

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**Διπλωματική Εργασία**

Ανίχνευση Αντικειμένων με Συσκευή Χαμηλού Κόστους Τύπου SONAR  
με Χρήση Τεχνικής Φίλτρου Kalman

Low Cost SONAR Device for Object Detection  
using Kalman Filtering Technique

**Μαρακάκης Γεώργιος**

Εξεταστική Επιτροπή

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος – Καθηγητής (Επιβλέπων)

Παπαευσταθίου Ιωάννης – Αναπληρωτής Καθηγητής

Παρτσινέβελος Παναγιώτης – Επίκουρος Καθηγητής

**Χανιά, Δεκέμβριος 2016**

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές μου, τον κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο και τον κ. Παρτσινέβελο Παναγιώτη (ΜΗΧΟΠ), για την πολύτιμη συνεισφορά τους στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και τον κ. Παπαευσταθίου Ιωάννη για τη συμμετοχή του στην αξιολόγηση ως μέλους της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Ευχαριστώ το φίλο Ζερβό Παναγιώτη, απόφοιτο του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και πλέον Μεταπτυχιακό φοιτητή του ΔΠΜΣ “Γεωπληροφορική” του ΕΜΠ, για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια διεξαγωγής της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τη Μαρία Β., τη Γεωργία Π. και την Κωνσταντίνα Β.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους και για τις προσωπικές τους θυσίες χωρίς τις οποίες θα ήταν σχεδόν αδύνατη η ολοκλήρωση των σπουδών μου και της διπλωματικής μου εργασίας.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάζεται και αναπτύσσεται μία συσκευή τύπου SONAR με χαμηλού κόστους υπερηχητικούς αισθητήρες και χρησιμοποιούνται εμπορικά διαθέσιμα εξαρτήματα για την κατασκευή του συστήματος ενώ παράλληλα καταβάλλεται προσπάθεια έτσι ώστε το τελικό σύστημα να έχει τα χαρακτηριστικά για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Γίνεται βαθμονόμηση για την αντιμετώπιση των συστηματικών σφαλμάτων που παρουσιάζουν οι αισθητήρες και χρήση του Φίλτρου Kalman για την αντιμετώπιση των τυχαίων σφαλμάτων. Δημιουργείται γραφικό περιβάλλον στη γλώσσα προγραμματισμού Processing.

## Γενικά για την εργασία

Το παρόν κείμενο είναι μία πλήρης τεχνική αναφορά της διπλωματικής εργασίας που εκπόνησε ο υπογράφων, Μαρακάκης Γεώργιος, στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης για την απονομή του διπλώματος Ηλεκτρονικού Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών, καθώς η σχολή μετονομάσθηκε τον Ιούλιο του 2016. Η εργασία ανατέθηκε το Νοέμβριο του 2015 και ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2016. Εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη και αξιολόγηση του καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνου (Σχολή ΗΜΜΥ) και του επίκουρου καθηγητή κ. Παρτσινέβελου Παναγιώτη (Σχολή ΜΗΧΟΠ).

## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Σχημάτων .....</b>	<b>6</b>
<b>Κατάλογος Διαγραμμάτων .....</b>	<b>7</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>8</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>10</b>
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	10
1.2 Συσκευές τύπου SONAR.....	11
1.3 Προσέγγιση της εργασίας .....	11
1.4 Δομή της εργασίας.....	12
<b>2. Ανάλυση των Υπερηχητικών Αισθητήρων .....</b>	<b>13</b>
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά των αισθητήρων .....	13
2.2.1 Ακρίβεια .....	14
2.2.2 Συνάρτηση μεταφοράς ή χαρακτηριστική καμπύλη.....	15
2.2.3 Ευαισθησία στο μετρούμενο μέγεθος .....	15
2.2.4 Γραμμικότητα .....	15
2.2.5 Εύρος (περιοχή) μέτρησης (λειτουργίας) .....	15
2.2.6 Διακριτική ικανότητα.....	15
2.2.7 Επαναληψιμότητα.....	15
2.2.8 Επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα .....	16
2.3 Αρχές λειτουργίας των υπερηχητικών αισθητήρων.....	16
2.4 Παράγοντες απόδοσης βάσει στόχου .....	18
2.5 Διαφορές μέσων διάδοσης αέρα και νερού .....	19
2.6 Ο Αισθητήρας Υπερήχων JSN-SR04T .....	20
<b>3. Βαθμονόμηση του υπερηχητικού αισθητήρα JSN-SR04T .....</b>	<b>21</b>
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Διακρίβωση .....	21
3.3 Διαδικασία Πειραματικών Μετρήσεων.....	22
3.4 Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων .....	30
3.5 Ρύθμιση.....	33
<b>4. Αρχιτεκτονική και Λειτουργία του Συστήματος.....</b>	<b>37</b>
4.1 Εισαγωγή.....	37
4.2 Αρχιτεκτονική του Συστήματος.....	37
4.2.1 Πλακέτα Μικροεπεξεργαστή.....	38
4.2.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας .....	39
4.2.3 Σερβομοτέρ (Servo Motor).....	40
4.2.4 Αισθητήρας Υπερήχων.....	41
4.2.5 Περιγραφή της Συνδεσμολογίας .....	43
4.3 Λειτουργία του Συστήματος .....	44
4.3.1 Γλώσσα Arduino .....	44
4.3.2 Περιγραφή Λειτουργίας.....	45
<b>5. Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη .....</b>	<b>48</b>
5.1 Εισαγωγή.....	48

5.2	Γλώσσα Processing.....	48
5.3	Περιγραφή γραφικού περιβάλλοντος .....	49
<b>6.</b>	<b>Φίλτρο Kalman .....</b>	<b>52</b>
6.1	Εισαγωγή.....	52
6.2	Εκτίμηση Κατάστασης.....	53
6.3	Ο Αλγόριθμος του Διακριτού Kalman Filter .....	55
6.3.1	Εξισώσεις Χρονικής Ενημέρωσης.....	57
6.3.2	Εξισώσεις Ενημέρωσης Μετρήσεων .....	58
6.4	Παραμετροποίηση και Απόδοση .....	60
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....</b>	<b>65</b>
	<b>Αναφορές και Εξωτερικοί Σύνδεσμοι.....</b>	<b>66</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Συνολικό Κόστος .....</b>	<b>68</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 – Η ανάπτυξη τάσης στα άκρα ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου κατά την άσκηση μηχανικής πίεσης σε αυτόν	16
Σχήμα 2.2 – Κατευθυντικότητα εκπομπής (α) και λήψης (β) ενός υπερηχητικού πομπού και ενός υπερηχητικού δέκτη αντίστοιχα	17
Σχήμα 2.3 – Αρχή λειτουργίας υπερηχητικού μετατροπέα μέτρησης αποστάσεων	17
Σχήμα 2.4 – Αλληλεπίδραση του ήχου με την επιφάνεια	18
Σχήμα 3.1 – Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα που παρουσιάζει Σφάλμα Κέρδους	24
Σχήμα 3.2 – Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα που παρουσιάζει Σφάλμα Μετατόπισης	30
Σχήμα 3.3 – Παράδειγμα χρήσης της MET	31
Σχήμα 4.1 – Διαγράμματα Χρονισμού Διαφορετικών PWM Διαμορφώσεων	37
Σχήμα 4.2 – Αισθητήρας Θερμοκρασίας LM35DZ, Κάτοψη (α) και Συνδεσιμότητα (β)	40
Σχήμα 4.3 – Πάνω όψη (α) και διάγραμμα χρονισμού (β) του SG90	41
Σχήμα 4.4 – Διάγραμμα Χρονισμού του JSN-SR04T	43
Σχήμα 4.5 – Σχηματικό Διάγραμμα Συστήματος	44
Σχήμα 4.6 – Διάγραμμα Ροής Top Level	45
Σχήμα 4.7 – Διάγραμμα Ροής LoopBody (α), calculateDistance (β)	47
Σχήμα 6.1 – Η συνεχής διαδικασία του Kalman Filter	56
Σχήμα 6.2 – Διάγραμμα Ροής Kalman Filter	56
Σχήμα 6.3 – Ακρίβεια Μετρήσεων έναντι Ευστάθειας Εκτιμήσεων	59
Σχήμα 6.4 – Διάγραμμα Ροής Εξισώσεων του Kalman Filter	60
Σχήμα 6.5 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων: $R=1$ , $Q=0.1$	61
Σχήμα 6.6 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων: $R=2$ , $Q=0.1$	62
Σχήμα 6.7 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων: $R=1$ , $Q=0.01$	62
Σχήμα 6.8 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων: $R=2cm$ , $Q=0.01cm$	63
Σχήμα 6.9 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων: $R=1$ , $Q=0.5$	63
Σχήμα 6.10 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων: $R=2$ , $Q=0.5$	64

---

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

---

Διάγραμμα 3.1 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 25cm	23
Διάγραμμα 3.2 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 100cm	24
Διάγραμμα 3.3 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 140cm	25
Διάγραμμα 3.4 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 385cm	26
Διάγραμμα 3.5 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 450cm	27
Διάγραμμα 3.6 – Επαλήθευση της σχέσης των πειραματικών μετρήσεων με τη MET	33
Διάγραμμα 3.7 – Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων προς πραγματικές αποστάσεις	34
Διάγραμμα 3.8 – Εξίσωση ρύθμισης που προκύπτει από τη MET	35
Διάγραμμα 3.9 – Επαλήθευση της εξίσωσης ρύθμισης με χρήση της MET	36

---

## Κατάλογος Εικόνων

---

Εικόνα 4.1 – Uno Board	38
Εικόνα 4.2 – Ο αισθητήρας θερμοκρασίας LM35DZ	39
Εικόνα 4.3 – SG90 Tower Pro Micro Servo	40
Εικόνα 4.4 – Μονάδα Υπερηχητικού Αισθητήρα JSN-SR04T	42
Εικόνα 5.1 – Απεικόνιση των συναρτήσεων <i>drawRadarHorizontal()</i> και <i>drawRadarVertical()</i>	50
Εικόνα 5.2 – Απεικόνιση των συναρτήσεων <i>drawLineHorizontal()</i> και <i>drawLineVertical()</i>	50
Εικόνα 5.3 – Απεικόνιση των συναρτήσεων <i>drawObjectHorizontal()</i> και <i>drawObjectVertical()</i>	51
Εικόνα 5.4 – Ολοκληρωμένη απεικόνιση του GUI	51



---

## Κατάλογος Πινάκων

---

<i>Πίνακας 3.1 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων 25cm-70cm</i>	<i>27</i>
<i>Πίνακας 3.2 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων 75cm-250cm</i>	<i>28</i>
<i>Πίνακας 3.3 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων 245cm-450cm</i>	<i>29</i>
<i>Πίνακας 3.4 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων μετά τη ρύθμιση από τη MET</i>	<i>35</i>

# 1.

## Εισαγωγή

---

### 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η κατασκευή μίας συσκευής τύπου SONAR (**SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging) χαμηλού κόστους η οποία θα λειτουργήσει ως θεωρητικό και πειραματικό υπόβαθρο για τις ανάγκες ανίχνευσης αντικειμένων ενός Υποβρυχίου Οχήματος Ενσύρματου Τηλεχειρισμού (Remotely Operated Underwater Vehicle - ROV).

Η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός υποβρυχίου οχήματος τύπου ROV είναι ένα project του Εργαστηρίου Γεωδαισίας & Πληροφορικής των Γεωεπιστημών (Senselab) του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, επιστημονικός υπεύθυνος του οποίου είναι ο κ. Παρτσινέβελος. Σκοπός της κατασκευής ενός ROV υποβρυχίου οχήματος είναι ο έλεγχος και η εποπτεία υποθαλάσσιων κατασκευών όπως μεγάλων υποθαλάσσιων σωληνώσεων.

Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η ενσωμάτωση μίας συσκευής τύπου SONAR στο ROV για δύο λόγους. Πρώτον, για να μπορεί να συμβάλλει στην υποβοήθηση της πλοήγησης του ROV καθώς ο σκελετός εκείνου που σχεδιάζεται στο Εργαστήριο Senselab έχει διαστάσεις 70×70×50cm. Δεύτερον, για να μπορεί να εντοπίζει μεγάλα αντικείμενα μέσα στο περιβάλλον του νερού που θα μπορούσαν να κεντρίσουν το ενδιαφέρον του χειριστή του ROV.

Σε καταστάσεις μειωμένης ορατότητας είτε λόγω βάθους, είτε λόγω σκιώδους περιβάλλοντος, η υποβοήθηση της πλοήγησης μέσω μιας συσκευής SONAR κρίνεται απαραίτητη.

Εν ολίγοις, υπήρξε η ανάγκη κατασκευής μιας συσκευής τύπου SONAR χαμηλού κόστους χωρίς να υπάρχουν, αρχικά, συγκεκριμένες απαιτήσεις στην εμβέλεια. Σκοπός είναι να έχει τα εφόδια να μετράει με ακρίβεια για να μπορεί να υποβοηθά την πλοήγηση του συγκεκριμένου σκελετού.

## 1.2 Συσκευές τύπου SONAR

Τα συστήματα τύπου SONAR χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση, για την επικοινωνία ή και για την ανίχνευση αντικειμένων μέσα ή έξω από το νερό. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα παθητικά SONAR και στα ενεργητικά. Τα *παθητικά* χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση παλμών ή κυμάτων που εκπέμπουν άλλα αντικείμενα ή συστήματα, ενώ τα *ενεργητικά* για την εκπομπή και τη λήψη ιδίων υπερηχητικών κυμάτων [1].

Υπάρχουν πολλά είδη συσκευών τύπου SONAR για διάφορες χρήσεις. Μερικές από αυτές είναι τα fish finders που χρησιμοποιούνται για ανίχνευση ψαριών, τα sidescan sonars που χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση του πυθμένα και τα forward-looking sonars που χρησιμοποιούνται για την υποβοήθηση της πλοήγησης πλοίων ανιχνεύοντας την εμπρόσθια περιοχή πλοήγησης.

Στην παρούσα εργασία ως πρότυπο χρήσης χρησιμοποιείται ο τύπος του forward-looking sonar.

## 1.3 Προσέγγιση της εργασίας

Οι συσκευές τύπου SONAR αποτελούνται από συστοιχίες αισθητήρων υπερήχου και έχουν μεγάλο κόστος. Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η δημιουργία μιας συσκευής τέτοιου τύπου με αισθητήρες υπερήχου ενός στοιχείου με σκοπό τη μείωση του κόστους. Η αντικατάσταση της συστοιχίας αισθητήρων επιχειρήθηκε με την περιστροφική κίνηση αισθητήρων ενός στοιχείου ίδιου τύπου οι οποίοι προσδέθηκαν σε σερβομοτέρ για σάρωση σε οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.

Λόγω περιορισμένου προϋπολογισμού για εξοπλισμό και, αρχικά, ελλιπούς εμπειρίας στο συγκεκριμένο περιβάλλον (νερό), επιλέχθηκε ο εμπορικά διαθέσιμος υπερηχητικός αισθητήρας ενός στοιχείου “JSN-SR04T”. Έναν αισθητήρα ίδιου τύπου χρησιμοποίησε ο κ. Chin Han Zong, απόφοιτος Ηλεκτρολόγος-Μηχανολόγος από το αντίστοιχο τμήμα του Πολυτεχνείου Μαλαισίας, στα πλαίσια της πτυχιακής του εργασίας με σκοπό τη μέτρηση του βάθους του πυθμένα χαρτογράφησης [2]. Κατά τη διάρκεια πειραματικών μετρήσεων στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποδείχτηκε ότι ο αισθητήρας είναι ακατάλληλος για υποβρύχια χρήση.

Η έλλειψη εργαστηριακών συνθηκών για υποβρύχies δοκιμαστικές μετρήσεις καθιστούσε απαραίτητη την εκ των προτέρων υλοποίηση ενός σημαντικού μέρους της διπλωματικής εργασίας, καθώς απαιτούνταν συντονισμός τριών ατόμων και εκ των προτέρων συνεννόηση με ιδιοκτήτες κατάλληλων εξωτερικών χώρων για τη δέσμευσή τους με σκοπό την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη αλλά είχε σαν αποτέλεσμα μεγάλη προσπάθεια και μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις.

Η προετοιμασία που ήταν, αρχικά, απαραίτητη σε επίπεδο υλοποίησης περιλάμβανε τη μερική κατασκευή του συστήματος και την αλγοριθμική του λειτουργία. Χρειάζοταν διαδικασία βαθμονόμησης για την αντιμετώπιση των συστηματικών σφαλμάτων, και λόγω των τυχαίων σφαλμάτων που εμφανίζονται, υπήρξε προετοιμασία αντιμετώπισης τους με χρήση τεχνικής Kalman Φίλτρου.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το υπόβαθρο που δημιουργήθηκε με βάσει τις συνθήκες που περιγράφονται παραπάνω και η ολοκλήρωση της κατασκευαστικής εκκρεμότητας. Η δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος συντελεί αποτελεσματικά στην ολοκλήρωση του συστήματος καθώς στόχος της συσκευής είναι να αποδίδεται προσεγγιστικά η εικόνα που “βλέπει” το σύστημα. Τα αποτελέσματα της υλοποίησης εφαρμόζονται, κατά αναλογία, σε αντικείμενα-στόχους τοποθετημένα σε εναέριο περιβάλλον.

## **1.4 Δομή της εργασίας**

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι βασικές αρχές των υπερηχητικών αισθητήρων και οι παράγοντες απόδοσής τους. Επίσης, γίνεται αναφορά στις διαφορές των μέσων διάδοσης αέρα και νερού, ενώ στο τέλος παρουσιάζεται ο αισθητήρας υπερήχων JSN-SR04T.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης στην οποία χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων για το συσχετισμό των πειραματικών μετρήσεων και τη διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν και η συνδεσμολογία τους για την κατασκευή του συστήματος μαζί με την αλγοριθμική αλληλεπίδρασή τους για τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το Γραφικό περιβάλλον χρήστη.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύεται η χρήση του Kalman Φίλτρου για την αντιμετώπιση των τυχαίων σφαλμάτων που παρουσιάζονται.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται μία αποτίμηση της παρούσας εργασίας και προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις για το σύστημα που υλοποιήθηκε.

# 2.

## Ανάλυση των Υπερηχητικών Αισθητήρων

---

### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας των υπερηχητικών αισθητήρων και οι παράγοντες απόδοσής τους με βάση τα αντικείμενα στόχευσης. Σκοπός είναι η κατανόηση της ορθής χρήσης τους και των πραγματικών δυνατοτήτων τους.

Επίσης, γίνεται μικρή αναφορά στις διαφορές των μέσων διάδοσης αέρα και νερού, ενώ στο τέλος παρουσιάζεται ο αισθητήρας JSN-SR04T και γίνεται ανάλυση των δυνατοτήτων του.

Πριν, όμως, αναλυθούν τα παραπάνω, γίνεται μια αναφορά σε εισαγωγικές έννοιες και χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρειάζονται για την καλύτερη κατανόησή τους.

### 2.2 Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Ένας αισθητήρας μετατρέπει το φυσικό μέγεθος που μετριέται (μετρούμενο μέγεθος) σε ηλεκτρικό σήμα, είτε αυτό είναι τάση είτε είναι ρεύμα.

Μερικά παραδείγματα φυσικών μεγεθών που μετρώνται με αισθητήρες είναι η θέση και η μετατόπιση ενός αντικειμένου, η ταχύτητα και η επιτάχυνση ενός κινητού αντικειμένου, η πίεση, η ροή ενός ρευστού, η υγρασία και η θερμοκρασία ενός περιβάλλοντος χώρου, η ακτινοβολία, κλπ.

Ενώ, ένας μετατροπέας (transducer) είναι μία διάταξη που απορροφά ενέργεια από ένα σύστημα και τη μετατρέπει σε ενέργεια άλλης μορφής.

Παραδείγματα μετατροπέων είναι η γεννήτρια που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια της ταχύτητας περιστροφής σε ηλεκτρική ενέργεια της τάσης εξόδου ή το αντίστροφο όπου το μοτέρ μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια της τάσης εισόδου σε μηχανική ενέργεια της ταχύτητας περιστροφής, κá [3].

Ένας καλός αισθητήρας πρέπει να ακολουθεί τους εξής κανόνες [4]:

1. Να είναι **ευαίσθητος στο μετρούμενο μέγεθος**.
2. Να **μην είναι ευαίσθητος σε κανένα άλλο μέγεθος** ή φαινόμενο.
3. Να **μην επηρεάζει το υπό μέτρηση μέγεθος**.
  - Σε έναν *ιδανικό αισθητήρα* το σήμα εξόδου είναι ακριβώς **γραμμικά ανάλογο** με την τιμή του μετρούμενου μεγέθους.
  - Οι αποκλίσεις του σήματος εξόδου του αισθητήρα από την ιδανική τιμή προκαλούν **σφάλματα** στη μέτρηση.
  - Τα **συστηματικά σφάλματα** σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να αντισταθμιστούν με διάφορες τεχνικές (πχ. αλλαγή της βαθμονόμησης).
  - Τα **τυχαία σφάλματα** είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν και δε μπορούν να εξαλειφθούν εντελώς.

Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα επιτρέπουν, (α) την αξιολόγηση της ποιότητας του αισθητήρα, και (β) επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή της μέτρησης.

### 2.2.1 Ακρίβεια

Η **ακρίβεια (accuracy)** σχετίζεται με το **μέγιστο σφάλμα** που μπορεί να εμφανίσει ο αισθητήρας κατά τη μέτρηση. Η ακρίβεια εκφράζεται:

(α) Ως προς τις μονάδες της μετρούμενης ποσότητας,

(β) ως εκατοστιαίο (%) σφάλμα ως προς την τιμή της μέτρησης (συνηθέστερη περίπτωση),

(γ) ως εκατοστιαίο (%) σφάλμα ως προς το εύρος πλήρους κλίμακας.

- *Υψηλή ακρίβεια* αντιστοιχεί σε **μικρό σφάλμα** και αντίστροφα.
- Είναι διαφορετική έννοια από την **ακρίβεια προσέγγισης (precision)** που εκφράζει την ικανότητα διάκρισης μεταξύ ίσων τιμών.
- Η ακρίβεια (accuracy) και η ακρίβεια προσέγγισης (precision) σχετίζονται μεταξύ τους, διότι η μέτρηση μιας ποσότητας με ένα αισθητήρα χαμηλής ακρίβειας (accuracy), παραπέμπει στην αναγραφή της μέτρησης με χαμηλή ακρίβεια προσέγγισης (precision).

### 2.2.2 Συνάρτηση μεταφοράς ή χαρακτηριστική καμπύλη

- Είναι η σχέση (συνάρτηση) του ηλεκτρικού σήματος στην έξοδο του αισθητήρα με την τιμή του φυσικού μεγέθους που μετράται:

ηλ.σήμα εξόδου =  $f$ ( φυσικό σήμα εισόδου ), όπου  $f()$ =συνάρτ.μεταφοράς

- Δίνεται από τον κατασκευαστή:

(α) Με μαθηματική έκφραση

(β) Με μορφή διαγράμματος

(γ) Με πίνακα αντιστοίχισης (**look-up table**) που συσχετίζει τις τιμές του μετρούμενου μεγέθους με το ηλεκτρικό σήμα εξόδου.

### 2.2.3 Ευαισθησία στο μετρούμενο μέγεθος

Η ευαισθησία (sensitivity) στο μετρούμενο μέγεθος,  $X_i$ , ενός αισθητήρα με συνάρτηση μεταφοράς  $V_o(X_i)$  δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{dV_o}{dX_i}$$

### 2.2.4 Γραμμικότητα

- Ένας αισθητήρας χαρακτηρίζεται ως *γραμμικός*, όταν η συνάρτηση μεταφοράς του είναι της μορφής:  $V_o = aX_i + b$  (γραμμική εξίσωση)
- Για λόγους απλούστευσης, η *μη-γραμμική* συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα προσεγγίζεται από μία γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, μειώνοντας όμως έτσι την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται.

### 2.2.5 Εύρος (περιοχή) μέτρησης (λειτουργίας)

Το *εύρος (περιοχή) μέτρησης (λειτουργίας)* (range) είναι τα όρια μέσα στα οποία μπορεί η συσκευή να λειτουργεί αξιόπιστα.

### 2.2.6 Διακριτική ικανότητα

- Η διακριτική ικανότητα (resolution) αναφέρεται στη μικρότερη είσοδο ή αλλαγή της εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει ο αισθητήρας.
- Η διακριτική ικανότητα είναι συσχετισμένη με την ακρίβεια προσέγγισης (precision) με την οποία εκτελείται η μέτρηση.

### 2.2.7 Επαναληψιμότητα

*Επαναληψιμότητα* (repeatability) είναι η ιδιότητα ενός αισθητήρα ή ενός συστήματος μέτρησης να παράγει το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα κατά τις διαδοχικές μετρήσεις, που εκτελούνται από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, της ίδιας μετρούμενης ποσότητας.

## 2.2.8 Επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα

(α) Κόστος

(β) Περιβαλλοντικοί παράγοντες

(γ) Χαρακτηριστικά λειτουργίας

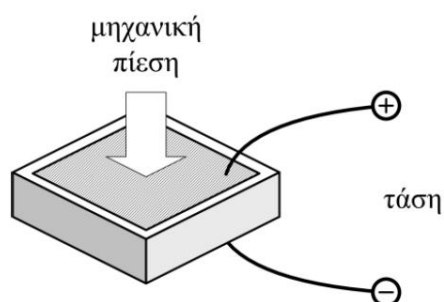
(δ) Απαιτήσεις της εφαρμογής

- Ένας αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για τη μέτρηση ενός μεγέθους, είτε σε συνθετότερες διατάξεις για τη μέτρηση άλλου μεγέθους.
- Πολλοί αισθητήρες διατίθενται σε μορφή:
  - (i) Μονολιθικού **ολοκληρωμένου κυκλώματος** (integrated circuit - IC)
  - (ii) **Αρθρώματος** (module) με διακριτά στοιχεία.

## 2.3 Αρχές λειτουργίας των υπερηχητικών αισθητήρων

Οι πομποί και δέκτες υπερηχητικών κυμάτων αποτελούνται από πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους και συνήθως αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως υπερηχητικοί μετατροπείς. Αυτό συμβαίνει γιατί οι, μεν, πομποί τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση (ηλεκτρική ενέργεια) που μετατρέπουν σε εκπεμπόμενα υπερηχητικά κύματα (μηχανική ενέργεια), με το αντίστροφο να συμβαίνει, αντίστοιχα, δε, από τους δέκτες.

Βασίζονται στο *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο* (piezoelectric effect), κατά το οποίο η ελαστική παραμόρφωση των γεωμετρικών διαστάσεων ενός κρυστάλλου λόγω άσκησης μηχανικής πίεσης σε αυτόν, προκαλεί τάση στα άκρα του κρυστάλλου ανάλογη της παραμόρφωσης [5].



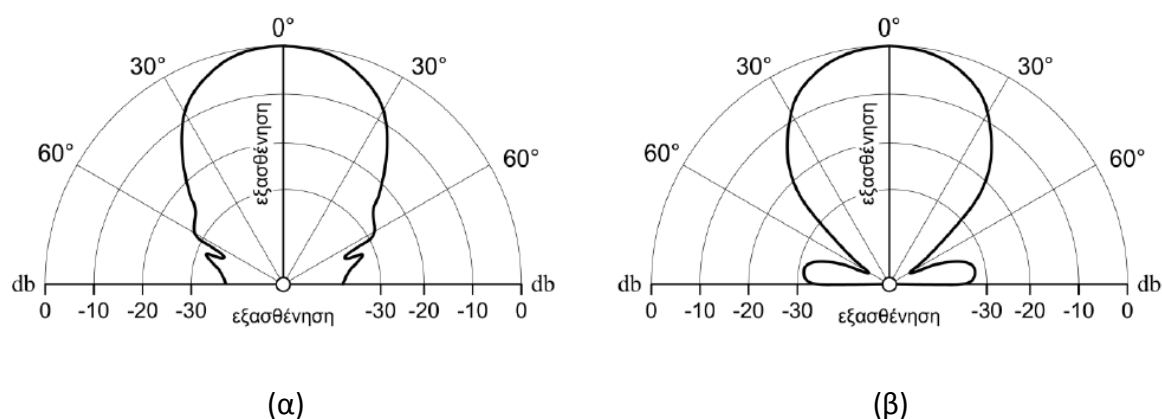
Σχήμα 2.1 – Η ανάπτυξη τάσης στα άκρα ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου κατά την άσκηση μηχανικής πίεσης σε αυτόν

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι *αντιστρέψιμο*, δηλαδή η εφαρμογή τάσης στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου τού προκαλεί μία προσωρινή παραμόρφωση. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι εναλλασσόμενη τότε αυτή η παραμόρφωση γίνεται αντληπτή με τη μορφή δονήσεων που είναι ο ακριβής τρόπος δημιουργίας των υπερηχητικών κυμάτων [6]. Τα ηχητικά κύματα δεν είναι τίποτα άλλο από διαταραχές της πίεσης του αέρα (μηχανική ταλάντωση) ως αποτέλεσμα δονήσεων ενός υλικού.



Τα υπερηχητικά κύματα είναι ήχος υψηλής συχνότητας της τάξης των 20KHz και άνω, και η επιλογή της συχνότητας του αισθητήρα γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μέτρησης.

Τα υπερηχητικά κύματα εκπέμπονται σε κωνική μορφή και παρουσιάζουν κατευθυντικότητα στο χώρο, τόσο αυτά, όσο και η ευαισθησία του δέκτη σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης του κύματος.



Σχήμα 2.2 – Κατευθυντικότητα εκπομπής (α) και λήψης (β) ενός υπερηχητικού πομπού και ενός υπερηχητικού δέκτη αντίστοιχα

Η ένταση,  $J$ , του υπερηχητικού κύματος που λαμβάνεται από ένα δέκτη υπερήχων που βρίσκεται σε απόσταση  $r$  από την πηγή είναι:

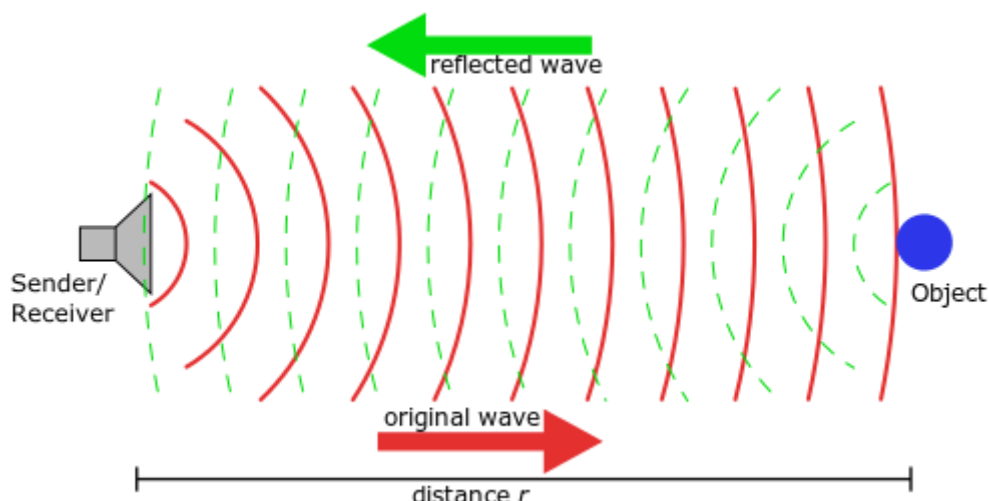
$$J = \frac{P_s}{4\pi r^2} \left[ \text{W} / \text{m}^2 \right] \quad (2.1).$$

Οι υπερηχητικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές μέτρησης της απόστασης αντικειμένων, καθώς και σε εφαρμογές ανίχνευσης της προσέγγισης αντικειμένων. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται να διατίθενται ως πομποδέκτες (transceiver) σε μορφή module.

Υπάρχουν modules τα οποία χρησιμοποιούν διακριτό μετατροπέα για την εκπομπή, ξεχωριστό από εκείνον για τη λήψη των υπερηχητικών κυμάτων και modules τα οποία συνδυάζουν τις δύο λειτουργίες σε ένα μόνο μετατροπέα.

Οι υπερηχητικοί μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για μέτρηση αποστάσεων (ultrasonic distance measurement module ή proximity sensor) κάνουν χρήση της ακόλουθης μεθόδου.

Εκπέμπουν έναν υπερηχητικό παλμό και μετρούν το χρονικό διάστημα (time interval) μέχρι τη σύλληψή του από το δέκτη. Αυτό το χρονικό διάστημα ονομάζεται *χρόνος πτήσης* (time of flight - TOF) και για τον υπολογισμό της πραγματικής μετρούμενης απόστασης χρησιμοποιείται κατά το ήμισυ στους τύπους της κινηματικής ( $TOF/2$ ).



Σχήμα 2.3 – Αρχή λειτουργίας υπερηχητικού μετατροπέα μέτρησης αποστάσεων

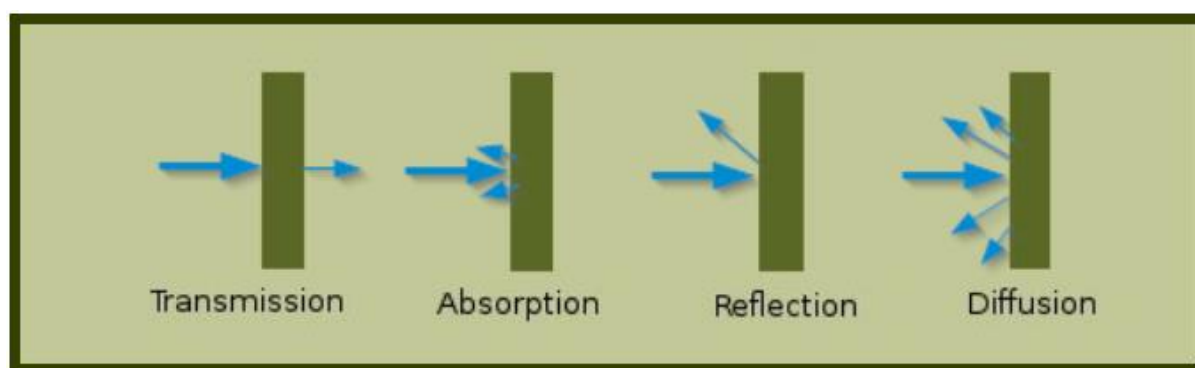
Αυτού του τύπου οι υπερηχητικοί μετατροπείς μέτρησης αποστάσεων χρησιμοποιούνται στα ηχοεντοπιστικά συστήματα τύπου SONAR (**SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging).

## 2.4 Παράγοντες απόδοσης βάσει στόχου

Οι ακουστικές ιδιότητες των αντικειμένων στόχευσης έχουν μεγάλη επίδραση στην απόδοση των υπερηχητικών αισθητήρων. Βοηθούν στην επιλογή αισθητήρα και καθορίζουν το εύρος μέτρησης ανάλογα με τη μορφολογία τους.

Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να ανακλάται το μεγαλύτερο μέρος ενός εκπεμπόμενου υπερηχητικού κύματος όταν εκείνο προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Ο λόγος είναι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ότι ο δέκτης “μετράει” την ένταση ( $J$ ) του κύματος που ανακλάται.

Βέβαια τα ηχητικά κύματα εκτός από την ανάκλαση υπόκεινται και στα φαινόμενα της μετάδοσης, της απορρόφησης και της διάχυσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 .



Σχήμα 2.4 – Αλληλεπίδραση του ήχου με την επιφάνεια

Επίπεδες, λείες και σκληρές επιφάνειες είναι τα ιδανικά σώματα προς ανίχνευση και αν βρίσκονται τοποθετημένα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του εκπεμπόμενου κύματος, μπορούν να εντοπισθούν στα άνω όρια του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα καθώς έτσι επιτυγχάνεται η ανάκλαση του μεγαλύτερου τμήματος του εκπεμπόμενου κύματος.

Όσο πιο ανομοιόμορφες, τραχείες και πορώδεις είναι επιφάνειες τόσο πιο δύσκολη γίνεται η ανάκλαση ικανού τμήματος του εκπεμπόμενου κύματος προς ανίχνευση καθώς τα φαινόμενα της απορρόφησης και της διάχυσης βρίσκουν πρόσφορο έδαφος.

Επίσης, σημαντικό ρόλο έχει και το μέγεθος της επιφάνειας στόχευσης. Όσο πιο μακριά βρίσκεται ένα αντικείμενο, ανεξαιρέτως μορφολογίας, τόσο πιο μεγάλη χρειάζεται να είναι η επιφάνεια πρόσπτωσης του κύματος έτσι ώστε να μπορεί να επιστραφεί αρκετό τμήμα του κύματος προς ανίχνευση [7].

## 2.5 Διαφορές μέσων διάδοσης αέρα και νερού

Για τη διάδοση του ήχου απαιτείται ένα ελαστικό μέσο όπως ο αέρας ή το νερό. Δεν υφίστανται ηχητικά κύματα στο κενό. Για να γίνει κατανοητή η διαφορά στην αρχιτεκτονική προσέγγιση που απαιτείται ανάμεσα σε αισθητήρες που προορίζονται για εναέρια και για υποβρύχια χρήση, αρκεί να αναφερθούν δύο βασικές διαφορές των μέσων διάδοσης.

Η πρώτη διαφορά αφορά την ταχύτητα στο κάθε μέσο διάδοσης. Στο εναέριο περιβάλλον η ταχύτητα του ήχου επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία και δευτερευόντως από την υγρασία περιβάλλοντος, η οποία θεωρείται αμελητέα ως παράμετρος [8]. Η σχέση που διέπει την ταχύτητα του ήχου ( $v_a$ ) με τη θερμοκρασία ( $T_c$ ) σε κλίμακα Κελσίου ( $^{\circ}C$ ) είναι η εξής:

$$v_a = 331.5 + (0.6 \cdot T_c) \quad m/s \quad (2.2)$$

Στο περιβάλλον του νερού, η ταχύτητα του ήχου ( $v_w$ ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία ( $T$ ), την πίεση ( $Z$ ) και την περιεκτικότητα σε αλάτι ( $S$ ). Η σχέση που συνδέει τις παραπάνω ποσότητες προτάθηκε το 1969 από τον CC Leroy [9] και είναι η εξής:

$$v_w = 1492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 \\ + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + Z / 61 \quad m/s \quad (2.3)$$

Προσεγγιστικά, η ταχύτητα του ήχου στο νερό είναι περίπου 4,5 φορές μεγαλύτερη από ότι είναι στον αέρα.

$$v_w / v_a \approx 4.5 \quad (2.4)$$

Η δεύτερη διαφορά, όμως, είναι η ουσιαστική ανάμεσα στον αέρα και στο νερό ως μέσα διάδοσης του ήχου. Η διαφορά αυτή είναι η ακουστική αντίσταση (acoustic impedance) και εκφράζεται ως το γινόμενο της πυκνότητας του μέσου ( $\rho$ ) επί την ταχύτητα του ήχου στο μέσο ( $c$ ). Τότε ο λόγος των ακουστικών αντιστάσεων των δύο μέσων, κατά προσέγγιση, είναι:

$$\frac{Z_w}{Z_a} = \frac{(\rho c)_w}{(\rho c)_a} = \frac{1000 \times 1500}{1.22 \times 330} \approx 3700 \quad (2.5)$$

Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει σημαντική αναντιστοιχία ανάμεσα στον αέρα και στο νερό ως μέσα διάδοσης του ήχου [10].

Συγκεκριμένα, η ταχύτητα διάδοσης επηρεάζει την αρχιτεκτονική προσέγγιση από τη σκοπιά της ακρίβειας μετρήσεων, ενώ η ακουστική αντίσταση την επηρεάζει από τη σκοπιά της ισχύος του εκπεμπόμενου κύματος που απαιτείται. Το υπερηχητικό κύμα πρέπει να είναι τόσο ισχυρό ώστε να μπορεί να διαδοθεί σε αυτά τα επίπεδα ακουστικής αντίστασης.

Για να επιτευχθεί η εκπομπή ενός τόσο ισχυρού κύματος, ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος χρειάζεται αρκετά μεγαλύτερη τάση διέγερσης από ότι εκείνος που εκπέμπει στον αέρα [11].

## **2.6 Ο Αισθητήρας Υπερήχων JSN-SR04T**

Ο υπερηχητικός αισθητήρας JSN-SR04T είναι ένας αδιάβροχος αισθητήρας χαμηλού κόστους και αγνώστου κατασκευαστή.

Δεν υπάρχει στην αγορά φύλλο των προδιαγραφών του προϊόντος από τον επίσημο κατασκευαστή. Η κοινότητα των μηχανικών τον χρησιμοποιεί όπως τον πολύ δημοφιλή αισθητήρα υπερήχων HC-SR04 καθώς έχουν περίπου ίδια χαρακτηριστικά.

Ο JSN-SR04T δεν είναι κατάλληλος για υποβρύχια χρήση, αφενός, από τη σκοπιά της πιστοποιημένης προστασίας και, αφετέρου, από τη σκοπιά της ισχύος που χρειάζεται για να διαδοθεί το υπερηχητικό κύμα στο περιβάλλον του νερού λόγω ακουστικής αντίστασης.

Η διαπίστωση αυτή έγινε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μέσω πειραματικών μετρήσεων σε ελεγχόμενο περιβάλλον νερού έχοντας λάβει υπόψη την ταχύτητα του ήχου στο μέσο. Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι τα εκπεμπόμενα υπερηχητικά κύματα ανακλώνται αμέσως χωρίς να μπορούν να διαπερνούν την ακουστική αντίσταση, δίνοντας τιμές ίσες με το ελάχιστο εύρος ανίχνευσης πολλαπλασιασμένο με το λόγο των ταχυτήτων των μέσων διάδοσης.

Είναι αισθητήρας χαμηλής τάσης εισόδου (5V DC), χαμηλής κατανάλωσης ρεύματος (30mA), με συχνότητα στα 40KHz. Το εύρος μέτρησης διαμορφώνεται στα 25cm-450cm σε περιβάλλον θερμοκρασίας -10°C~70°C. Αναγράφεται διακριτική ικανότητα των 0.5cm και γωνία εκπομπής μικρότερη των 50°.

# 3.

## Βαθμονόμηση του υπερηχητικού αισθητήρα JSN-SR04T

---

### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η διαδικασία βαθμονόμησης του υπερηχητικού αισθητήρα JSN-SR04T για τη διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων που παρουσιάζει.

Χρησιμοποιείται η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων (MET) για την επαλήθευση των πειραματικών μετρήσεων και τη ρύθμιση της ακρίβειας του αισθητήρα.

Για την αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων και για την υλοποίηση της MET χρησιμοποιείται το περιβάλλον προγραμματισμού Matlab, έκδοση R2016a.

### 3.2 Διακρίβωση

Κατά τη διαδικασία διακρίβωσης του αισθητήρα στο εναέριο περιβάλλον, διαπιστώθηκε ότι εμφανίζει μικρό σφάλμα στις μετρήσεις σε όλο το εύρος λειτουργίας του (25cm-450cm) το οποίο οφείλεται σε κατασκευαστική ατέλεια.

Σύμφωνα με το πρότυπο MIL-STD-45662 'Calibration system requirements', διακρίβωση (qualification) είναι η σύγκριση μεταξύ δύο οργάνων ή συσκευών μέτρησης, από τα οποία το ένα είναι πρότυπο γνωστής ακρίβειας, ανιχνευόμενης σε εθνικά ή διεθνή πρότυπα και το άλλο άγνωστης ακρίβειας. Με τη σύγκριση αυτή βαθμολογείται το υπό έλεγχο όργανο ή συσκευή ή διαπιστώνεται ή επαληθεύεται ή επαναφέρεται με ρύθμιση η ακρίβειά του [12].

Η διαδικασία διακρίβωσης έπεται της διαδικασίας βαθμονόμησης η οποία είναι η πρωτοβάθμια διαδικασία ρύθμισης ενός οργάνου ή μιας συσκευής μέτρησης σύμφωνα με το πρότυπο αναφοράς. Η βαθμονόμηση γίνεται από τον κατασκευαστή ενώ η διακρίβωση από ανεξάρτητους φορείς. Στην Ελλάδα ο επίσημος φορέας έκδοσης πιστοποιητικών διακρίβωσης, ανάμεσα στις πολλές υπηρεσίες που προσφέρει, είναι το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ) και υπάγεται στο Εθνικό Σύστημα Υποδομών Ποιότητας (ΕΣΥΠ).

Με άλλα λόγια, η διακρίβωση είναι ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ των τιμών μίας ποσότητας όπως αυτή προσδιορίζεται από ένα πρότυπο αναφοράς και των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από τις ενδείξεις του υπό διακρίβωση οργάνου ή συστήματος. Ο προσδιορισμός αυτής της σχέσης (και της διόρθωσης στην ένδειξη του υπό διακρίβωση οργάνου) πραγματοποιείται με την χρήση κατάλληλης μετρητικής μεθόδου και συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της μέτρησης.

Στην παρούσα εργασία η μετρητική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων (ΜΕΤ), τόσο για την επαλήθευση της σχέσης των πειραματικών μετρήσεων όσο και για την επαναφορά της ακρίβειας του αισθητήρα υπερήχων.

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου υπό συγκεκριμένη θερμοκρασία με πρότυπο αναφοράς μία μετρητική ταινία μήκους 2 μέτρων. Ο αισθητήρας παρέμεινε σταθερός κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ενώ τα αντικείμενα στόχευσης τοποθετούνταν με ακρίβεια χιλιοστού του μέτρου κάθετα στη διεύθυνση στόχευσης του αισθητήρα.

### 3.3 Διαδικασία Πειραματικών Μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.2 η ταχύτητα του ήχου στο εναέριο περιβάλλον μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό έπρεπε να υπάρχει πρότερη γνώση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για τον ακριβή υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου, και, ιδανικά, η μετρούμενη θερμοκρασία να παραμείνει σταθερή έτσι ώστε να υπάρχει συσχέτιση των μετρήσεων και ορθή εξαγωγή της χαρακτηριστικής εξίσωσης.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κλιματιζόμενη αίθουσα στους 22°C . Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας θερμοκρασίας, η ένδειξη του οποίου κυμαινόταν στις τέσσερις διακριτές τιμές {20.97°C, 21.47°C, 21.97°C, 22.48°C} . Μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παρουσίασε η δεύτερη τιμή, οπότε επιλέχθηκε προσεγγιστικά η τιμή θερμοκρασίας  $T_c = 21.5^\circ C$  .

Η ταχύτητα του ήχου  $v_s$  διαμορφώθηκε ως εξής:

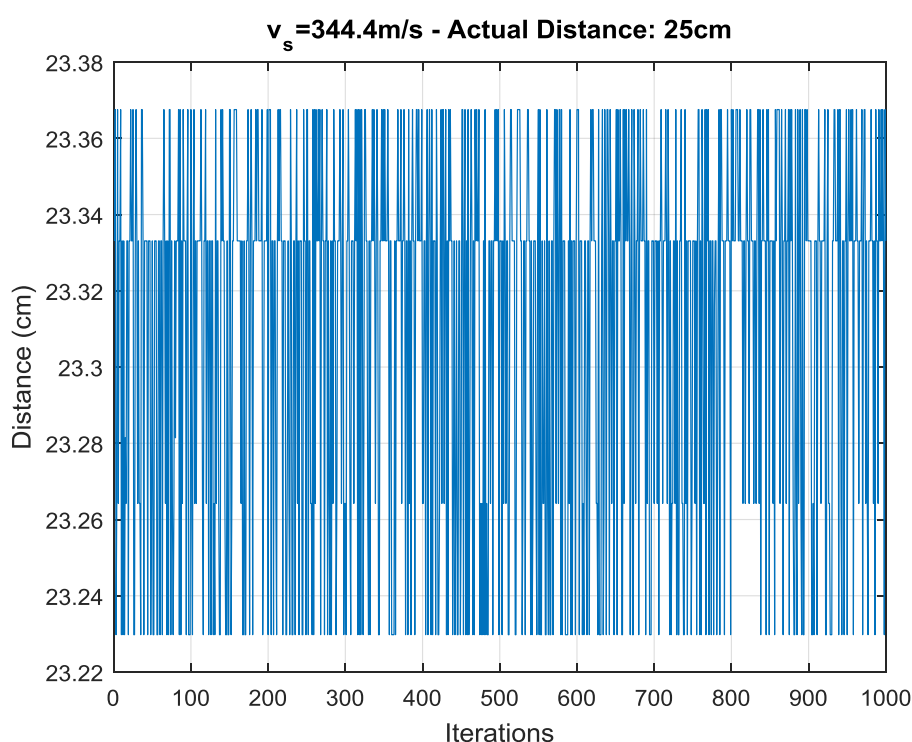
$$v_s = 331.5 + (0.6 \cdot T_c) = 331.5 + (0.6 \cdot 21.5) = 344.4 \quad m/s$$

Αρχικά, ένα λείο και επίπεδο αντικείμενο διαστάσεων 10x5cm τοποθετούνταν κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του υπερηχητικού παλμού και έπειτα εκτελούνταν η διαδικασία απόκτησης δεδομένων, η οποία επαναλαμβανόταν κάθε 5cm καλύπτοντας ολόκληρο το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα (25cm-450cm). Για κάθε γνωστή απόσταση ελήφθησαν δείγματα των 1000 επαναλήψεων και εξήχθησαν στατιστικά δεδομένα: μέσης τιμής, τυπικής απόκλισης και επικρατούσας τιμής.

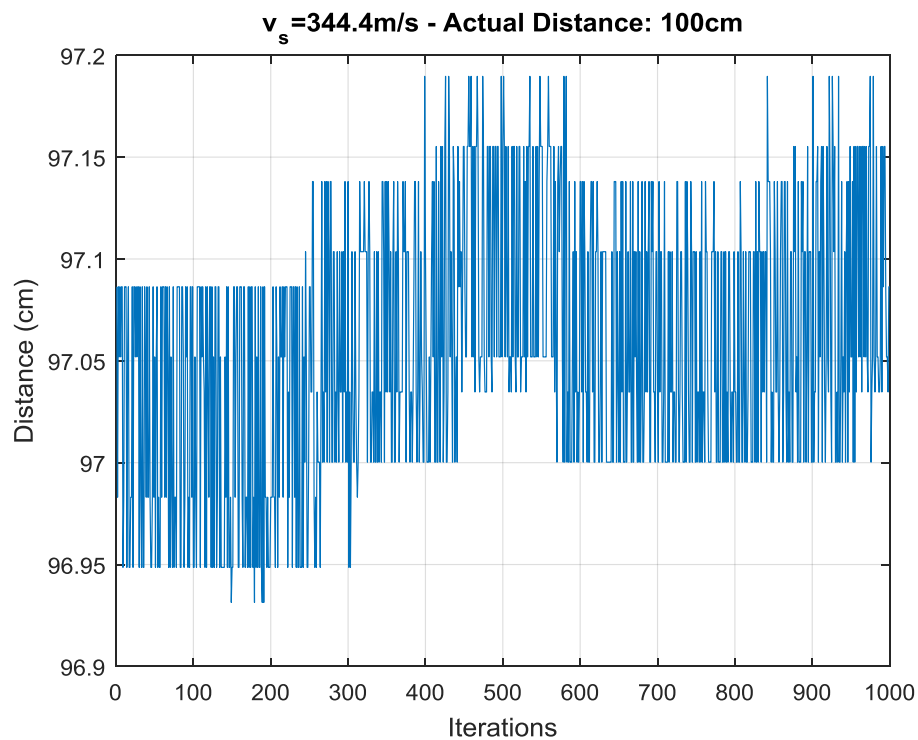
Η απόσταση των 25cm είναι το κάτω όριο του εύρους λειτουργίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Μολοταύτα, στις δοκιμαστικές μετρήσεις που έγιναν διαπιστώθηκε ότι ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει αντικείμενα και σε εγγύτερες αποστάσεις, θέτοντας το κάτω όριο στα 20cm.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.1, το σφάλμα το οποίο αναφέρθηκε πιο πάνω είναι ευδιάκριτο και σταθερό στο σύνολο των επαναλήψεων. Στο πρώτο τέταρτο του εύρους λειτουργίας του (25cm-100cm) παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η απόσταση αυξάνεται σταδιακά και το σφάλμα κατά απόλυτη τιμή, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.2 . Αυτή η παρατήρηση δίνει αρχικά την εντύπωση ότι πρόκειται για σφάλμα κέρδους.

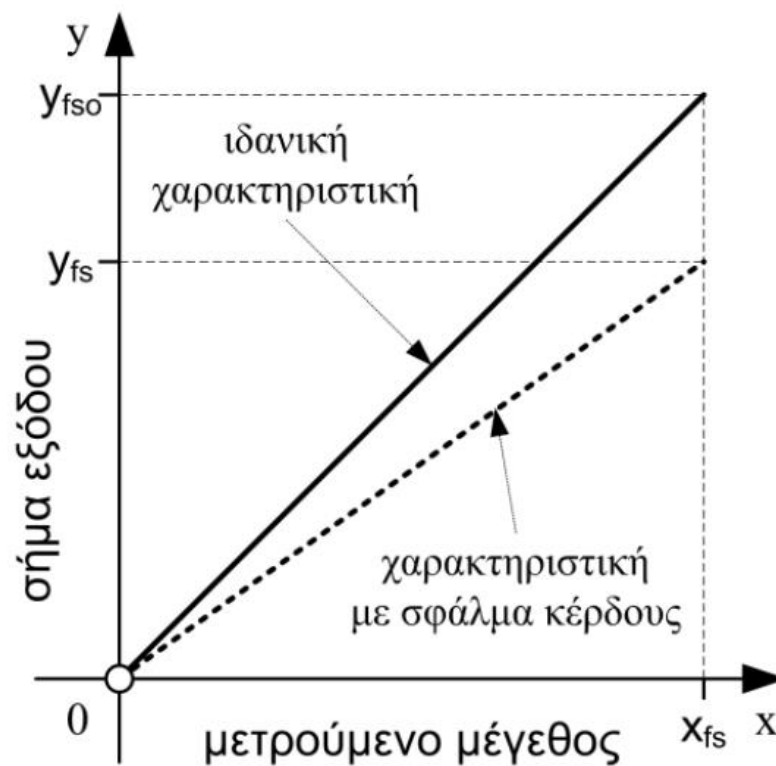
Το σφάλμα κέρδους (gain error) είναι η αλλαγή της κλίσης της ιδανικής χαρακτηριστικής (συνάρτηση μεταφοράς) του αισθητήρα [13], όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 .



*Διάγραμμα 3.1 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 25cm  
Επιφάνεια Αντικειμένου Στόχευσης Διαστάσεων 10x5cm*



Διάγραμμα 3.2 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 100cm  
Επιφάνεια Αντικειμένου Στόχευσης Διαστάσεων 10x5cm



Σχήμα 3.1 – Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα που παρουσιάζει Σφάλμα Κέρδους



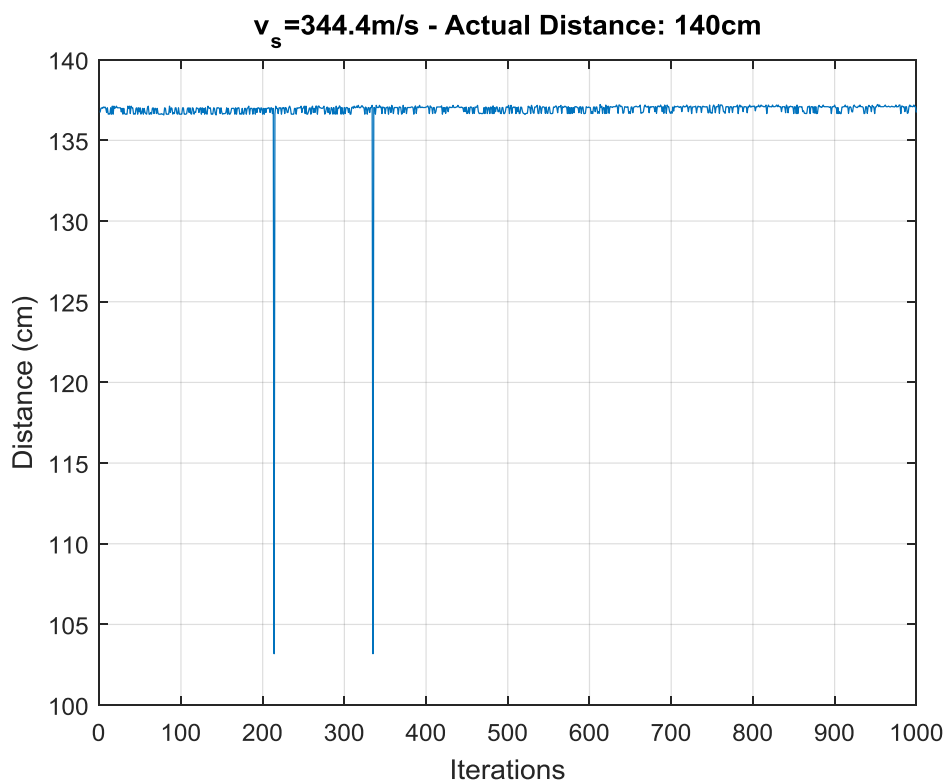
Από εκείνο το σημείο και έπειτα (100cm) η τιμή του σφάλματος δεν αυξάνει σημαντικά. Περιορίζεται ανάμεσα στα 2.5-3.5cm κατά μέσο όρο (μ.ό.), χωρίς να υπερβαίνει τα 4cm κατά μ.ό. σε συνθήκες απόλυτης ευστοχίας.

Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 140cm, παρατηρείται ότι κάποιες ελάχιστες μετρήσεις παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση συγκριτικά όχι μόνο με την πραγματικά μετρούμενη απόσταση αλλά και με το μέσο όρο των μετρήσεων, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.3 .

Μετά από παρατήρηση μερικών δειγμάτων, θεωρούνται ως αστοχία μετρήσεις οι οποίες αποκλίνουν  $\pm 20\text{cm}$  από την πραγματικά μετρούμενη απόσταση, δίνοντας μεγάλο περιθώριο για αποδεκτό σφάλμα μέτρησης.

Μεταγενέστερα, αν οι μετρήσεις με απόκλιση μεγαλύτερη των  $\pm 20\text{cm}$  επηρεάζουν αισθητά τη μέση τιμή των μετρήσεων, απορρίπτονται και η μέση τιμή υπολογίζεται εκ νέου.

Για αυτές τις μεγάλες αποκλίσεις ευθύνεται το μέγεθος της επιφάνειας του στόχου. Από την απόσταση των 240cm και έπειτα, το αντικείμενο στόχευσης διαστάσεων 10x5cm αντικαθίσταται με ένα επιφάνειας διαστάσεων 30x25cm, οπότε οι μεγάλες αποκλίσεις παύουν να εμφανίζονται.



*Διάγραμμα 3.3 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 140cm  
Επιφάνεια Αντικειμένου Στόχευσης Διαστάσεων 10x5cm*

Από την απόσταση των 300cm και έπειτα, ο αισθητήρας δυσκολεύεται να εντοπίσει το αντικείμενο στόχευσης με επιφάνεια διαστάσεων 30x25cm. Στη θέση του τοποθετείται αντικείμενο με επιφάνεια διαστάσεων 80x80cm.

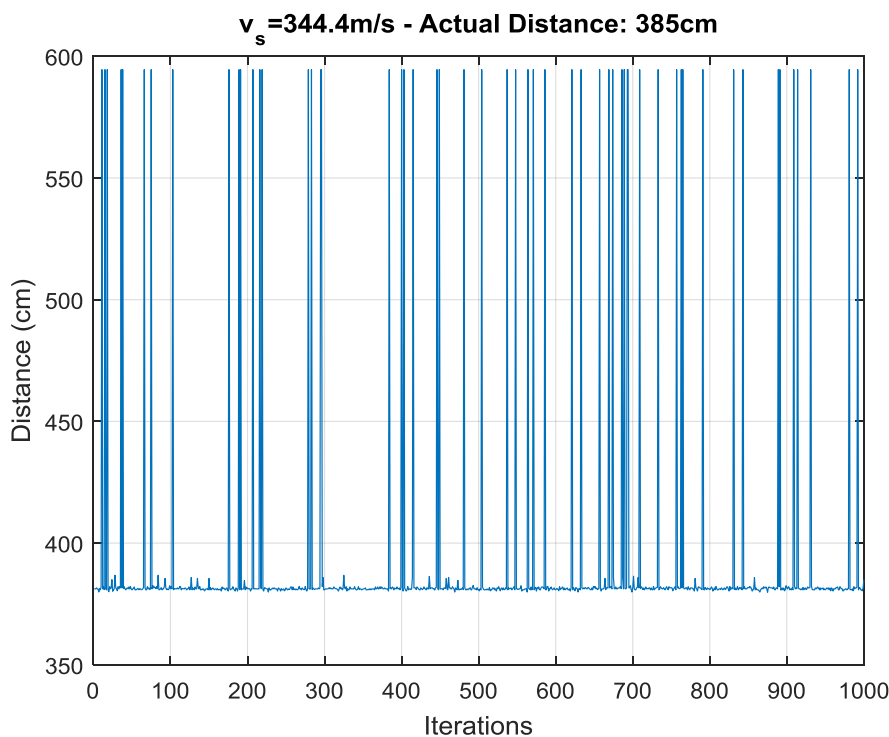
Η ευστοχία διατηρείται ως την απόσταση των 380cm, όπου η αστοχία γίνεται αισθητή και για πρώτη φορά επηρεάζει τη μέση τιμή των μετρήσεων, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.4.

Η απόρριψη των τιμών, όπως περιγράφεται παραπάνω, βρίσκει εφαρμογή στο φάσμα των αποστάσεων 385cm-450cm και τα στατιστικά δεδομένα τείνουν στα επίπεδα των αναμενόμενων τιμών.

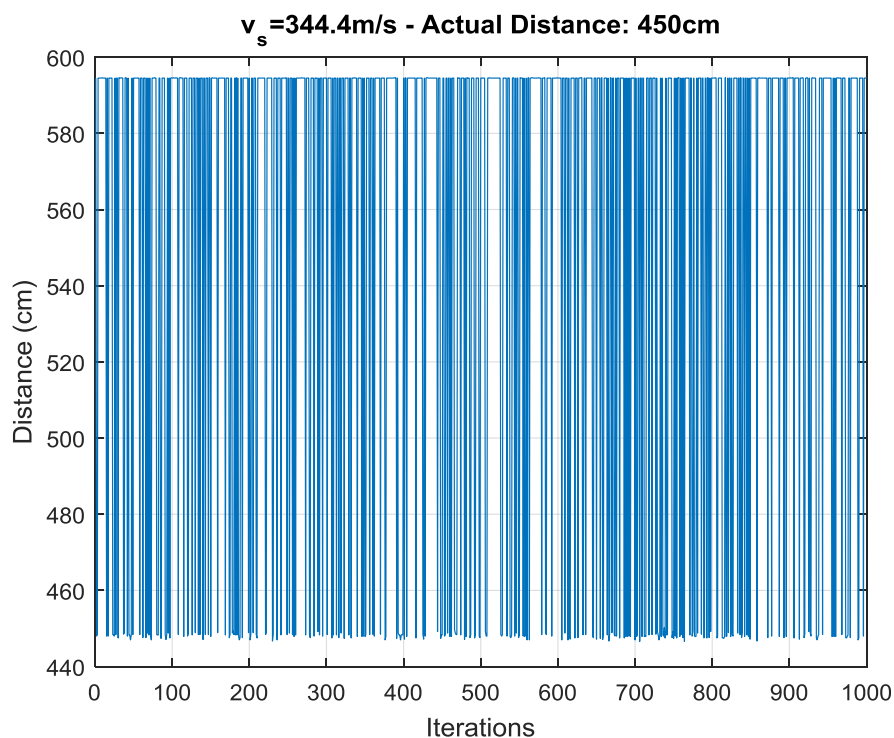
Με βάση τις μετρήσεις, ο αισθητήρας μετά τα 400cm αρχίζει να φτάνει τα όριά του καθώς τα επίπεδα αστοχίας είναι πολύ υψηλά, θέτοντας εν αμφιβόλω την ικανότητα του να λαμβάνει αξιόπιστες μετρήσεις, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.5 .

Παράδοξο μπορεί να χαρακτηριστεί το γεγονός πως στην απόσταση των 400cm ακριβώς παρουσιάζεται ευστοχία 100%, ενώ δείγματα των 1000 επαναλήψεων ελήφθησαν αρκετές φορές για λόγους αξιοπιστίας της εγκυρότητας του αποτελέσματος. Για τις εκατέρωθεν γειτονικές αποστάσεις η αστοχία βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα.

Όλα τα δεδομένα των μετρήσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 3.1-3.3 .



*Διάγραμμα 3.4 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 385cm  
Επιφάνεια Αντικειμένου Στόχευσης Διαστάσεων 80x80cm*



*Διάγραμμα 3.5 – Δείγμα 1000 Επαναλήψεων Πραγματικής Απόστασης 450cm  
Επιφάνεια Αντικειμένου Στόχευσης Διαστάσεων 80x80cm*

Πραγματική Μετρούμενη Απόσταση (cm)	Μέση Τιμή TOF/2 Δείγματος ( $\mu\text{s}$ )	Μέση Απόσταση Δείγματος (cm)	Τυπική Απόκλιση Μετρήσ. Δείγματος (cm)	Επικρατούσα Τιμή Δείγματος (cm)	Ποσοστό Αστοχίας% (Μέτρηση >Πραγμ $\pm 20\text{cm}$ )	Νέα Μέση Απόστ. (cm)
25	676	23.30	0.05	23.33	0%	-
26	704	24.26	0.05	24.31	0%	-
27	733	25.27	0.05	25.33	0%	-
28	762	26.24	0.05	26.27	0%	-
29	791	27.24	0.06	27.29	0%	-
30	819	28.22	0.05	28.18	0%	-
35	951	32.76	0.04	32.73	0%	-
40	1093	37.64	0.04	37.64	0%	-
45	1236	42.58	0.05	42.63	0%	-
50	1380	47.51	0.05	47.49	0%	-
55	1522	52.41	0.02	52.4	0%	-
60	1669	57.46	0.04	57.48	0%	-
65	1813	62.44	0.05	62.38	0%	-
70	1956	67.38	0.04	67.34	0%	-

*Πίνακας 3.1 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων 25cm-70cm  
Θερμοκρασία: 21.5°C – Ταχύτητα Ήχου:  $v_s = 344.4 \text{ m/s}$*

Πραγματική Μετρούμενη Απόσταση (cm)	Μέση Τιμή TOF/2 Δείγματος (μs)	Μέση Απόσταση Δείγματος (cm)	Τυπική Απόκλιση Μετρήσ. Δείγματος (cm)	Επικρατούσα Τιμή Δείγματος (cm)	Ποσοστό Αστοχίας% (Μέτρηση >Πραγμ ±20cm)	Νέα Μέση Απόστ. (cm)
75	2098	72.26	0.04	72.28	0%	-
80	2243	77.26	0.06	77.31	0%	-
85	2387	82.22	0.09	82.22	0%	-
90	2543	87.22	0.02	87.23	0%	-
95	2676	92.15	0.06	92.19	0%	-
100	2818	97.05	0.06	97	0%	-
105	2963	102.03	0.05	102.01	0%	-
110	3105	106.91	0.17	106.97	0%	-
115	3249	111.89	0.29	111.93	0%	-
120	3394	116.89	0.07	116.87	0%	-
125	3539	121.87	0.61	121.79	0%	-
130	3683	126.82	0.17	126.75	0%	-
135	3833	132	0.21	132.23	0%	-
140	3974	136.87	1.52	137.08	0.2%	-
145	4123	141.99	0.16	142.09	0%	-
150	4266	146.91	1.37	146.98	0.1%	-
155	4412	151.94	0.16	152	0%	-
160	4556	156.89	0.15	156.96	0%	-
165	4692	161.60	3.2	161.81	0.3%	-
170	7838	166.62	2.84	166.74	0.2%	-
175	4984	171.64	2.17	171.75	0.1%	-
180	5131	176.7	0.11	176.74	0%	-
185	5273	181.59	2.48	181.61	0.1%	-
190	5416	186.53	2.64	186.52	0.1%	-
195	5566	191.68	0.17	191.57	0%	-
200	5705	196.47	4.17	196.58	0.2%	-
205	5846	201.35	0.19	201.5	0%	-
210	6002	206.71	0.19	206.86	0%	-
215	6149	211.78	0.18	211.73	0%	-
220	6291	216.66	0.2	216.67	0%	-
225	6440	221.79	0.65	221.75	0.1%	-
230	6585	226.77	4.08	227.16	0.3%	-
235	6731	231.82	0.99	232.03	0.1%	-
240	6879	236.91	0.27	236.89	0%	-
245	7025	241.93	0.29	241.90	0%	-
250	7172	247	0.32	246.86	0%	-

Πίνακας 3.2 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων 75cm-250cm  
Θερμοκρασία: 21.5°C – Ταχύτητα Ήχου:  $v_s = 344.4m/s$

Πραγματική Μετρούμενη Απόσταση (cm)	Μέση Τιμή TOF/2 Δείγματος (μs)	Μέση Απόσταση Δείγματος (cm)	Τυπική Απόκλιση Μετρήσης Δείγματος (cm)	Επικρατούσα Τιμή Δείγματος (cm)	Ποσοστό Αστοχίας% (Μέτρηση >Πραγμ ±20cm)	Νέα Μέση Απόστ. (cm)
255	7316	251.97	0.28	251.75	0%	-
260	7455	256.76	0.3	256.68	0%	-
265	7603	261.85	0.28	261.77	0%	-
270	7756	267.1	0.29	267.09	0%	-
275	7883	271.5	0.26	271.23	0%	-
280	8025	276.39	0.31	276.19	0%	-
285	8170	281.37	0.3	281.2	0%	-
290	8319	286.49	0.28	286.23	0%	-
295	8465	291.54	0.3	291.55	0%	-
300	8607	296.42	0.33	296.44	0%	-
305	8750	301.35	0.28	301.4	0%	-
310	8885	305.99	8.17	306.4	0%	-
315	9036	311.19	0.32	311.1	0%	-
320	9188	316.45	0.4	316.2	0%	-
325	9329	321.28	0.4	321.4	0%	-
330	9479	326.47	0.37	326.4	0%	-
335	9642	332.05	8.31	332	0.1%	-
340	9775	336.66	0.36	336.8	0%	-
345	9935	342.18	0.35	342.1	0%	-
350	10067	346.72	0.34	346.8	0%	-
355	10229	352.28	0.37	352.6	0%	-
360	10377	357.39	0.34	357.4	0%	-
365	10521	362.33	0.38	362.5	0%	-
370	10656	366.99	0.75	366.6	0%	-
375	10834	373.10	0.67	373.3	0%	-
380	10999	378.82	0.87	378.9	0%	-
385	11413	393.09	48	381.2	5.5%	381.36
390	11551	397.79	46.56	387	5.3%	386.78
395	12568	432.83	81.13	594.5	20.1%	392.16
400	11529	397.07	0.47	397.1	0%	-
410	15103	520.14	90.99	594.5	60%	408.81
420	16316	561.93	68.4	594.5	81.5%	418.43
430	17161	591.03	23.73	594.5	97.9%	429.05
440	15230	524.5	78.05	594.5	55.4%	437.55
450	16046	552.61	66.22	594.5	71.4%	448.04

Πίνακας 3.3 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων 245cm-450cm

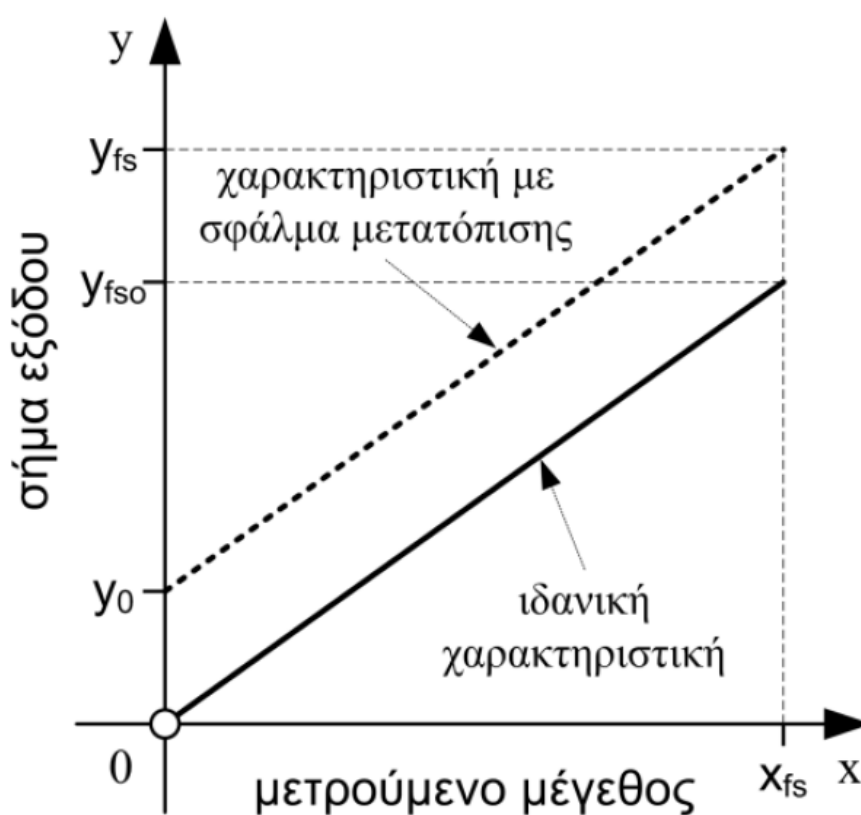
Θερμοκρασία: 21.5°C – Ταχύτητα Ήχου:  $v_s = 344.4 \text{ m/s}$

Παρατηρώντας τους πίνακες 3.1-3.3 προκύπτει η χονδρική διαπίστωση ότι, συνολικά, η κατά μ.ό. απόκλιση που παρουσιάζεται στις μετρήσεις εμπίπτει στην κατηγορία του σφάλματος μετατόπισης, καθώς τα κατά μ.ό. σφάλματα των μετρήσεων των αποστάσεων κοντά στο άνω όριο του εύρους λειτουργίας δεν εμφανίζονται κατά αναλογία πολλαπλάσια των αντίστοιχων κοντά στο κάτω όριο:

$$|(\text{Πραγματική Μετρ. Απόσταση}) - (\text{Μέση Απόσταση Δείγματος})| = \text{Σφάλμα}$$

- Κάτω Όριο:  $|25\text{cm} - 23.3\text{cm}| = 1.7\text{cm}$  και  $|26\text{cm} - 24.26\text{cm}| = 1.74\text{cm}$
- Άνω Όριο:  $|440\text{cm} - 437.55| = 2.45\text{cm}$  και  $|450\text{cm} - 448.04| = 1.96\text{cm}$

Το σφάλμα μετατόπισης (offset error) είναι η μετατόπιση της χαρακτηριστικής χωρίς αλλαγή της κλίσης [13], όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 .

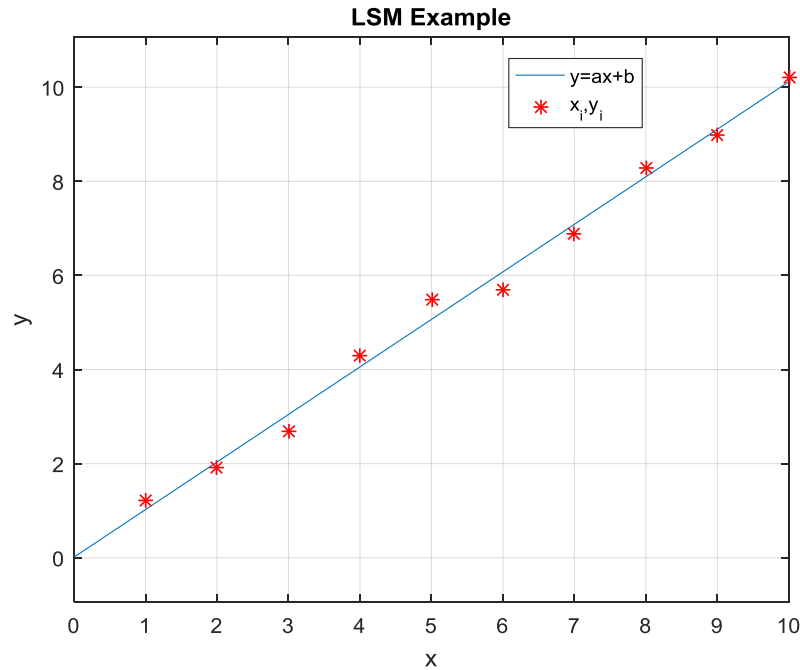


Σχήμα 3.2 – Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα που παρουσιάζει Σφάλμα Μετατόπισης

Για την επιστημονική τεκμηρίωση της παραπάνω διαπίστωσης, χρησιμοποιείται η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων.

### 3.4 Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

Η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων (MET) χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό της μαθηματικής σχέσης που περιγράφει ένα φαινόμενο και διέπει ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3 .



Σχήμα 3.3 – Παράδειγμα χρήσης της MET

Η εξίσωση  $y = a + bx$  προκύπτει από τη MET, τα σημεία  $\{x_i, y_i\}$  είναι πειραματικά δεδομένα

Πριν αναλυθεί η μέθοδος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ανακάλυψη της MET έχει προκαλέσει την πιο διάσημη διαμάχη ‘πατρότητας’ στην ιστορία της στατιστικής. Ο Γάλλος μαθηματικός A.M. Legendre (1752-1833) τη δημοσίευσε πρώτος το 1805 ενώ ο Γερμανός μαθηματικός C.F. Gauss (1777-1855) το 1809, ισχυριζόμενος ότι την χρησιμοποιούσε ήδη από το 1795 [14].

Έστω  $n$  σημεία  $\{x_i, y_i\}$ , όπου  $i = 1, 2, \dots, n$ , τα οποία είναι αποτέλεσμα καταγραφής πειραματικών μετρήσεων και είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι συνδέονται με γραμμική σχέση.

Σκοπός της μεθόδου είναι να βρεθεί η βέλτιστη ευθεία της μορφής  $y = ax + b$ , όπου  $a, b \in \mathbb{R}$ , η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων των σημείων από την ευθεία αυτή [15]. Με άλλα λόγια, να βρεθούν οι αριθμοί  $a, b$  που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση:

$$E(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \quad (3.1)$$

Η ελάχιστη τιμή της  $E(a, b)$  μπορεί να βρεθεί υπολογίζοντας τις μερικές παραγώγους της ως προς  $a$  και ως προς  $b$  και εξισώνοντάς τις με το μηδέν:

$$\frac{dE}{da} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - ax_i - b) = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{dE}{db} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0 \quad (3.3)$$

Άρα οι (3.2) και (3.3) γίνονται:

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - ax_i - b) = 0 \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0 \quad (3.5)$$

Αναπτύσσοντας τις (3.4) και (3.5) προκύπτει:

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.6)$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.7)$$

Λύνοντας ως προς  $a$  προκύπτει:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.8)$$

Ενώ το  $b$  δίνεται από τη σχέση:

$$b = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i) \quad (3.9)$$

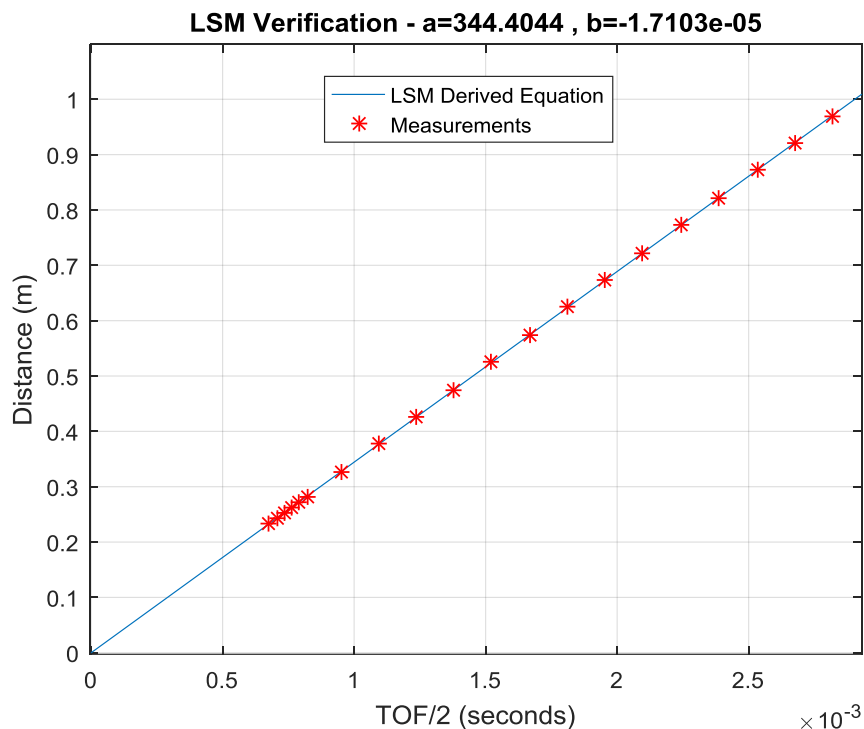
Στην παρούσα εργασία η μέθοδος χρησιμοποιείται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, πρώτα για την επαλήθευση της σχέσης των πειραματικών μετρήσεων και έπειτα για τη ρύθμιση του σφάλματος που εμφανίζεται με βάση τις πραγματικά μετρούμενες αποστάσεις.

Στην πρώτη υλοποίηση, η ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$  είναι ο χρόνος πτήσης του υπερηχητικού κύματος διαιρεμένος κατά δύο  $x = TOF / 2$  και η εξαρτημένη μεταβλητή  $y$  είναι η μετρούμενη απόσταση  $y = d$ .

Ο συντελεστής  $a$  είναι η ταχύτητα του ήχου στο εναέριο περιβάλλον  $v_s$  και με την υλοποίηση της MET επαληθεύτηκε με τιμή  $a = v_s = 344.4 \text{ m/s}$ . Η σταθερά  $b$  είναι το αμελητέο σφάλμα μετατόπισης των μετρήσεων ως προς τη θεωρητική σχέση που συνδέει



τις έννοιες της ταχύτητας, του χρόνου και της απόστασης και τείνει στο μηδέν με τιμή  $b = -0.000017$ , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.6 .

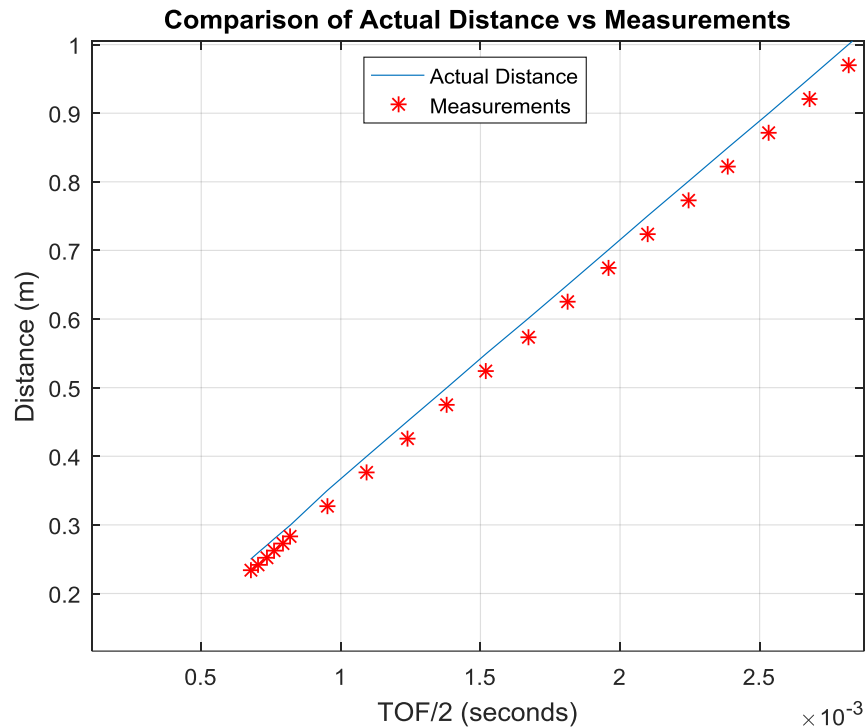


*Διάγραμμα 3.6 – Επαλήθευση της σχέσης των πειραματικών μετρήσεων με τη MET*

Στη δεύτερη περίπτωση, όπου ουσιαστικά και τυπικά επιχειρείται η εκ νέου ρύθμιση του οργάνου μέτρησης, αυτό που αλλάζει στα δεδομένα είναι η εξαρτημένη μεταβλητή  $y$  η οποία παίρνει τις τιμές της πραγματικά μετρούμενης απόστασης ενώ η σταθερά  $b$  αναμένεται να διορθώσει το σφάλμα μετατόπισης.

### 3.5 Ρύθμιση

Πιο συγκεκριμένα αυτό το οποίο αναμένεται να πραγματοποιήσει η μέθοδος, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.7, είναι να υπολογισθεί μια προστιθέμενη σταθερά  $b$  τέτοια ώστε οι χρόνοι των πειραματικών μετρήσεων να αντιστοιχηθούν στις πραγματικά μετρούμενες αποστάσεις.



Διάγραμμα 3.7 – Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων προς πραγματικές αποστάσεις

Η εξίσωση που προκύπτει από την υλοποίηση της MET με τα νέα δεδομένα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.8, δίνει μια πάρα πολύ ικανοποιητική προσέγγιση της ταχύτητας του ήχου με  $a = v_s = 344.6 \text{ m/s}$ . Η απόκλιση που παρουσιάζεται στο συντελεστή  $a$  είναι σε επιτρεπτά επίπεδα και δεν είναι ικανή να επηρεάσει τη θεωρητική σχέση υπολογισμού της ταχύτητας του ήχου  $v_s = 331.5 + (0.6 \cdot T_c)$ .

Η σταθερά  $b$  που προκύπτει βρίσκεται πολύ κοντά στα σφάλματα που εμφανίζονται στις πειραματικές μετρήσεις (παρατηρώντας τους πίνακες 3.1-3.3) με τιμή  $b = 0.0274 \text{ m}$ .

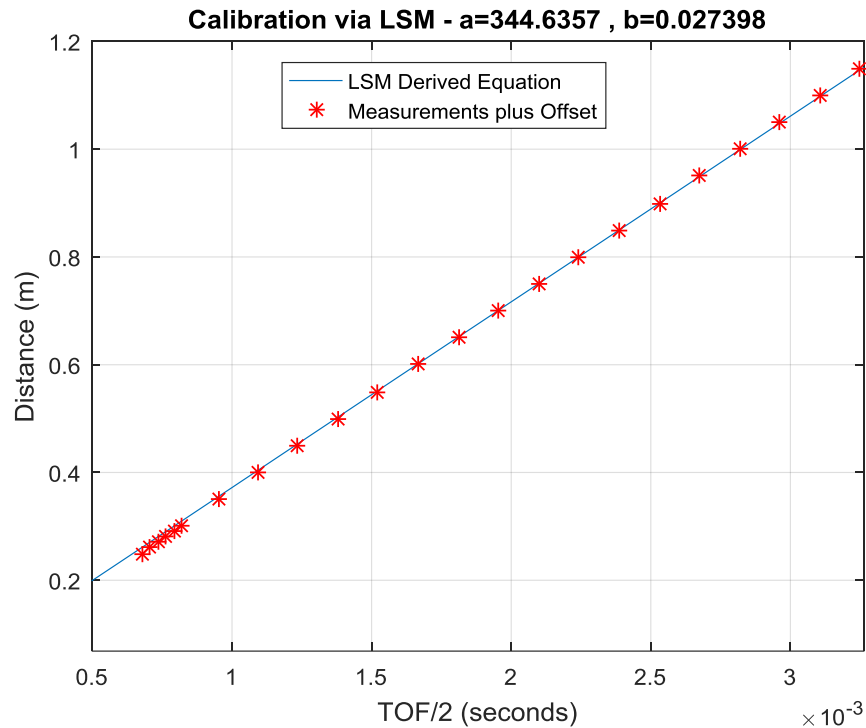
Εν ολίγοις, η εξίσωση ρύθμισης που προέκυψε είναι η:

$$y = 344.6x + 0.0274 \quad (3.10)$$

Η οποία, από θεωρία, μεταφράζεται σε:

$$d = v_s (TOF / 2) + 0.0274 \text{ m} \quad (3.11)$$

Οι νέες πειραματικές μετρήσεις μετά τη ρύθμιση αλλά και απόρριψη των αστοχιών, όπως ορίστηκε παραπάνω, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.



Διάγραμμα 3.8 – Εξίσωση ρύθμισης που προκύπτει από τη MET

Πραγματική Μετρούμενη Απόσταση (cm)	Μέση Τιμή TOF/2 (microsec)	Μέση Απόσταση Δείγματος (cm)	Τυπική Απόκλιση Μετρήσ. Δείγματος (cm)	Επικρατούσα Τιμή Δείγματος (cm)	Μέση Απόστ. Πριν τη Ρύθμιση (cm)	Πραγματική- μ.ό. Μετρήσεων  =Σφάλμα (cm)
25	667	25.71	0.05	25.8	23.30	0.71
50	1370	49.91	0.05	49.9	47.51	0.09
75	2100	75.05	0.15	75.1	72.26	0.05
100	2834	100.32	0.17	100.2	97.05	0.32
125	3529	124.26	0.07	124.3	121.87	0.74
150	4247	149	0.06	149	146.91	1
175	4963	173.67	0.06	173.7	171.64	1.33
200	5695	198.87	0.17	199	196.47	1.13
225	6430	224.17	0.25	224	221.79	1.83
250	7161	249.36	0.23	249.6	247	0.64
275	7898	274.73	0.28	274.7	271.5	0.27
300	8614	299.41	0.33	299.4	296.42	0.59
325	9332	324.14	0.28	324.3	321.28	0.86
350	10078	349.85	0.37	349.7	246.72	0.15
375	10810	375.03	0.56	375.1	371.1	0.03
400	11551	400.56	1.01	400.6	397.07	0.56
420	12116	420.01	0.74	419.6	418.43	0.01
440	12714	440.6	1.1	440.8	437.55	0.6

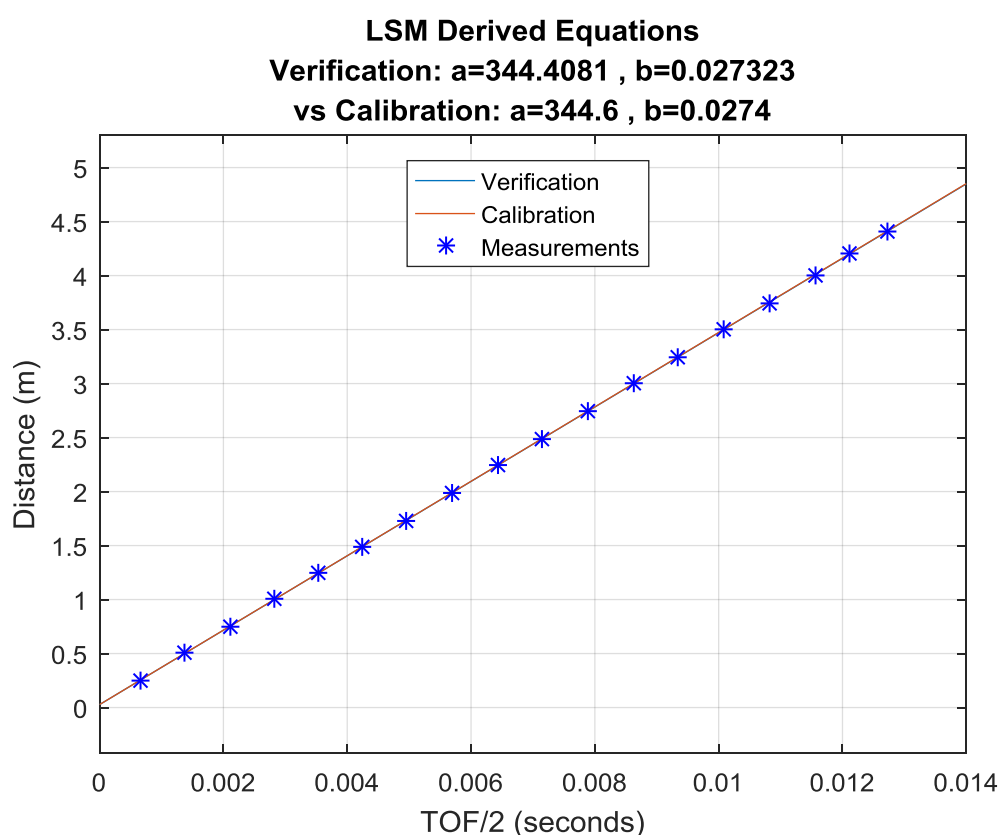
Πίνακας 3.4 – Στατιστικά Στοιχεία Μετρήσεων μετά τη ρύθμιση από τη MET

Θερμοκρασία:  $21.5^{\circ}\text{C}$  – Ταχύτητα Ήχου:  $v_s = 344.4\text{ m/s}$

Διαπιστώνεται ότι οι πειραματικές μετρήσεις μετά τη βαθμονόμηση με χρήση της MET εμφανίζουν πολύ μικρότερο σφάλμα από τις αντίστοιχες αρχικά μη-επεξεργασμένες.

Συγκεκριμένα, ο μέσος όρος των σφαλμάτων, όπως φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.4, σε ιδανικές συνθήκες, δηλαδή στοχεύοντας λείες, επίπεδες, μεγάλες επιφάνειες, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης των ηχητικών κυμάτων και χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το σφάλμα από τις αστοχίες, υπολογίζεται στα  $0.6\text{cm}$ , τιμή η οποία υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα.

Επαληθεύοντας με τη MET τις πειραματικές μετρήσεις μετά τη ρύθμιση, οι συντελεστές που προκύπτουν είναι  $a = 344.4$  και  $b = 0.0273$ , οι οποίοι σχεδόν ταυτίζονται με αυτούς της εξίσωσης ρύθμισης με  $a = 344.6$  και  $b = 0.0274$ , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.9, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.



Διάγραμμα 3.9 – Επαλήθευση της εξίσωσης ρύθμισης με χρήση της MET

# 4.

## Αρχιτεκτονική και Λειτουργία του Συστήματος

---

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των εξαρτημάτων που αποτελούν τη συσκευή τύπου SONAR, της μεταξύ τους συνδεσμολογίας με παρουσίαση μπλοκ διαγράμματος (block diagram) και της αλγοριθμικής αλληλεπίδρασής τους με διαγράμματα ροής (flowchart diagram) η οποία είναι απαραίτητη για την λειτουργία του συστήματος.

Κανένα εξάρτημα δεν είναι προϊόν πρωτογενούς σχεδίασης στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Όλα τα εξαρτήματα είναι προϊόντα του εμπορίου τα οποία μπορούν να αποκτηθούν από Έλληνα προμηθευτή ή από το εξωτερικό.

Η σχεδίαση έχει ως εξής. Χρησιμοποιείται αισθητήρας θερμοκρασίας για τη μέτρησή της και τον ακριβή υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου, έτσι ώστε να αποφευχθεί ενδεχόμενο σφάλμα κέρδους. Οι δύο αισθητήρες θερμοκρασίας στερεώνονται πάνω στα σερβομοτέρ τα οποία τοποθετούνται έτσι ώστε το ένα να εξυπηρετεί τη σάρωση σε οριζόντιο άξονα και το άλλο σε κατακόρυφο. Με την κίνηση των αισθητήρων πάνω στα σερβομοτέρ επιχειρείται η αντικατάσταση των συστοιχιών αισθητήρων όπως στις συσκευές τύπου SONAR. Όλα τα προαναφερόμενα συνδέονται σε πλακέτα με μικροελεγκτή που επικοινωνεί με Η/Υ.

### 4.2 Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Αρχικά περιγράφονται τα εξαρτήματα και έπειτα ακολουθεί η περιγραφή της συνδεσμολογίας.

### 4.2.1 Πλακέτα Μικροεπεξεργαστή

Προς ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα εμπορίου NHDuino Uno η οποία είναι κλώνος της πολύ δημοφιλούς πλακέτας Arduino Uno [16].

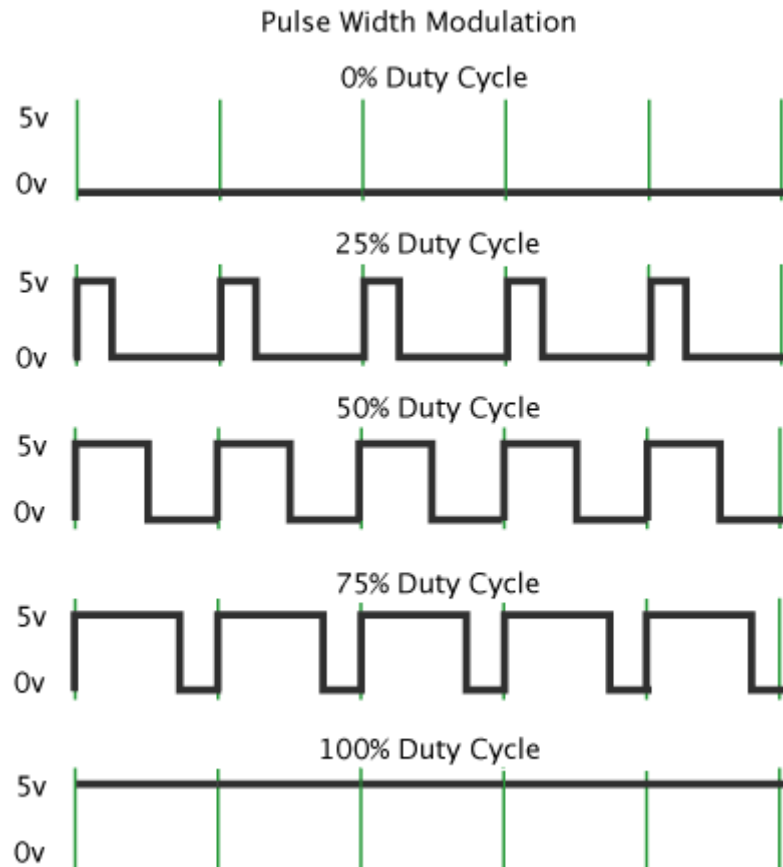
Βασίζεται στον ATmega328P της Atmel [17], έναν 8-bit μικροελεγκτή (μP) της οικογένειας AVR εκτεταμένης RISC αρχιτεκτονικής στα 16MHz με 32KB εσωτερική μνήμη. Η πλακέτα διαθέτει 14 ψηφιακές θύρες εισόδου/εξόδου, 6 εκ των οποίων είναι τύπου PWM, 6 αναλογικές θύρες εισόδου και θύρα Mini USB B-Type για διασύνδεση με Η/Υ.



Εικόνα 4.1 – Uno Board

Η Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (PWM, Pulse Width Modulation) είναι μια τεχνική με την οποία γίνεται εφικτό αναλογικά αποτελέσματα να επιτευχθούν με ψηφιακά μέσα [18] [19].

Ένας PWM παλμός είναι ένας ψηφιακός παλμός του οποίου η συχνότητα είναι σταθερή αλλά η ενεργή του κατάσταση (duty cycle, 'ON' ή 'HIGH') μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα στο 0% και στο 100% του κύκλου ρολογιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 .



Σχήμα 4.1 – Διαγράμματα Χρονισμού Διαφορετικών PWM Διαμορφώσεων

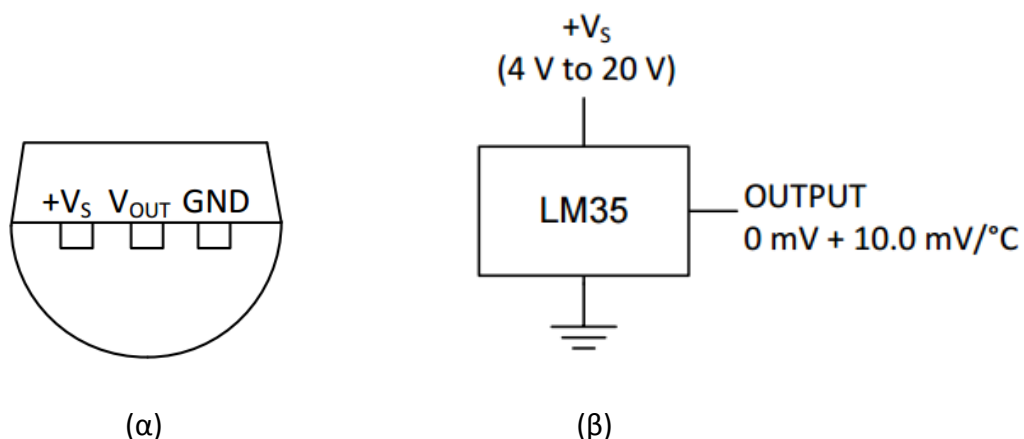
Η υλοποίηση των προγραμμάτων γίνεται στη γλώσσα προγραμματισμού Arduino η οποία είναι βασισμένη στο programming framework Wiring [20] (πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα υλοποιημένη σε C/C++).

#### 4.2.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας επιλέχθηκε ο αισθητήρας LM35DZ της Texas Instruments. Είναι αισθητήρας ολοκληρωμένου κυκλώματος με αναλογική τάση εξόδου και είναι βαθμονομημένος στην κλίμακα Κελσίου.



Εικόνα 4.2 – Ο αισθητήρας θερμοκρασίας LM35DZ



Σχήμα 4.2 – Αισθητήρας Θερμοκρασίας LM35DZ,  
Κάτοψη (α) και Συνδεσιμότητα (β)

Διαθέτει τρεις ακροδέκτες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, τροφοδοσίας ( $+V_s$ ) με τάση εισόδου 4-20Volt, γείωσης ( $GND$ ) και αναλογικής τάσης εξόδου ( $V_{out}$ ) με συντελεστή γραμμικής κλίμακας στα  $+10\text{mV}/^\circ\text{C}$ .

Χαρακτηριστικά του LM35DZ [21]:

- Βαθμονόμηση στην κλίμακα Κελσίου
- Συντελεστής γραμμικής κλίμακας:  $+10\text{mV}/^\circ\text{C}$
- Ακρίβεια:  $0.5^\circ\text{C}$  (στους  $25^\circ\text{C}$ )
- Εύρος λειτουργίας:  $-55^\circ\text{C}$  έως  $150^\circ\text{C}$
- Τάση εισόδου: 4 V έως 20 V
- Κατανάλωση ρεύματος: 60  $\mu\text{A}$

### 4.2.3 Σερβομοτέρ (Servo Motor)

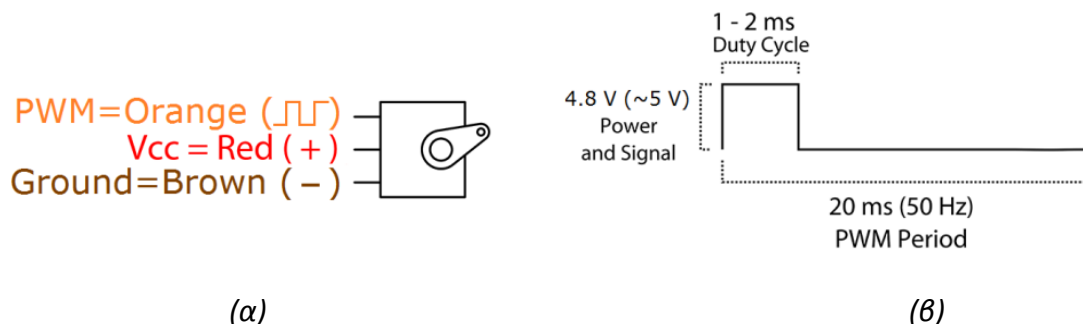
Για τη γωνιακή περιστροφή χρησιμοποιήθηκε το πολύ δημοφιλές σερβομοτέρ SG90 Micro Servo της Tower Pro. Είναι πολύ μικρό σε διαστάσεις αλλά αποδίδει μεγάλη ισχύ κατά αναλογία με το μέγεθός του.



Εικόνα 4.3 – SG90 Tower Pro Micro Servo



Διαθέτει τρεις ακροδέκτες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, τροφοδοσίας ( $V_{cc}$ ), γείωσης ( $Ground$ ), και ψηφιακού σήματος ελέγχου (PWM).



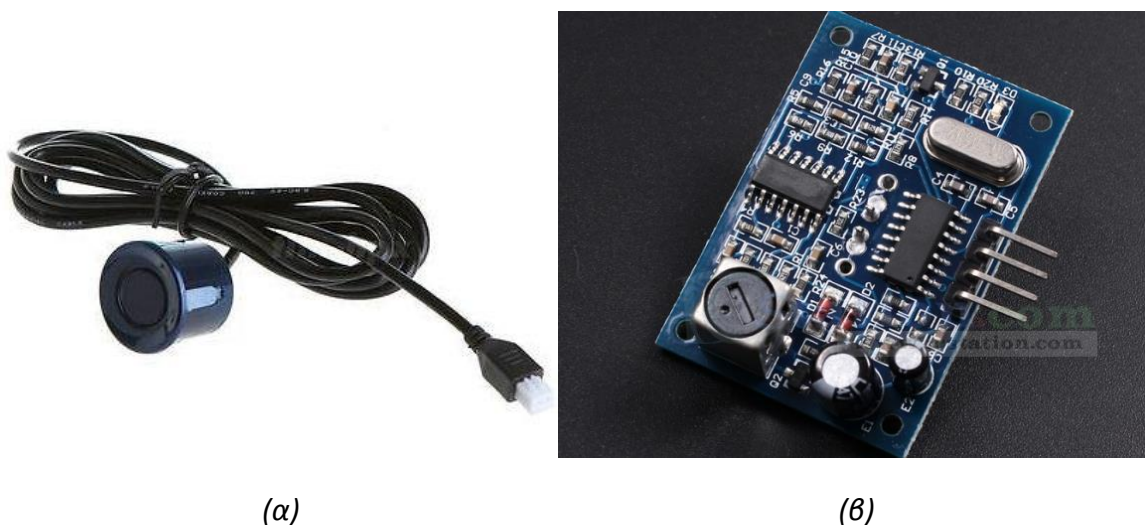
Σχήμα 4.3 – Πάνω όψη (α) και διάγραμμα χρονισμού (β) του SG90

Χαρακτηριστικά του SG90 [22]:

- Βάρος: 9 g
- Διαστάσεις: 22.2 x 11.8 x 31 mm
- Stall Torque: 1.8 kg/cm
- Ταχύτητα λειτουργίας: 0.1 s/60 degree
- Τάση εισόδου: 4.8 V (~5V)
- Εύρος νεκρής ζώνης: 10  $\mu$ s
- Θερμοκρασία λειτουργίας: 0 °C – 55 °C

#### 4.2.4 Αισθητήρας Υπερήχων

Το βασικό πλεονέκτημα της μονάδας υπερηχητικού αισθητήρα JSN-SR04T είναι η συμβατότητα που παρέχει με την πλακέτα Uno. Είναι σε μορφή module και αποτελείται από δύο εξαρτήματα που ενώνονται με ένα ομοαξονικό καλώδιο μήκους 2 μέτρων, την πλακέτα σύνδεσης με το Uno και τον αισθητήρα ο οποίος είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (Π/ΗΚ).





(γ)

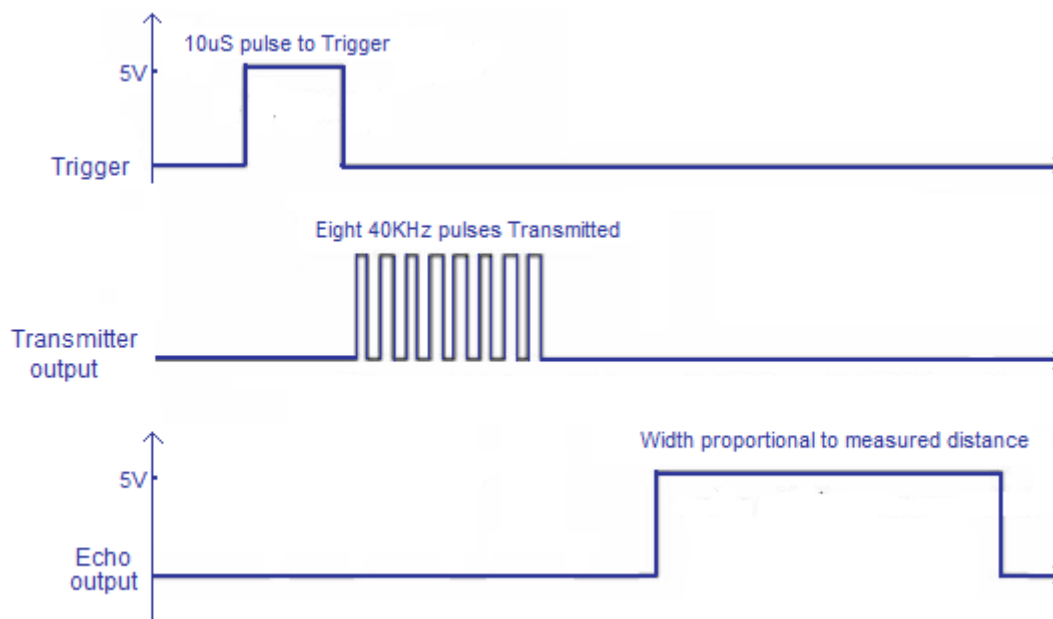
Εικόνα 4.4 – Μονάδα Υπερηχητικού Αισθητήρα JSN-SR04T

Αισθητήρας συνδεδεμένος με ομοαξονικό καλώδιο 2m (α), Πίσω όψη της πλακέτας σύνδεσης (β), Μπροστά όψη της πλακέτας σύνδεσης (γ)

Διατίθενται τέσσερις ακροδέκτες από την πλακέτα σύνδεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4(γ), τροφοδοσίας (5V), γείωσης (GND), δέκτη ενεργοποίησης του υπερηχητικού παλμού (Rx – Trig) και εκπομπού επιστροφής του υπερηχητικού παλμού (Tx – Echo).

Η πλακέτα σύνδεσης επιτελεί δύο λειτουργίες. Σε πρώτη φάση λειτουργεί ως μετατροπέας του ψηφιακού σήματος ενεργοποίησης (trigger) που δέχεται από τον μΡ σε αναλογική τάση (Digital to Analog Converter - DAC) για τις ανάγκες του Π/ΗΚ. Στον Π/ΗΚ εφαρμόζεται η ηλεκτρική τάση που προέρχεται από τον DAC, στις γεωμετρικές διαστάσεις του οποίου (Π/ΗΚ) δημιουργείται μια στιγμιαία ελαστική παραμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό εκπέμπεται ένα υπερηχητικό κύμα 8 παλμών των 40KHz, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα Χρονισμού 4.4, ως αποτέλεσμα του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Εν ολίγοις, στην πρώτη φάση ο αισθητήρας λειτουργεί ως πομπός υπερηχητικού κύματος.

Σε δεύτερη φάση, λειτουργεί ως δέκτης. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δρα ευθέως και η στιγμιαία ελαστική παραμόρφωση που δημιουργείται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Π/ΗΚ έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αναλογικής τάσης στα άκρα του. Η αναλογική αυτή τάση μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converter - ADC) από την πλακέτα σύνδεσης για τη μετάδοσή του στον μΡ, όπου υπολογίζεται ο χρόνος πτήσης (TOF) του υπερηχητικού κύματος.



Σχήμα 4.4 – Διάγραμμα Χρονισμού του JSN-SR04T

Χαρακτηριστικά του JSN-SR04T:

- Τάση λειτουργίας: DC 5V
- Κατανάλωση ρεύματος: 30mA
- Συχνότητας ακουστικής εκπομπής: 40kHz
- Περιοχή λειτουργίας: 0.25m-4.5m
- Διακριτική ικανότητα:  $\pm 0.5\text{cm}$
- Γωνία εκπομπής:  $< 50^\circ$
- Θερμοκρασία λειτουργίας:  $-10 \sim 70^\circ\text{C}$

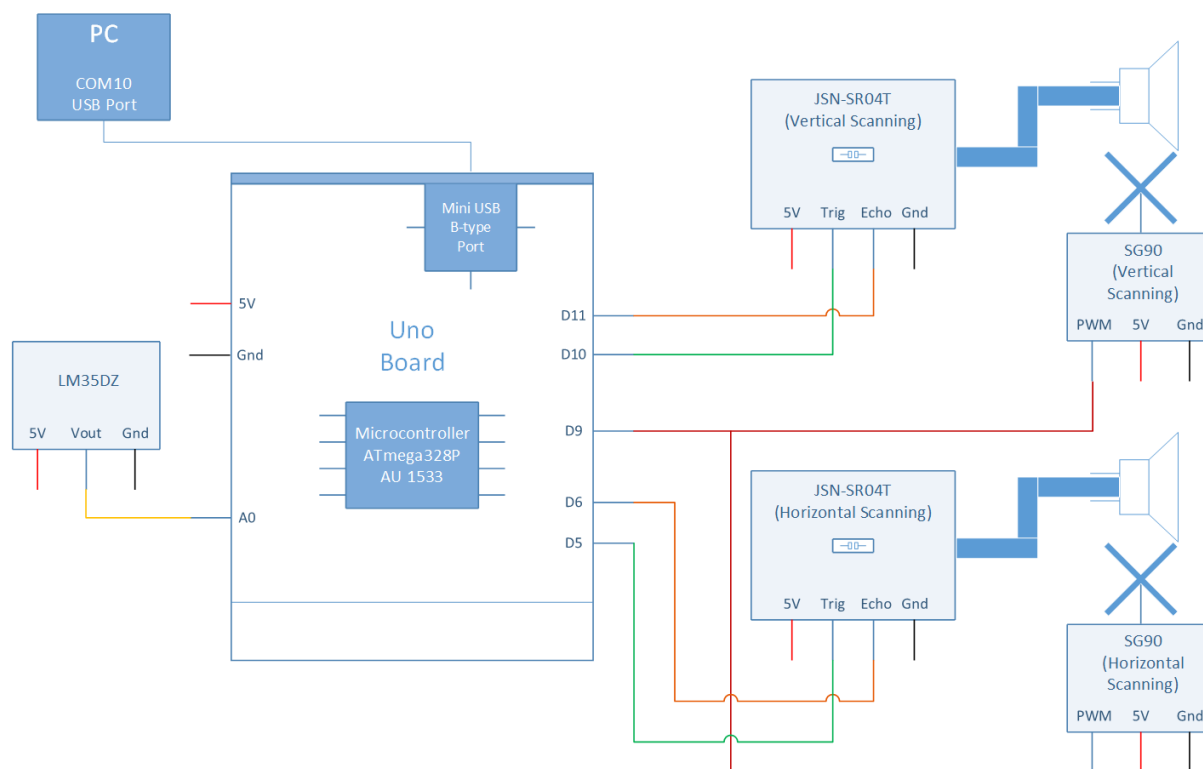
#### 4.2.5 Περιγραφή της Συνδεσμολογίας

Στο σχηματικό διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.5), απεικονίζεται η συνδεσμολογία των εξαρτημάτων για τη συναρμολόγηση του συστήματος.

Η πλακέτα Uno συνδέεται μέσω θύρας USB με Η/Υ και τροφοδοτείται από αυτόν, ενώ με τη σειρά του το Uno τροφοδοτεί όλα τα εξαρτήματα που αποτελούν το σύστημα με συνεχές ρεύμα τάσης 5V.

Η αναλογική έξοδος ( $V_{out}$ ) του αισθητήρα θερμοκρασίας LM35DZ συνδέεται στην πρώτη αναλογική θύρα εισόδου ( $A_0$ ) του Uno.

Οι ακροδέκτες ελέγχου των δύο SG90 Micro Servo συνδέονται και οι δύο στην ίδια ψηφιακή θύρα ( $D_9$ ) του Uno. Ο ένας τοποθετείται σε όρθια στάση για την εξυπηρέτηση της κίνησης στον οριζόντιο άξονα και ο άλλος σε πλάγια στάση για την κίνηση στον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.5 – Σχηματικό Διάγραμμα Συστήματος

Οι αισθητήρες υπερήχου JSN-SR04T βρίσκονται προσδεμένοι με δεματικά τύπου tire-up επάνω στους βραχίονες των SG90 Micro Servo έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σάρωση σε οριζόντιο και σε κατακόρυφο άξονα.

Εκείνος που είναι τοποθετημένος στο σερβομοτέρ που βρίσκεται σε όρθια στάση χρησιμοποιεί την ψηφιακή θύρα  $D_{10}$  του Υπο ως έξοδο για το εισερχόμενο σήμα ενεργοποίησης στον ακροδέκτη *Trig* της πλακέτας του αισθητήρα, ενώ χρησιμοποιεί την  $D_{11}$  του Υπο ως είσοδο για το εξερχόμενο σήμα επιστροφής του υπερηχητικού παλμού από τον ακροδέκτη *Echo* της πλακέτας σύνδεσης.

Αντίστοιχα, εκείνος που βρίσκεται τοποθετημένος στο σερβομοτέρ που βρίσκεται σε πλάγια στάση χρησιμοποιεί την  $D_5$  για το *Trig* και την  $D_6$  για το *Echo*.

### 4.3 Λειτουργία του Συστήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η αλγοριθμική λειτουργία των εξαρτημάτων η οποία είναι γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού Arduino.

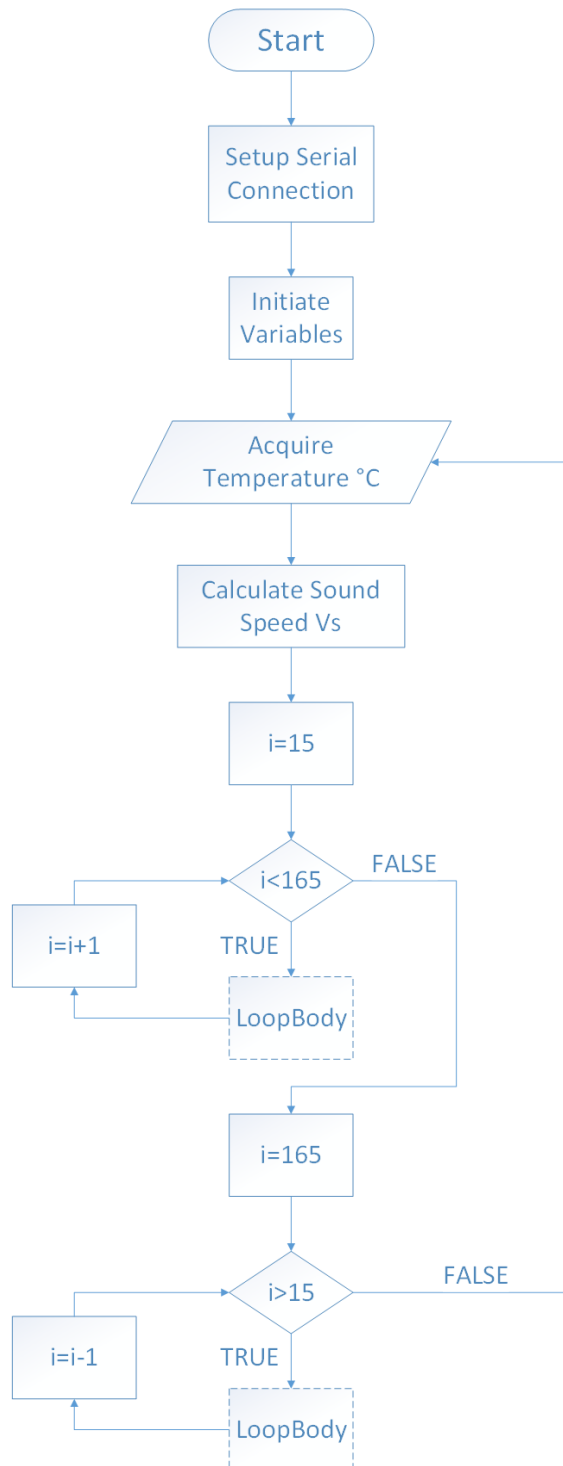
### 4.3.1 Γλώσσα Arduino

Στη γλώσσα προγραμματισμού Arduino το κάθε πρόγραμμα ονομάζεται *sketch*.

Η δομή της γλώσσας είναι πολύ απλοϊκή καθώς το κάθε *sketch* αποτελείται από δύο συναρτήσεις. Η συνάρτηση *setup()* είναι εκείνη που καλείται πρώτη όταν το *sketch* ξεκινάει. Χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση μεταβλητών, τον προσδιορισμό των θυρών, την ενσωμάτωση βιβλιοθηκών κ.ά.

Έπειτα καλείται η συνάρτηση *loop()* η οποία κάνει ακριβώς αυτό που δηλώνει το όνομά της, δηλαδή επαναλαμβάνεται επιτρέποντας στο πρόγραμμα να εκτελείται συνεχώς. Αναλογικά με τη γλώσσα προγραμματισμού C, η συνάρτηση *loop()* αντιστοιχεί στη συνάρτηση *main()* όπου βρίσκεται το κυρίως σώμα του κώδικα.

#### 4.3.2 Περιγραφή Λειτουργίας



Σχήμα 4.6 – Διάγραμμα Ροής Top Level

Στο συγκεκριμένο sketch η συνάρτηση *setup()* καλείται για τη δημιουργία σειριακής σύνδεσης με τον Η/Υ, την αρχικοποίηση όλων των μεταβλητών και τη δημιουργία αντικειμένου για το χειρισμό των δύο σερβομοτέρ SG90 Micro Servo.

Στη συνάρτηση *loop()*, αρχικά λαμβάνεται η μέτρηση της θερμοκρασίας από τον αισθητήρα LM35DZ έτσι ώστε να υπολογιστεί η ακριβής ταχύτητα του ήχου στις δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος.

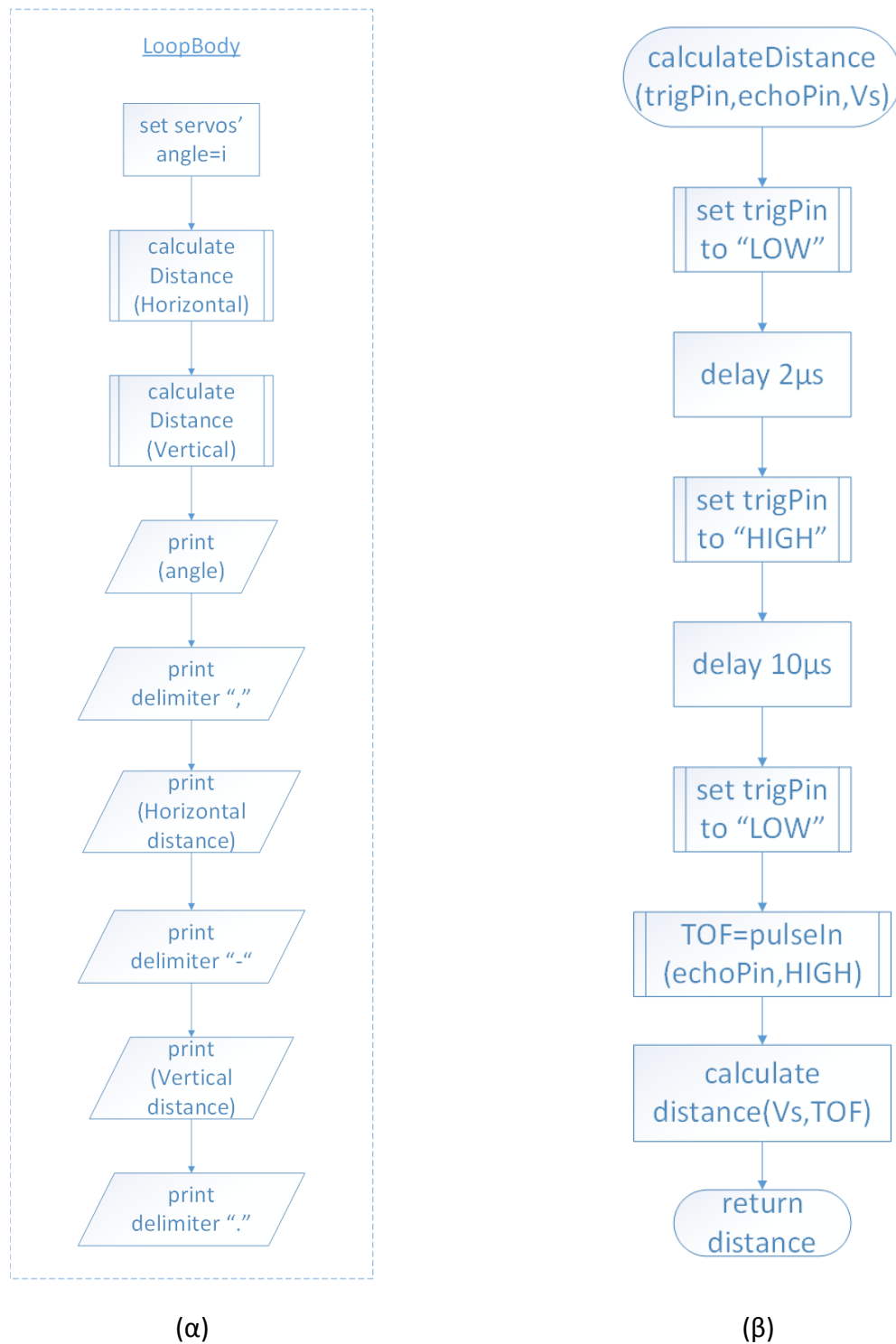
Ακολουθούν δύο *for-loops* τα οποία εκτελούν τη διαδικασία της κίνησης των βραχιόνων των σερβομοτέρ, αρχικά αριστερόστροφα στις μοίρες 15°-164° και μετά δεξιόστροφα στις μοίρες 165°-16°, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Το σώμα των δύο *for-loops* εκτελεί τον ίδιο κώδικα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7(α), αλλά δεν αποτελεί διακριτή συνάρτηση. Εμφανίζεται σε ξεχωριστό διάγραμμα ροής λόγω έκτασης.

Αρχικά τίθεται η γωνία των σερβομοτέρ και έπειτα καλείται δύο φορές η συνάρτηση υπολογισμού της απόστασης *calculateDistance()*. Πρώτα υπολογίζεται η απόσταση στον οριζόντιο άξονα και μετά στον κατακόρυφο. Έχοντας ολοκληρώσει τους υπολογισμούς, ακολουθεί η εκτύπωση τους μέσω της σειριακής σύνδεσης. Εκτυπώνονται διαδοχικά η γωνία των σερβομοτέρ, η οριζόντια απόσταση και τέλος η κατακόρυφη. Ανάμεσά τους εκτυπώνονται διαχωριστικά (*delimiter*) έτσι ώστε να είναι εφικτή η διάκρισή τους.

Η συνάρτηση *calculateDistance(int trigPin, int echoPin, float Vs)* επιτελεί τη λειτουργία του υπολογισμού της απόστασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7(β). Παίρνει 3 ορίσματα, το *trigPin(int)* για την ενεργοποίηση του αισθητήρα υπερήχων, το *echoPin(int)* για την επιστροφή του ήχου και την ταχύτητα του ήχου *Vs(float)* στο εναέριο περιβάλλον.

Αρχικά, το *trigPin* τίθεται σε κατάσταση “LOW” και μετά από καθυστέρηση 2 μs τίθεται σε κατάσταση “HIGH” για 10 μs, δηλαδή όσο χρειάζεται για να δημιουργηθεί το υπερηχητικό κύμα των 8 παλμών συχνότητας 40KHz του διαγράμματος χρονισμού 4.4.

Έπειτα, ο υπερηχητικός αισθητήρας μπαίνει στη φάση του δέκτη, όπως περιγράφηκε παραπάνω, αναμένοντας το εισερχόμενο υπερηχητικό κύμα. Ο χρόνος πτήσης *TOF* καταγράφεται μέσω της συνάρτησης *pulseIn()* στον ακροδέκτη *echoPin*. Τέλος, μέσω του *TOF* και του *Vs* υπολογίζεται η απόσταση και επιστρέφεται.



Σχήμα 4.7 – Διάγραμμα Ροής LoopBody (α), calculateDistance (β)

# 5.

## Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη

---

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός του γραφικού περιβάλλοντος στο ολοκληρωμένο προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας Processing. Το γραφικό περιβάλλον είναι απαραίτητο για την ολοκληρωμένη υλοποίηση του συστήματος τύπου SONAR καθώς με αυτό τον τρόπο αποδίδεται η εικόνα της πραγματικότητας που αντικρίζει.

Στην επιστήμη υπολογιστών, Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη ή Γραφική Διασύνδεση/Διεπαφή Χρήστη (Graphical User Interface - GUI) είναι ένα σύνολο γραφικών στοιχείων ή απεικονιζόμενων δεικτών, δευτερευόντως, αντί κειμένου με σκοπό την καλύτερη αλληλεπίδραση του χρήστη με τη συσκευή [23].

### 5.2 Γλώσσα Processing

Η γλώσσα προγραμματισμού Arduino είναι βασισμένη, εκτός από το framework Wiring, και στη γλώσσα προγραμματισμού Processing [20].

Μάλιστα, η δομή τους είναι ίδια καθώς η συνάρτηση *setup()* επιτελεί τον ίδιο ρόλο και στη γλώσσα Processing ενώ η *loop()* αντικαθίσταται από τη συνάρτηση *draw()* η οποία εκτελείται συνεχώς. Όμως υπάρχει μία σημαντική διαφορά μεταξύ τους καθώς η γλώσσα Arduino είναι γραμμένη σε C/C++ ενώ η Processing σε JAVA.

Η Processing είναι μία γλώσσα ανοιχτού κώδικα με δικό της περιβάλλον προγραμματισμού και χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και προβολή ήχου και εικόνας. Εν ολίγοις με την Processing είναι εφικτό να δημιουργηθεί γραφικό περιβάλλον σε Η/Υ.



### 5.3 Περιγραφή γραφικού περιβάλλοντος

Στην παρούσα εργασία, το GUI προσομοιάζει με αυτό των RADAR αλλά με πολύ λιγότερες ενδείξεις και αλληλεπίδραση.

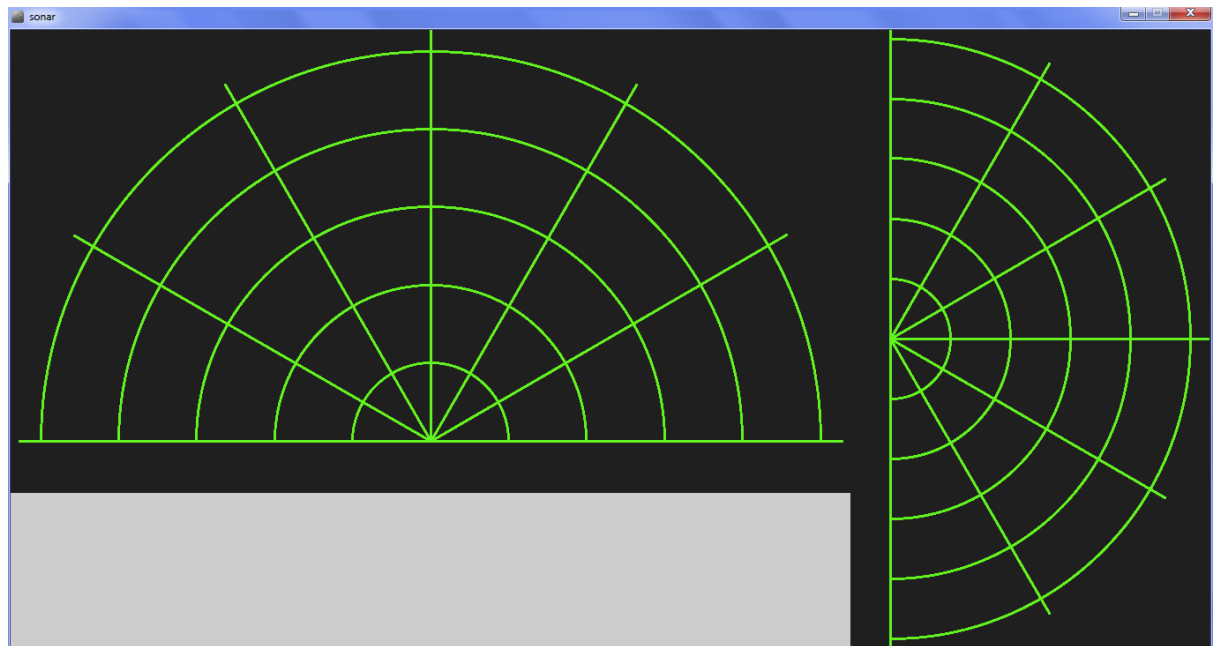
Αποτελείται από δύο ημικύκλια, το ένα για την απεικόνιση της οριζόντιας σάρωσης και το άλλο για κατακόρυφη σάρωση. Για τις ανάγκες της οριζόντιας σάρωσης σχεδιάστηκε ένα ημικύκλιο το οποίο απεικονίζει την απόσταση, αναλογικά με τον τριγωνομετρικό κύκλο, στο 1<sup>ο</sup> και στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο. Αντίστοιχα για τη σάρωση στον κατακόρυφο άξονα χρησιμοποιούνται τα τεταρτημόρια 1 και 4. Επίσης υπάρχει περιγραφή της κατάστασης με κείμενο στο κάτω αριστερά κομμάτι της οθόνης.

Αναλυτικά ο σχεδιασμός έχει ως εξής.

Αρχικά, δημιουργείται ένα παράθυρο διαστάσεων 1360x700px το οποίο φιλοξενεί τη σχεδίαση και στο οποίο τίθεται φόντο (background) σε μαύρο χρώμα. Το προγραμματιστικό περιβάλλον Processing δέχεται, μέσω της σειριακής σύνδεσης του μΡ με τον Η/Υ, σε κάθε χρονική στιγμή 3 ορίσματα σε μορφή ροής πληροφορίας την οποία αναλύει για να εξάγει σε αναγνώσιμη μορφή. Η ροή της πληροφορίας που εισέρχεται, όπως περιγράφηκε στη λειτουργικότητα του συστήματος στο Διάγραμμα Ροής του LoopBody στο Σχήμα 4.7(α), είναι η γωνία των σερβομοτέρ και οι αποστάσεις σε οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα με τα διαχωριστικά ενδιάμεσα.

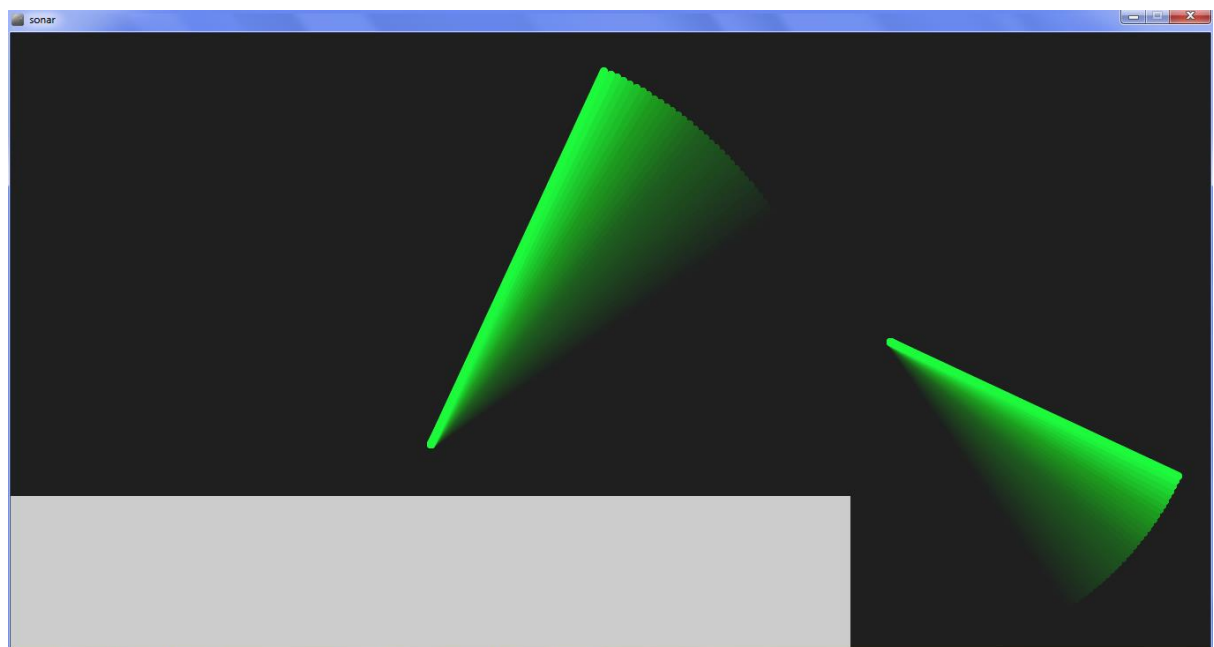
Έπειτα, καλούνται 8 συναρτήσεις για τη διαμόρφωση του γραφικού περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα είναι 4 συναρτήσεις που δημιουργούν διαφορετικά γραφικά αντικείμενα για την απεικόνιση της απόστασης στον οριζόντιο άξονα, οι οποίες καλούνται εκ νέου για την απεικόνιση των ίδιων γραφικών αντικειμένων με διαφορετικές συντεταγμένες, στον κατακόρυφο άξονα. Το πλήθος των συντεταγμένων κάνει μη αποδοτική τη χρήση παραμέτρων στις συναρτήσεις, με αποτέλεσμα τον αριθμό των 8 συναρτήσεων.

Οι συναρτήσεις *drawRadarHorizontal()* και *drawRadarVertical()* απεικονίζουν την έκταση που καλύπτεται σε οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1 . Η κάθε μία τυπώνει 5 ημικύκλια και 6 γραμμές με διαφορετικό προσανατολισμό για το διάκριση του μήκους και των γωνιών αντίστοιχα. Αυτές οι δύο συναρτήσεις είναι οι μόνες που αποτελούνται από στατικά αντικείμενα.



Εικόνα 5.1 – Απεικόνιση των συναρτήσεων *drawRadarHorizontal()* και *drawRadarVertical()*

Ακολουθούν οι συναρτήσεις *drawLineHorizontal()* και *drawLineVertical()* οι οποίες απεικονίζουν ευθείες γραμμές που δείχνουν την περιοχή που σαρώνεται χωρίς να ανιχνεύεται αντικείμενο. Τυπώνουν γραμμές πράσινου χρώματος στις γωνίες που στοχεύουν οι αισθητήρες υπερήχων σε συνδυασμό με προηγούμενες γωνίες οι οποίες εμφανίζονται με φίλτρο απόσβεσης στο χρόνο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2 .



Εικόνα 5.2 - Απεικόνιση των συναρτήσεων *drawLineHorizontal()* και *drawLineVertical()*

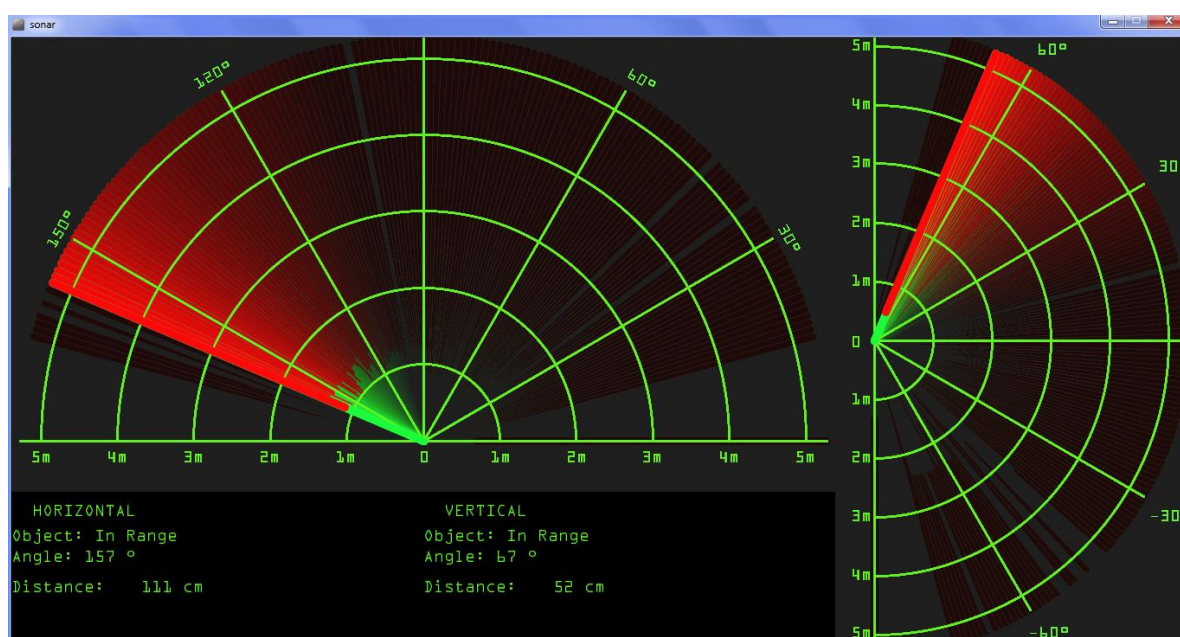
Έπειτα, οι συναρτήσεις *drawObjectHorizontal()* και *drawObjectVertical()* αναπαριστούν την ανίχνευση αντικείμενου στο χώρο, όταν υπάρχει, σε αντίθεση με τις συναρτήσεις *drawLineHorizontal()* και *drawLineVertical()*. Αποδίδουν στην οθόνη τις μετρήσεις των αισθητήρων με ευθείες γραμμές κόκκινου χρώματος στις γωνίες που στοχεύουν με φίλτρο

απόσβεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3 . Όταν ανιχνεύεται αντικείμενο οι κόκκινες γραμμές των *drawObjectHor./Ver.()* επικαλύπτουν εκείνες των *drawLineHor./Ver.()* ειδικά δε θα ήταν δυνατόν να αναπαρασταθεί η παρουσία αντικειμένου.



Εικόνα 5.3 - Απεικόνιση των συναρτήσεων *drawObjectHorizontal()* και *drawObjectVertical()*

Οι συναρτήσεις *drawTextHorizontal()* και *drawTextVertical()* απεικονίζουν όλες τις επεξηγηματικές πληροφορίες σε μορφή κειμένου που είναι απαραίτητες. Στα δύο ημικύκλια αναγράφονται οι δείκτες της έκτασης που καλύπτεται και οι δείκτες των γωνιών όπου βρίσκονται τα σερβομοτέρ και κατ' επέκταση το που στοχεύουν οι αισθητήρες. Στο κάτω αριστερά τμήμα του παραθύρου υπάρχει επεξηγηματικό κείμενο για κάθε άξονα και της απόστασης στην οποία ενδεχομένως ανιχνεύεται αντικείμενο. Όλες οι συναρτήσεις φαίνονται συνδυαστικά στην Εικόνα 5.4 .



Εικόνα 5.4 – Ολοκληρωμένη απεικόνιση του GUI

# 6.

## Φίλτρο Kalman

---

### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η προσπάθεια αλγοριθμικής βελτιστοποίησης του συστήματος όσον αφορά στις μετρήσεις με χρήση τεχνικής Kalman Φίλτρου.

Εκτός από τα συστηματικά σφάλματα λόγω κατασκευαστικής ατέλειας, τα οποία αντιμετωπίστηκαν με τη διαδικασία βαθμονόμησης στο κεφάλαιο 3, κάθε όργανο μέτρησης εμφανίζει και τυχαία σφάλματα τα οποία είναι πιο δύσκολο να αντιμετωπιστούν. Αυτού του τύπου τα σφάλματα παρουσιάστηκαν στη διαδικασία της βαθμονόμησης και ήταν αυτά που απορρίφθηκαν από τη διαδικασία υπολογισμού των συστηματικών σφαλμάτων έτσι ώστε να μην την επηρεάζουν.

Όσον αφορά στην αντιμετώπισή τους, η δημοφιλής πρακτική της μέσης τιμής αντενδίδκνυται για εφαρμογή σε μετρήσεις που προκύπτουν από υπερηχητικούς μετατροπείς διότι κάνει αυτό ακριβώς το οποίο προσπαθεί να αποφύγει, δηλαδή την επιλογή μίας εσφαλμένης μέτρησης ως ορθής.

Αντίθετα, μία προτεινόμενη τεχνική είναι η λήψη πλήθους μετρήσεων σε ένα μικρό χρονικό διάστημα και η επιλογή της επικρατούσας τιμής. Όμως, αυτή είναι μία καλή τεχνική για συστήματα που δεν αναμένουν μεγάλες αλλαγές στις μετρήσεις τους και μειονεκτεί γιατί χρειάζονται αρκετές μετρήσεις έτσι ώστε να υπάρχει μια ασφαλής επιλογή σε περίπτωση μεγάλων αποκλίσεων.

Αυτό που χρειάζεται είναι ένας αλγόριθμος που συνδυάζει την κάθε μέτρηση, ιδανικά, με την ακριβώς προηγούμενη ή με ιστορικό προηγούμενων μετρήσεων και με κάποια πιθανότητα ευστοχίας ή αστοχίας.

Ένας αλγόριθμος που ενέχει τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι γνωστός στη βιβλιογραφία ως Φίλτρο Kalman (εφεξής KF-Kalman Filter).

Το ΚΦ είναι ένα εργαλείο που βοηθά την εκτίμηση αναμενόμενων τιμών. Χρησιμοποιεί τις μαθηματικές εξισώσεις επαναληπτικά και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις εκτιμά την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους λαμβάνοντας υπόψη το θόρυβο περιβάλλοντος και το σφάλμα με αποτέλεσμα να το ελαχιστοποιεί.

Σε αντίθεση με τα περιγραφικά μέτρα θέσης που αναφέρθηκαν, δηλαδή της μέσης τιμής και της επικρατούσας τιμής, το ΚΦ εκτιμά την πραγματική τιμή παράλληλα με την κάθε μέτρηση κάνοντας χρήση ενός βεβαρημένου παράγοντα ανάλογα με την απόκλιση που έχουν οι μετρήσεις από μια χρονική στιγμή στην επόμενη.

Η εκτίμηση της πραγματικής τιμής με τον τρόπο αυτό γίνεται ταχύτερα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου, όμως, είναι ότι γίνεται σε πραγματικό χρόνο με χρήση σημαντικά λιγότερων μετρήσεων, κάτι που απαιτούν τα συστήματα πραγματικού χρόνου όπως είναι τα συστήματα πλοήγησης.

## 6.2 Εκτίμηση Κατάστασης

Το 1960 ο Rudolf E. Kalman εξέδωσε τη δημοφιλή πλέον εργασία του περιγράφοντας έναν αναδρομικό αλγόριθμο που έδινε λύση στο πρόβλημα του γραμμικού φιλτραρίσματος δεδομένων διακριτού χρόνου [24]. Έκτοτε, λόγω της εξέλιξης της επιστήμης υπολογιστών, το ΚΦ έχει αποτελέσει θέμα εκτεταμένης έρευνας και εφαρμογής ειδικά στον τομέα της αυτόνομης και της υποβοηθούμενης πλοήγησης.

Το ΚΦ είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που παρέχει αποδοτικά υπολογιστικά μέσα για την εκτίμηση της κατάστασης μιας διαδικασίας, με τρόπο που ελαχιστοποιείται ο μέσος όρος των τετραγώνων των σφαλμάτων.

Είναι πολύ ισχυρό από πολλές πλευρές καθώς δύναται να παρέχει εκτίμηση για προηγούμενη, παρούσα ή μελλοντική κατάσταση ακόμα και όταν η ακριβής φύση του υπό μοντελοποίηση συστήματος είναι άγνωστη.

Το ΚΦ αντιμετωπίζει το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης  $x \in R^n$  ως μια ελεγχόμενη διαδικασία διακριτού χρόνου που διέπεται από τη γραμμική στοχαστική εξίσωση διαφορών:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (6.1),$$

με διάνυσμα μετρήσεων  $z \in R^m$  με εξίσωση:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (6.2).$$

Οι τυχαίες μεταβλητές  $w_k$  και  $v_k$  αναπαριστούν τους θορύβους διαδικασίας και μετρήσεων αντιστοίχως. Εδώ υποθέτουμε ότι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και οι θόρυβοι είναι λευκοί, κανονικής κατανομής και περιγράφονται από τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (6.3),$$

και  $p(v) \sim N(0, R) \quad (6.4)$

Ο πίνακας  $A$  διαστάσεων  $n \times n$  στην εξίσωση διαφορών (6.1) συσχετίζει την παρούσα κατάσταση με την προηγούμενη ακόμη και χωρίς την ύπαρξη συνάρτησης ελέγχου ή και θορύβου ενώ ο πίνακας  $B$  διαστάσεων  $n \times l$  συσχετίζει την προαιρετική είσοδο ελέγχου  $u \in R^l$  στην εκτιμώμενη κατάσταση. Ο πίνακας  $H$  διαστάσεων  $m \times n$  στην εξίσωση (6.2) συσχετίζει την κατάσταση με τις μετρήσεις.

Στην πράξη, οι τιμές συνδιακύμανσης του θορύβου  $Q$  και  $R$  αλλά και των πινάκων  $A$  και  $H$  ενδέχεται να μεταβάλλονται από μια χρονική στιγμή στην επόμενη, ωστόσο εδώ υποθέτουμε ότι παραμένουν σταθερές.

Η εκτιμώμενη κατάσταση προκύπτει από τη μοντελοποίηση των φυσικών σχέσεων του υπό εξέταση συστήματος. Για παράδειγμα, για την περιγραφή της κατάστασης της ελεύθερης πτώσης ενός αντικειμένου χρειάζεται η πληροφορία του ύψους  $h(t)$  και της ταχύτητας  $u(t)$  κάθε χρονική στιγμή. Οι φυσικές σχέσεις που διέπουν και τα δύο μεγέθη είναι γνωστές από τις εξισώσεις του Νεύτωνα για την κινηματική [25].

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας δεν δύναται να εφαρμοστεί παρόμοια μοντελοποίηση διότι δεν υπάρχει κάποια ελεγχόμενη διαδικασία προς εξέταση καθώς ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε σταθερό σημείο, άρα δεν υπάρχει κίνηση προς μοντελοποίηση, και επίσης είναι αδύνατο να γίνει πρόβλεψη της κίνησης του οποιουδήποτε τυχαία ανιχνευόμενου αντικειμένου.

Ακολούθως, η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται επαρκώς από την τιμή της απόστασης στην οποία ανιχνεύει αντικείμενο ο αισθητήρας.

Συνεπώς, η εξίσωση διαφορών  $x_k$  (6.1) απαλλάσσεται από την είσοδο ελέγχου  $u_{k-1}$  και από το θόρυβο διαδικασίας  $w_k$ , δεδομένου ότι έχει μηδενική μέση τιμή ( $\mu_w = 0$ , βλ.(6.3)), οπότε γίνεται:

$$x_k = x_{k-1} \quad (6.5),$$

αφού  $A = [1]$  καθώς τα  $x_k, x_{k-1}$  είναι μονόμετρα μεγέθη.

Αντιστοίχως, το διάνυσμα μετρήσεων  $z_k$  (6.2), το οποίο διαμορφώνεται μέσω του προσαρμοστικού πίνακα  $H$  και της  $x_k$  για να χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του αλγορίθμου, απλοποιείται σε μεταβλητή που περιέχει την πληροφορία της μετρούμενης απόστασης αφού το  $x_k$  είναι μονόμετρο μέγεθος και ο θόρυβος μετρήσεων  $v_k$  έχει μηδενική μέση τιμή ( $\mu_v = 0$ , βλ.(6.4)).

Εκτός από την εξίσωση διαφορών  $x_k$  (6.1) και το διάνυσμα μετρήσεων  $z_k$  (6.2) στην εκτίμηση κατάστασης το KF θέτει ως δεδομένο το σφάλμα που ενδέχεται να προκύψει στους υπολογισμούς του.

Με  $\hat{x}_k^- \in R^n$  ορίζεται η a priori εκτίμηση κατάστασης τη χρονική στιγμή  $k$  δεδομένης της πληροφορίας που υπάρχει για τη διαδικασία πριν τη χρονική στιγμή  $k$ , ενώ με  $\hat{x}_k \in R^n$  ορίζεται η a posteriori εκτίμηση κατάστασης τη χρονική στιγμή  $k$  δεδομένων των μετρήσεων  $z_k$ .

Επομένως, τα a priori και a posteriori σφάλματα εκτίμησης ορίζονται ως εξής:

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^- \quad (6.6),$$

και 
$$e_k = x_k - \hat{x}_k \quad (6.7).$$

Αντιστοίχως, η a priori συνδιακύμανση σφάλματος είναι:

$$P^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (6.8),$$

και η a posteriori συνδιακύμανση σφάλματος είναι:

$$P = E[e_k e_k^T] \quad (6.9).$$

### 6.3 Ο Αλγόριθμος του Διακριτού Kalman Filter

Το KF εκτιμά το σύστημα με μία μορφή ελέγχου ανάδρασης (feedback). Το φίλτρο εκτιμά την κατάσταση του συστήματος για μία δεδομένη χρονική στιγμή και έπειτα την επεξεργάζεται εκ νέου με τη μορφή μετρήσεων και θορύβου. Για το λόγο αυτό, οι εξισώσεις του KF χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις εξισώσεις χρονικής ενημέρωσης και τις εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων.

Οι εξισώσεις χρονικής ενημέρωσης είναι υπεύθυνες για την προώθηση (στο χρόνο) της παρούσας εκτίμησης κατάστασης και σφάλματος για την εξαγωγή της a priori εκτίμησης κατάστασης και σφάλματος της επόμενης χρονικής στιγμής.

Οι εξισώσεις είναι οι εξής δύο:

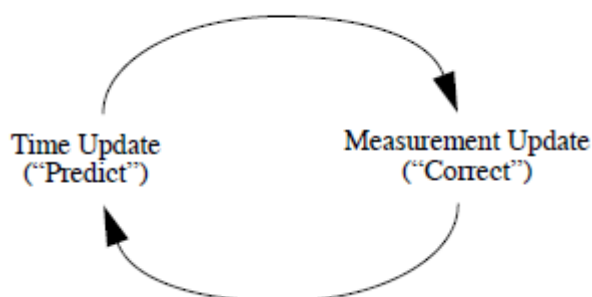
- Η εξίσωση a priori εκτίμησης κατάστασης (a priori state estimate), και
- Η εξίσωση a priori συνδιακύμανσης σφάλματος εκτίμησης κατάστασης - εφεξής σφάλμα εκτίμησης (a priori error in estimate).

Οι εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων είναι υπεύθυνες για την ανατροφοδότηση, πιο συγκεκριμένα, για την ενσωμάτωση των μετρήσεων στις a priori εκτιμήσεις για την εξαγωγή των, πιο βελτιωμένων, a posteriori εκτιμήσεων.

Οι εξισώσεις είναι οι εξής τρείς:

- Η εξίσωση υπολογισμού Κέρδους (Kalman Gain),
- Η εξίσωση a posteriori εκτίμησης κατάστασης (a posteriori state estimate),
- Η εξίσωση a posteriori συνδιακύμανσης σφάλματος εκτίμησης κατάστασης - εφεξής σφάλμα εκτίμησης (a posteriori error in estimate).

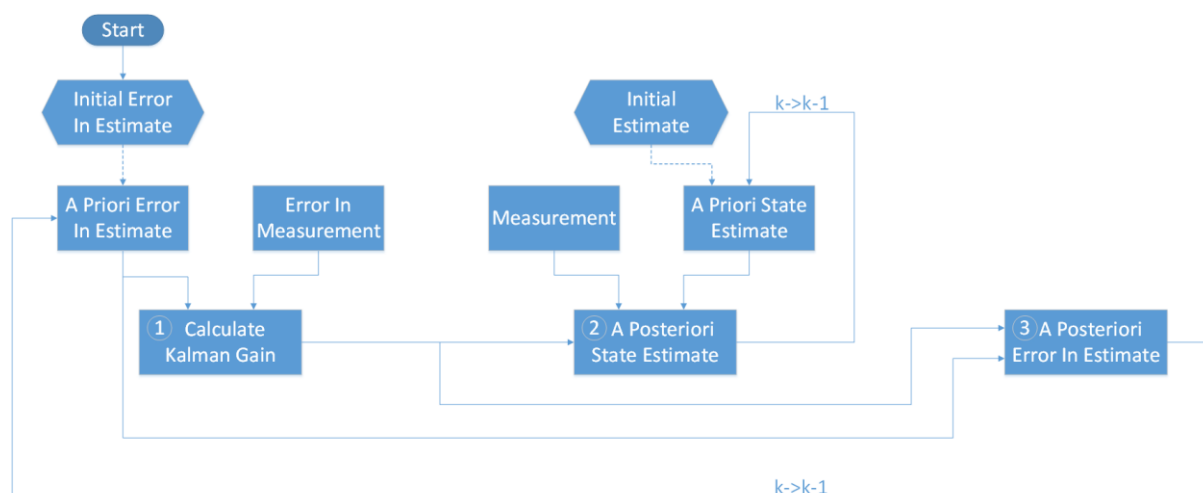
Οι εξισώσεις χρονικής ενημέρωσης μπορούν να θεωρηθούν ως εξισώσεις πρόβλεψης (*predict*) ενώ οι εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων ως εξισώσεις διόρθωσης (*correct*). Πράγματι, ο τελικός αλγόριθμος εκτίμησης θυμίζει αλγόριθμο πρόβλεψης-διόρθωσης (*predict-correct*) για την επίλυση αριθμητικών προβλημάτων.



Σχήμα 6.1- Η συνεχής διαδικασία του Kalman Filter.

*Η χρονική ενημέρωση προβάλλει την παρούσα εκτίμηση κατάστασης προωθημένη στο χρόνο.*

*Η ενημέρωση μετρήσεων ρυθμίζει την προωθημένη εκτίμηση σύμφωνα με τις πραγματικές μετρήσεις εκείνης της χρονικής στιγμής.*



Σχήμα 6.2- Διάγραμμα Ροής Kalman Filter

Το μεγάλο πλεονέκτημα του KF είναι ότι για μία δεδομένη χρονική στιγμή  $k$  χρειάζεται πολύ λίγη πληροφορία από την ακριβώς προηγούμενη χρονική στιγμή  $k-1$  για να ολοκληρώσει τους υπολογισμούς του.

Για τις δύο εξισώσεις χρονικής ενημέρωσης, από τις οποίες εκκινείται ο αλγόριθμος, απαιτούνται μόνο οι *a posteriori* εκτιμήσεις κατάστασης και σφάλματος της προηγούμενης



χρονικής στιγμής για την εξαγωγή των αντίστοιχων *a priori* της παρούσας χρονικής στιγμής που προηγούνται των τριών εξισώσεων ενημέρωσης μετρήσεων.

Για τον υπολογισμό του Κέρδους χρειάζεται να είναι γνωστό το *a priori* σφάλμα εκτίμησης και το σφάλμα μετρήσεων. Επειδή το σφάλμα εκτίμησης ενημερώνεται κάθε χρονική στιγμή, στην αρχική κατάσταση γίνεται χρήση ενός σφάλματος εκτίμησης κατά προσέγγιση, το οποίο πολύ γρήγορα δεν έχει επίδραση στις μελλοντικές καταστάσεις.

Η συνεισφορά του Κέρδους στον αλγόριθμο είναι κεφαλαιώδους σημασίας καθώς ο αλγόριθμος σε κάθε χρονική στιγμή δύναται να κρίνει αν θα εμπιστευτεί την *a priori* εκτίμηση κατάστασης ή τις μετρήσεις, γεγονός που κάνει συνολικά το KF αποδοτικό.

Το Κέρδος τροφοδοτεί τον υπολογισμό της *a posteriori* εκτίμησης κατάστασης η οποία εξαρτάται από την *a priori* εκτίμηση αλλά και τις παρούσες μετρήσεις. Όπως και στον υπολογισμό του Κέρδους γίνεται χρήση μιας αρχικής προσεγγιστικής εκτίμησης που πολύ σύντομα δεν επηρεάζει τις επόμενες εκτιμήσεις. Έπειτα, η *a posteriori* εκτίμηση κατάστασης αποθηκεύεται ως πληροφορία και χρησιμοποιείται σαν είσοδος στην επόμενη *a priori* εκτίμηση κατάστασης με την ιδιότητα, πλέον, της προηγούμενης εκτίμησης κατάστασης.

Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός του *a posteriori* σφάλματος εκτίμησης συνδυάζοντας το *a priori* σφάλμα εκτίμησης και συμπληρωματικά την τιμή του Κέρδους. Όπως και στην περίπτωση της *a posteriori* εκτίμησης κατάστασης, το σφάλμα εκτίμησης που προέκυψε αποθηκεύεται ως πληροφορία και χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο επόμενο *a priori* σφάλμα εκτίμησης με την ιδιότητα, πλέον, του προηγούμενου σφάλματος εκτίμησης.

### 6.3.1 Εξισώσεις Χρονικής Ενημέρωσης

Η εξίσωση *a priori* εκτίμησης κατάστασης:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (6.10),$$

διαφέρει από την αρχική θεωρητική (3.1) ως προς την απουσία του θορύβου  $w_k$ .

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας απλοποιείται σε:

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}, \text{ βλ. (3.5)}$$

αφού τα μεγέθη είναι μονόμετρα.

Η εξίσωση *a priori* σφάλματος εκτίμησης:

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6.11),$$

εκφράζεται από το άθροισμα της διακύμανσης  $Q$  του θορύβου  $w_k$  της αρχικής θεωρητικής εξίσωσης κατάστασης (βλ. (6.1),(6.3)) και του γινομένου του *a posteriori* σφάλματος εκτίμησης της προηγούμενης χρονικής στιγμής  $P_{k-1}$ , επί του πίνακα  $A$  ο

οποίος είναι ο ίδιος προσαρμοστικός πίνακας που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση κατάστασης (βλ. (6.1),(6.10)), επί του πίνακα  $A^T$  ο οποίος είναι ο ανάστροφος του  $A$ .

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας απλοποιείται σε:

$$P_k^- = P_{k-1} + Q$$

αφού τα μεγέθη είναι μονόμετρα.

### 6.3.2 Εξισώσεις Ενημέρωσης Μετρήσεων

Η εξίσωση υπολογισμού του Κέρδους (Kalman Gain):

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \quad , \text{ με } 0 \leq K_k \leq 1 \quad (6.12),$$

εκφράζεται από το πηλίκο του γινομένου του a priori σφάλματος εκτίμησης  $P_k^-$  επί του πίνακα  $H^T$ , του ανάστροφου του προσαρμοστικού πίνακα  $H$  του διανύσματος μετρήσεων  $z_k$  (βλ. (6.2)), προς το άθροισμα της διακύμανσης  $R$  (εφεξής σφάλμα μετρήσεων) του θορύβου  $v_k$  (βλ. (6.2),(6.4)) και του γινομένου των προαναφερόμενων  $P_k^-$ ,  $H$ ,  $H^T$ .

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας απλοποιείται σε:

$$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R}$$

αφού τα μεγέθη είναι μονόμετρα.

Παρατηρείται ότι όταν το a priori σφάλμα εκτίμησης τείνει στο μηδέν,  $P_k^- \rightarrow 0$ , ή όταν το σφάλμα μετρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερο από το σφάλμα εκτίμησης,  $R \gg P_k^- \Rightarrow R - P_k^- \rightarrow \infty$ , τότε το Κέρδος τείνει στο μηδέν:

$$\lim_{P_k^- \rightarrow 0} K_k = 0, \quad \lim_{R - P_k^- \rightarrow \infty} K_k = 0.$$

Αντιθέτως, όταν το σφάλμα μετρήσεων τείνει στο μηδέν,  $R \rightarrow 0$ , ή όταν το σφάλμα εκτίμησης είναι πολύ μεγαλύτερο από το σφάλμα μετρήσεων,  $P_k^- \gg R \Rightarrow P_k^- - R \rightarrow \infty$ , τότε το Κέρδος τείνει στη μονάδα:

$$\lim_{R \rightarrow 0} K_k = 1, \quad \lim_{P_k^- - R \rightarrow \infty} K_k = 1.$$

Η εξίσωση *a posteriori* εκτίμησης κατάστασης:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (6.13),$$

εκφράζεται από το άθροισμα της *a priori* εκτίμησης κατάστασης  $\hat{x}_k^-$  και του γινομένου του κέρδους  $K_k$  επί της διαφοράς της προσαρμοσμένης εκτίμησης κατάστασης  $H\hat{x}_k^-$  από το διάνυσμα μετρήσεων  $z_k$ .

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας απλοποιείται σε:

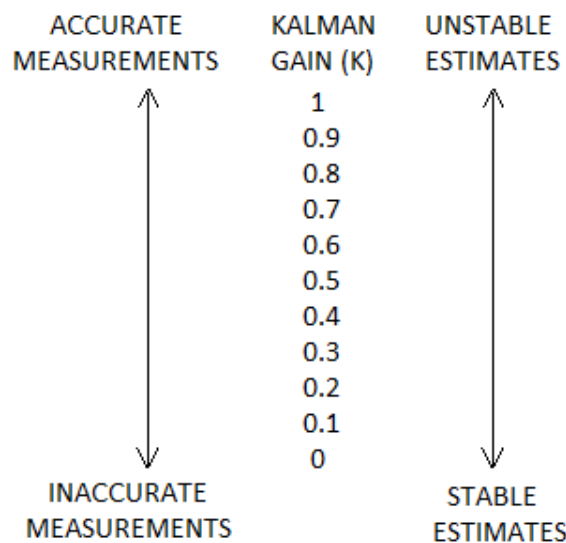
$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{x}_k^-)$$

αφού τα μεγέθη είναι μονόμετρα.

Η διαφορά  $z_k - H\hat{x}_k^-$  ονομάζεται *καινοτομία μετρήσεων* και αντανακλά τη διαφορά στις εκτιμώμενες και τις πραγματικές μετρήσεις. Μηδενική διαφορά σημαίνει ότι αυτές οι δύο ποσότητες έρχονται σε πλήρη συμφωνία, συνεπώς η εκτίμηση είναι ακριβής.

Επίσης, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται το Κέρδος, τόσο πιο σημαντική είναι η συνεισφορά της καινοτομίας μετρήσεων.

Μία άλλη οπτική σχετικά με την επίδραση του Κέρδους στην εκτίμηση κατάστασης είναι ότι όταν το σφάλμα μετρήσεων τείνει στο μηδέν,  $R \rightarrow 0$ , τότε οι μετρήσεις είναι ακριβείς και γίνονται όλο και πιο αξιόπιστες σε σχέση με τις εκτιμήσεις που θεωρούνται κάπως αναξιόπιστες με όρους ευστάθειας. Αντιθέτως, όσο το σφάλμα εκτίμησης τείνει στο μηδέν,  $P_k^- \rightarrow 0$ , οι μετρήσεις γίνονται λιγότερο αξιόπιστες ενώ οι εκτιμήσεις θεωρούνται ότι ευσταθούν περισσότερο.



Σχήμα 6.3 – Ακρίβεια Μετρήσεων έναντι Ευστάθειας Εκτιμήσεων

Τον κύκλο εξισώσεων του αλγορίθμου κλείνει η εξίσωση *a posteriori* σφάλματος εκτίμησης:

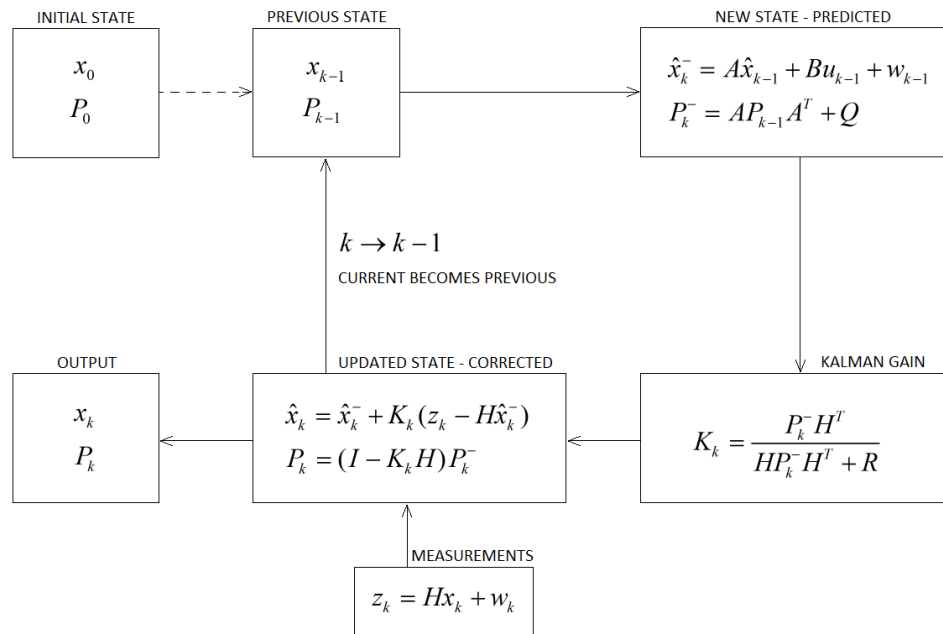
$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (6.14),$$

η οποία εκφράζεται ως το γινόμενο του *a priori* σφάλματος εκτίμησης  $P_k^-$  επί της διαφοράς του προσαρμοσμένου Κέρδους  $K_k H$  από τον ταυτοτικό πίνακα  $I$ .

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας απλοποιείται σε:

$$P_k = (1 - K_k) P_k^-$$

αφού τα μεγέθη είναι μονόμετρα.



Σχήμα 6.4 – Διάγραμμα Ροής Εξισώσεων του Kalman Filter

## 6.4 Παραμετροποίηση και Απόδοση

Συνήθως το σφάλμα μετρήσεων  $R$  μετράται πριν τεθεί το KF σε εφαρμογή. Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας αυτό είναι εφικτό και με σχετική ακρίβεια. Το σφάλμα μετρήσεων είναι συγκεκριμένα το σφάλμα μέτρησης του αισθητήρα υπερήχων και προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις της βαθμονόμησης.

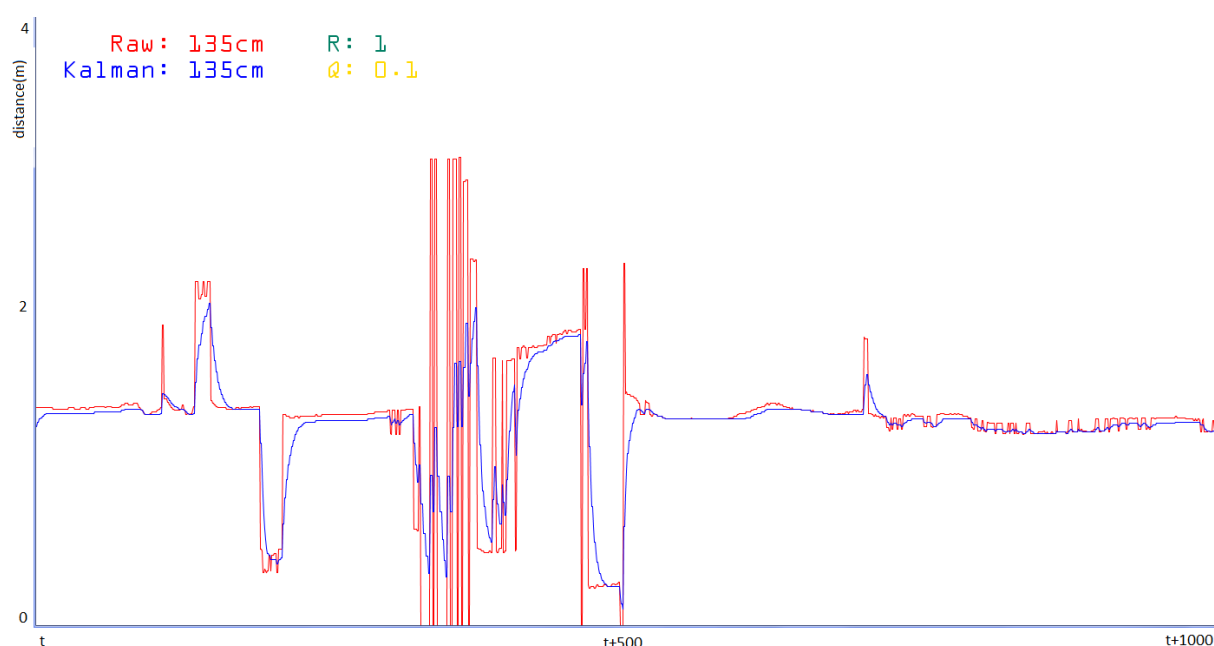
Αντιθέτως, ο προσδιορισμός της διακύμανσης  $Q$  του θορύβου διαδικασίας  $w_k$  είναι πιο δύσκολη διαδικασία καθώς, τυπικά, δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσης παρατήρησης της διαδικασίας που εκτιμάται.

Ενίστε, μία σχετικά απλή διαδικασία μπορεί να δημιουργήσει αποδεκτά αποτελέσματα αν εισαχθεί αρκετή αβεβαιότητα με την επιλογή του  $Q$ . Αλλά στην περίπτωση αυτή θα πρέπει οι μετρήσεις να θεωρούνται αξιόπιστες.

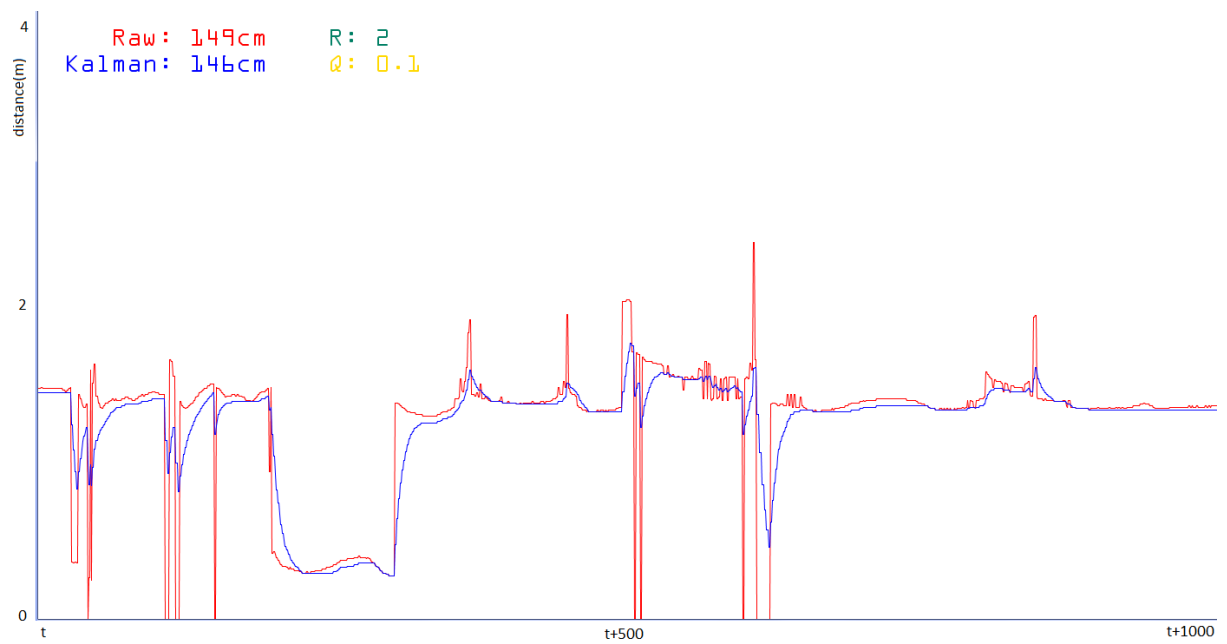
Σε κάθε περίπτωση, είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει λογική βάση στην επιλογή των παραμέτρων, μπορεί να επιτευχθεί πολύ καλή απόδοση του φίλτρου με πειραματισμό των τιμών των  $R$  και  $Q$ .

Η συνήθης πρακτική είναι το  $Q$  να τείνει στο μηδέν,  $Q \rightarrow 0$ , αλλά να είναι ελάχιστα μεγαλύτερο του μηδενός έτσι ώστε να μην υπάρχει ενδεχόμενο μηδενισμού του Κέρδους, γεγονός το οποίο θα καθιστούσε τις μετρήσεις αχρείαστες και, κατ'επέκταση, θα κατέστρεφε συνολικά την απόδοση του φίλτρου.

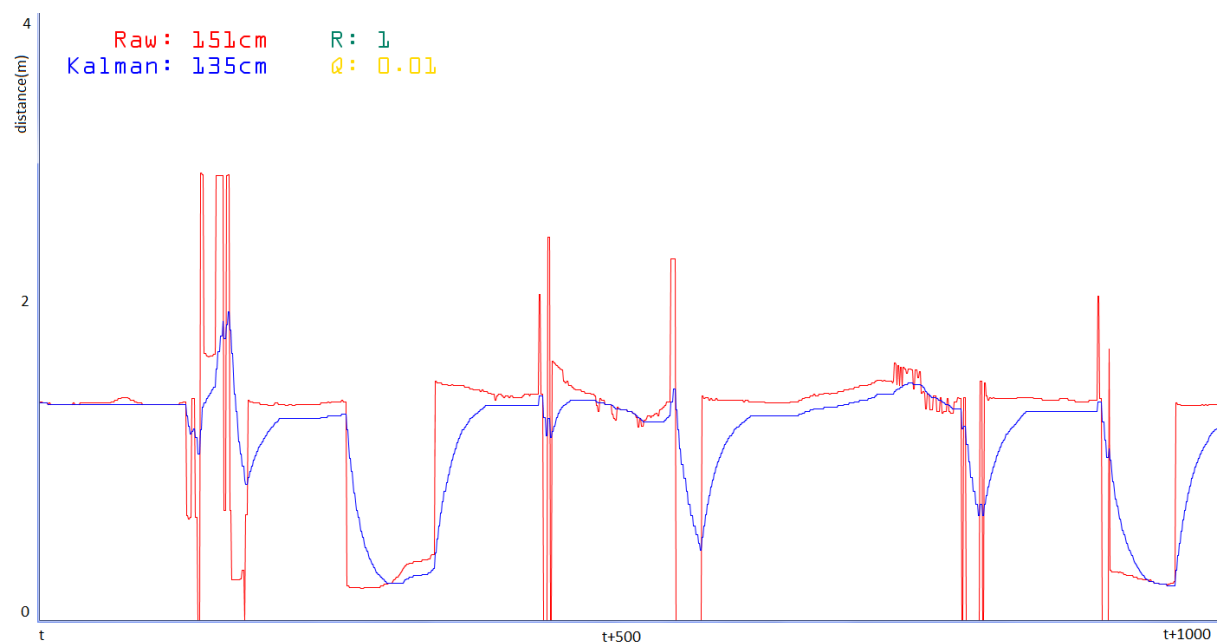
Επίσης, τιμή του  $Q$  πολύ κοντά στο μηδέν ή πολύ μικρή συγκριτικά με το σφάλμα μετρήσεων  $R$  σημαίνει ότι η τιμή του Κέρδους εξαρτάται αποκλειστικά από τη σύγκριση του a priori σφάλματος εκτίμησης  $P_k^-$  και του σφάλματος μετρήσεων  $R$  χωρίς να δίνεται εκ των προτέρων βάρος στις μετρήσεις, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.5-6.8. Επιτυγχάνεται το ζητούμενο που είναι η εξομάλυνση του θορύβου αλλά χάνεται η ακρίβεια μετρήσεων και η διακριτική ικανότητα εξουδετερώνοντας στην ουσία τα θετικά αποτελέσματα του φίλτρου.



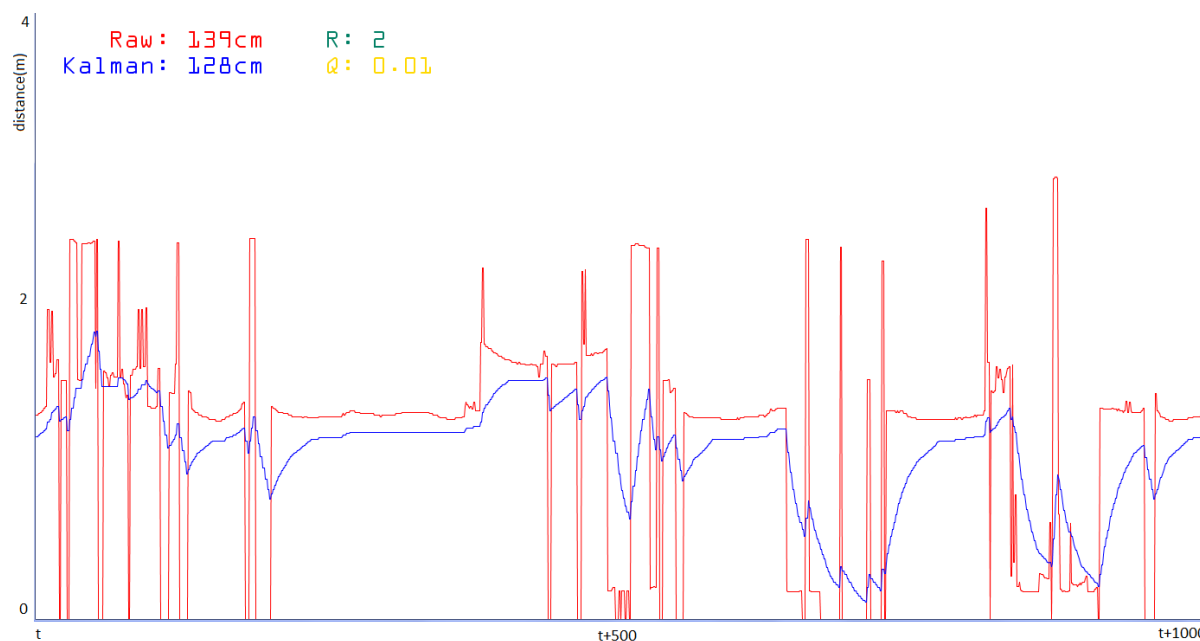
Σχήμα 6.5 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων:  $R=1$ ,  $Q=0.1$



Σχήμα 6.6 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων:  $R=2$ ,  $Q=0.1$

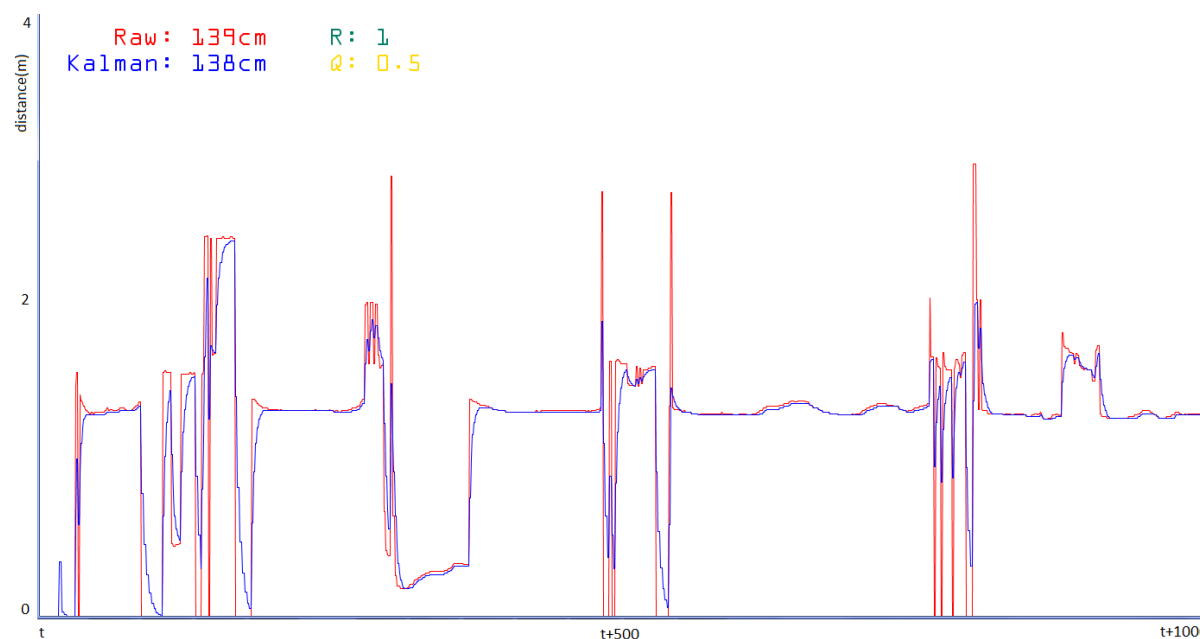


Σχήμα 6.7 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων:  $R=1$ ,  $Q=0.01$

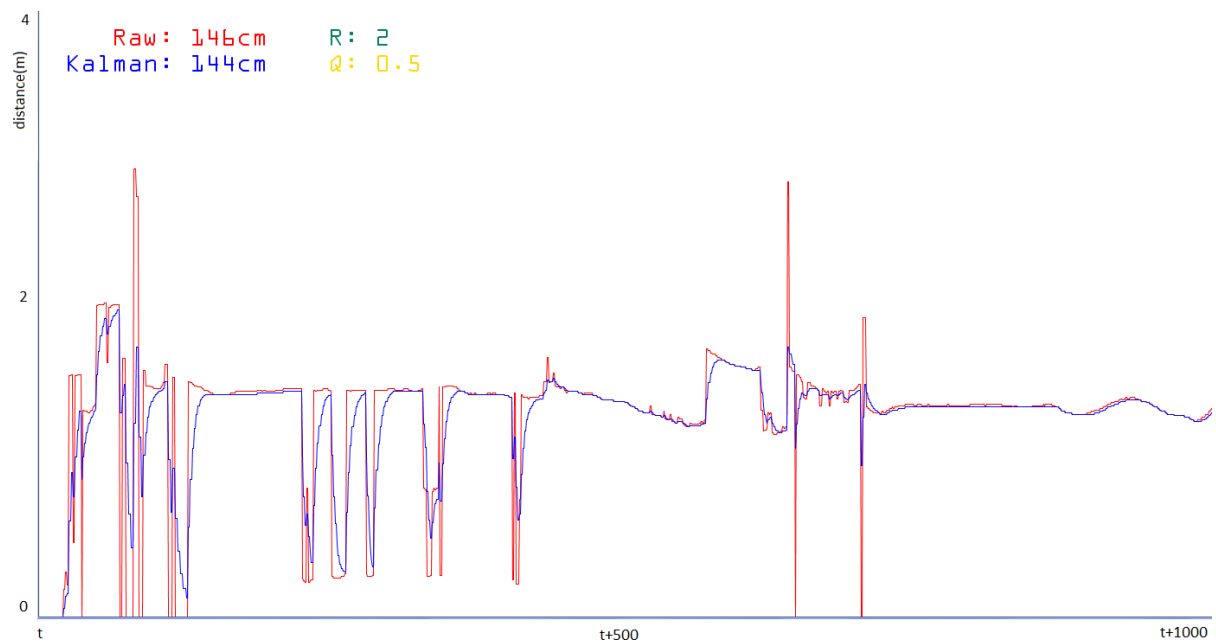


Σχήμα 6.8 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων:  $R=2\text{cm}$ ,  $Q=0.01\text{cm}$

Αντιθέτως, τιμή του  $Q$  συγκρίσιμη με εκείνη του  $R$ , ανεξαρτήτως αν είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη, σημαίνει ότι η διαδικασία εμπιστεύεται εκ των προτέρων τις μετρήσεις, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.10-6.11. Διατηρείται η ακρίβεια των μετρήσεων και η διακριτική ικανότητα, όμως παρατηρείται και ευαισθησία στο θόρυβο.



Σχήμα 6.9 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων:  $R=1$ ,  $Q=0.5$



Σχήμα 6.10 – Σύγκριση Kalman Φίλτρου έναντι ακατέργαστων μετρήσεων:  $R=2$ ,  $Q=0.5$

Η συγκεκριμένη παραμετροποίηση του KF αποδίδει αυτό για το οποίο χρησιμοποιήθηκε αλλά παράλληλα δημιουργεί ένα πρόβλημα. Καταφέρει την ομαλοποίηση των ακραίων τιμών και των ασταθών μετρήσεων αλλά εισάγει καθυστέρηση σε μεγάλες μεταβολές των τιμών που δεν αποτελούν τυχαίο σφάλμα.



# 7.

## Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

---

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η προσέγγιση μιας συσκευής υψηλού κόστους με λιγοστά μέσα. Το συμπέρασμα είναι ότι όσο άρτια και αν είναι η αλγοριθμική λειτουργία που υλοποιήθηκε, το ζήτημα του υλικού παραμένει. Είναι πολύ δύσκολο ένας αισθητήρας ενός στοιχείου να υποκαταστήσει μία συστοιχία αισθητήρων του ίδιου τύπου.

Όσον αφορά τη μελλοντική εργασία, θα ήταν ενδιαφέρον η λειτουργικότητα του συστήματος να παρείχε δυνατότητα πραγματικού χειρισμού από το χρήστη. Δηλαδή να είχε την ευχέρεια να ελέγξει ο ίδιος τα σερβομοτέρ μέσω του πληκτρολογίου του συνδεδεμένου Η/Υ και ουσιαστικά να κατευθύνει τον αισθητήρα.

Δεν κρίθηκε απαραίτητο να γίνει περαιτέρω πρόοδος στο συγκεκριμένο project καθώς τα μέλη που αποτελούσαν την ομάδα του ROV έχουν αποσυρθεί από αυτό. Επίσης, το κόστος κατασκευής της συσκευής για υποβρύχια χρήση είναι αρκετά μεγαλύτερο από τον διαθέσιμο προϋπολογισμό.

## Αναφορές και Εξωτερικοί Σύνδεσμοι

---

- [1] «Sonar,» *Wikipedia*.
- [2] C. H. Zong, «Low Cost Autonomous Underwater 3D Mapping,» UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA, June 2015.
- [3] Κ.Καλαϊτζάκης, «Αισθητήρας-Μετατροπέας,» σε *Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες*, Έκδοση 2013.1, pp. 23-24.
- [4] Κ.Καλαϊτζάκης, «Χαρακτηριστικά των αισθητήρων,» σε *Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες*, Έκδοση 2013.1, pp. Σελ \$28-42.
- [5] Κ.Καλαϊτζάκης, «Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς,» σε *Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες*, Έκδοση 2013.1, pp. Σελ \$153-154, .
- [6] J. Luan, «Sonar Transducers,» σε *Development of a Small Sonar Altimeter and Constant Altitude Controller for a Miniature Autonomous*, Blacksburg, Virginia, Virginia Polytechnic Institute, 2005, p. 7.
- [7] «Understanding Target Acoustics,» *Maxbotix*.
- [8] «Speed sound air vs temperature,» *Parallax*.
- [9] CC.Leroy, «Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in sea water,» *Journal of the Acoustic Society of America*, pp. 46-216, 1969.
- [10] P.Vigoureux, «Underwater Sound,» National Physical Laboratory, Teddington.
- [11] J. Luan, «Transmitter Circuit Design and Operation,» σε *Development of a Small Sonar Altimeter and Constant Altitude Controller for a Miniature Autonomous*, Blacksburg, Virginia, Virginia Polytechnic Institute, 2005, pp. 12-13.
- [12] ΜΕ-ΤΠΔΠ, «Κεφ. 8,» σε *Τυποποίηση και ποιότητα στη σύγχρονη κοινωνία*, ΤΕΕ, 2008.

- [13] Κ.Καλαϊτζάκης, «Σφάλμα κέρδους και σφάλμα μετατόπισης,» σε *Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες*, Έκδοση 2013.1 .
- [14] S. M.Stigler, «Gauss and the Invention of Least Squares,» σε *Annals of Statistics*, 1981.
- [15] S. J. Miller, «The Method of Least Squares,» Mathematics Department Brown University.
- [16] «<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>,» *Arduino Uno*.
- [17] «[http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf),» *Atmel ATmega328P*.
- [18] «<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>,» *PWM Tutorial*.
- [19] «<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>,» *PWM Secrets*.
- [20] «<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>,» *Arduino language*.
- [21] «<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>,» *LM35DZ datasheet*.
- [22] «<http://www.micropik.com/PDF/SG90Servo.pdf>,» *SG90 Micro Servo*.
- [23] «[https://en.wikipedia.org/wiki/Graphical\\_user\\_interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Graphical_user_interface),» *Graphical User Interface*.
- [24] G. W. a. G. Bishop, «An Introduction to the Kalman Filter».
- [25] D. G. ElBayoumi, «Understanding and Applying Discrete Kalman Filtering,» June 24, 2016.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Συνολικό Κόστος

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται αντιπροσωπικά το κόστος (€/τεμάχιο) των εξαρτημάτων από Έλληνα προμηθευτή σε σχέση με προμηθευτή του εξωτερικού. Οι τιμές συμπεριλαμβάνουν ΦΠΑ, αλλά δεν συνυπολογίζεται το μεταφορικό κόστος.

Εξάρτημα \ Κόστος (€/τεμ.)	Ελλάδα	Εξωτερικό	Ποσότητα
Μικροελεγκτής Μονής Πλακέτας Uno	8€	7.99€	1
Αισθητήρας Θερμοκρασίας LM35DZ	1.50€	0.70€	1
SG90 Micro Servo	4€	0.93€	2
Υπερηχητικός Αισθητήρας JSN-SR04T	17€	6.69€	2
Breadboard 830 Tie-Points	4.80€	2.62€	1
Καλώδια τύπου Jumper (πακέτο 65 τεμαχίων)	3.99€	1.87€	1
<b>Συνολικό Κόστος</b>	<b>60.29€</b>	<b>28.42€</b>	

Πίνακας Παραρτήματος – Υπολογισμός κόστους υλικών εξαρτημάτων συστήματος

Τιμές Νοεμβρίου - Δεκεμβρίου 2016

Το μεγάλο πλεονέκτημα της αγοράς υλικών εξαρτημάτων από Έλληνα προμηθευτή είναι η άμεση παράδοση των προϊόντων. Συγκεκριμένα, όταν επιλέχθηκε ο υπερηχητικός

αισθητήρας JSN-SR04T δεν υπήρχε στην ελληνική αγορά, οπότε η αγορά από το εξωτερικό ήταν η μόνη επιλογή. Ο χρόνος παράδοσης από το εξωτερικό πλησίασε τους 2 ημερολογιακούς μήνες.

Όμως, η διαφορά στο κόστος είναι μεγάλη καθώς το συνολικό κόστος των εξαρτημάτων που περιγράφηκαν είναι το διπλάσιο από Έλληνα προμηθευτή σε σχέση με προμηθευτή του εξωτερικού. Πλέον, λόγω της απήχησης του ηλεκτρονικού εμπορίου στο αγοραστικό κοινό, αποτελεί κοινή πρακτική η αγορά ηλεκτρονικού εξοπλισμού από το εξωτερικό όταν ο χρόνος παράδοσης δεν αποτελεί κριτήριο αγοράς.