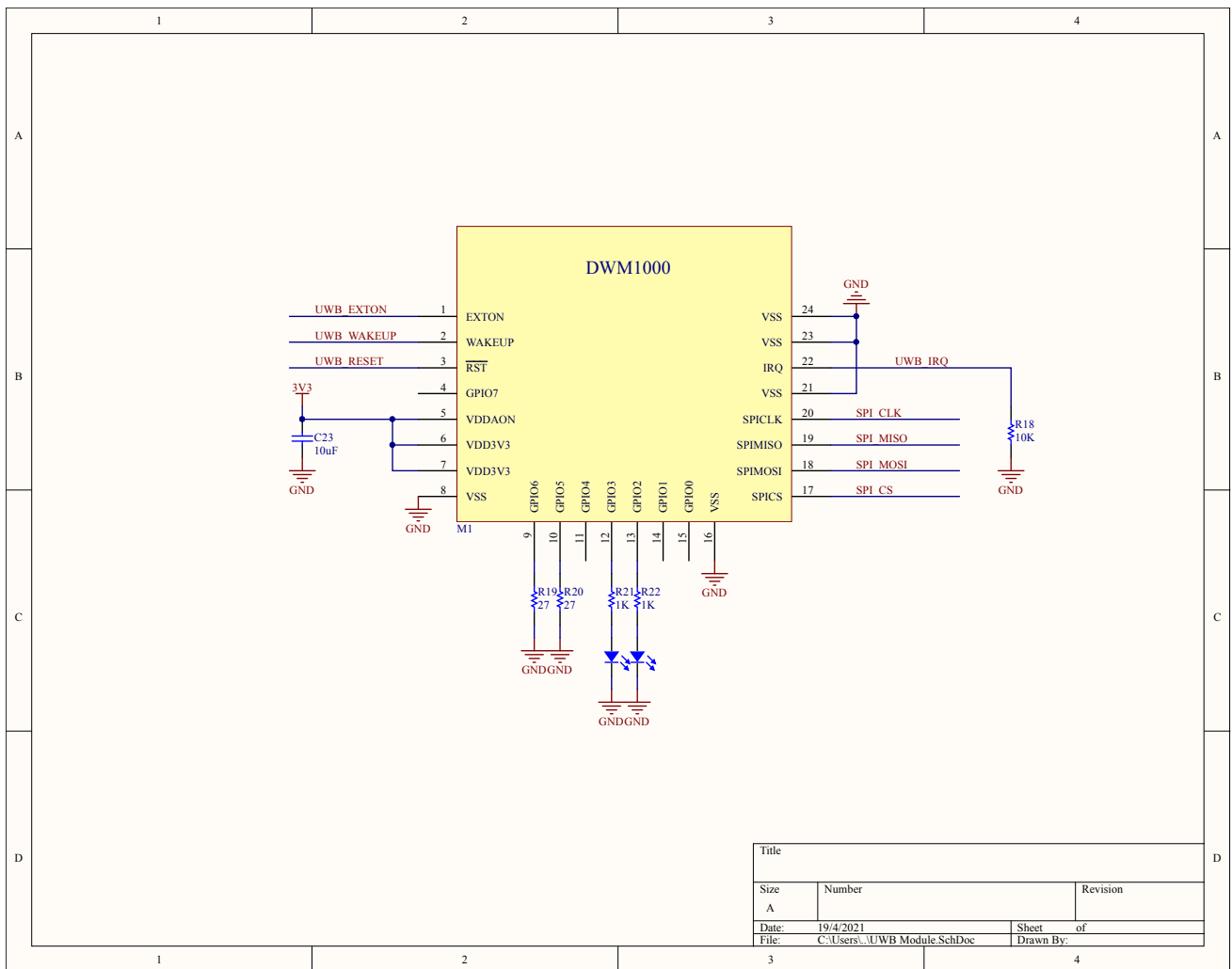


**Εικόνα 3.8 - DW1000 για SPIPHA = 0 Πρωτόκολλο Μεταφοράς [29]**

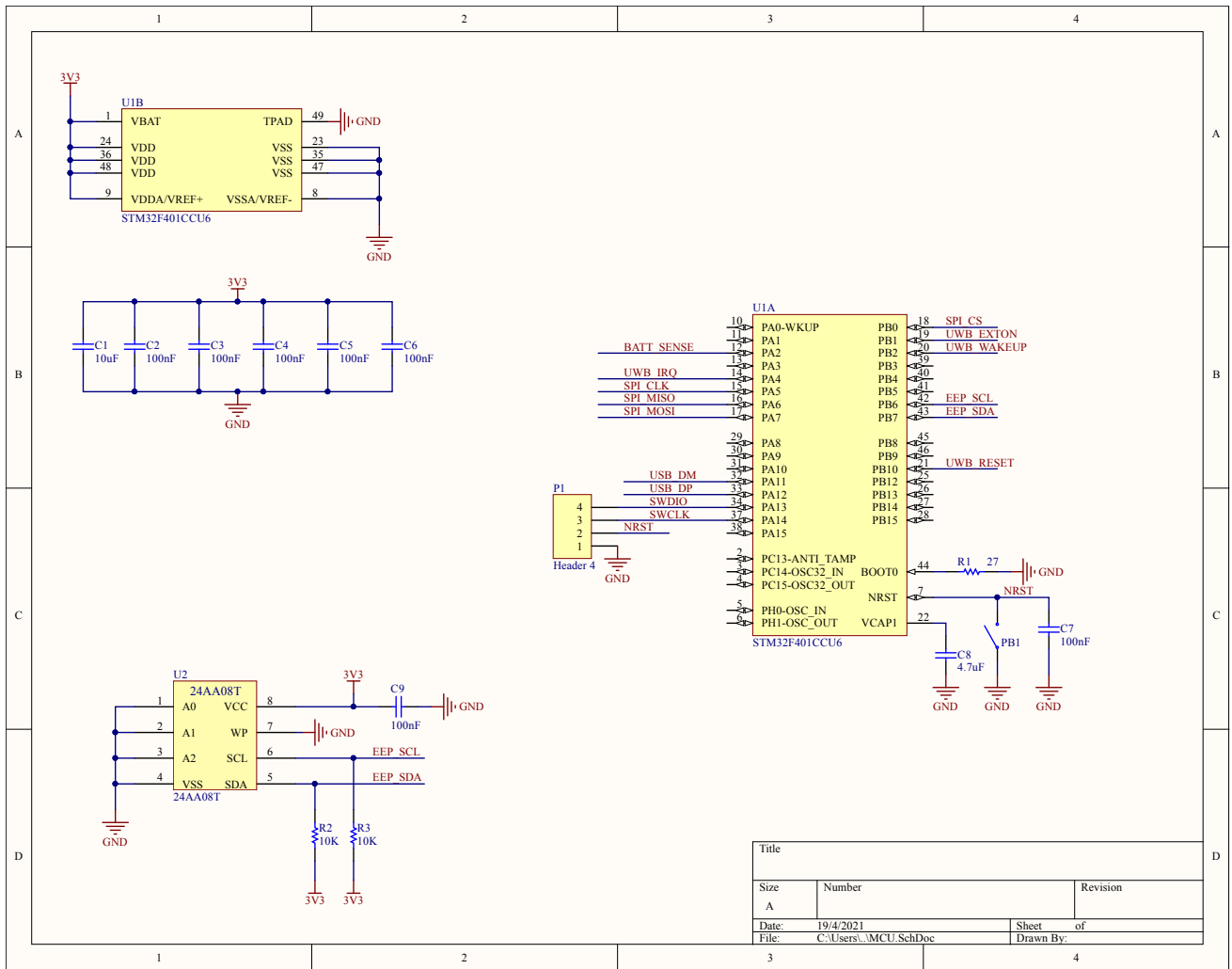
Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.8** πρώτα αποστέλλεται το MSB bit. Στην περίπτωση του SPIPOL = 0 και SPIPHA = 0 τα δεδομένα δειγματοληπτούνται στην θετική ακμή του ρολογιού το οποίο είναι προεπιλεγμένο χαμηλά (0). Το ίδιο συμβαίνει για την περίπτωση που SPIPOL = 1 όμως η δειγματοληψία γίνεται στην πρώτη άνοδο του ρολογιού που συναντάει καθώς το ρολόι είναι προεπιλεγμένο ψηλά (1). Κάθε μεταφορά SPI είναι πλήρως αμφίδρομη, πράγμα που σημαίνει ότι τα δεδομένα αποστέλλονται από τον Master στον Slave και από τον Slave στον Master ταυτόχρονα.

### 3.4 Σχηματικό Διάγραμμα και PCB πλακέτας

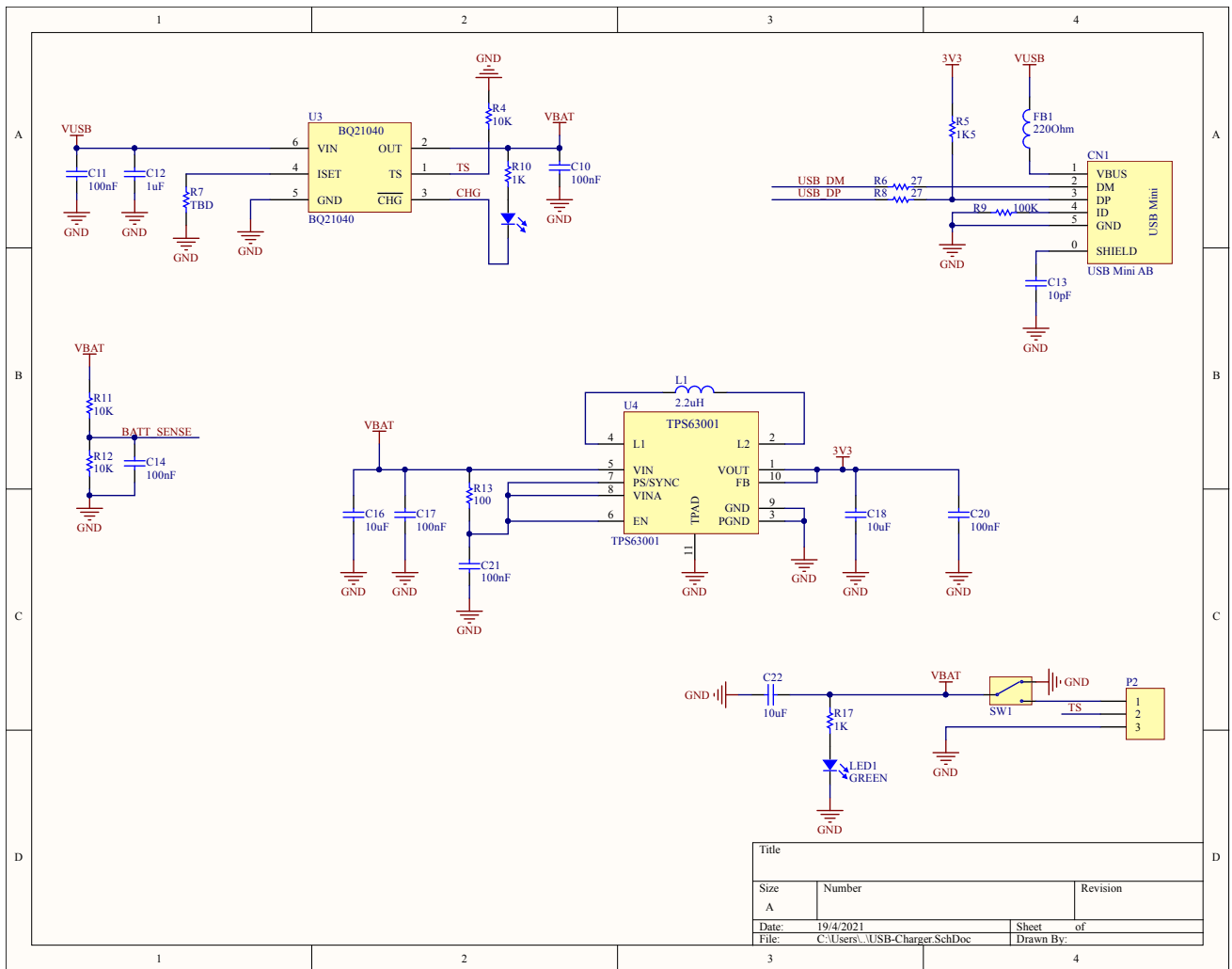
Παρακάτω παρατίθενται τα σχηματικά διαγράμματα και το PCB Layout της πλακέτας που σχεδιάστηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία με την βοήθεια του εργαστηρίου ηλεκτρονικής Circuits & Systems Group του Ε.Μ.Π. Η σχεδίαση έγινε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα **Altium Designer 20.0** της Microsoft.



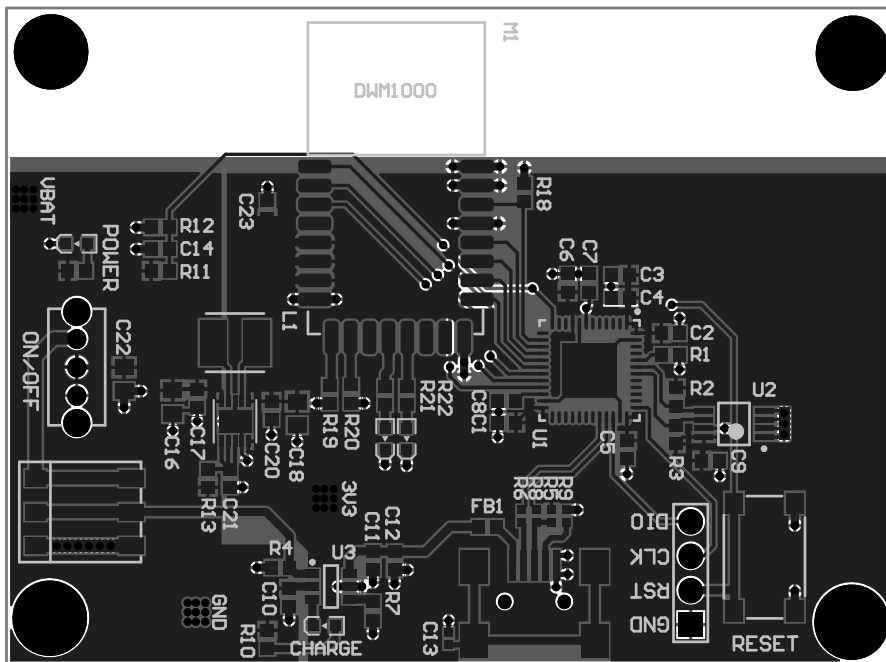
Εικόνα 3.9 - Σχηματικός Κυκλώματος Μέρους I



Εικόνα 3.10 - Σχηματικός Κυκλώματος Μέρους II



Εικόνα 3.11 - Σχηματικός Κυκλώματος Μέρους



Εικόνα 3.12 - PCB Layout Πλακέτας



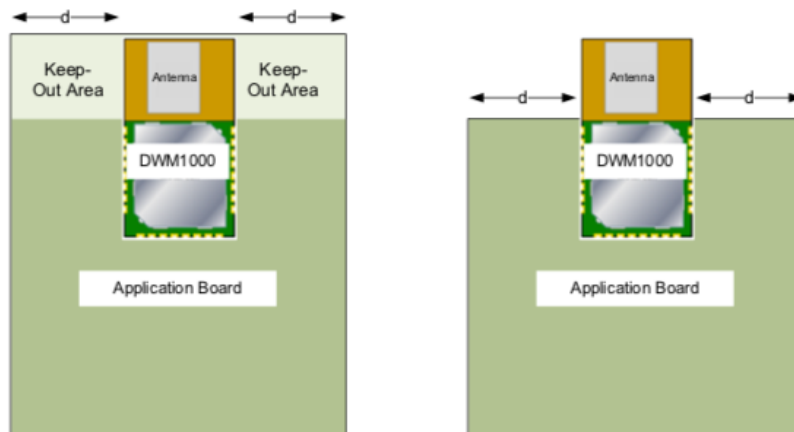
Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
10uF	Capacitor 0603 - 10uF, 10%, X5R, 6V3	C1, C23	0603C	Cap 10uF	2
100nF	Capacitor 0603 - 100nF, 10%, X7R, 16V, Capacitor 0603 - 100nF, 10%, X7R, 25V	C2, C3, C4, C5, C6, C7, C9, C10, C11, C14, C17, C20, C21	0603C	Cap 100nF	13
4.7uF	Capacitor 0603 - 4.7uF, 10%, X7R, 6.3V	C8	0603C	Cap 4.7uF	1
1uF	Capacitor 0603 - 1uF, 10%, X7R, 16V	C12	0603C	Cap 1uF	1
10pF	Capacitor 0402 - 10pF, 5%, COG, 10V	C13	0402C	Cap 10pF	1
10uF	Capacitor 0805 - 10uF, 10%, X7R, 16V	C16, C18, C22	0805C	Cap 10uF	3
USB Mini AB		CN1	USB MINI FEMALE	USB Mini AB	1
220Ohm	Ferrite Bead - 220Ohm, 1.5A, 0603	FB1	0603R	Ferrite Bead - 220Ohm, 1.5A, 0603	1
2.2uH	Coilcraft XAL4020-222MEB - 2.2uH, 5.5A, 38.7mOhms	L1	XAL4020	XAL4020-222MEB	1
GREEN	Green LED - 0603	LED1, LED2, LED4	LED 0603	Green 0603	3
RED	Green RED - 0603	LED3	LED 0603	Red 0603	1
DWM1000	UWB Module	M1	DWM1000	DWM1000	1
Header 4		P1	HEADER1X4	Header 4	1
AVX 9276 - 3Positions	Headers & Wire Housings Wire to Board Conn. 18-24 AWG	P2	AVX - 009276003021106	AVX 9276 - 3Positions	1
Tactile Switches	Tactile Switches	PB1	PTS645SM43SMTR	Tactile Switch (SMD) - PTS645SM43SMTR	1
27	Resistor 0603 - 27Ohms, 5%, 1/10W	R1, R19, R20	0603R	Res 27	3
10K	Resistor 0603 - 10K, 1%, 1/10W, Resistor 0603 - 10K, 0.1%, 1/16W	R2, R3, R4, R11, R12, R18	0603R	Res 10K (1%), Res 10K (0.1%)	6
1K5	Resistor 0402 - 1K5, 1%, 1/8W	R5	0402R	Res 1K5	1
27	Resistor 0402 - 27, 1%, 1/16W	R6, R8	0402R	Res 27	2
TBD	Resistor 0603	R7	0603R	Res 0603	1
100K	Resistor 0402 - 100K, 5%, 1/16W	R9	0402R	Res 100K	1
1K	Resistor 0603 - 1K, 5%, 1/10W, Resistor 0603 - 1K, 1%, 1/10W	R10, R17, R21, R22	0603R	Res 1K, Res 1K (1%)	4
100	Resistor 0603 - 100Ohms, 1%, 1/10W	R13	0603R	Res 100 (1%)	1
Slide Switch	Slide Switches SPDT On-On	SW1	OS102011MS2QN1	Slide Switch	1
STM32F401CCU6	ARM Cortex-M4 32-bit MCU+FPU	U1	QFN48 - 0.5MM	STM32F401CCU6	1
24AA08T	EEPROM 1kx8 - 1.8V	U2	MSOP8 - 0.65MM	24AA08T	1
BQ21040	Linear Battery Charger	U3	SOT23-6 - 0.95MM	BQ21040	1
TPS63001	Buck-Boost Converter	U4	SON10 - 0.5MM	TPS63001DRCT	1

Εικόνα 3.13 - Πίνακας Εξαρτημάτων

### 3.4.1 Διάταξη κεραίας

Η μονάδα DWM χρησιμοποιεί σήματα UWB για τη μέτρηση αποστάσεων. Διά του παρόντος αποστέλλονται ραδιοσήματα μεταξύ των κόμβων. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό του χρόνου πτήσης από τη μία μονάδα στην άλλη και έτσι μια επαρκής απόστασης. Χρησιμοποιώντας ραδιοσήματα, μπορεί να προκύψουν διαφορές στην ισχύ του σήματος ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής και τοποθέτησης του ίδιου του DWM1000 στην πλακέτα εφαρμογής. [29]

Στο Φύλλο Δεδομένων (Datasheet) του DWM1000 δίνονται αναλυτικές οδηγίες για την διάταξη της κεραίας του chip στην πλακέτα. Κατά το σχεδιασμό του PCB στο οποίο θα συγκολληθεί το DWM1000, πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά η εγγύτητα της μονοπολικής κεραίας του DWM100 σε μεταλλικά και σε άλλα μη RF διαφανή υλικά. Δύο προτεινόμενα σχήματα τοποθέτησης εμφανίζονται παρακάτω. Για βέλτιστη απόδοση RF, ο αλεσμένος χαλκός πρέπει να πλημμυρίσει σε όλες τις περιοχές της πλακέτας εφαρμογών, εκτός από τις περιοχές με την ένδειξη "Keep-Out Area", όπου δεν πρέπει να υπάρχει μέταλλο από τις δύο πλευρές, πάνω ή κάτω (π.χ. να μην τοποθετηθεί μπαταρία κάτω από την κεραία). Στην **Εικόνα 3.14** φαίνεται μια πλακέτα χωρίς μη RF διαφανές υλικό στην περιοχή "Keep-Out Area" ή μια πλακέτα με την κεραία να προεξέχει, έτσι ώστε η περιοχή "Keep-Out Area" να βρίσκεται σε ελεύθερο χώρο. Στο δεύτερο σχήμα είναι ακόμη πιο σημαντικό να μην τοποθετηθούν μεταλλικά εξαρτήματα πάνω ή κάτω από την κεραία σε μια εφαρμογή συστήματος, καθώς επηρεάζουν την ακτινοβολία της κεραίας. Η τιμή  $d$  πρέπει να είναι τουλάχιστον 10mm. [29]



**Εικόνα 3.14 - Διάταξη κεραίας DWM1000 σε μια πλακέτα [29]**

# Κεφάλαιο 4

## 4. Two-Way Ranging

Στο **Κεφάλαιο 2** αναφέρθηκαν οι πιθανές τεχνικές εντοπισμού θέσης ενός στόχου σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση της τεχνολογίας UWB. Μια από τις πιο δημοφιλείς είναι η μέθοδος Time of Arrival (ToA), όπου εξάγει το εκτιμώμενο εύρος μεταξύ των δύο κόμβων από ένα σύνολο ανταλλαγών σημάτων μεταξύ των κόμβων καταγράφοντας τις χρονικές σημάνσεις άφιξης και μετάδοσης του σήματος αντίστοιχα. Κάθε ένα από τα εκτιμώμενα εύρη θεωρείται ακτίνα ενός κύκλου. [38] Η τελική θέση του στόχου υπολογίζεται βρίσκοντας το σημείο όπου τέμνονται οι κύκλοι με κέντρα τη θέση των άγκυρών. Σε αυτήν τη μέθοδο, απαιτούνται τουλάχιστον τρεις άγκυρες για τον εντοπισμό ενός στόχου σε 2D χώρο ή τέσσερις σε 3D χώρο. Έχουν αναπτυχθεί κάποιες παραλλαγές της μεθόδου αυτής με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της ακριβείας των αλγορίθμων εντοπισμού με τη μείωση της μετατόπισης ρολογιού των κόμβων. Μια ασύγχρονη παραλλαγή της μεθόδου ToA είναι η Two-Way Ranging (TWR - αμφίδρομη εμβέλεια). Η διαφορά μεταξύ των ToA, TDoA και Two-Way Ranging (TWR) είναι ότι το TWR δεν απαιτεί συγχρονισμό των ρολογιών. [24] [47]

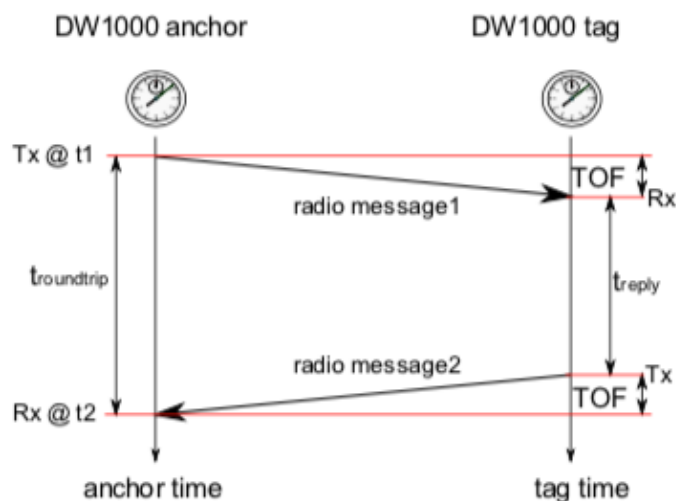
### 4.1 Two-Way Ranging

Στην περίπτωση του TWR, ο στόχος επικοινωνεί με καθεμία από τις σταθερές άγκυρες ξεχωριστά, για αυτό ονομάζεται και αμφίδρομη ανταλλαγή εύρους. Το Tag και κάθε Άγκυρα ανταλλάσσουν πληροφορίες χρονισμού έτσι ώστε η άγκυρα να μπορεί να υπολογίσει το χρόνο πτήση (ToF) του σήματος από το Tag στην άγκυρα χωρίς την ανάγκη συγχρονισμού ετικέτας και άγκυρας εγκαίρως. Μόλις κάθε σταθερή άγκυρα έχει αποκτήσει τις πληροφορίες αυτές, είναι εφικτός ο υπολογισμός της θέσης του στόχου. [39]

Μια πολύ απλοποιημένη εκδοχή του τι συμβαίνει είναι η εξής:

1. Η άγκυρα μεταδίδει ένα σήμα προς την ετικέτα και καταγραφεί την ώρα που το μήνυμα εξάχθηκε από την κεραία ( $t_1$ ).
2. Το Tag (ετικέτα) λαμβάνει το μήνυμα και στέλνει μια απάντηση.
3. Η άγκυρα καταγραφεί την ώρα που λαμβάνει την απάντηση ( $t_2$ ).
4. Η άγκυρα υπολογίζει το χρόνο επιστροφής του σήματος:  $T_{round} = t_2 - t_1$ .
5. Τέλος η άγκυρα υπολογίζει την απόσταση χρησιμοποιώντας τον τύπο  $d = c \cdot \frac{T_{round} - T_{reply}}{2}$ , όπου το  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός.

Υπάρχουν όμως κρυφές καθυστερήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψιν σε μια πραγματική εφαρμογή. Η ετικέτα λαμβάνει το μήνυμα και μεταδίδει μια απόκριση πίσω στην άγκυρα μετά από μια συγκεκριμένη καθυστέρηση  $t_{reply}$  (**Εικόνα 4.1**). [40]



Εικόνα 4.1 - TWR [40]

Χρησιμοποιώντας τις χρονικές σημάνσεις  $t_1$  και  $t_2$ , η άγκυρα μπορεί να υπολογίσει το χρόνο μετ' επιστροφής του σήματος και γνωρίζοντας το χρόνο απάντησης ( $t_{reply}$ ) στην ετικέτα, ο χρόνος πτήσης του σήματος μπορεί να υπολογιστεί από το τύπο:

$$ToF = \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2}$$

και υποθέτοντας ότι η ταχύτητα των ραδιοκυμάτων μέσω του αέρα είναι ίδια με τη ταχύτητα του φωτός  $c$ , τότε η απόσταση της άγκυρας από την ετικέτα υπολογίζεται από τον τύπο:  $d = c \cdot ToF$ . [40]

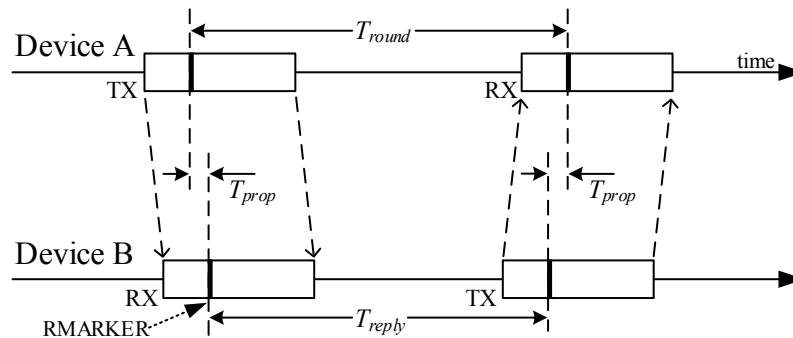
Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι TWR, ο ένας είναι TWR μονής όψης (SS-TWR) και ο άλλος TWR διπλής όψης (DS-TWR).

### 4.1.1 Single Sided Two-Way Ranging (SS-TWR)

Το SS-TWR χρησιμοποιεί ένα χρόνο μετ' επιστροφής ( $T_{round}$ ) για τη μέτρηση της ώρας άφιξης του σήματος (ToA). Πιο συγκεκριμένα μια Συσκευή A στέλνει ένα μήνυμα που ονομάζεται Poll σε μια Συσκευή B και η Συσκευή B απαντάει με ένα μήνυμα προς την Συσκευή A που ονομάζεται Response (Ανταπόκριση). Κάθε Συσκευή (A ή B) καταγραφεί με ακρίβεια τους χρόνους μετάδοσης και λήψης των πλαισίων των μηνυμάτων και έτσι μπορεί να υπολογίσει τους χρόνους  $T_{round}$  και  $T_{reply}$  με μια απλή αφαίρεση. Η εκτίμηση του χρόνου πτήσης  $T_{prop}$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\hat{T}_{prop} = \frac{1}{2}(T_{round} - T_{reply}).$$

όπου  $T_{round}$  είναι ο χρόνος που απαιτείται από την αποστολή του μηνύματος Poll μέχρι να λάβει την απάντηση από την Συσκευή A και  $T_{reply}$  είναι ο χρόνος μεταξύ της λήψης του μηνύματος Poll και της αποστολής της απάντησης (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 - SS\_TWR [27]

Οι χρόνοι  $T_{round}$  και  $T_{reply}$  μετρώνται ανεξάρτητα από τις συσκευές A και B χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα τοπικά ρολόγια τους, τα οποία και τα δύο έχουν κάποιο σφάλμα αντιστάθμισης  $e_A$  και  $e_B$  από την ονομαστική τους συχνότητα. [27] Εάν το  $T_{reply}$  είναι μεγάλο και υπάρχει πολύ μεγάλο σφάλμα ρολογιού, ο εκτιμώμενος χρόνος πτήσης  $T_{prop}$ , θα γίνει ανακριβής. Το SS-TWR είναι ευαίσθητο σε σφάλματα ρολογιού (clock errors). Με βάση την **Εικόνα 4.2** το σφάλμα στη μέτρηση του  $T_{prop}$  δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$error = \hat{T}_{prop} - T_{prop} \simeq \frac{1}{2}(e_A - e_B) \cdot T_{reply}$$

Ορισμένες τυπικές τιμές τους σφάλματος αυτού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1**:

Πίνακας 4.1

clock error / $T_{reply}$	2 ppm	5 ppm	10 ppm	20 ppm	40 ppm
100 $\mu$ s	0.1 ns	0.25 ns	0.5 ns	1 ns	2 ns
200 $\mu$ s	0.2 ns	0.5 ns	1 ns	2 ns	4 ns
500 $\mu$ s	0.5 ns	1.25 ns	2.5 ns	5 ns	10 ns
1 ms	1 ns	2.5 ns	5 ns	10 ns	20 ns
2 ms	2 ns	5 ns	10 ns	20 ns	40 ns
5 ms	5 ns	12.5 ns	25 ns	50 ns	100 ns

Τυπικά σφάλματα που προκαλούνται από το ρολόι κατά την εκτίμηση του χρόνου πτήσης σε SS-TWR [27]

Να σημειωθεί ότι ο χρόνος απάντησης  $T_{reply}$  δεν είναι μόνο ο χρόνος ανακύκλωσης RX-to-TX, αλλά περιλαμβάνει επίσης τη διάρκεια του μηνύματος. Επίσης ένα σφάλμα της τάξης του 1 ns αντιστοιχεί με σφάλμα 30 cm στη μετρούμενη απόσταση. [25]

Το αποδεκτό εύρος σφάλματος σε κάθε εφαρμογή ενδέχεται να διαφέρει. Το SS-TWR μπορεί να είναι η κατάλληλη επιλογή για μέτρηση εύρους, αν ο χρόνος απάντησης  $T_{reply}$  ελαχιστοποιείται και το σφάλμα ρολογιού είναι χαμηλό. Στην πράξη, θα υπάρχει πάντα μετατόπιση της συχνότητας ρολογιού, που σημαίνει ότι η συχνότητα ρολογιού σε έναν κόμβο είναι υψηλότερη από ότι στον άλλο κόμβο. Στον **Πίνακα 4.2** φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το  $T_{reply}$  και όσο αυξάνεται η μετατόπιση του ρολογιού, το σφάλμα στην εκτίμηση του χρόνου πτήσης αυξάνεται σε σημείο που το σφάλμα

καθιστά την εκτίμηση πολύ ανακριβή. Το SS-TWR δεν χρησιμοποιείται συνήθως, όταν η εφαρμογή απαιτεί ακρίβεια επιπέδου εκατοστών.

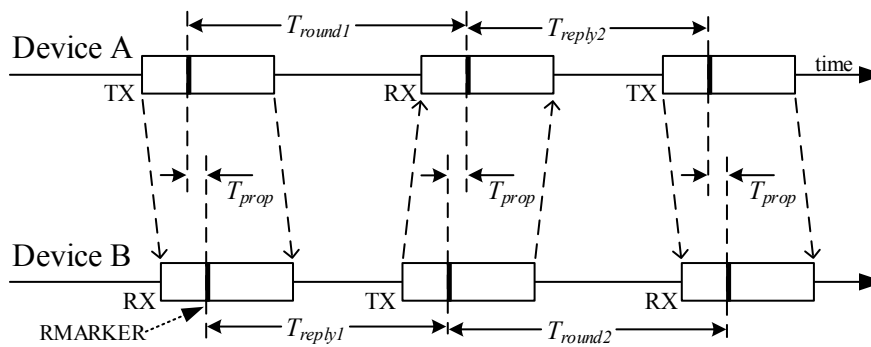
**Πίνακας 4.2**

clock error $T_{reply}$	2 ppm	5 ppm	10 ppm	20 ppm	40 ppm
<b>211 <math>\mu</math>s total</b> 6.81 Mbps 64 Symbol Preamble 96 $\mu$ s response delay	0.2 ns	0.5 ns	1.1 ns	2.1 ns	4.2 ns
<b>275 <math>\mu</math>s total</b> 6.81 Mbps 128 Symbol Preamble 96 $\mu$ s response delay	0.3 ns	0.7 ns	1.4 ns	2.8 ns	5.5 ns
<b>403 <math>\mu</math>s total</b> 6.81 Mbps 256 Symbol Preamble 96 $\mu$ s response delay	0.4 ns	1 ns	2 ns	4 ns	8 ns

**Τυπικό σφάλμα που προκαλείται από το ρολόι στην εκτίμηση χρόνου πτήσης του SS-TWR χρησιμοποιώντας πραγματικά μήκη IEEE.802.15.4-2011 UWB frame [27]**

### 4.1.2 Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR)

Το DS-TWR, είναι μια επέκταση του βασικού SS-TWR στην οποία χρησιμοποιούνται δύο μετρήσεις χρόνου μετ' επιστροφής ( $T_{round}$ ) και συνδυάζονται για να δώσουν ένα αποτέλεσμα χρόνου πτήσης (ToF) που έχει μειωμένο σφάλμα ακόμη και για πολύ μεγάλες καθυστερήσεις απόκρισης. Η λειτουργία του DS-TWR είναι όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.3**, όπου χρησιμοποιεί την απάντηση της πρώτης μέτρησης μετ' επιστροφής ως εκκινήτη για τη δεύτερη μέτρηση μετ' επιστροφής. Κάθε συσκευή (A ή B) καταγραφεί με ακρίβεια τους χρόνους μετάδοσης και λήψης των μηνυμάτων. [27]



**Εικόνα 4.3 - DS\_TWR με 3 μηνύματα [27]**

Η εκτίμηση του χρόνου πτήσης ( $T_{prop}$ ) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\hat{T}_{prop} = \frac{(T_{round1} \cdot T_{round2} - T_{reply1} \cdot T_{reply2})}{(T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2})}$$

Το παραπάνω σχήματα χαρακτηρίζονται ως μη-Συμμετρικό (asymmetric) επειδή δεν απαιτεί οι χρόνοι απάντησης από κάθε συσκευή να είναι οι ίδιοι. Χρησιμοποιώντας αυτό το σχήμα, το τυπικό σφάλμα που προκαλείται από το ρολόι βρίσκεται στο χαμηλό εύρος picosecond ακόμη και με 20 ppm κρυστάλλους. Σε αυτά τα επίπεδα σφάλματος, η ακρίβεια του προσδιορισμού της ώρας άφιξης των μηνυμάτων σε καθέναν από τους δέκτες συμβάλλει σημαντικά στο συνολικό σφάλμα  $T_{prop}$  από το σφάλμα που προκαλείται από το ρολόι.

$$error = \hat{T}_{prop} \cdot \left(1 - \frac{k_a + k_b}{2}\right)$$

Το ρολόι στη συσκευή A τρέχει  $k_a$  φορές την επιθυμητή συχνότητα και το ρολόι στη συσκευή B τρέχει  $k_b$  φορές την επιθυμητή συχνότητα, και τα δύο  $k_a$  &  $k_b$  είναι κοντά στο 1. Ακόμη και με σχετικά μεγάλο εύρος λειτουργίας UWB, δηλαδή 100 m, το ToF είναι μόλις 333 ns, οπότε το σφάλμα είναι  $20 \times 10^{-14} \times 333 \times 10^{-9}s$ , δηλαδή  $6,7 \times 10^{-12}$  δευτερόλεπτα ή 6,7 picoseconds που είναι περίπου 2,2 mm. Για να επιτευχθούν αυτά τα επίπεδα σφάλματος δεν απαιτείται η χρήση του ίδιου χρόνου απόκρισης σε κάθε συσκευή. [27]

### 4.1.3 Symmetric-Double-Sided Two-Way Ranging (SDS-TWR)

Το SDS-TWR αποτελεί μια ειδική περίπτωση του DS-TWR στο οποίο οι χρόνοι  $T_{reply1}$  και  $T_{reply2}$  είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται μόνο πρόσθεση, αφαίρεση και διαίρεση με το 4 που επιτυγχάνεται εύκολα σε μικροελεγκτές χαμηλής ισχύος, ωστόσο έχει ως αποτέλεσμα ολόκληρη η ανταλλαγή να διαρκέσει περισσότερο από το απαραίτητο.

$$\hat{T}_{prop} = \frac{(T_{round1} - T_{reply2} + T_{round2} - T_{reply1})}{4}$$

Μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί μια κατάσταση όπου οι χρόνοι απάντησης σε κάθε συσκευή είναι οι ίδιοι, αν και η χρήση της λειτουργίας καθυστερημένης αποστολής DW1000 το απλοποιεί. Οι υπολογισμοί που απαιτούνται σε κάθε συσκευή ενδέχεται να διαφέρουν. Για παράδειγμα, το τελικό μήνυμα από τη συσκευή A στη συσκευή B θα πρέπει συχνά να ενσωματώνει τους χρόνους αποστολής και λήψης στο πακέτο έτσι ώστε η συσκευή B να μπορεί να υπολογίσει τον χρόνο πτήσης. Εάν απαιτούνται συμμετρικοί χρόνοι καθυστέρησης, θα πρέπει να επεκταθεί ολόκληρη η ανταλλαγή μετ' επιστροφής για να αντιμετωπιστεί αυτό. Όταν οι καθυστερήσεις απόκρισης είναι ευέλικτες, η ανταλλαγή μπορεί να είναι πιο γρήγορη. [27]

### 4.1.4 Σύγκριση Μεθόδων Εφαρμογής TWR

Παραπάνω αναλύθηκαν τρεις από τις βασικές μεθόδους εφαρμογής TWR για τον υπολογισμό του χρόνου πτήσης (ToF) ενός μηνύματος, έτσι γνωρίζοντας τον χρόνο πτήσης ενός σήματος στον ελεύθερο χώρο, η απόσταση μεταξύ ενός στόχου και μιας άγκυρας μπορεί εύκολα να μετρηθεί χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του φωτός. Στον Πίνακα 4.3 παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών. [22]

Πίνακας 4.3

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονέκτημα
SS-TWR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Απαιτείται μόνο μία ανταλλαγή μηνυμάτων που εξοικονομεί χρόνο και ενέργεια.</li> <li>Εάν το <math>T_{reply}</math> διατηρείται σύντομο και χρησιμοποιούνται ακριβείς κρύσταλλοι, τότε η εκτίμηση του χρόνου πτήσης μπορεί να είναι αρκετά ακριβής για ορισμένες περιπτώσεις χρήσης.</li> </ul>	Καθώς αυξάνεται το $T_{reply}$ και αυξάνεται η αντιστάθμιση ρολογιού, ο εκτιμώμενος χρόνος πτήσης γίνεται πολύ ανακριβής.
DS-TWR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Οι χρόνοι απάντησης δεν χρειάζεται να είναι οι ίδιοι - δίνει μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό περιπτώσεων χρήσης και σεναρίων εφαρμογών.</li> <li>Το σφάλμα στον υπολογισμένο χρόνο πτήσης ελαχιστοποιείται.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Απαιτεί λειτουργίες πολλαπλασιασμού και διαίρεσης.</li> <li>Υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας.</li> </ul>
SDS-TWR	Απαιτεί μόνο απλές μαθηματικές πράξεις για να εξαχθεί ένα αποτέλεσμα.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Οι χρόνοι απάντησης πρέπει να είναι οι ίδιοι. Εάν δεν είναι τα ίδια τότε εισάγεται ένα σφάλμα στο αποτέλεσμα του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ των χρόνων απάντησης.</li> <li>Η ανταλλαγή εύρους είναι μεγαλύτερη από το απαραίτητο, επειδή όλοι οι χρόνοι απάντησης πρέπει να είναι όσο ο μεγαλύτερος χρόνος απάντησης.</li> </ul>

Μετά τη σύγκριση των μοντέλων επιλέχθηκε η μέθοδος DS-TWR λόγω της υψηλής ακρίβειας και ευελιξίας καθώς δεν απαιτείται συγχρονισμός των ρολογιών και δεν επηρεάζεται από τη μετατόπιση του ρολογιού. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων μπορεί να εκτιμηθεί σε έναν μόνο κόμβο, χωρίς την ανάγκη ανταλλαγής πληροφοριών με έναν άλλο κόμβο. Έχει αναφερθεί αρκετές φορές παραπάνω ότι για RTLS σε 2D χώρο χρειάζονται τουλάχιστον τρεις άγκυρες ενώ σε 3D χώρο τέσσερις. Η παρούσα διπλωματική εργασία, ασχολείται με τον εντοπισμό θέσης σε 2D χώρους, επομένως χρειάζονται τρεις άγκυρες και ένας κινητός στόχος (Tag). [41]

Το DW1000 έχει μια ειδική λειτουργία που μπορεί και καθυστερεί την αποστολή μηνυμάτων πράγμα που εξαλείφει τη πηγή σφαλμάτων από την μετατόπιση ρολογιού. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται καθυστερημένη μετάδοση και επιτρέπει στον κεντρικό ελεγκτή να επιλέξει έναν χρόνο μετάδοσης και να προβλέψει τη χρονική σήμανση μετάδοσης. Στην πραγματικότητα, αυτή η καθυστέρηση είναι κρίσιμη και θεμελιώδης, επειδή το σφάλμα εκτίμησης του TOF επηρεάζεται, όχι μόνο από την κίνηση του ρολογιού στον ταλαντωτή, αλλά και από άλλες πηγές σφάλματος, όπως τη καθυστέρηση χρόνου διάδοσης, τη καθυστέρηση χρόνου μετάδοσης και τη καθυστέρηση λήψης. Αυτό περιλαμβάνει την καθυστέρηση που εισήγαγε η κεραία, το PCB και άλλα εξωτερικά και εσωτερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Το πρότυπο IEEE.802.15.4 θεωρεί τις μετατοπίσεις του ρολογιού ως το μόνο κυρίαρχο σφάλμα για τη σύγκριση των σφαλμάτων εκτίμησης του TOF μεταξύ διαφορετικών μεθόδων TWR. [27]



## 4.1.5 Υπολογισμός καθυστέρησης

Ως μέρος της εκτίμησης της ώρας της πτήσης, απαιτείται χρονική σήμανση για το πότε ελήφθη το μήνυμα και για το πότε εστάλη η απάντηση. Το DWM1000 δεν προσφέρει έναν τρόπο αυτόματης ρύθμισης του χρόνου κατά τη μετάδοση, αλλά προσφέρει τη δυνατότητα να οριστεί μια ώρα κατά την οποία ένα μήνυμα θα μεταδοθεί στο μέλλον. Εάν αποσταλεί καθυστερημένη μετάδοση, η χρονική σήμανση μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων και στη συνέχεια να ενσωματωθεί στο μήνυμα. [42]

Στην ιδανική περίπτωση, αυτή η καθυστέρηση είναι μικρή. Ωστόσο, εάν η καθυστέρηση είναι πολύ μικρή, ο μικροεπεξεργαστής δεν θα είναι σε θέση να μεταδώσει τα δεδομένα στο DWM1000 πριν περάσει η καθυστερημένη χρονική σήμανση. Αυτό προκαλεί σφάλμα και το DWM δεν θα μεταδώσει τίποτα. Επίσης, η καθυστέρηση που καθορίζεται δεν είναι ακριβώς η καθυστέρηση κατά την οποία το DWM1000 θα αρχίσει να μεταδίδει, είναι η καθυστέρηση που το DWM1000 θα αρχίσει να μεταδίδει το τμήμα δεδομένων του μηνύματος.

Πριν από οποιαδήποτε μετάδοση, αποστέλλεται ένα «preamble» που επιτρέπει στις άλλες συσκευές του δικτύου να ξυπνήσουν και να μάθουν ότι έρχεται ένα μήνυμα. Η αποστολή του προοιμίου διαρκεί σχετικά μεγάλο χρόνο (περίπου 1 ms ανά σύμβολο στο προοίμιο, το οποίο προσθέτει έως και 2 ms για το μήκος του προοιμίου).

Η καθυστέρηση πριν από τη μετάδοση ενός κόμβου είναι το άθροισμα των:

- Αριθμός συμβόλων στο προοίμιο  $\times 1\mu\text{s}$  (το 1024 είναι η τιμή που χρησιμοποιείται εδώ, αν και το DWM προσφέρει διαφορετικές επιλογές μήκους προοιμίου, δεν είναι ακριβώς 1  $\mu\text{s}$  αλλά είναι πολύ κοντά)
- Απαιτούμενος χρόνος για τον υπολογισμό και την αποστολή της χρονικής σήμανσης χρησιμοποιώντας SPI, περίπου 1000 $\mu\text{s}$  (εμπειρικά προσδιορίζεται)
- Bytes δεδομένων για μετάδοση  $\times 4,5\ \mu\text{s}$ , ή  $85 \times$  αριθμός συσκευών στο δίκτυο εκτός από αυτό (προσδιορίζεται εμπειρικά).

Προσθέτοντας περίπου 200 $\mu\text{s}$ , η καθυστέρηση που χρησιμοποιούμε στον κώδικα για 3 συσκευές είναι περίπου 3500  $\mu\text{s}$ . Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί αυτή η καθυστέρηση, ώστε να αυξηθεί η μέγιστη συχνότητα στο οποίο, το σύστημα μπορεί να ενημερώσει τα εύρη. Το τμήμα του να έχεις ένα μικρό προοίμιο σε σχέση με ένα μακρύ είναι ότι ένα μεγαλύτερο προοίμιο χρειάζεται χρόνο για να στείλει, αλλά έχει χαμηλότερη πιθανότητα να χάσει από τους παραλήπτες.

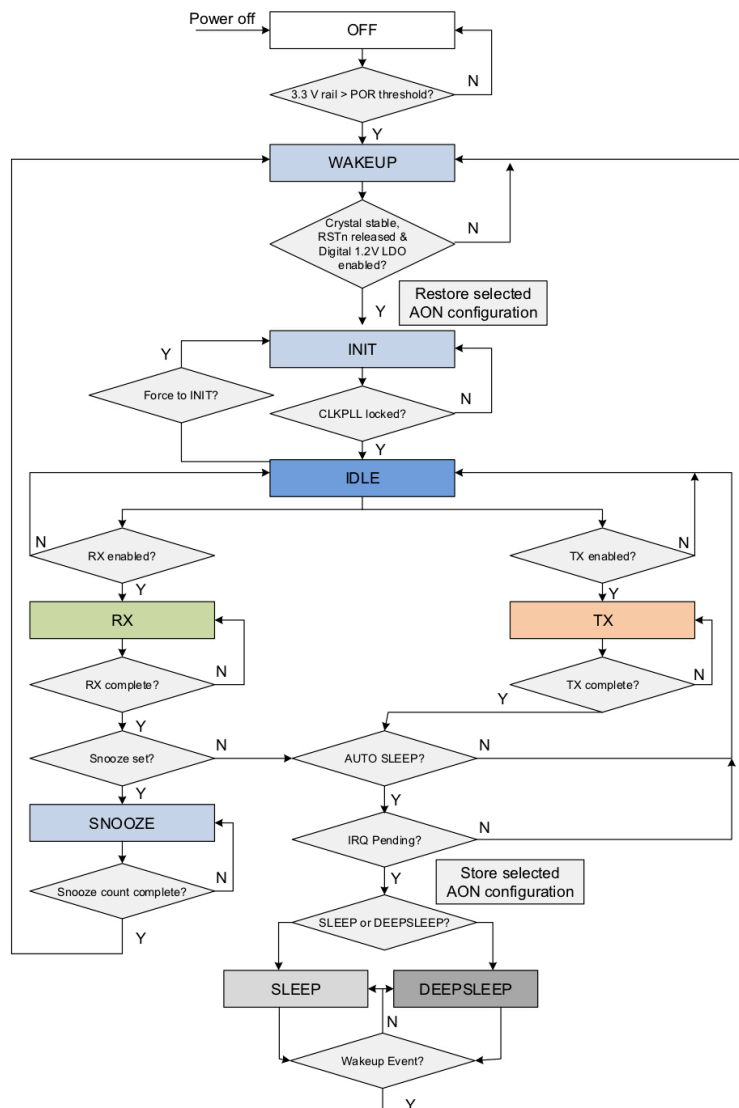
## 4.2 Λειτουργίες του DW1000

Το DW1000 έχει έναν αριθμό διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας (modes) που παρουσιάζονται στο **Πίνακας 4.4**:

**Πίνακας 4.4**

Όνομα Λειτουργίας	Περιγραφή Λειτουργίας
OFF	Η συσκευή είναι εντελώς απενεργοποιημένη.
WAKEUP	Περίοδος εκκίνησης της συσκευής, μετά από 4 ms μεταβαίνει στην κατάσταση INIT της συσκευής.
INIT	Περίοδος σταθεροποίησης του εσωτερικού ρολογιού για μετά μετάβαση στην κατάσταση IDLE της συσκευής.
IDLE	Σε αυτήν την κατάσταση, το SPI μπορεί να λειτουργήσει έως και 20 MHz, σε αυτήν την κατάσταση το σύστημα είναι έτοιμο να λάβει εντολές και μετά να εισέλθετε στη λειτουργία λήψης ή μετάδοσης.
SLEEP	Στην κατάσταση SLEEP, ο εσωτερικός ταλαντωτής χαμηλής ισχύος DW1000 λειτουργεί και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του μετρητή ύπνου του οποίου η λήξη έχει προγραμματιστεί να "ξυπνήσει" το DW1000 και να προχωρήσει στην κατάσταση WAKEUP.
DEEPSLEEP	Η κατάσταση με τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (εκτός το OFF), σε αυτήν την κατάσταση ενεργοποιείται μόνο το AON (Always On Memory), παραμένει σε αυτήν την κατάσταση μέχρι ένα συμβάν αφύπνισης (γραμμή SPICSn στο LOW ή γραμμή WAKEUP στο HIGH) να εντοπιστεί για να μεταβεί στην κατάσταση WAKEUP.
TX state	Στην κατάσταση TX, το DW1000 μεταδίδει ένα πλαίσιο που περιέχει τα περιεχόμενα του buffer μετάδοσης στο διαμορφωμένο κανάλι RF με τις διαμορφωμένες παραμέτρους μετάδοσης.
RX state	Στην κατάσταση RX, ο δέκτης DW1000 είναι ενεργός, αναζητώντας προοίμιο.
SNOOZE	Η κατάσταση SNOOZE είναι παρόμοια με την κατάσταση INIT εκτός από το ότι ένας μετρητής εκτελείται για να προκαλέσει το DW1000 να μεταβεί αυτόματα στην κατάσταση RX όταν λήξει ο μετρητής.

Στην **Εικόνα 4.5** παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής του DW1000.

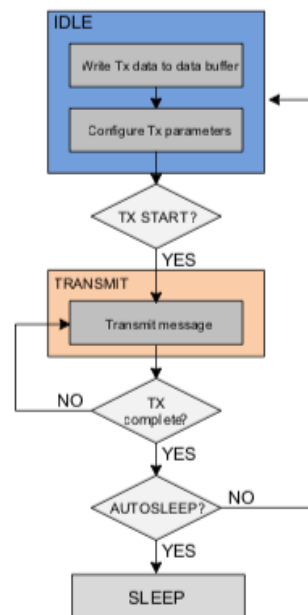


Εικόνα 4.5 - Διάγραμμα Ροής DW1000 [27]

### 4.2.1 Μετάδοση Μηνύματος (TX)

Η μετάδοση των πλαισίων δεδομένων είναι μία από τις βασικές λειτουργίες του πομποδέκτη DW1000. Το DW1000 ξεκινά στην κατάσταση IDLE αναμένοντας οδηγίες από τον κεντρικό ελεγκτή. Για τη μετάδοση, ο κεντρικός ελεγκτής πρέπει να γράψει τα δεδομένα στο buffer μετάδοσης της συσκευής. Οι επιθυμητές διαμορφώσεις μετάδοσης για το προοίμιο, το ρυθμό δεδομένων και το PRF πρέπει επίσης να γράφουν στο μητρώο ελέγχου μετάδοσης πλαισίου (Transmit Frame Control). Η διαμόρφωση του πομπού πραγματοποιείται στην κατάσταση IDLE, αλλά οι διαμορφώσεις πλαισίου μπορεί να πραγματοποιούνται κατά την ενεργή μετάδοση. Αφού έχουν γίνει όλες οι σχετικές διαμορφώσεις, ο κεντρικός ελεγκτής ξεκινά τη μετάδοση γράφοντας το bit TXSTRT στο μητρώο ελέγχου συστήματος (Register Control System). Μετά το αίτημα μετάδοσης, το DW1000 στέλνει αυτόματα ολόκληρο το πλαίσιο (προοίμιο, SFD, PHR και δεδομένα). Το τέλος της μετάδοσης του πλαισίου σηματοδοτείται στον κεντρικό υπολογιστή μέσω του bit TXFRS (Transmit Frame Sent) και το DW1000 επιστρέφει στη λειτουργία IDLE για να

περιμένει νέες οδηγίες. Στην **Εικόνα 4.6** παρουσιάζεται ένα απλό διάγραμμα ροής για τη μετάδοση ενός πλαισίου. [27]



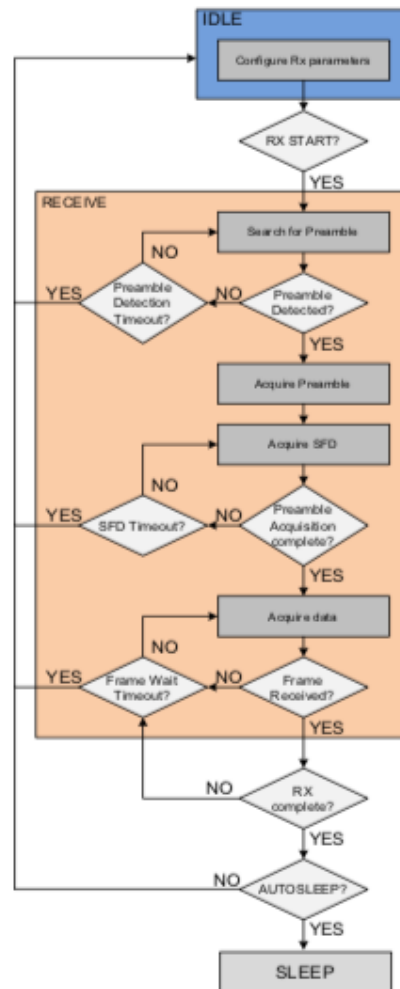
**Εικόνα 4.6 - Βασική Ακολουθία Μετάδοσης [27]**

Η μετάδοση ενός πλαισίου μπορεί να είναι άμεση ή καθυστερημένη εισάγοντας μια καθυστέρηση σε μονάδες UWB και πρέπει να ρυθμιστεί πριν από την μετάδοση μέσω ειδικών καταχωρητών του συστήματος. Για καθυστερημένη μετάδοση, ο χρόνος μετάδοσης προγραμματίζεται σε ένα μητρώο Καθυστερημένης Μετάδοσης ή Λήψης (Delayed Send or Receive Time). Στη συνέχεια η καθυστερημένη μετάδοση ξεκινάει ρυθμίζοντας τα στοιχεία TXDLYS και TXSTRT. Ο στόχος μιας καθυστερημένης μετάδοσης είναι ότι ο καθορισμένος χρόνος μετάδοσης είναι προβλέψιμος και ευθυγραμμισμένος με τη χρονική σήμανση μετάδοσης, στην ουσία ο καθορισμένος χρόνος μετάδοσης, είναι ο χρόνος μετάδοσης του RMARKER (δεν συμπεριλαμβάνεται η καθυστέρηση της κεραίας Tx), δηλαδή είναι ο αρχικός χρόνος Tx προτού προστεθεί η καθυστέρηση της κεραίας. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό του χρόνου μετάδοσης ενός μηνύματος και ενσωμάτωση του στο μήνυμα που μεταδίδεται. Στην καθυστερημένη μετάδοση, το DW1000 υπολογίζει έναν εσωτερικό χρόνο έναρξης για το πότε θα αρχίσει να στέλνει το προοίμιο, για να μπορέσει να κάνει την χρονική σήμανση του RMARKER και του προγραμματισμένου χρόνου μετάδοσης να συμφωνούν. Το DW1000 παραμένει στην κατάσταση IDLE έως ότου ο χρόνος συστήματος φτάσει στο σωστό σημείο για να ενεργοποιηθεί ο πομπός και να ξεκινήσει το προοίμιο.[27]

Η καθυστερημένη μετάδοση χρησιμοποιείται κυρίως στη μέθοδο Αμφίδρομης Εμβέλειας (Two-Way Ranging), όπου είναι σημαντικό να διατηρούνται οι χρόνοι απόκρισης ίδιοι και στα δύο άκρα για να μειωθεί το σφάλμα στην εκτίμηση εύρους. Η ελαχιστοποίηση του χρόνου απόκρισης μειώνει επίσης αυτό το σφάλμα. Το μέγιστο μήκος των δεδομένων που διαβιβάζονται σύμφωνα με το πρότυπο IEEE.802.15.4 μπορεί να είναι 127 bytes, αλλά η συσκευή DWM1000 επιτρέπει την επέκταση του μήκους δεδομένων έως και 1023 bytes το μέγιστο, όπου σε αυτή την περίπτωση η κεφαλίδα PHY επεκτείνεται κατά 3 bits.

## 4.2.2 Λήψη Μηνύματος (RX)

Η λήψη ενός καρέ ενεργοποιείται μέσω αιτήματος του κεντρικού υπολογιστή ή μέσω της αυτόματης επανενεργοποίησης του δέκτη. Ο δέκτης αναζητά συνεχώς το προοίμιο έως ότου εντοπιστεί ή ληφθεί το προοίμιο, όπου εκεί είναι έτοιμο για να ξεκινήσει η αποδιαμόρφωση του. Ένα χρονικό όριο ανίχνευσης προοιμίου μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να επιτρέπει στον δέκτη να σταματήσει να αναζητά το προοίμιο μετά από μια επιθυμητή περίοδο. Στην **Εικόνα 4.7** παρουσιάζεται μια βασική ακολουθία λήψης. [27]



**Εικόνα 4.7 - Βασική Ακολουθία Λήψης [27]**

Οι φάσεις της λήψης ενός πλαισίου είναι:

- I. Ανίχνευση του Προοιμίου
- II. Συσσώρευση του Προοιμίου
- III. Ανίχνευση του SFD
- IV. Αποδιαμόρφωση του PHR
- V. Αποδιαμόρφωση Δεδομένων

## I. Ανίχνευση του Προοιμίου [27]

Η ακολουθία του προοιμίου ανιχνεύεται με διασταυρούμενη συσχέτιση σε τεμάχια, τα οποία έχουν μήκος συμβόλων προοιμίου. Το μέγεθος του κομματιού που χρησιμοποιείται επιλέγεται από τη διαμόρφωση PAC. Το μέγεθος PAC πρέπει να επιλεγεί ανάλογα με το αναμενόμενο μέγεθος προοίμιο. Ο Πίνακας 4.5 παρέχει τη συνιστώμενη διαμόρφωση μεγέθους PAC για χρήση στο δέκτη, ανάλογα με το προοίμιο που χρησιμοποιείται στον πομπό.

Πίνακας 4.5

Expected preamble length of frames being received	Recommended PAC size
64	8
128	8
256	16
512	16
1024	32
1536	64
2048	64
4096	64

### Προτεινόμενο Μέγεθος PAC [27]

Είναι δυνατόν να ακυρωθεί η λήψη εάν δεν εντοπιστεί έγκυρο προοίμιο εντός ενός προκαθορισμένου χρόνου. Το χρονικό όριο ανίχνευσης προοιμίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ανταλλαγή μηνυμάτων για να εγκαταλείψει τη λήψη το συντομότερο δυνατό, εξοικονομώντας ενέργεια.

## I. Συσσώρευση του Προοιμίου

Μόλις ανιχνευθεί η ακολουθία του προοιμίου, ο δέκτης αρχίζει να συσσωρεύει συσχετισμένα σύμβολα προοιμίου, ενώ αναζητά την ακολουθία SFD. Η συσσώρευση σταματά όταν ανιχνεύεται το SFD, αλλά μπορεί να σταματήσει νωρίτερα εάν ο συσσωρευτής μεγαλώσει γρήγορα, στην περίπτωση αυτή ο δέκτης συνεχίζει να λαμβάνει το προοίμιο, χωρίς να συσσωρεύεται, αναζητώντας την ακολουθία SFD.

## II. Ανίχνευση του SFD

Η ανίχνευση του SFD είναι ένα βασικό συμβάν στη λήψη ενός πλαισίου, επειδή σηματοδοτεί την έναρξη της κεφαλίδας PHY, η οποία ορίζει το RMARKER που είναι το σημείο καταγραφής της χρονικής σήμανσης και σηματοδοτεί την αλλαγή από την αποδιαμόρφωση του προοιμίου στην αποδιαμόρφωση BPM / BPSK του PHR (και τα δεδομένα στη συνέχεια). Είναι δυνατόν να ακυρωθεί η λήψη εάν το SFD δεν ανιχνευθεί εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος μετά την ανίχνευση του προοιμίου. Αυτό το χρονικό όριο ανίχνευσης SFD προστατεύει από την εσφαλμένη ανίχνευση προοιμίου (υπάρχει μια πιθανότητα να συμβεί). Το DW1000 έχει επίσης τη δυνατότητα προγραμματισμού μη τυπικών ακολουθιών SFD που δίνουν βελτιωμένη απόδοση.

## III. Αποδιαμόρφωση του PHR

Ο κύριος ρόλος του PHY Header (PHR) είναι να μεταφέρει το μήκος του τμήματος δεδομένων

του πλαισίου και να δείξει τον ρυθμό δεδομένων που χρησιμοποιείται για την αποδιαμόρφωση δεδομένων.

#### IV. Αποδιαμόρφωση Δεδομένων

Στον δέκτη χρησιμοποιείται αποκωδικοποιητής Viterbi για ανάκτηση των bit δεδομένων (αυτό χρησιμοποιείται επίσης για τη λήψη του PHR) τα οποία στη συνέχεια περνούν μέσω του αποκωδικοποιητή Reed Solomon για να εφαρμόσουν οποιαδήποτε περαιτέρω διόρθωση μπορεί. Η επιτυχής λήψη ενός καρέ σηματοδοτείται στον κεντρικό υπολογιστή μέσω των bit κατάστασης συμβάντος RXDFR και RXFCG.

Η διαδικασία της λήψης ενός πλαισίου μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί μετά από μια καθορισμένη καθυστέρηση, διαμορφώνοντας τους κατάλληλους καταχωρητές του συστήματος.

### 4.2.3 Timestamps

Το DW1000 χρησιμοποιεί μαθηματικές και ηλεκτρονικές τεχνικές για να εφαρμόσει ένα πολύ ακριβές ρολόι. Το DW1000 έχει τη δυνατότητα να καταγράψει τη χρονική σήμανση του ρολογιού, όταν συμβαίνουν ορισμένα συμβάντα κατά τη μετάδοση και τη λήψη ενός πλαισίου. Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης και της λήψης, οι χρονικές σημάσεις αποθηκεύονται μέσα στη συσκευή, ιδίως στους καταχωρητές.

#### - Timestamp TX

Κατά τη μετάδοση ενός πλαισίου, η έναρξη της PHR (PHY header) είναι το συμβάν που ορίζεται από το πρότυπο IEEE.802.15.4 UWB PHY για τη χρονική σήμανση της μετάδοσης του μηνύματος. Η ώρα που ξεκινά το πρώτο σύμβολο του PHR από την κεραία (ορίζεται ως RMARKER) είναι το συμβάν που ορίζεται ως χρονική σήμανση μετάδοσης (Transmit Timestamp). Σε αυτή τη χρονική σήμανση δεν έχει συμπεριληφθεί η καθυστέρηση της κεραίας μετάδοσης.

#### - Timestamp RX

Κατά τη λήψη του πλαισίου, το συμβάν ανίχνευσης SFD που σηματοδοτεί το τέλος του προοιμίου και την έναρξη του PHR είναι το σημείο που γίνεται η καταγραφή του χρόνου από το IC. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 UWB ορίζει τη στιγμή που αυτό το RMARKER φτάνει στην κεραία ως το σημαντικό συμβάν που καταγράφεται η χρονική σήμανση. Το κύκλωμα ψηφιακού δέκτη DW1000 παίρνει μια χρονική σήμανση του συμβόλου στο οποίο συμβαίνει το συμβάν RMARKER και προσθέτει διάφορους παράγοντες διόρθωσης για να δώσει μια προσαρμοσμένη τιμή χρονικής σήμανσης, δηλαδή την ώρα κατά την οποία ο RMARKER έφτασε στην κεραία.

Οι χρονικές σημάσεις είναι πολύ σημαντικές όσον αφορά τον εντοπισμό θέσης, δεδομένου ότι είναι ακριβώς αυτές που επιτρέπουν στην ακριβή μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ των συσκευών, όσον αφορά το Two Way Ranging. Η πραγματική μονάδα των χρονικών σημάτων εντός του DW1000 μπορεί να υπολογιστεί ως  $1/(128 \times 499.2 \times 10^6)$  δευτερόλεπτα που αντιστοιχεί σε 15,65 ps. [27]

### 4.3 Μηνύματα

Η γενική μορφή ενός μηνύματος, με βάση την τυπική κωδικοποίηση IEEE.802.15.4 για ένα πλαίσιο δεδομένων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.8**. [30]

2 octets		1 octet	2 octets		8 octets	8 octets	Variable #octets	2 octets
Frame Control (FC)		Sequence Number	PAN ID		Destination Address	Source Address	Payload	FCS
0x41	0x88		0xDE	0xCA				

**Εικόνα 4.8 - Γενική Μορφή Μηνύματος**

Το μήνυμα αποτελείται από τα πεδία: Frame Control (FC), Sequence Number, PAN ID, Destination Address, Source Address, Ranging Message και το FCS. [27]

- Το Frame Control (FC) είναι το πεδίο που ξεκινά κάθε πλαίσιο που βασίζεται στο IEEE 802.15.4. Το πεδίο αποτελείται από δύο byte που διαφέρουν μεταξύ των μηνυμάτων καθώς ορισμένα χρησιμοποιούν διευθύνσεις 8-οκτάδων (64-bit) και άλλα διευθύνσεις 2-οκτάδων (16-bit). Ο ρόλος του είναι να προσδιορίσει τον τύπο πλαισίου και να υποδείξει ποια στοιχεία ενσωματώνονται στο υπόλοιπο του πλαισίου.
- Το sequence number οκτάδας αυξάνεται κατά modulo-256 για κάθε πλαίσιο που αποστέλλεται, σύμφωνα με τους κανόνες IEEE.
- PAN ID: μια μοναδική 16-bit τιμή (0xDECA) που χρησιμοποιείται σε όλα τα μηνύματα για το pairing του chip με τον MCU. Το PAN ID μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο διαπραγμάτευσης για την σύνδεση στο δίκτυο ή μπορεί να είναι μια σταθερά διαμορφωμένη εγκατάσταση.
- Οι διευθύνσεις προορισμού και προέλευσης είναι είτε 64-bit προγραμματισμένα μοναδικά σε κάθε μονάδα (εργοστασιακά), είτε προσωρινά εκχωρημένες διευθύνσεις 16-bit.
- Payload: το πρώτο byte του ωφέλιμου φορτίου υποδηλώνει πάντα τον τύπο πλαισίου που ακολουθείται από το περιεχόμενο του μηνύματος.
- Το 2-octets FCS είναι μια ακολουθία ελέγχου πλαισίου CRC σύμφωνα με το πρότυπο IEEE, (αυτό μπορεί να δημιουργηθεί αυτόματα από το DW1000 IC και να επισυνάπτεται στο μεταδιδόμενο μήνυμα).

Το Decawave υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους μηνυμάτων, οι οποίοι καθορίζονται για τη φάση ανακάλυψης (Discovery phase), τη φάση εύρους (Ranging phase) και τη τελική μετάδοση δεδομένων (Data Transmission). Τα μηνύματα αυτά ακολουθούν τις συμβάσεις του IEEE, όμως δεν είναι τυπικά μηνύματα RTLS. Στο πρότυπο ISO/IEC 24730-62 [43] αναφέρονται λεπτομέρειες τυποποιημένων μορφών μηνυμάτων για χρήση σε συστήματα RTLS με βάση το IEEE 802.15.4 UWB. Το ISO/IEC 24730-62 ορίζει δυο πρωτοκόλλα air-interface και ένα Application Program Interface (API) για RTLS, με σκοπό να επιτρέψει τη συμβατότητα και να ενθαρρύνει τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων για την αναπτυσσόμενη αγορά RTLS. Τα μηνύματα που σχετίζονται με το TWR αναγνωρίζονται μέσω ενός κωδικού λειτουργίας (Function Code) που εισάγεται στο πρώτο byte του μεταβλητού στοιχείου του μηνύματος. [3]

Σε προηγούμενη ενότητα έχει αναφερθεί ότι σε ένα RTLS που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο TWR απαιτούνται 3 μηνύματα για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ της άγκυρας και της ετικέτας. Τα πλαίσια που χρησιμοποιούνται, είναι διαμορφωμένα πλαίσια της Decawave σύμφωνα με την



κωδικοποίηση του τυποποιημένου πλαισίου IEEE.802.15.4. Τα μηνύματα αυτά είναι τα Poll, Response και Final (στην περίπτωση του DS-TWR).

1. Poll: ένα μήνυμα “δημοσκόπησης” στέλνεται από τον εκκινήτη για να ενεργοποιήσει την ανταλλαγή.
2. Response: η απάντηση που στέλνεται από τον ανταποκριτή που επιτρέπει στο εκκινήτη να συνεχίσει τη διαδικασία.
3. Final: Το τελικό μήνυμα που στέλνεται από τον εκκινήτη προς τον ανταποκριτή για να ολοκληρωθεί η ανταλλαγή και να παρέχει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται, για την εκτίμηση του χρόνου πτήσης του μηνύματος και στην συνέχεια της απόστασης μεταξύ των δυο κόμβων. Το τελικό μήνυμα περιέχει τα Timestamps του Tx Poll, Rx Resp και Tx Final.

Στην περίπτωση του SS-TWR στέλνονται μόνο 2 μηνύματα, το Poll και το Final (ως Response).

1. Poll: ένα μήνυμα “δημοσκόπησης” στέλνεται από τον εκκινήτη για να ενεργοποιήσει την ανταλλαγή.
2. Response: Το μήνυμα απάντησης που στέλνεται από τον ανταποκριτή προς τον εκκινήτη για να ολοκληρωθεί η ανταλλαγή και να παρέχει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται, για την εκτίμηση του χρόνου πτήσης του μηνύματος και στην συνέχεια της απόστασης μεταξύ των δυο κόμβων.

### 4.3.1 Παράδειγμα Μηνύματος

Συνεπώς ένα μήνυμα όπως το Poll έχει την εξής μορφή :

`poll_msg[] = {0x41, 0x88, 0, 0xCA, 0xDE, 'W', 'A', 'V', 'E', 0x21, 0, 0};`

- byte 0/1: Frame Control, η τιμή 0x8841 υποδεικνύει ένα πλαίσιο δεδομένων που χρησιμοποιεί 16-bit διεύθυνση
- byte 2: Sequence Number, αυξάνεται για κάθε νέο frame
- byte 3/4: PAN ID => 0xDECA
- byte 5/6: διεύθυνση προορισμού
- byte 7/8: διεύθυνση προέλευσης
- byte 9: Function Code, συγκεκριμένες τιμές για να δείξει ποιο μήνυμα βρίσκεται στη διαδικασία εύρεσης εύρους.
- Μήνυμα Poll: όχι άλλα δεδομένα
- Μήνυμα Response:
  - byte 10-13: χρονική σήμανση λήψης μηνυμάτων δημοσκόπησης.
  - byte 14 -17: χρονική σήμανση μετάδοσης μηνύματος απόκρισης.
- Όλα τα μηνύματα τελειώνουν με το 2-byte FCS που ορίζεται αυτόματα από το DW1000.

## 4.4 Διαμόρφωση Καναλίου

Η Decawave έχει αναπτύξει ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα για την οδήγηση του DW1000 IC πομποδέκτη. Το πρόγραμμα οδήγησης της συσκευής DW1000 ελέγχεται μέσω του Application Programming Interface (API), που αποτελείται από ένα σύνολο λειτουργιών και περιγραφεί καθεμία από τις λειτουργίες του λεπτομερώς. Πρόκειται για ένα σύνολο λειτουργιών χαμηλού επιπέδου που παρέχουν ένα μέσο άσκησης των κύριων χαρακτηριστικών του DW1000 μέσω του SPI. [44]

```

typedef struct
{
    uint8 chan;    // channel number {1,2,3,4,5,7}
    uint8 prf;    // Pulse Repetition Frequency {16 or 64}
    uint8 txPreambLenght; //64 - 4096
    uint8 rxPAC;  // Acquisition Chunk Size
    uint8 txCode; // TX preamble code
    uint8 rxCode; // RX preamble code
    uint8 nsSFD;  // use non-std SFD for better performance
    uint8 dataRate; // 110K, 850K, 6M8
    uint8 phrMode; // PHR mode
    uint16 sfdTO; // SFD timeout value (in symbols)
} dwt config t;

```

Για τη διαμόρφωση των παραμέτρων καναλιού για χρήση τόσο από τον πομπό όσο και από τον δέκτη είναι υπεύθυνη η συνάρτηση *dwt\_configure()*. Η συνάρτηση *dwt\_configure()* καλείται πριν την ενεργοποίηση του δέκτη ή πριν την έκδοση μιας εντολής εκκίνησης μετάδοσης. Μπορεί να κληθεί επίσης ξανά για να αλλαχθούν οι ρυθμίσεις όταν απαιτείται, αρκεί το DW1000 να ξεκινάει πάντα από την κατάσταση IDLE. Οι ρυθμίσεις καθορίζονται από τη δομή *dwt\_config\_t* που μεταβιβάζονται στη συνάρτηση *dwt\_configure()*. Σε αυτή τη δομή (structure) περιέχονται τα δεδομένα διαμόρφωσης του DW1000.

Περιγραφή των παραμέτρων [44]:

- **chan**: Η παράμετρος chan ορίζει τον αριθμό καναλιού UWB (ορίζοντας την κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης). Τα υποστηριζόμενα κανάλια είναι 1, 2, 3, 4, 5 και 7.
- **prf**: Η παράμετρος prf επιτρέπει την επιλογή του ονομαστικού PRF (συχνότητα επανάληψης παλμού) που χρησιμοποιείται από τον δέκτη και μπορεί να είναι είτε 16 MHz είτε 64 MHz.
- **txPreambLenght**: Η παράμετρος txPreambLength καθορίζει το προοίμιο, το οποίο έχει ένα εύρος τιμών.
- **rxPAC**: Η παράμετρος rxPAC καθορίζει το μέγεθος του προοιμίου απόκτησης κομματιών (Preamble Acquisition Chunk) που θα χρησιμοποιηθεί.
- **txCode-rxCode**: Οι παράμετροι txCode και rxCode επιλέγουν τους κωδικούς προοιμίου που θα χρησιμοποιηθούν στον πομπό και στο δέκτη και οι έχουν τις ίδιες τιμές.
- **nsSFD**: Η παράμετρος nsSFD επιτρέπει τη χρήση μιας εναλλακτικής μη τυπικής ακολουθίας SFD (Start Frame Delimiter), την οποία η Decawave έχει βρει πιο ισχυρή από αυτήν που ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και επομένως, προσφέρει βελτιωμένη απόδοση.
- **dataRate**: Η παράμετρος dataRate καθορίζει ότι ο ρυθμός δεδομένων είναι ένας από τους 110kbps, 850kbps ή 6800kbps,
- **phrMode**: Η παράμετρος phrMode επιλέγει είτε την τυπική είτε την εκτεταμένη λειτουργία PHR.
- **sfdTO**: Η παράμετρος sfdTO ορίζει την τιμή χρονικού ορίου SFD.

#### 4.4.1 Επιλογή Καναλιού και Εύρους Ζώνης

Παρεμβολές μεταξύ καναλιών συμβαίνουν σε συστήματα UWB. Αυτή η παρεμβολή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την κατάλληλη επιλογή καναλιών και διαμορφώσεων καναλιών. Η επιλογή της κεντρικής συχνότητας του καναλιού συνήθως υπαγορεύεται από περιφερειακούς κανονισμούς

(διαφορετικοί κανόνες σε ΗΠΑ και Ευρώπη). Το πρότυπο IEEE 802.15.4 UWB PHY καθορίζει έναν αριθμό καναλιών, από 0 έως 10 GHz, μερικά με την ίδια κεντρική συχνότητα και διαφορετικά εύρη ζώνης. Η λειτουργία σε ευρύτερο εύρος ζώνης αυξάνει το εύρος αλλά επίσης αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Στον **Πίνακα 4.6** παρουσιάζονται τα κανάλια UWB και τα preamble code που υποστηρίζονται από το DW1000. [44]

**Πίνακας 4.6**

Channel number	Centre frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Preamble Codes (16 MHz PRF)	Preamble Codes (64 MHz PRF)
1	3494.4	499.2	1, 2	9, 10, 11, 12
2	3993.6	499.2	3, 4	9, 10, 11, 12
3	4492.8	499.2	5, 6	9, 10, 11, 12
4	3993.6	1331.2*	7, 8	17, 18, 19, 20
5	6489.6	499.2	3, 4	9, 10, 11, 12
7	6489.6	1081.6*	7, 8	17, 18, 19, 20
<b>N.B.</b> For correct operation of the DW1000 the software must take care to only allow selection of those preamble codes appropriate for the configured PRF.				

\* The DW1000 has a maximum receive bandwidth of 900 MHz

#### **Υποστηριζόμενα Κανάλια και προτεινόμενα preamble codes [27]**

Παρατηρείται ότι το κανάλι 2 και το κανάλι 4 έχουν και τα δύο 3993,6 MHz κεντρική συχνότητα, αλλά έχουν εύρος ζώνης 499,2 και 1331,2 MHz αντίστοιχα.

Το Application Note της Decawave, “APH010 DW1000 INTERCHANNEL INTERFERENCE” [45], εξετάζει το πως οι μεταδόσεις από ένα συγκεκριμένο κανάλι DW1000 μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές. Οι παρεμβολές αυτές μπορούν να δημιουργηθούν στις περιπτώσεις όπου α) ο δέκτης είναι διαμορφωμένος στο ίδιο κανάλι που είναι είναι διαμορφωμένος και ο πομπός, αλλά με διαφορετικές τιμές PRF και/ή Preamble code και β) στην περίπτωση που ο δέκτης είναι διαμορφωμένος σε διαφορετικό κανάλι από τον πομπό και έχει ρυθμιστεί με ίδιο ή διαφορετικό PRF ή/και Preamble code. Στο [45] παρουσιάζονται οδηγίες για την επιλογή κωδικών PRF και preamble για την ελαχιστοποίηση τέτοιων παρεμβολών.

Μετά την ανάγνωση του παραπάνω Application Note [45], αποσαφηνίστηκε ότι:

- Μετάδοση από ίδια κανάλια αλλά με διαφορετικά PRF δεν λαμβάνεται στον δέκτη.
- Το 64 MHz PRF είναι πιο ανθεκτικό σε παρεμβολές μεταξύ καναλιών από το 16 MHz PRF.
- Για ίδιο PRF στα 64 MHz και διαφορετικά preamble codes, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δυο κόμβων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 m για να μην υπάρχουν παρεμβολές.
- Για ίδιο PRF στα 16 MHz και διαφορετικό preamble code, η ελάχιστη απόσταση είναι περίπου 2.2 m για να μην υπάρχουν παρεμβολές.
- Για ίδιο κανάλι, PRF και preamble code υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Η παρεμβολή μεταξύ των καναλιών 2 & 5 είναι πολύ μικρότερη από ό, τι μεταξύ των καναλιών 1 & 2 ή 2 & 3 καθαρά λόγω της απόστασης μεταξύ των συχνοτήτων.

## 4.4.2 Επιλογή Ρυθμού Δεδομένων, Preamble και PRF

Με δεδομένη τη κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης (DW1000 Channel), η επιλογή του ρυθμού δεδομένων καθορίζει στο τέλος το εύρος λειτουργίας. Ωστόσο, το μήκος της ακολουθίας του προοιμίου έχει επίσης μια επίπτωση στο εύρος αυτό. Για κάθε αριθμημένο κανάλι, το πρότυπο IEEE.802.15.4 καθορίζει δυο preamble codes για PRF 16 MHz και τέσσερις κωδικούς για PRF 64 MHz (**Πίνακα 4.6**). Η ακολουθία του προοιμίου, έχει σημαντική επίδραση στο εύρος λειτουργίας και στην ακρίβεια των χρονικών σημάτων. [45]

Στον **Πίνακα 4.7** παρέχονται ορισμένα προτεινόμενα μήκη ακολουθίας προοιμίου για χρήση ανάλογα με τον ρυθμό δεδομένων. Ένα μεγαλύτερο προοίμιο παρέχει βελτιωμένη απόδοση εμβέλειας και καλύτερη πληροφορία για την ώρα άφιξης ενός μηνύματος, ενώ ένα μικρότερο προοίμιο δίνει μικρότερο χρόνο στον αέρα και εξοικονομεί ενέργεια. Όταν γίνεται χρήση χαμηλού ρυθμού δεδομένων για μεγάλη εμβέλεια, τότε απαιτείται μεγάλο προοίμιο για την επίτευξη αυτού του εύρους. Με υψηλό ρυθμό δεδομένων, το εύρος λειτουργίας είναι φυσικά μικρό, οπότε δεν υπάρχει λόγος να σταλθεί ένα μεγάλο προοίμιο καθώς σπαταλά χρόνο και ισχύ χωρίς πρόσθετο πλεονέκτημα εύρους. [45]

**Πίνακας 4.7**

Data Rate	Recommended preamble sequence length
6.8 Mbps	64 or 128 or 256
850 kbps	256 or 512 or 1024
110kbps	2048 or 4096

**Προτεινόμενο μέγεθος Preamble [27]**

Τέλος στο **Πίνακα 4.5** παρέχεται η συνιστώμενη διαμόρφωση μεγέθους PAC για χρήση στον δέκτη, ανάλογα με το μήκος προοιμίου που χρησιμοποιείται στον πομπό, όπως έχει προαναφερθεί στην **Ενότητα 4.2.2**.

# Κεφάλαιο 5

## 5. Προγραμματισμός και Μετρήσεις

### 5.1 Προγραμματισμός Μικροεπεξεργαστή

Ο μικροελεγκτής που είναι εγκαταστημένος στο κύκλωμα, που έχει σχεδιαστή για τη παρούσα διπλωματική είναι ένα από τα βασικά στοιχεία, δεδομένου ότι αναλαμβάνει την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, όσο και τη δημιουργία των κατάλληλων εντολών για να εκκίνηση του πομποδέκτη DWM1000. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή γίνεται μέσω ενός ολοκληρωμένου περιβάλλον ανάπτυξης για επεξεργαστές STM32, το STM32CubeIDE [46]. Αρχικά γίνεται η διαμόρφωση των ακροδεκτών, ρολογιών και περιφερειακών με τη βοήθεια του εργαλείου STM32CubeMX και εφόσον έχει δημιουργηθεί το project, γίνεται η δημιουργία του κώδικα. Να σημειωθεί ότι το SPI του μικροελεγκτή τρέχει με ταχύτητα 500 Kbits/s για την επικοινωνία με το DWM1000.

Το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί είναι πολύ απλό, καθώς ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να υπάρξει λογισμικό που επιτρέπει την λειτουργικότητα του συστήματος. Ως γνωστό σε αυτό το RTLS υπάρχουν τρεις άγκυρες και μια ετικέτα, προφανώς οι άγκυρες μοιράζονται τον ίδιο κώδικα και η ετικέτα διαφορετικό. Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι έχει γίνει χρήση του λογισμικού που προσφέρει η DecaWave στον επίσημο ιστότοπο της <https://www.decawave.com/software/>, το οποίο τροποποιήθηκε σε σχέση με τον αρχικό κώδικα που προσφέρεται για την επίτευξη το στόχου της εργασίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το κομμάτι κώδικα για τον Εκκινήτη (Initiator):

```
int main(void)
{
    /* Reset of all peripherals */
    HAL_Init();
    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();
    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_SPI1_Init();
    MX_USB_DEVICE_Init();

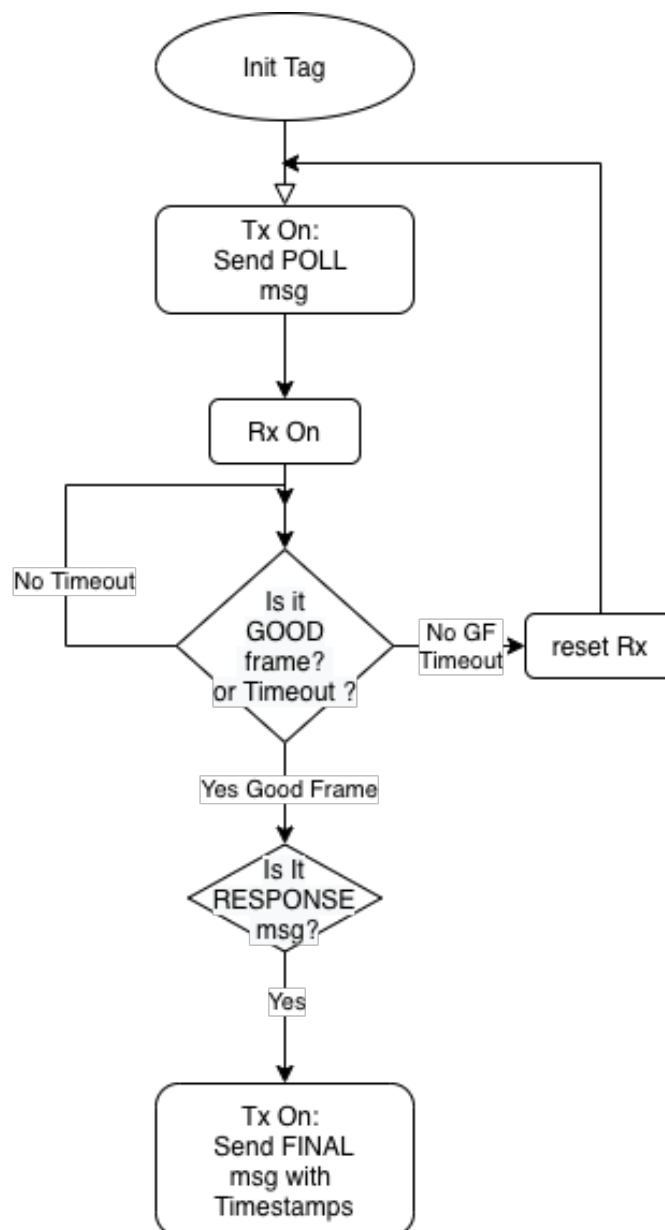
    while (1)
    {
        dw_twr_init(0);
        HAL_Delay(RNG_DELAY_MS);

        dw_twr_init(1);
        HAL_Delay(RNG_DELAY_MS);

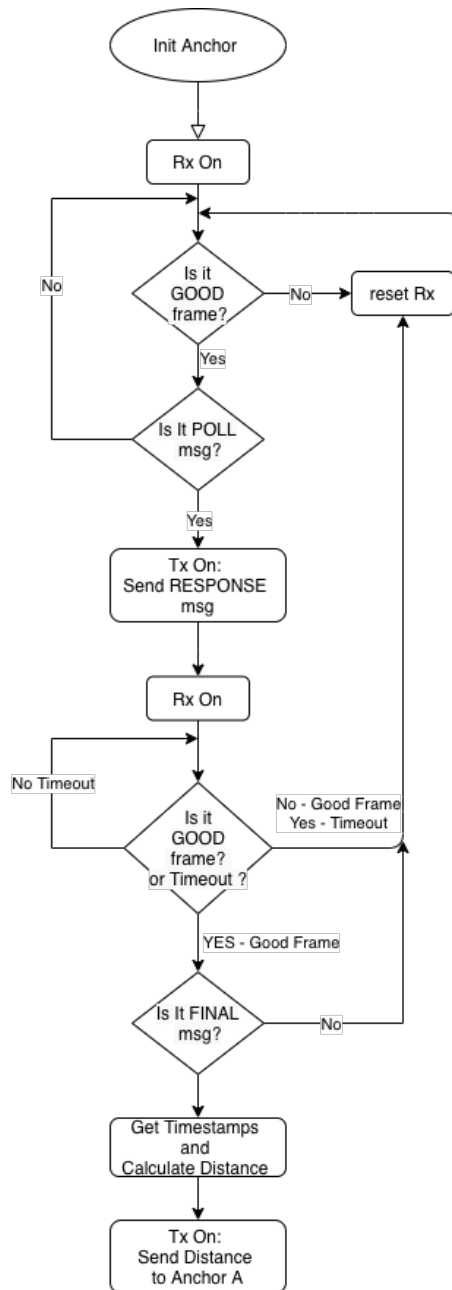
        dw_twr_init(2);
        HAL_Delay(RNG_DELAY_MS);
    }
}
```

Ο εκκινητής στην περίπτωση του DS-TWR είναι υπεύθυνος για την εκκίνηση της ανταλλαγής μηνυμάτων με μια συγκεκριμένη Άγκυρα. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω κομμάτι κώδικα ο εκκινητής αναζητεί μονίμως για αποστάσεις από τις άγκυρες A, B και C αντίστοιχα, μεταξύ αυτών των ανταλλαγών μηνυμάτων υπάρχει μια μικρή διακοπή ώστε να μπορέσει να επανεκκινηθεί ο πομπός ή ο δέκτης για μελλοντική χρήση και την επιτυχή μεταφορά των δεδομένων από την Άγκυρα A στον κεντρικό υπολογιστή μέσω της σειριακής θύρας USB. Ο πλήρης κώδικας δίνεται στο παράρτημα.

## 5.2 Διαγράμματα Ροής για την Ετικέτα και τις Άγκυρες

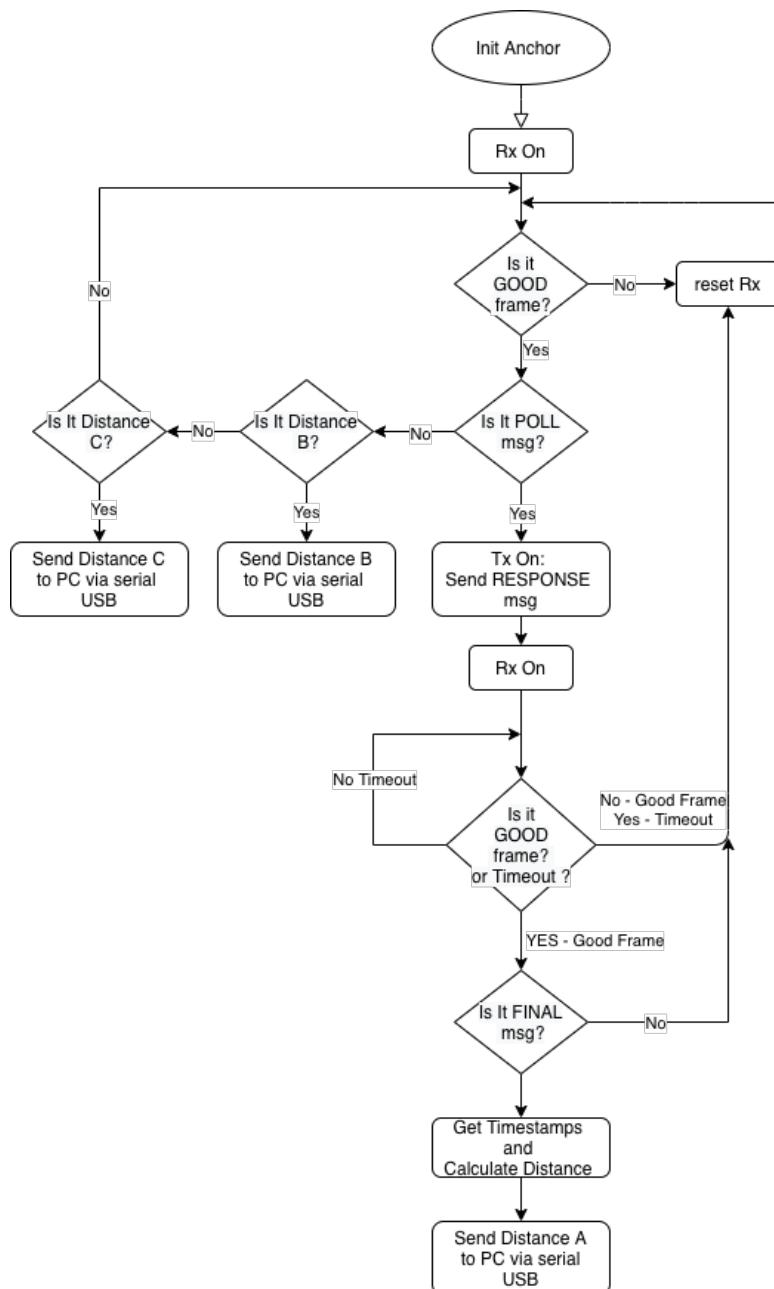


Εικόνα 5.1 - Διάγραμμα Ροής Ετικέτας



**Εικόνα 5.2 - Διάγραμμα Ροής  
Άγκυρας B/C**

Όπως έχει αναφερθεί και στις παραπάνω ενότητες οι άγκυρες B και C πρέπει να στείλουν τις υπολογιζόμενες αποστάσεις στην άγκυρα A, για να τις μεταφέρει με τη σειρά της στο κεντρικό υπολογιστή. Η ετικέτα είναι προγραμματισμένη έτσι ώστε να αναζητάει πρώτα την άγκυρα A και μετά τις άγκυρες B και C με την σειρά. Αυτό έχει ως σκοπό την ελεγχόμενη αποστολή των αποστάσεων από τις άγκυρες B και C στην άγκυρα A.



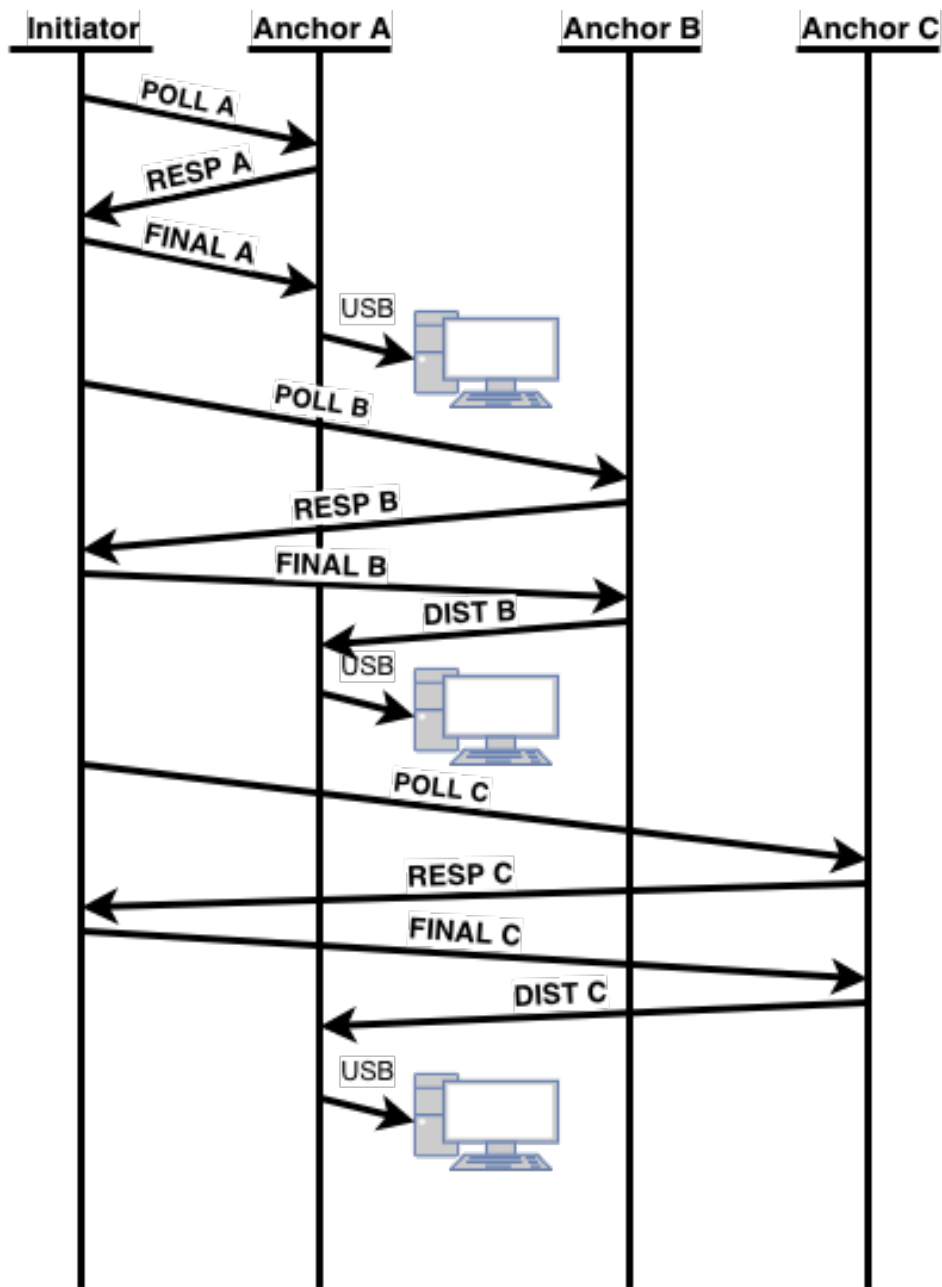
**Εικόνα 5.3 - Διάγραμμα Ροής Άγκυρας Α**

Το λογισμικό της άγκυρας Α διαφέρει σε σχέση με αυτό των Β και C για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί. Οι άγκυρες είναι πάντα ενεργοποιημένες και έτοιμες να ανταποκριθούν στο μήνυμα δημοσκόπησης του εκκινητή. Επομένως η άγκυρα Α, αφού εκτιμήσει την απόσταση που απέχει από τον εκκινητή (Distance A), θα μπορούσε να μπει στην λειτουργία ύπνου για εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι να ξαναέρθει η σειρά της για να ανταλλάξει μηνύματα με τον εκκινητή. Όμως αυτό θα δημιουργούσε ένα μικρό πρόβλημα στην ανάγκη του project, που θέλει όλες οι αποστάσεις να μεταφέρονται αποκλειστικά από μια Master άγκυρα στον κεντρικό υπολογιστή. s

Άρα, θεωρείται ότι η απόσταση Α έχει εκτιμηθεί και μεταφερθεί σειριακά στον κεντρικό υπολογιστή και ο εκκινητής έχει ξεκινήσει την ανταλλαγή μηνυμάτων με τις άλλες δυο άγκυρες ξεχωριστά. Όταν εκτιμηθεί η απόσταση Β, στέλνεται αυτόματα μέσω ενός κωδικοποιημένου μηνύματος σύμφωνα με το πρότυπο IEEE.802.15.4a, στην άγκυρα Α. Η άγκυρα Α “ψάχνει” μονίμως για ένα “Good Frame” στον αέρα και αφού τα αποκωδικοποιήσει ελέγχει αν είναι αυτό που θέλει για να συνεχίσει την διαδικασία TWR. Αν δεν είναι όμως το μήνυμα POLL για την



Άγκυρα A, μπορεί να είναι ένα από τα άλλα μηνύματα που βρίσκονται ήδη στον αέρα (POLL, RESPONSE, FINAL ή DIST). Στην συγκεκριμένη περίπτωση η άγκυρα ψάχνει για το μήνυμα DI2T που περιέχει την απόσταση που απέχει η άγκυρα B από την ετικέτα και στην συνέχεια για το DI3T αντίστοιχα. Ακολουθεί διάγραμμα για την κατανόηση στην **Εικόνα 5.4**.



**Εικόνα 5.4 - Διάγραμμα 11 μηνυμάτων**

## 5.3 Μετρήσεις

Αρχικά έγιναν μετρήσεις μεταξύ ενός Initiator και ενός Responder σε μια ευθεία κοιτάζοντας την ακρίβεια, για την τελική επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί στο RTLS της διπλωματικής εργασίας. Οι δυο μέθοδοι που αναλύθηκαν στο **Κεφάλαιο 4** είναι οι DS-TWR και SS-TWR, στην μέθοδο DS-TWR επιλέγεται το Mode 3, ενώ στην μέθοδο SS-TWR το Mode 4.

```
Mode 3
{
    2,
    DWT_PRF_64M,
    DWT_PLEN_1024,
    DWT_PAC32,
    9,
    9,
    1,
    DWT_BR_110K,
    DWT_PHRMODE_STD,
    (1024 + 1 + 64 - 32)
};
```

```
Mode 4
{
    2,
    DWT_PRF_64M,
    DWT_PLEN_128,
    DWT_PAC8,
    9,
    9,
    0,
    DWT_BR_6M8,
    DWT_PHRMODE_STD,
    (128 + 1 + 8 - 8)
};
```

Πίνακας 5.1

Real Value (m)	DS_Measurement (m)	DS_Error (m)	SS_Measurement (m)	SS_Error (m)
0,50	0,61	-0,11	0,46	0,04
1,00	1,01	-0,01	0,8	0,2
1,50	1,44	0,06	1,59	-0,09
2,00	1,96	0,04	1,94	0,06
2,50	2,55	-0,05	2,25	0,25
3,00	2,97	0,03	2,78	0,22
3,50	3,46	0,04	3,53	-0,03
4,00	3,94	0,06	3,85	0,15
4,50	4,54	-0,04	4,59	-0,09
5,00	4,93	0,07	5,12	-0,12
5,50	5,48	0,02	5,44	0,06
6,00	6,08	-0,08	6,11	-0,11
6,50	6,59	-0,09	6,44	0,06
7,00	7,03	-0,03	7,08	-0,08
7,50	7,51	-0,01	7,44	0,06
8,00	7,92	0,08	7,83	0,17
8,50	8,52	-0,02	8,31	0,19
9,00	9,13	-0,13	9,09	-0,09
9,50	9,68	-0,18	9,64	-0,14

Real Value (m)	DS_Measurement (m)	DS_Error (m)	SS_Measurement (m)	SS_Error (m)
10,00	10,01	-0,01	9,98	0,02
10,50	10,60	-0,1	10,58	-0,08
11,00	11,08	-0,08	10,19	0,81
11,50	11,61	-0,11	11,46	0,04
12,00	12,13	-0,13	11,92	0,08

### Μετρήσεις DS-TWR και SS-TWR

Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5.1** οι μετρήσεις που έγιναν με τη μέθοδο Double Sided - Two Way Ranging, δίνουν καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με αυτές που έγιναν με τη μέθοδο Single Sided - Two Way Ranging. Ήταν αναμενόμενο καθώς στο **Κεφάλαιο 4** αναφέρθηκε ότι λόγω της μετατόπισης του ρολογιού, το σφάλμα αυξάνεται. Να σημειωθεί ότι για τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις των καναλιών η μέθοδος DS-TWR είχε εμβέλεια έως και 30m, ενώ η SS-TWR στα 19m ξεκίνησε να χάνει το σήμα της. Επομένως για το παρακάτω RTLS θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η μέθοδος DS-TWR.

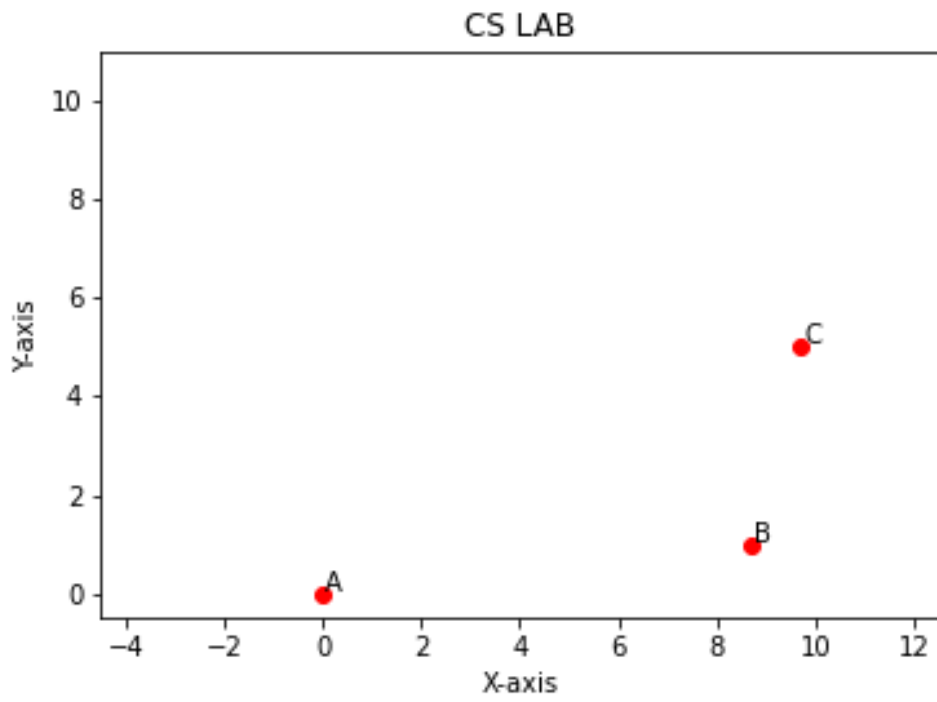
## 5.4 Περιβάλλον Πειράματος

Το περιβάλλον που πραγματοποιήθηκε το Πείραμα ήταν στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής και Συστημάτων του ΕΜΠ και σε ένα σαλόνι.

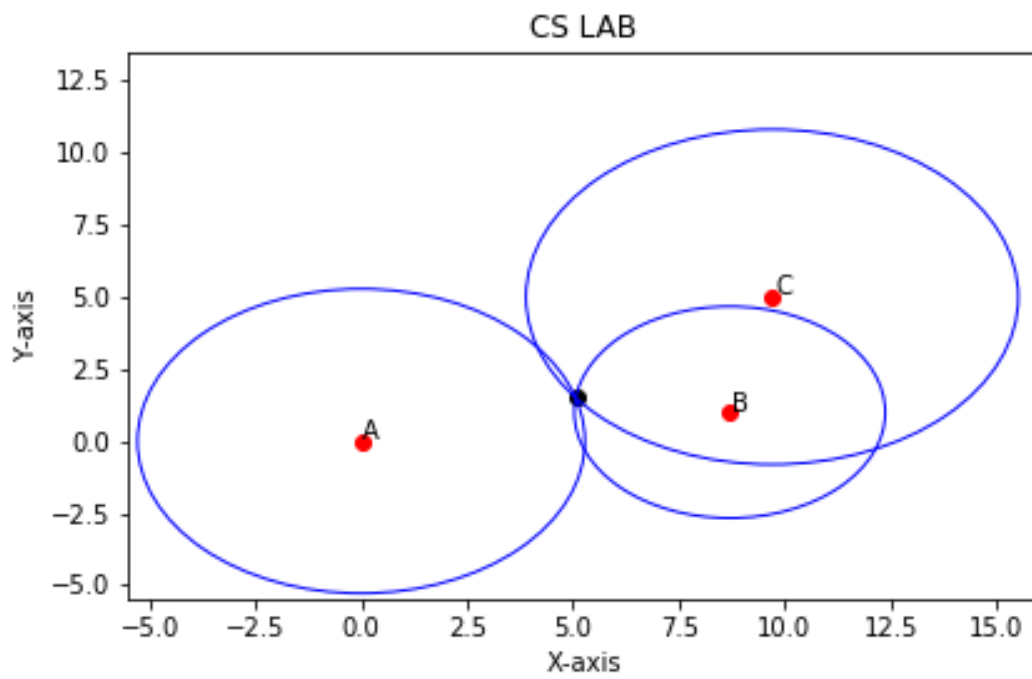
### CS Lab

Στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικής και Συστημάτων του ΕΜΠ, τοποθετήθηκαν οι Άγκυρες σε σταθερά σημεία. Μετρήθηκαν οι μεταξύ τους αποστάσεις και σημειώθηκαν για να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια, στον αλγόριθμο Trilateration που παρατίθεται στο **GitHub** [48]. Όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές παραπάνω τα δεδομένα λαμβάνονται από την Άγκυρα A (Master Anchor), που είναι συνδεδεμένη με τον Η/Υ μέσω σειριακής θύρας USB. Η Ετικέτα συνδέεται με Powerbank για την τροφοδοσία της και ξεκινάει η ανταλλαγή μηνυμάτων και συνεπώς η εκτίμηση των αποστάσεων των αγκυρών από την ετικέτα.

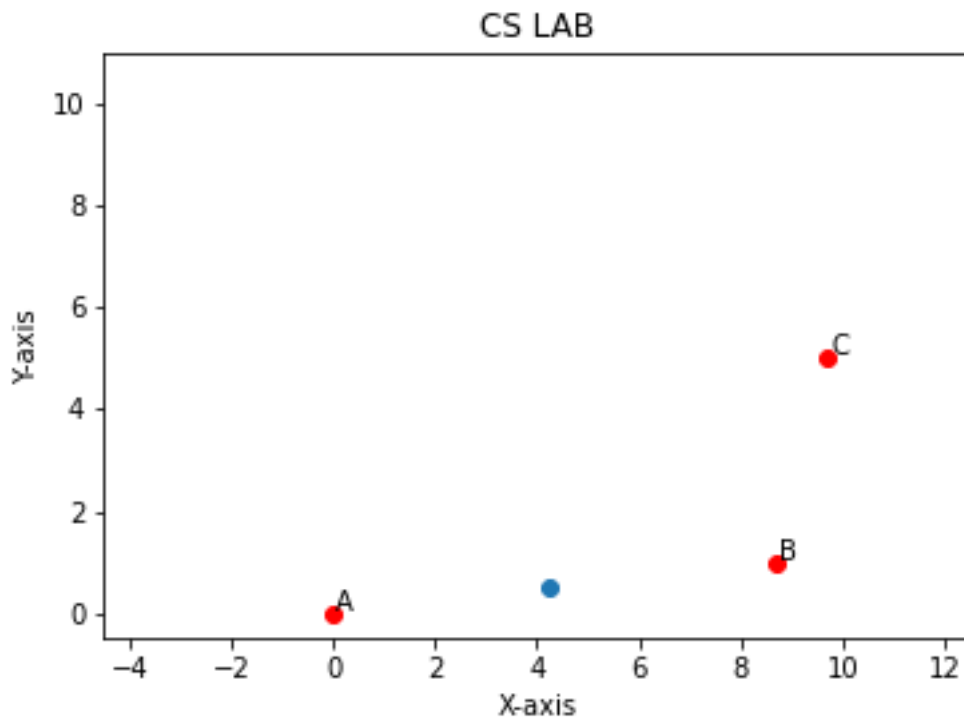
- Στην **Εικόνα 5.5** παρουσιάζεται η διάταξη των αγκυρών εντός του εργαστηρίου.
- Στην **Εικόνα 5.6** φαίνονται οι νοητοί κύκλοι που δημιουργούνται για την εκτίμηση της θέσης που βρίσκεται η ετικέτα. Το σημείο τομής των τριών κύκλων είναι η θέση της ετικέτας.
- Στις εικόνες **5.7** και **5.8** φαίνονται δυο διαδοχικές εκτιμήσεις θέσης της ετικέτας.



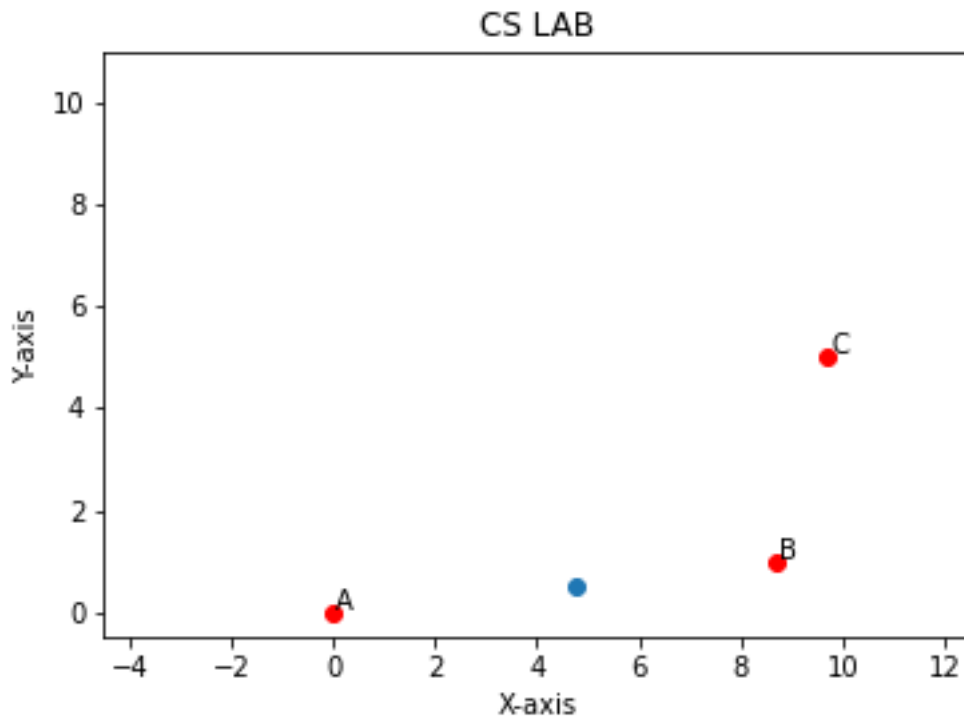
**Εικόνα 5.5 - Τοποθέτηση Anchors στο CS LAB**



**Εικόνα 5.6 - Εκτίμηση θέσης Ετικέτας με τον αλγόριθμο Trilateration**



**Εικόνα 5.7 - Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.20**

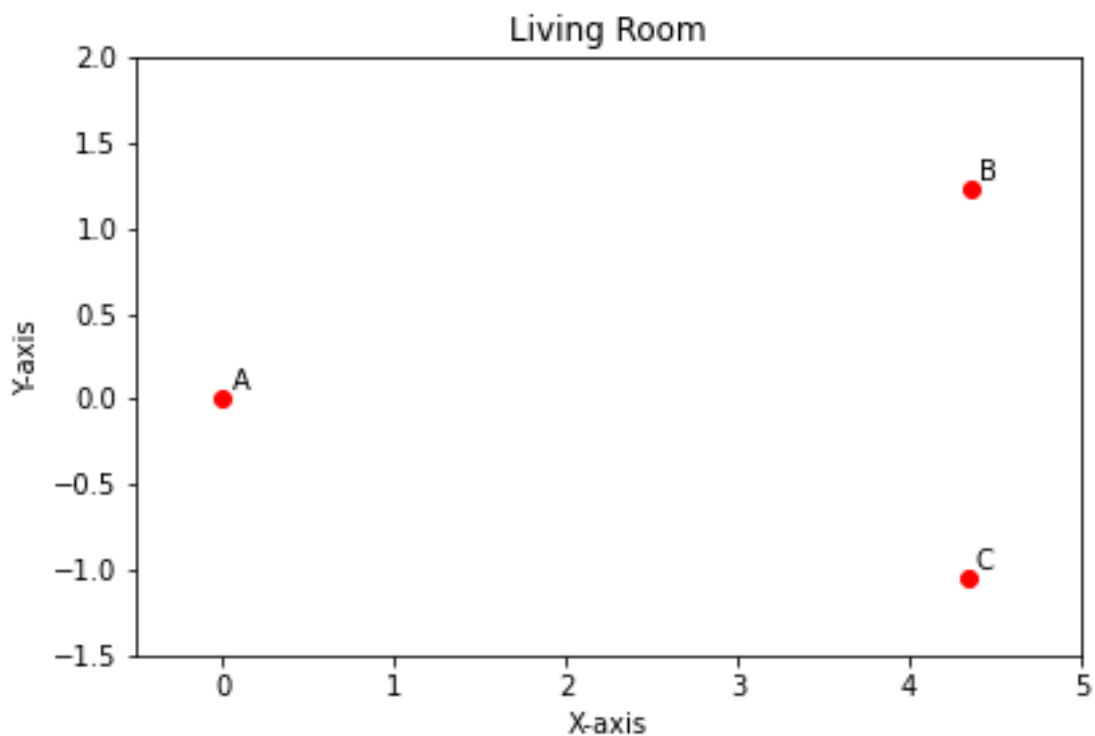


**Εικόνα 5.8 - Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.21**

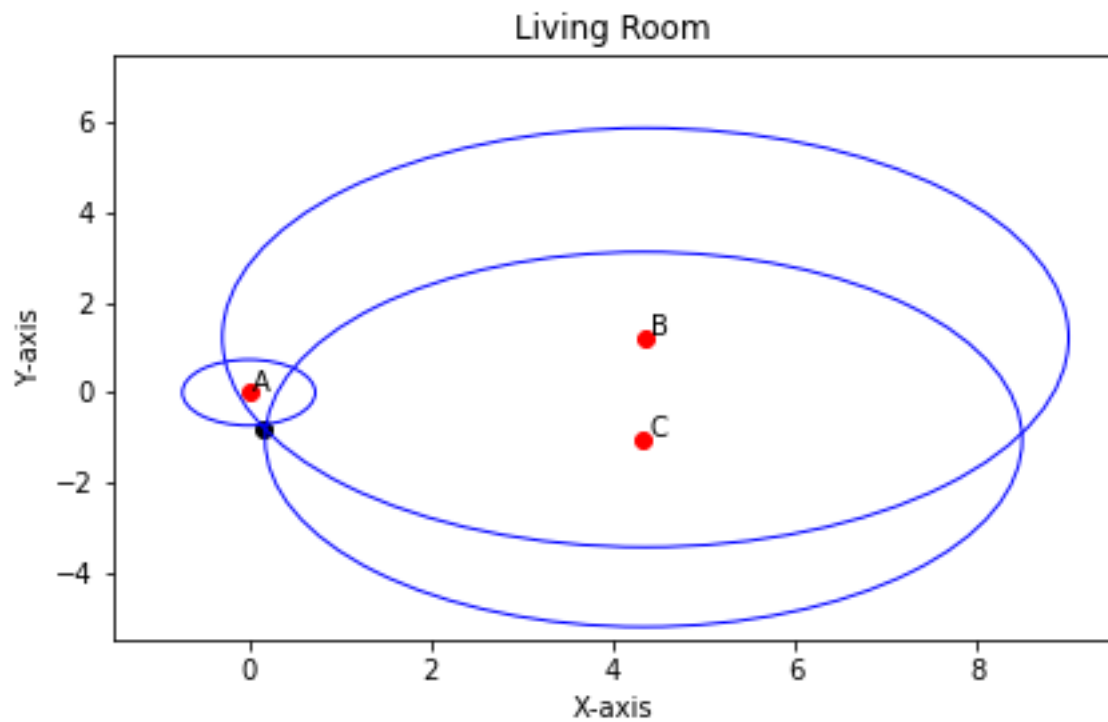
## Living Room

Ομοίως με το εργαστήριο σε ένα σαλόνι, τοποθετήθηκαν οι άγκυρες, μετρήθηκαν και σημειώθηκαν οι μεταξύ τους αποστάσεις. Τεθηκε σε λειτουργία το RTLS και λήφθηκαν οι μετρήσεις από την Άγκυρα A (Master Anchor). Φυσικά υπήρχαν κάποιες αστοχίες στις μετρήσεις των αποστάσεων της ετικέτας από την άγκυρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει ένα ακριβώς σημείο τομής των τριών κύκλων, όμως ο αλγόριθμος Trilateration έχει προβλέψει για αυτή τη περίπτωση και υπολογίζει περίπου τη θέση της ετικέτας εντός κάποιων ορίων (**Εικόνα 5.11**).

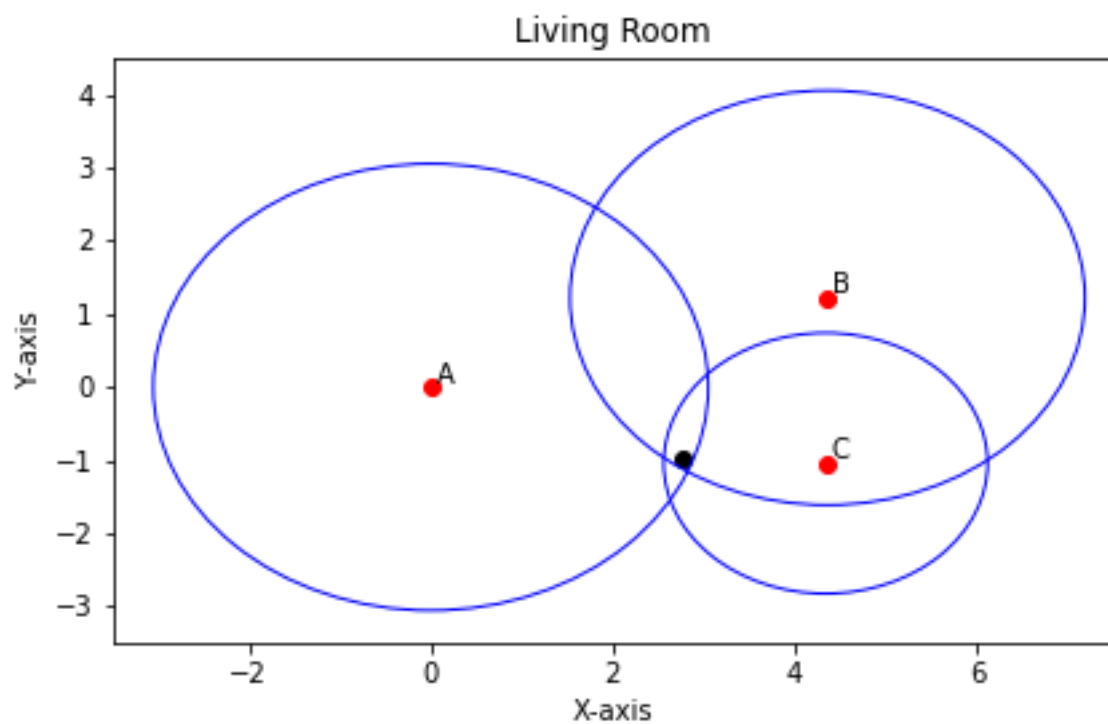
- Στην **Εικόνα 5.9** παρουσιάζεται η διάταξη των αγκυρών εντός του εργαστηρίου.
- **Εικόνα 5.10**: υπολογισμός θέσης της ετικέτας σε ένα μοναδικό σημείο τομής.
- **Εικόνα 5.11**: υπολογισμός θέσης της ετικέτας εντός μιας νοητής περιοχής.
- Στις εικόνες **5.12** και **5.13** φαίνονται δυο διαδοχικές εκτιμήσεις θέσης της ετικέτας.



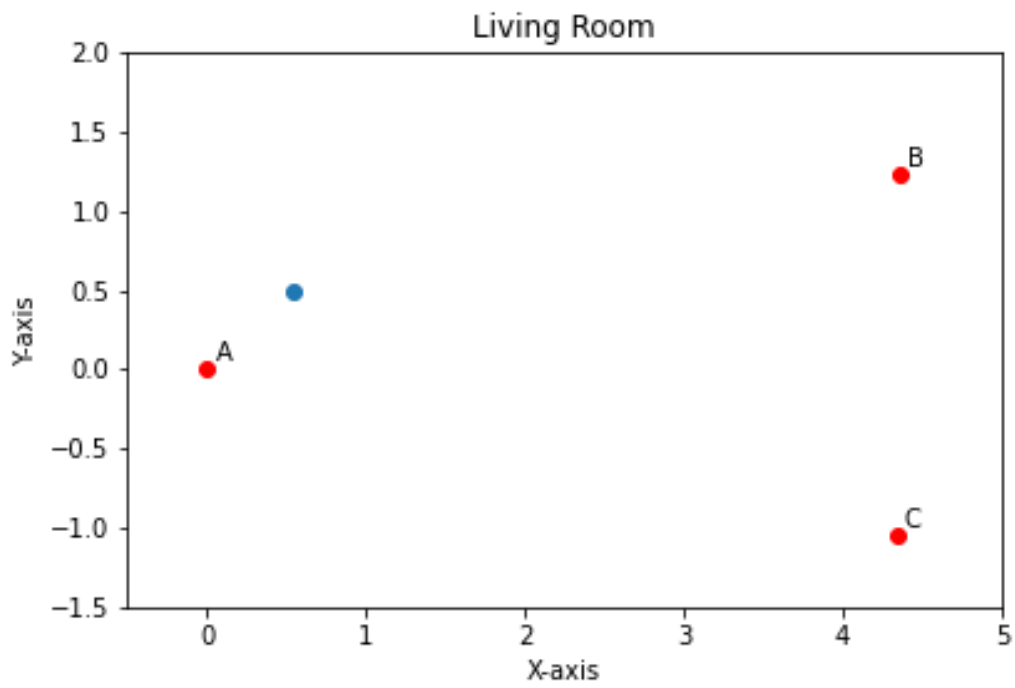
**Εικόνα 5.9 - Τοποθέτηση Anchors στο Σαλόνι**



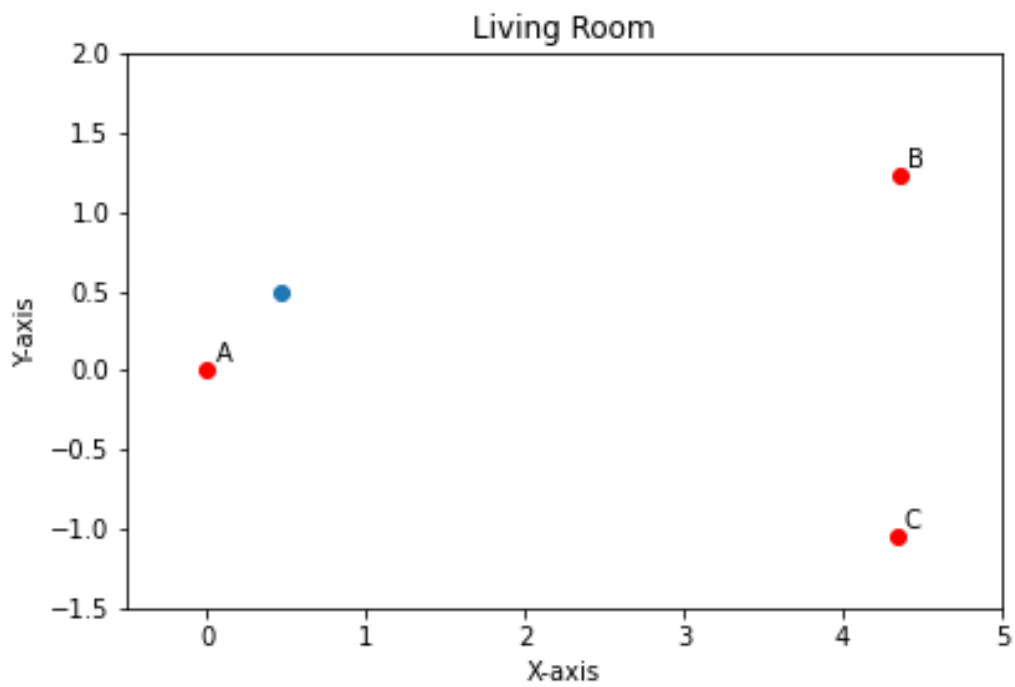
Εικόνα 5.10 - Εκτίμηση θέσης Ετικέτας με τον αλγόριθμο Trilateration



Εικόνα 5.11 - Εκτίμηση θέσης με Trilateration εντός μιας περιοχής



Εικόνα 5.12 - Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.11



Εικόνα 5.13 - Εκτίμηση θέσης ετικέτας για τις μετρήσεις No.12



# Κεφάλαιο 6

## 6. Επίλογος και Μελλοντικές Επεκτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της **Ενότητας 5.4** για τη δοκιμή της διάταξης, επαληθεύθηκε η λειτουργία του RTLS που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Το παρόν έργο είναι λειτουργικό και καλύπτει πλήρως τους σκοπούς της διπλωματικής, θα μπορούσε όμως να βελτιωθεί, ως προς την ακρίβεια, την εμβέλεια, την κατανάλωση ισχύος και ως προς τις δυνατότητες του γενικά.

### 6.2 Future Work

#### 6.2.1 DS-TWR-Parallel

Στην **Εικόνα 6.1** παρουσιάζεται ένα διάγραμμα DS-TWR με 3 άγκυρες, στο οποίο απαιτείται η αποστολή μόνο 5 μηνυμάτων συνολικά για τον υπολογισμό, των επιμέρους αποστάσεων κάθε άγκυρας από τον στόχο.

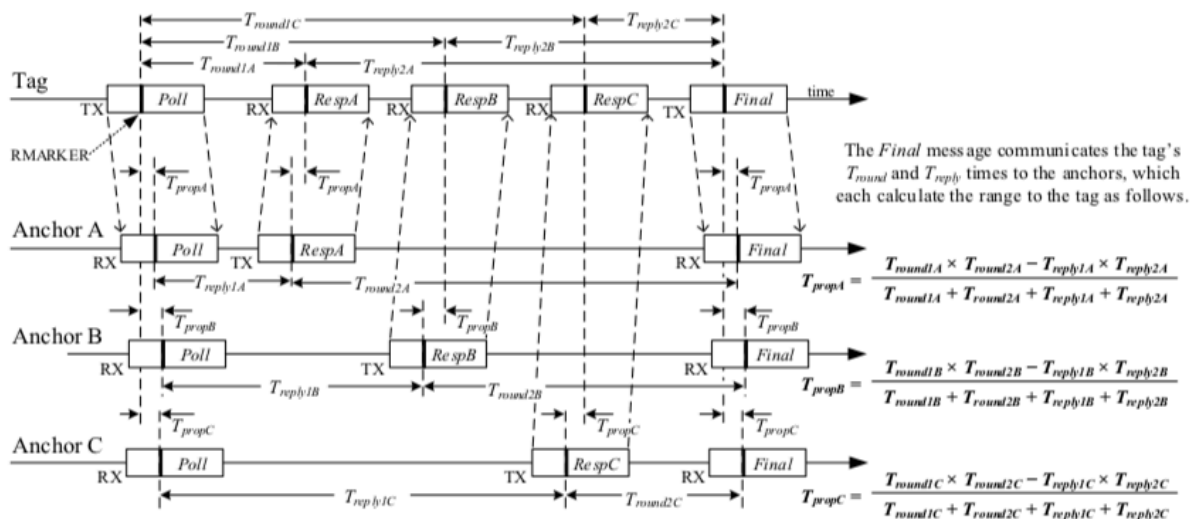


Figure 39: Ranging to 3 anchors with just 5 messages where each anchor calculates its own range result

Εικόνα 6.1 - TWR με 3 Άγκυρες

Η ετικέτα (Tag) ξεκινάει την ανταλλαγή μηνυμάτων στέλνοντας το πρώτο μήνυμα Poll, κάθε άγκυρα το λαμβάνει διαδοχικά και σημειώνει το χρόνο λήψης του. Το σήμα αυτό λαμβάνεται από όλες τις άγκυρες ταυτόχρονα αλλά δεν απαντάτε όλες ταυτόχρονα καθώς αυτό προκαλεί σύγκρουση σημάτων. Πρώτα αφού λάβει η άγκυρα A το Poll, στέλνει εντός συγκεκριμένου χρόνου, πίσω στο Tag την πρώτη απάντηση (Resp A) και έπειτα περιμένει για το τελικό μήνυμα Final. Οι άγκυρες B και C είναι προγραμματισμένες έτσι ώστε να περιμένουν μέχρι να στείλει η άγκυρα A

την απάντηση της στο Tag και αντίστοιχα η C περιμένει μέχρι να σταλθεί η απάντηση του B στο Tag (Resp B). Αφού το Tag λάβει όλες τις απαντήσεις (Resp A, B και C) τότε στέλνει το τελικό μήνυμα (Final) ξανά πίσω σε κάθε άγκυρα.

Στη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας έγινε μια προσπάθεια υλοποίησης της παραπάνω μεθόδου. Συγκεκριμένα ρυθμίστηκαν οι άγκυρες ώστε να περιμένουν το μήνυμα Poll και αφού το λάβουν η καθεμία να στείλουν διαδοχικά μετά από συγκεκριμένες καθυστερήσεις το μήνυμα Resp στην άγκυρα. Η άγκυρα λάμβανε με επιτυχία τις 3 ανταποκρίσεις από τις άγκυρες A, B και C. Με τη σειρά της έστειλε το τελικό μήνυμα (Final), όμως κάποιες άγκυρες δεν ήταν σε θέση να το λάβουν λόγω χρονικών ορίων (Timeouts).

## 6.2.2 Low Power

Όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες, τόσο ο DWM1000 όσο και ο μικροεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε έχουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Η εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί, δεν είναι η βέλτιστη σε ότι αφορά την κατανάλωση. Το συγκεκριμένο πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί μειώνοντας τα συνολικά μηνύματα που αποστέλλονται από 9 σε 5 κάνοντας χρήση της μεθόδου DS-TWR-Parallel που αναφέρθηκε προηγουμένως (**Ενότητα 6.2.1**). Η κατανάλωση ισχύος μπορεί να μειωθεί σημαντικά κάνοντας χρήση των λειτουργιών SLEEP και DEEPSLEEP στις καταστάσεις αναμονής του DWM1000.

## 6.2.3 EEPROM

Στην **Κεφάλαιο 3** έγινε αναφορά στο υλικό που χρησιμοποιείται. Αναφέρθηκε ότι έχει εγκατασταθεί μνήμη τύπου EEPROM και είναι συνδεδεμένη με τον μικροεπεξεργαστή μέσω σειριακού διαύλου I<sup>2</sup>C. Ο σκοπός για τον οποίο έχει συμπεριληφθεί στο κύκλωμα είναι για την αποθήκευση σχετικά μικρών δεδομένων όπως ρυθμίσεις, καθώς είναι μνήμη μόνο για ανάγνωση που δεν χάνει το περιεχόμενό της όταν διακόπτεται η παροχή ρεύματος και μπορεί να διαγραφεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Ωστόσο δεν έχει γίνει καθόλου χρήση της στην συγκεκριμένη διπλωματική.

# Κεφάλαιο 7

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] A. Al-baidhani, “Self-deployable positioning systems for emergency situations employing uwb radio technology,” Ph.D. Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2019. Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <http://www.tdx.cat/handle/10803/667752>
- [2] J. Kostak, “Real Time Location System (RTLS) Technology Comparison,” *Sewio RTLS*. <https://www.sewio.net/uwb-technology/rtls-technology-comparison/> (accessed May 18, 2021).
- [3] “RTLS For Dummies, Malik, Ajay, eBook - Amazon.com.” <https://www.amazon.com/RTLS-Dummies-Ajay-Malik-ebook/dp/B0026LTMFA> (accessed May 18, 2021).
- [4] O. Silver, “An Indoor Localization System Based on BLE Mesh Network,” p. 77.
- [5] “MSc\_IES\_SKOURAS\_ELIAS\_0024\_MSC\_THESIS\_final\_MR.pdf.” Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: [http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/4375/MSc\\_IES\\_SKOURAS\\_ELIAS\\_0024\\_MSC\\_THESIS\\_final\\_MR.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/4375/MSc_IES_SKOURAS_ELIAS_0024_MSC_THESIS_final_MR.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- [6] F. Lensund and M. Sjöstedt, *Local positioning system for mobile robots using ultra wide-band technology*. 2018. Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-232506>
- [7] “UWB vs. Bluetooth 5.1 – Localino – We keep you on track!” <https://www.localino.net/en/localino-uwb-vs-bluetooth-5-1/> (accessed May 18, 2021).
- [8] T. F. Wiig, “Assessment of Indoor Positioning System (IPS) technology,” 2010, Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/8740>
- [9] “What is RTLS? | An Introduction to Real-Time Locating Systems.” <https://www.atlasrfidstore.com/what-is-rtls-an-introduction-to-real-time-location-systems/> (accessed May 18, 2021).
- [10] A. Alarifi *et al.*, “Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances,” *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 5, May 2016, doi: [10.3390/s16050707](https://doi.org/10.3390/s16050707).
- [11] M. Gudjonsson and A. Johansson, “Usage of UWB sensors for people collision avoidance at construction sites,” *undefined*, 2018, Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: [/paper/Usage-of-UWB-sensors-for-people-collision-avoidance-Gudjonsson-Johansson/964086aed5069ca331a64a74fca7b9fe88da6f5](https://paper/Usage-of-UWB-sensors-for-people-collision-avoidance-Gudjonsson-Johansson/964086aed5069ca331a64a74fca7b9fe88da6f5)

- [12] L. GHOLAMHOSSEINI, F. SADOUGHI, and A. SAFAEI, “Hospital Real-Time Location System (A Practical Approach in Healthcare): A Narrative Review Article,” *Iran J Public Health*, vol. 48, no. 4, pp. 593–602, Apr. 2019.
- [13] “RTLS in Go Karting Control System | Sewio RTLS.” <https://www.sewio.net/rtls-in-go-karting-control-system/> (accessed May 18, 2021).
- [14] M.-G. D. Benedetto, T. Kaiser, A. F. Molish, I. Oppermann, C. Politano, and D. Porcino, Eds., *UWB Communication Systems: A Comprehensive Overview*. New York, NY: Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [15] “Ultra-wideband,” *Wikipedia*. May 04, 2021. Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultra-wideband&oldid=1021386995>
- [16] R. Zandian, “Ultra-wideband Based Indoor Localization of Mobile Nodes in ToA and TDoA Configurations,” 2019, Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <https://pub.uni-bielefeld.de/record/2934897>
- [17] “Characteristics of ultra-wideband technology,” p. 20.
- [18] M. Charlier, B. Quoitin, and D. Hauweele, “Challenges in using time slotted channel hopping with ultra wideband communications,” in *Proceedings of the International Conference on Internet of Things Design and Implementation*, New York, NY, USA, Apr. 2019, pp. 82–93. doi: [10.1145/3302505.3310071](https://doi.org/10.1145/3302505.3310071).
- [19] “NetLoc: A UWB-based Localization System for the Internet of Things” Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5d7ac4d4aee76&location=browse>
- [20] “Ultra Wideband Wireless Positioning Systems” Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: [https://thetoolchain.com/mirror/dw1000/uwb\\_wireless\\_positioning\\_systems\\_technical\\_report.pdf](https://thetoolchain.com/mirror/dw1000/uwb_wireless_positioning_systems_technical_report.pdf)
- [21] B. O’Keefe, “Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques,” p.3. Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: [https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick\\_OKeefe\\_F1.pdf](https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf)
- [22] J. Gerth, “Development of a system for real time localization of a team of athletes using Ultra Wide band : design choices and considerations for mesh network localization,” May 22, 2019. <https://essay.utwente.nl/77988/> (accessed May 19, 2021).
- [23] 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, no. 6, pp. 1067–1080, Nov. 2007, doi: [10.1109/TSMCC.2007.905750](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905750).

- [24] “APS003 - Decawave.” <https://www.decawave.com/aps003/> (accessed May 18, 2021).
- [25] “White Paper Localino Indoor Localization Preview,” *Scribd*. <https://www.scribd.com/document/444599565/White-Paper-Localino-Indoor-Localization-preview-pdf> (accessed May 18, 2021).
- [26] N. Awarkeh, “2D indoor localization system with an UWB multistatic radar,” phdthesis, Université Paris-Saclay, 2019. Accessed: May 19, 2021. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02505477>
- [27] “DW1000 User Manual,” *Decawave*. <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual/> (accessed May 18, 2021).
- [28] R. Zandian, “Ultra-wideband Based Indoor Localization of Mobile Nodes in ToA and TDoA Configurations,” 2019, Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <https://pub.uni-bielefeld.de/record/2934897>
- [29] “DWM1000-Datasheet.pdf.” Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: <https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2020/09/DWM1000-Datasheet.pdf>
- [30] “IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks.” [https://standards.ieee.org/standard/802\\_15\\_4-2020.html](https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html) (accessed May 18, 2021).
- [31] J. Lindström, *UWB-based wireless sensor network with medical application*. 2018. Accessed: May 19, 2021. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-355590>
- [32] J. Yang and M. Yan, “Implementation of UWB indoor location and distance measurement based on TOF algorithm,” *MATEC Web Conf.*, vol. 173, p. 03018, 2018, doi: [10.1051/mateconf/201817303018](https://doi.org/10.1051/mateconf/201817303018).
- [33] “TPS63000 data sheet, product information and support | TI.com.” <https://www.ti.com/product/TPS63000> (accessed May 18, 2021).
- [34] “bq21040.pdf.” Accessed: May 18, 2021. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq21040.pdf?ts=1616951500415&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq21040.pdf?ts=1616951500415&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [35] “STM32L412KB - Ultra-low-power with FPU Arm Cortex-M4 MCU 80 MHz with 128 Kbytes of Flash memory, USB - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l412kb.html> (accessed May 18, 2021).
- [36] “20001710L.pdf.” Accessed: May 17, 2021. [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001710L.pdf>

- [37] “Serial Peripheral Interface,” *Wikipedia*. May 08, 2021. Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Serial\\_Peripheral\\_Interface&oldid=1022081532](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Serial_Peripheral_Interface&oldid=1022081532)
- [38] M. Charlier, “Application d’UWB à la mesure du temps de propagation et à la localisation,” p. 131.
- [39] M. Wagner, “Trusted Positioning with Two-Way Ranging,” International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, p. 4, 2016. Accessed: May 18, 2021. [Online]. Available: [http://www3.uah.es/ipin2016/usb/app/descargas/210\\_WIP.pdf](http://www3.uah.es/ipin2016/usb/app/descargas/210_WIP.pdf)
- [40] “APS013\_The-Implementation-of-Two-Way-Ranging-with-the-DW1000\_v2.3.pdf.” Accessed: May 17, 2021. [Online]. Available: [https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS013\\_The-Implementation-of-Two-Way-Ranging-with-the-DW1000\\_v2.3.pdf](https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS013_The-Implementation-of-Two-Way-Ranging-with-the-DW1000_v2.3.pdf)
- [41] C. Lian Sang, M. Adams, T. Hörmann, M. Hesse, M. Porrmann, and U. Rückert, “Numerical and Experimental Evaluation of Error Estimation for Two-Way Ranging Methods,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 616, Feb. 2019, doi: [10.3390/s19030616](https://doi.org/10.3390/s19030616).
- [42] D. Barclay, M. Aliasut, L. Ojeda, D. R. McLeod, and D. E. Hossain, “Augmented Reality with Location Tracking,” p. 72.
- [43] “ISO/IEC 24730-62:2013,” *ISO*. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/03/60379.html> (accessed May 18, 2021).
- [44] “DW1000\_Software\_API\_Guide\_rev2p7.pdf.” *UserManual.wiki*. <https://usermanual.wiki/Pdf/DW1000SoftwareAPIGuiderev2p4.1120642274/html> (accessed May 17, 2021).
- [45] “APH010\_DW1000\_INTER\_CHANNEL\_INTERFACE.pdf.” Accessed: May 17, 2021. [Online]. Available: [https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/aph010\\_dw1000\\_inter\\_channel\\_interference.pdf](https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/aph010_dw1000_inter_channel_interference.pdf)
- [46] “STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (accessed May 20, 2021).
- [47] “Ultra wideband based Real Time Localization System infrastructure using Decawave DWM1000 modules.pdf.” Accessed: May 24, 2021. <https://www.cs.unicam.it/marcantoni/tesi/Ultra%20wideband%20based%20Real%20Time%20Localization%20System%20infrastructure%20using%20Decawave%20DWM1000%20modules.pdf>
- [48] [https://github.com/kdeligiorgis/UWB\\_DWM1000](https://github.com/kdeligiorgis/UWB_DWM1000)