



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ενεργές και παθητικές μέθοδοι ανίχνευσης
πολύ μικρών ιπτάμενων οχημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Α. Κυρίτσης

Επιβλέπων : Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ενεργές και παθητικές μέθοδοι ανίχνευσης
πολύ μικρών ιπτάμενων οχημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Α. Κυρίτσης

Επιβλέπων : Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιούλιο 2016.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου

.....
Δήμητρα Κακλαμάνη

.....
Ροδούλα Μακρή

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Ερευνήτρια ΕΠΙΣΕΥ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Αλέξανδρος Λ. Κυρίτσης

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

Copyright © Αλέξανδρος Λ. Κυρίτσης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας ανίχνευσης μικρών ιπτάμενων οχημάτων με τη χρήση RF ή/και ακουστικών συχνοτήτων. Χρησιμοποιείται μια υφιστάμενη κατασκευή ραντάρ με συχνότητα λειτουργίας 24GHz (RF ανίχνευση – ενεργή μέθοδος) και απλό δυναμικό μικρόφωνο (ακουστική ανίχνευση – παθητική μέθοδος).

Στο πρώτο μέρος της εργασίας (Ενότητες 1 και 2) γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των πτητικών μέσων που αναφέρονται επίσημα ως Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών («**ΣμηΕΑ**») καθώς και περιγραφή των απαραίτητων εννοιών/εργαλείων που αφορούν στην προσπάθεια ανίχνευσής τους. Παρουσιάζονται και αναλύονται έννοιες όπως το φαινόμενο Doppler, η ανάλυση I/Q, η «ραδιοδιατομή» (RCS) ενός αντικειμένου, η (αυτο)συσχέτιση σημάτων· όλες απαραίτητες στην υλοποίηση διατάξεων, επεξεργασία σημάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο δεύτερο μέρος (Ενότητα 3) περιγράφεται η ενεργός διαδικασία ανίχνευσης ενός πραγματικού εμπορικού ΣμηΕΑ (εφεξής «drone») με το ραντάρ 24GHz. Αφού αναλυθεί η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου ραντάρ (CW Doppler) παρουσιάζεται η υλοποίηση κατάλληλου προγράμματος σε περιβάλλον LabVIEW και τα αποτελέσματα κατά τις δοκιμές ανίχνευσης, τόσο σε κλειστό όσο και σε ανοιχτό χώρο.

Στο τρίτο μέρος (Ενότητα 4) επιχειρείται η παθητική – ακουστική ανίχνευση του ίδιου drone. Χρησιμοποιώντας ηχογραφημένες ακουστικές κυματομορφές από πτήσεις του drone σε διάφορες αποστάσεις από το μικρόφωνο, γίνεται εφαρμογή μεθόδων στο πεδίο του χρόνου (συσχέτιση) και στο πεδίο της συχνότητας (Συσχέτιση Αρμονικών Γραμμών) για να επιτύχουμε ανίχνευση.

Το τέταρτο και τελευταίο μέρος (Ενότητα 5), περιλαμβάνει μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και κριτική αποτίμησή τους. Επιπλέον θέτει τις βάσεις για συνέχιση της έρευνας στο τμήμα της RF – ενεργούς ανίχνευσης, της ακουστικής – παθητικής ανίχνευσης καθώς και με συνδυασμό μεθόδων.

Λέξεις Κλειδιά: ΣμηΕΑ, ιπτάμενο όχημα, ραδιοδιατομή, ραντάρ συνεχούς κύματος Doppler, ανίχνευση, αυτοσυσχέτιση – ετεροσυσχέτιση σημάτων, συστοιχία μικροφώνων, διαμόρφωση δέσμης.

ABSTRACT

Object of the present thesis is to study the detection feasibility of small aircrafts using radio and/or acoustic wave frequencies. An existing implementation of a 24GHz radar is used (RF detection – active method) as well as a simple dynamic microphone (acoustic detection – passive method).

In the first part of the thesis (Chapters 1 and 2), a short presentation of small aircrafts - referred to as Unmanned Aircraft Systems (“UAS”) - is made, as well as a description of the fundamental concepts/tools that take part in the attempt of a UAS detection. Terms such as Doppler effect, I/Q analysis, radar cross – section (RCS) of an object, signal (auto)correlation, are presented and analyzed; all of them essential in the hardware implementation, signal processing and result extraction.

The second part (Chapter 3) describes the active detection process of a real commercial UAS (hereafter “drone”) using the 24GHz radar. After an analysis of the basic principles of the specific type of radar (CW Doppler), a suitable LabVIEW implementation is presented along with the results of the detection attempts, both indoor and outdoors.

In the third part (Chapter 4), an attempt to passively detect the same drone is made. Using pre-recorded acoustic waveforms from drone flights in various distances from the microphone, we apply both time – domain (cross correlation) and frequency – domain (Harmonic Line Association) methods to achieve detection.

The fourth and final part (Chapter 5) includes a summary of the results and its evaluation. Furthermore, it sets the basis for future research in the RF - active detection method, the acoustic - passive detection method as well as combinations of the two.

Key Words: UAS, drone, RCS, Continuous Wave Doppler radar, detection, signal autocorrelation – cross correlation, microphone array, beamforming.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Ουζούνολγου για την ουσιαστική του καθοδήγηση στη συγγραφή της παρούσας εργασίας. Μου έδωσε ώθηση για την απόκτηση νέας γνώσης αλλά και ευκαιρία για την αποκρυστάλλωση παλαιάς.

Επίσης ευχαριστώ την ερευνήτρια του ΕΠΙΣΕΥ Δρ. Ροδούλα Μακρή για την αδιάκοπη και καθοριστική στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Αλέξανδρος Κυρίτσης

Ιούλιος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Γενικά περί UAS	14
1.1.1 Κατηγοριοποίηση	14
1.1.2 Εφαρμογές, δυνατότητες και εμπορικές υλοποιήσεις	15
1.1.2.1 Επιλογή UAS για την εργασία	18
1.1.3 Κανονιστικό πλαίσιο	19
1.2 Ανίχνευση UAS	20
1.2.1 Ανασταλτικοί παράγοντες	20
1.2.2 Προεκτάσεις σε θέματα ασφάλειας	20
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	22
2.1 Συστήματα radar	22
2.1.1 Γενικά	22
2.1.2 Αρχή λειτουργίας	22
2.1.3 Εξίσωση ραντάρ	24
2.1.4 Τύποι ραντάρ	26
2.2 Φαινόμενο Doppler	27
2.2.1 Γενική αρχή	27
2.2.2 Εφαρμογή σε συστήματα radar	29
2.3 Ανάλυση I/Q	30
2.4 Radar Cross Section (RCS) και ανιχνευσιμότητα	34
2.5 Συσχέτιση σημάτων	36
2.5.1 Ετεροσυσχέτιση (Cross correlation)	37
2.5.2 Αυτοσυσχέτιση (Autocorrelation)	38

3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	41
3.1 Περιγραφή λειτουργίας radar	41
3.2 Δοκιμαστική εφαρμογή χρήσης ραντάρ	44
3.3 Χρήση για ανίχνευση UAS	46
3.3.1 Περιγραφή περιβάλλοντος εφαρμογής	46
3.3.2 Ανίχνευση UAS	48
4. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕ ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	52
4.1 Γενικά	52
4.2 Cross correlation ηχητικού σήματος με γνωστή κυματομορφή	52
4.3 Εξαγωγή φασματικού περιεχομένου κυματομορφής	56
4.3.1 Harmonic Lince Association (HLA)	60
4.4 Beamforming	61
5. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	63
5.1 Επισκόπηση διαδικασίας	63
5.1.1 Συμπεράσματα διαδικασίας ενεργού ανίχνευσης	63
5.1.2 Συμπεράσματα διαδικασίας παθητικής ανίχνευσης	64
5.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη διατάξεων	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Παράδειγμα Tri-copter	15
Εικόνα 1.2: Παράδειγμα Quad-copter	15
Εικόνα 1.3: Παράδειγμα Six-copter.....	16
Εικόνα 1.4: Παράδειγμα Eight-copter	16
Εικόνα 1.5: Συνδυασμός πολλών drone στην ίδια εφαρμογή.....	16
Εικόνα 1.6: Drone για αγροτικό ψεκασμό ακριβείας	18
Εικόνα 1.7: Σχέδιο drone για αποστολή προϊόντων στο σπίτι από την Amazon.....	18
Εικόνα 1.8: Το DJI Phantom 3 Advanced που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία.....	19
Εικόνα 2.1: Εκπομπή κύματος από ραντάρ.....	22
Εικόνα 2.2: Επιστροφή ανακλώμενου κύματος από στόχο	22
Εικόνα 3.1: Το CW Doppler ραντάρ της εργασίας	41
Εικόνα 3.2: Διαστάσεις χοανοκεραιών	41
Εικόνα 3.3: Το drone σε αιώρηση	50
Εικόνα 3.4: Το drone κατά την κίνηση	50
Εικόνα 3.5: Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής πτερύγων	51
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα υλοποίησης συστοιχίας μικροφώνων	62

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες του Phantom 3 Advanced	19
Πίνακας 2.1: Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων – στόχων	36
Πίνακας 3.1: Πίνακας δεδομένων TDMS	47
Πίνακας 4.1: Πίνακας μετρήσεων κατά απόσταση	53
Πίνακας 4.2: Πίνακας με τις αποστάσεις LOS	54

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Κατανομή drone ανά δραστηριότητα/χρήση.....	17
Σχήμα 1.2: Κατασκευαστές εμπορικών drones και τα μερίδιά τους στην αγορά.....	17
Σχήμα 1.3: Μερίδιο αγοράς DJI για το 2014.....	18
Σχήμα 1.4: Πρόβλεψη για ανάπτυξη αγοράς drones.....	18
Σχήμα 2.1: Κατευθυντικότητα κεραίας ραντάρ – ανακλώμενη ισχύς	23
Σχήμα 2.2: Εκτίμηση κατεύθυνσης στόχου	24
Σχήμα 2.3: Κατηγοριοποίηση συστημάτων ραντάρ	26
Σχήμα 2.4: Πύκνωση μετώπων κύματος	27
Σχήμα 2.5: Μεγέθη που εμπλέκονται στην ολίσθηση Doppler	28
Σχήμα 2.6: Block διάγραμμα ενός CW Doppler ραντάρ	30
Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση συμφασικής – ορθογώνιας συνιστώσας	31
Σχήμα 2.8: Block διάγραμμα υλοποίησης διαμορφωτή I/Q	32
Σχήμα 2.9: Block διάγραμμα υλοποίησης αποδιαμορφωτή I/Q	33
Σχήμα 2.10: I/Q διαμόρφωση – αποδιαμόρφωση στο πεδίο της συχνότητας	33
Σχήμα 2.11: Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης – ετεροσυσχέτισης σημάτων 1	39
Σχήμα 2.12: Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης – ετεροσυσχέτισης σημάτων 2	40
Σχήμα 2.13: Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης – ετεροσυσχέτισης σημάτων παρουσία θορύβου	40
Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα του ραντάρ 24GHz	42
Σχήμα 3.2: Σχηματικό I/Q downconverter	43
Σχήμα 3.3: Διαδικασία απόρριψης ειδώλου του downconverter	44
Σχήμα 3.4: Εφαρμογή Doppler_Detect – κίνηση αυτοκινήτου προς τα εμπρός	45
Σχήμα 3.5: Εφαρμογή Doppler_Detect – κίνηση αυτοκινήτου προς τα πίσω	45
Σχήμα 3.6: Εφαρμογή επιτήρησης ραντάρ	46
Σχήμα 3.7: Κορυφές αρμονικών τάσης 50Hz	48
Σχήμα 3.8: Θόρυβος στην περιοχή 480Hz – 600Hz	48
Σχήμα 3.9: Κορυφές κατά την προσπάθεια ανίχνευσης του drone	49
Σχήμα 3.10: Ραντάρ κάθετο στο επίπεδο των πτερύγων του drone	50
Σχήμα 4.1: Το περιβάλλον της εφαρμογής συσχέτισης κυματομορφών	53
Σχήμα 4.2: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #1	55
Σχήμα 4.3: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #2	55

Σχήμα 4.4: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #3	56
Σχήμα 4.5: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #4	56
Σχήμα 4.6: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – power spectrum #10	57
Σχήμα 4.7: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – power spectrum #25	58
Σχήμα 4.8: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – spectrogram #10	58
Σχήμα 4.9: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – spectrogram #25	59
Σχήμα 4.10: Εφαρμογή HLA για εξαγωγή ακουστικών χαρακτηριστικών	60

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά περί UAS

Σύμφωνα με τον ορισμό που προτάθηκε από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ), ένα **Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους -ΣμηΕΑ (Unmanned Aircraft System – UAS)** είναι «το μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UA) μαζί με όλο τον σχετικό εξοπλισμό που αφορά στην υποστήριξη αυτού (σταθμός ελέγχου, δυνατότητες σύνδεσης δεδομένων και τηλεχειρισμού, εξοπλισμός πλοήγησης κλπ.) ο οποίος είναι απαραίτητος για την λειτουργία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους.»

Ο παραπάνω ορισμός περιλαμβάνεται στον «Κανονισμό πτήσεων των Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) – Unmanned Aircraft Systems (UAS)» που τέθηκε σε δημόσια διαβούλευση από την ΥΠΑ. Επίσημο ρυθμιστικό πλαίσιο δεν υπάρχει ακόμα στη χώρα μας κατά το χρόνο συγγραφής της παρούσας εργασίας.

1.1.1 Κατηγοριοποίηση

Η συνέχεια του προαναφερθέντος ορισμού αναφέρει: «Τα ΣμηΕΑ είναι είτε ελεύθερα (free UAS) ή είναι δυνατόν να είναι προσδεδεμένα (tethered UAS) σε σταθερές ή κινητές βάσεις. Στην κατηγορία των συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών -ΣμηΕΑ (Unmanned Aircraft System – UAS) περιλαμβάνονται και τα Τηλεχειριζόμενα Αεροσκάφη (Remotely-Piloted Aircraft RPA) και τα Τηλεχειριζόμενα Συστήματα Αεροσκαφών (Remotely-Piloted Aircraft Systems RPAS), καθώς και τα αυτόνομα αεροσκάφη (autonomous aircraft).»

Λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

- τη μέγιστη μάζα απογείωσης (MTOM – Maximum Take Off Mass)
- το είδος χρήσης
- το ύψος άνωθεν της γης ή της θάλασσας όπου επιτρέπεται να ίπτανται
- τις περιοχές (αποκλειστικές ή μη) όπου ίπτανται
- τις τεχνικές δυνατότητές του
- την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος πτητικής λειτουργίας του,

καθορίζονται 3 κατηγορίες ΣμηΕΑ:

1. Η «ανοικτή» κατηγορία (UAS Open Category)
2. Η «ειδική» κατηγορία (UAS Specific Category)
3. Η «πιστοποιημένη» κατηγορία (UAS Certified Category).

Το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας βρίσκεται στην «ανοικτή» κατηγορία, κύρια χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

- Ο χειριστής έχει απευθείας οπτική επαφή με το ΣμηΕΑ
- Έχουν MTOM < 25Kg
- Απαγορεύεται η πτήση τους πάνω από απαγορευμένες / περιορισμένες περιοχές όπως έχουν αυτές οριστεί για μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη και για Επανδρωμένα Αεροσκάφη καθώς επίσης και πάνω από συγκεντρώσεις προσώπων ή σε πλευρική απόσταση μικρότερη από 150m
- Μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος πτήσης τα 400 ft (~122m)

1.1.2 Εφαρμογές, δυνατότητες και εμπορικές υλοποιήσεις

Ακόμη και αν περιοριστούμε στην «ανοικτή» κατηγορία UAS, η ποικιλία στις εφαρμογές τους είναι τεράστια και η καταγραφή της έξω από τους σκοπούς της εργασίας. Εφεξής θα αναφερόμαστε στα ΣμηΕΑ αυτής της κατηγορίας συλλήβδην ως «**drones**»· όρος που άλλωστε χρησιμοποιείται ευρέως αλλά και επίσημα από την FAA – Federal Aviation Administration, Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής αντίστοιχη της ΥΠΑ.

Οι συνηθισμένες εφαρμογές αφορούν drones με 3, 4, 6 και 8 έλικες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δίνονται στις Εικόνες 1.1 έως 1.4.



Εικόνα 1.1: Παράδειγμα Tri-copter



Εικόνα 1.2: Παράδειγμα Quad-copter



Εικόνα 1.3: Παράδειγμα Six-copter



Εικόνα 1.4: Παράδειγμα Eight-copter

Υπάρχουν παραδείγματα υλοποιήσεων που συνδυάζουν παραπάνω από ένα drone μιας κατηγορίας. Έτσι επιτυγχάνουν το scaling up των κατασκευών όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5 όπου 4 Quad-copters έχουν χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα.

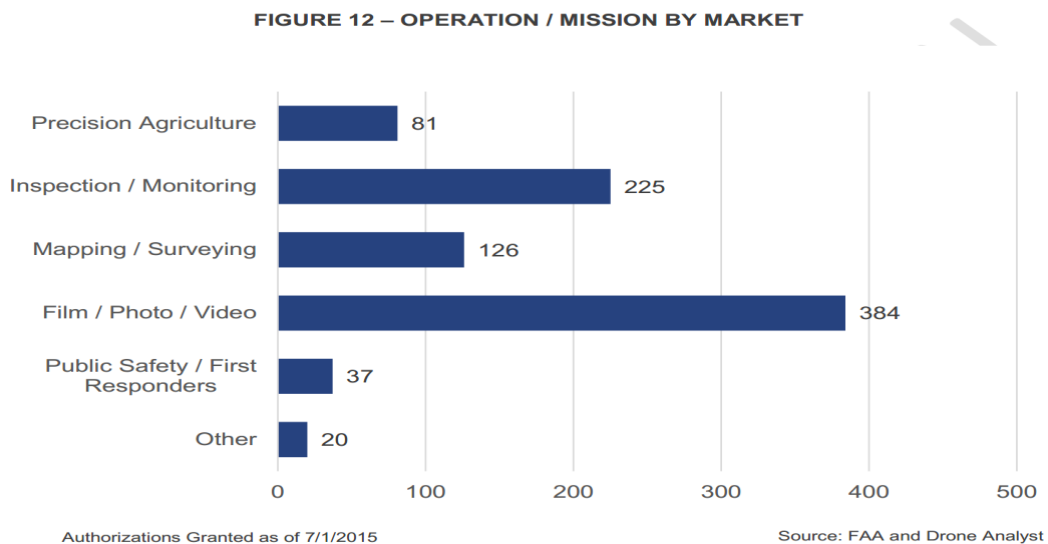


Εικόνα 1.5: Συνδυασμός πολλών drone στη ίδια εφαρμογή

Στο Σχήμα 1.1, φαίνεται η κατανομή των καταγεγραμμένων/δηλωθέντων drones σε διάφορες δραστηριότητες για τις οποίες χρησιμοποιούνται. Από τα στοιχεία αυτά (που αφορούν το έτος 2015) αλλά και από την καθημερινή εμπειρία, μπορεί κανείς με ασφάλεια να θεωρήσει ότι η μεγάλη πλειονότητα των drones χρησιμοποιείται για την εναέρια λήψη εικόνων ή/και βίντεο. Ο σκοπός για τον οποίο λαμβάνονται οι υπόψη εικόνες είναι που διαφοροποιεί τις κατηγορίες χρήσης μεταξύ τους. Πεδία εφαρμογής είναι:

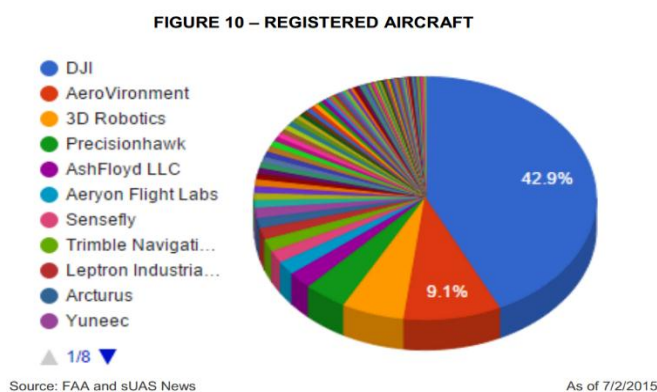
- Εφαρμογές ψυχαγωγίας (αερομοντελισμός, ερασιτεχνική φωτογραφία)

- Επαγγελματικές εφαρμογές (φωτογράφιση\βιντεοσκόπηση γεγονότων, γεωδαισία)
- Εφαρμογές επιτήρησης (συνόρων, χώρων ενδιαφέροντος)
- Εφαρμογές ασφαλείας (αντίδραση σε περιπτώσεις καταστροφών, εντοπισμός σε αποστολές SAR ανακούφιση θυμάτων καταστροφών)



Σχήμα 1.1: Κατανομή drone ανά δραστηριότητα/χρήση – Πηγή: dronelife.com

Η υφιστάμενη πραγματικότητα στην αγορά drone για ερασιτεχνική χρήση, βρίσκει μάλλον κυρίαρχη την εταιρία DJI με τα μοντέλα της σειράς Phantom.

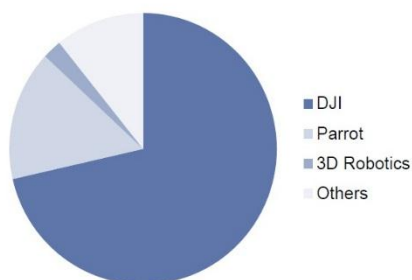


Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται ότι πάνω από 40% των συνολικά καταγεγραμμένων drones είναι της DJI ενώ σε συνδυασμό με το Σχήμα 1.3, διαπιστώνουμε ότι το μερίδιο αγοράς της βαίνει μειούμενο εξαιτίας του ανταγωνισμού.

Σχήμα 1.2: Κατασκευαστές εμπορικών drones και τα μερίδιά τους στην αγορά – Πηγή: dronelife.com

Η συνολική εικόνα της αγοράς στον τομέα των drones αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.4, όπου προβλέπεται τριπλασιασμός της εν λόγω αγοράς από το 2015 στο 2017.

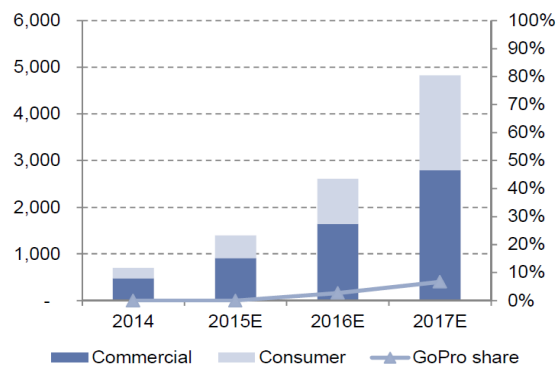
Exhibit 19: DJI is by far the leader in the drone market
Market share, 2014



Source: Goldman Sachs Global Investment Research.

Σχήμα 1.3: Μερίδιο αγοράς DJI για το 2014 –
Πηγή: dronelife.com

Exhibit 18: We estimate the drone market at \$1.4bn in 2015, more than tripling to approach \$5bn in 2017
Consumer and Commercial drone market (\$ mn)



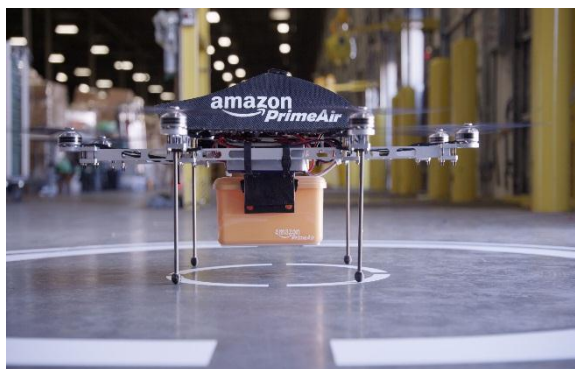
Source: Goldman Sachs Global Investment Research.

Σχήμα 1.4: Πρόβλεψη για ανάπτυξη αγοράς drones –
Πηγή: dronelife.com

Παρόλο που ξεφεύγουν από την κατηγορία open λόγω MTOM>25Kg, θα ήταν παράληψη να μην αναφερθούν σημαντικές εφαρμογές όπως ψεκασμοί ακριβείας (precision spraying) σε δύσβατες καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Εικόνα 1.6) ενώ εντυπωσιακό, αν και για μικρότερα βάρη, είναι το σχέδιο της Amazon για κατ' οίκο παράδοση προϊόντων με τη χρήση drone (Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.6: Drone για αγροτικό ψεκασμό ακριβείας – Πηγή: Associated Press



Εικόνα 1.7: Σχέδιο drone για αποστολή προϊόντων στο σπίτι από την Amazon – Πηγή: forbes.com

1.1.2 Επιλογή UAS για την εργασία

Για τους σκοπούς της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Advanced της σειράς Phantom 3 της DJI (Εικόνα 1.8). Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο είναι: α) είναι ευρέως διαδεδομένο, β) διαθέσιμο σε καταστήματα λιανικής και γ) σχετικά οικονομικό.



Εικόνα 1.8: Το DJI Phantom 3 Advanced που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία

Στοιχεία του συγκεκριμένου drone στην έκταση που ενδιαφέρει την παρούσα, φαίνονται στον Πίνακα 1.1 και αφορούν ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και πτητικές του δυνατότητες.

Σκάφος	Βάρος (με μπαταρία και έλικες)	1280 g
	Διαγώνια διάσταση (χωρίς έλικες)	350 mm
	Μέγιστη ταχύτητα ανόδου	5 m/s (18 km/h)
	Μέγιστη ταχύτητα καθόδου	3 m/s (10.8 km/h)
	Μέγιστη ταχύτητα	16 m/s (57.6 km/h)
	Θερμοκρασία λειτουργίας	0°C έως 40°C
	Σύστημα προσδιορισμού θέσης	GPS/GLONASS
	Χρόνος πτήσης	23 λεπτά (περίπου)
	Ύψος πτήσης	120 m από το σημείο απογείωσης (περιορισμένο)
Τηλεχειριστήριο	Συχνότητα λειτουργίας	2.400 GHz-2.483 GHz
	Μέγιστη απόσταση μετάδοσης	3.5 km (χωρίς εμπόδια, χωρίς παρεμβολές)
	EIRP	16 dBm
Μπαταρία	Χωρητικότητα	4480 mAh
	Τάση λειτουργίας	15.2 V
	Τύπος	LiPo 4S
	Βάρος	365 g

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες του Phantom 3 Advanced – Πηγή: dji.com

1.1.3 Κανονιστικό πλαίσιο

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 1.1, εξειδικευμένο ρυθμιστικό πλαίσιο για τις πτήσεις ΣμηΕΑ απουσιάζει τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Ωστόσο κατόπιν εντολής του Υπουργού Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων, συντάχθηκε από την ΥΠΑ σχέδιο κανονισμού το οποίο τέθηκε σε δημόσια διαβούλευση στις 24 Μαΐου 2016. Η διαδικασία υποβολής προτάσεων για τροποποίηση ολοκληρώθηκε την 8^η Ιουνίου 2016 και βρίσκεται στο στάδιο της αξιολόγησης. Με το πέρας της αξιολόγησης - οριστικοποίηση, προβλέπεται η δημοσίευσή του στην Εφημερίδα της Κυβέρνησης και έναρξη ισχύος του Κανονισμού μετά την παρέλευση διμήνου από τη σχετική δημοσίευση.

Στην κατεύθυνση αυτή κινήθηκε νωρίτερα η FAA των ΗΠΑ, εκδίδοντας στις 21 Ιουνίου 2016 ένα σύντομο κανονισμό για πτήσεις UAS εμπορικής χρήσης (commercial use). Παρόλο που ο σχετικός κανονισμός δεν περιλαμβάνει αεροσκάφη μοντελισμού (model aircraft), εντούτοις εκτιμάται ότι η εφαρμογή του θα αποφέρει περισσότερα από \$82 δις στην οικονομία των ΗΠΑ και θα δημιουργήσει περισσότερες από 100.000 νέες θέσεις εργασίας στα επόμενα 10 χρόνια. Η αρχή ισχύος του τοποθετείται στο τέλος Αυγούστου 2016.

1.2 Ανίχνευση UAS

Η εκτεταμένη εμπορική χρήση των drones έχει πυροδοτήσει την ανάλογη προσπάθεια προς την κατεύθυνση ανίχνευσής τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ο διαγωνισμός του MITRE για την ανάδειξη της καλύτερης λύσης C-UAS (Counter – UAS) όπου στην τελική του φάση 8 εταιρείες θα διαγωνιστούν για το καλύτερο σύστημα ανίχνευσης\ταυτοποίησης «ύποπτων» drones βάρους κάτω των 2.3 kg.

1.2.1 Ανασταλτικοί παράγοντες

Το μικρό τους μέγεθος και η εκτεταμένη χρήση πλαστικού στην κατασκευή τους, είναι δυο από τους κυριότερους παράγοντες που δυσχεραίνουν τη διαδικασία ανίχνευσης UAS. Με διαστάσεις μικρότερες των 50cm από άκρο σε άκρο και μόνα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη τους μικρούς ηλεκτρικούς κινητήρες των ελίκων (ενδεχομένως και κάποιους αισθητήρες\κάμερα), η ανακλώμενη ενέργεια για ένα ραντάρ είναι ελάχιστη.

Η χαμηλή ταχύτητα καθώς και το χαμηλό ύψος πτήσης τους είναι επίσης ανασταλτικοί παράγοντες. Η παρούσα σχεδίαση ραντάρ, επιχειρεί ν' ανιχνεύσει σχετικά μεγάλα αντικείμενα (αεροσκάφη, πλοία, αυτοκίνητα) που κινούνται με υψηλές ταχύτητες (άνω των 60km/h).

1.2.2 Προεκτάσεις σε θέματα ασφάλειας

Ήδη ζητήματα ασφαλείας έχουν εγερθεί από συμβάντα όπως η πτώση ενός εμπορικού drone στο λευκό οίκο των ΗΠΑ και η προσέγγιση drone στα 6m από τον αεροδιάδρομο του αεροδρομίου Heathrow. Εκτός από τις καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να υπάρξουν εάν παρασυρθεί στους κινητήρες ενός αεροπλάνου κατά την πτήση, μόνο η απόσπαση της

προσοχής του πιλότου από την ύπαρξη ενός drone στο οπτικό του πεδίο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη.

Η παράνομη επιτήρηση χώρων περιορισμένης πρόσβασης γίνεται ευκολότερη από οποιονδήποτε ερασιτέχνη έχει στη διάθεσή του ένα εμπορικό drone. Χώροι όπως στρατιωτικές βάσεις και αεροδρόμια, ευαίσθητες δασικές περιοχές, γίνονται πλέον ευκολότεροι στόχοι για κακόβουλες δραστηριότητες παρά τους πρόσφατους περιορισμούς geo – fencing που ενεργοποιήθηκαν σε επίπεδο λογισμικού.

Η ευκολία παραμετροποίησης ορισμένων χαρακτηριστικών όπως όπως το φορτίο που φέρουν, προσδίδει επιπλέον δυνατότητες στα UAS: η κάμερα μπορεί να αφαιρεθεί με σχετική ευκολία και ν' αντικατασταθεί από αυτοσχέδιες κατασκευές οι οποίες με τη σειρά όπως μπορούν να προκαλέσουν μαζική ζημία. Με τον τρόπο αυτό, μια πτήση drone πάνω από συγκεντρώσεις πλήθους ανθρώπων όπως για παράδειγμα σε ένα γήπεδο κατά τη διάρκεια ποδοσφαιρικού αγώνα, μπορεί να μην αποσκοπεί αποκλειστικά στη μαγνητοσκόπηση του γεγονότος αλλά να εγκυμονεί μεγάλους κινδύνους.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1 Συστήματα radar

2.1.1 Γενικά

Ο όρος καθιερώθηκε κατά το Β' παγκόσμιο πόλεμο από τις συμμαχικές δυνάμεις για να περιγράψει τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό που ανιχνεύει την παρουσία αντικειμένων μέσω την ανακλώμενης από αυτά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

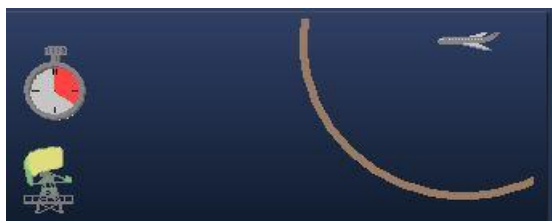
Πρόκειται για ακρωνύμιο του όρου "RADio (Aim) Detecting And Ranging" που εισήχθη ήδη από το 1940 από αξιωματικό του αμερικανικού Ναυτικού για να περιγράψει την –τότε– νέα εφεύρεση.

2.1.2 Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία του ραντάρ απεικονίζεται στις εικόνες 2.1 & 2.2 ενώ να περιγραφεί ως εξής: η κεραία του ραντάρ λειτουργώντας ως πομπός, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα (συνεχές ή με τη μορφή παλμού) κάποια χρονική στιγμή t_0 . Το κύμα προσπίπτει στο στόχο και μέρος της ενέργειάς του ανακλάται και επιστρέφει τη χρονική στιγμή t με καθυστέρηση Δt ($t = t_0 + \Delta t$) στην κεραία του ραντάρ η οποία πλέον λειτουργεί ως δέκτης· το επιστρεφόμενο κύμα αναφέρεται και ως «ηχώ».



Εικόνα 2.1: Εκπομπή κύματος από ραντάρ



Εικόνα 2.2: Επιστροφή ανακλώμενου κύματος από στόχο

Με γνωστή την ταχύτητα διάδοσης των ΗΜ κυμάτων στην ατμόσφαιρα $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s και μετρώντας τη χρονική καθυστέρηση Δt , μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόσταση του στόχου από το ραντάρ. Έτσι λοιπόν η εμβέλεια R (Range) του ραντάρ δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.1)$$

όπου R : η εμβέλεια του ραντάρ\απόσταση από το στόχο (σε m)

c : η ταχύτητα του ΗΜ κύματος στον αέρα ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s)

Δt : το χρονικό διάστημα από την εκπομπή του αρχικού έως τη λήψη του ανακλώμενου κύματος (σε s).

Η εξίσωση (2.1) προκύπτει από τον απλό ορισμό της ταχύτητας

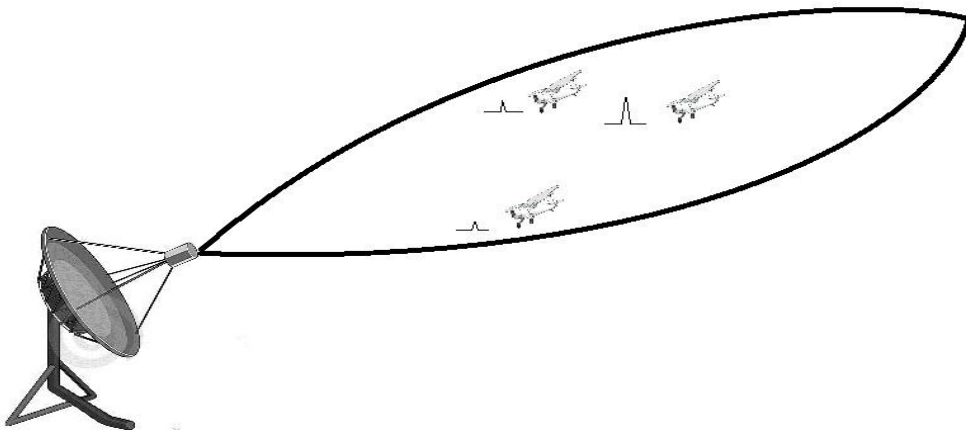
$$v = \frac{s}{t} \quad (2.2)$$

στην οποία ο δρόμος s είναι η συνολική διαδρομή πομπός-στόχος-δέκτης που διανύει το κύμα και ισούται πρακτικά με το διπλάσιο της απόστασης R μεταξύ πομπού και δέκτη. Έτσι αν στη (2.2) αντικαταστήσουμε $s=2R$, το v με τη γνωστή ταχύτητα c και το χρόνο t με την καθυστέρηση Δt έχουμε

$$c = \frac{2 \cdot R}{\Delta t} \quad (2.3)$$

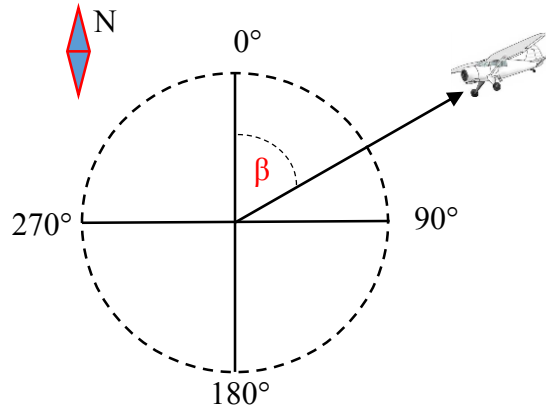
από την οποία προκύπτει η (2.1).

Πλέον της απόστασης, με γνωστή την κατευθυντικότητα της κεραίας του ραντάρ είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η κατεύθυνση του στόχου.



Σχήμα 2.1: Κατευθυντικότητα κεραίας ραντάρ – ανακλώμενη ισχύς

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, το σημείο εντός του κυρίου λοβού της κεραίας στο οποίο βρίσκεται ο στόχος καθορίζει την ισχύ της ηχώς που επιστρέφει στο δέκτη. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η γωνία β σε σχέση με τον πραγματικό βορρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Εκτίμηση κατεύθυνσης στόχου

2.1.3 Εξίσωση ραντάρ

Για την εξαγωγή μιας σχέσης που να υπολογίζει την εμβέλεια R ενός ραντάρ, θεωρούμε ισοτροπικό ακτινοβολητή ως κεραία που εκπέμπει σε ιδανικές συνθήκες διάδοσης σφαιρικά κύματα. Έτσι, περιοχές με την ίδια πυκνότητα ισχύος σχηματίζουν σφαίρες επιφάνειας $A=4\pi R^2$ γύρω από την κεραία. Όσο αυξάνεται η απόσταση από την κεραία, η πυκνότητα ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης κεραίας – στόχου.

Η πυκνότητα ισχύος (μη κατευθυντικής) κεραίας ραντάρ δίνεται από τη σχέση

$$S = \frac{P_{\Pi}}{4\pi R_1^2} \quad (2.4)$$

όπου P_{Π} : η εκπεμπόμενη ισχύς από τον πομπό (σε W)

R_1 : η απόσταση ραντάρ – στόχου (σε m)

Λαμβάνοντας υπόψη το κατευθυντικό κέρδος G της κεραίας, μπορούμε ν' αντικαταστήσουμε στη (2.4) το S με τον όρο

$$S_{\Pi} = S \cdot G. \quad (2.5)$$

Η ενέργεια P_{σ} που ανακλάται (ηχώ) από το στόχο προς το ραντάρ είναι συνάρτηση της «ραδιοδιατομής» ή «ενεργού διατομής» ή «ηχώ ραντάρ» ή «Radar Cross Section (RCS)» του στόχου (το οποίο συμβολίζεται με σ και θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα) και χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.5) γίνεται

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi}}{4\pi R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (2.6)$$

Η επιστροφή της ηχώς θεωρούμε ότι γίνεται υπό τις ίδιες συνθήκες διάδοσης στο μέσο, οπότε η πυκνότητα ισχύος S_λ που λαμβάνει ο δέκτης του ραντάρ είναι

$$S_\lambda = \frac{P_\sigma}{4\pi R_2^2} \quad (2.7)$$

Η σχέση (2.7) αφορά την ισχύ εισόδου στην κεραία. Λαμβάνοντας υπόψη την ενεργό επιφάνεια της κεραίας

$$A_\varepsilon = \frac{\lambda^2 \cdot G}{4\pi} \quad (2.8)$$

όπου λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, προκύπτει η ισχύς λήψης P_λ

$$P_\lambda = S_\lambda \cdot A_\varepsilon = \frac{P_\Pi \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (2.9)$$

Στη (2.9) θεωρήσαμε ότι η απόσταση πομπού – στόχου R_1 και στόχου – δέκτη R_2 είναι ίσες, δηλαδή $R_1 = R_2 = R$.

Με τη λογική υπόθεση ότι η μέγιστη απόσταση στην οποία ανιχνεύεται ο στόχος (R_M) γίνεται όταν έχουμε ελάχιστη ισχύ λήψης στο δέκτη ($P_\lambda = P_{min}$) και με δεδομένη την ευαισθησία αυτού, λύνοντας τη (2.9) ως προς την απόσταση R , προκύπτει η μέγιστη εμβέλεια ή *εξίσωση ραντάρ*

$$R_M = \sqrt[4]{\frac{P_\Pi \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_{min}}} \quad (2.10)$$

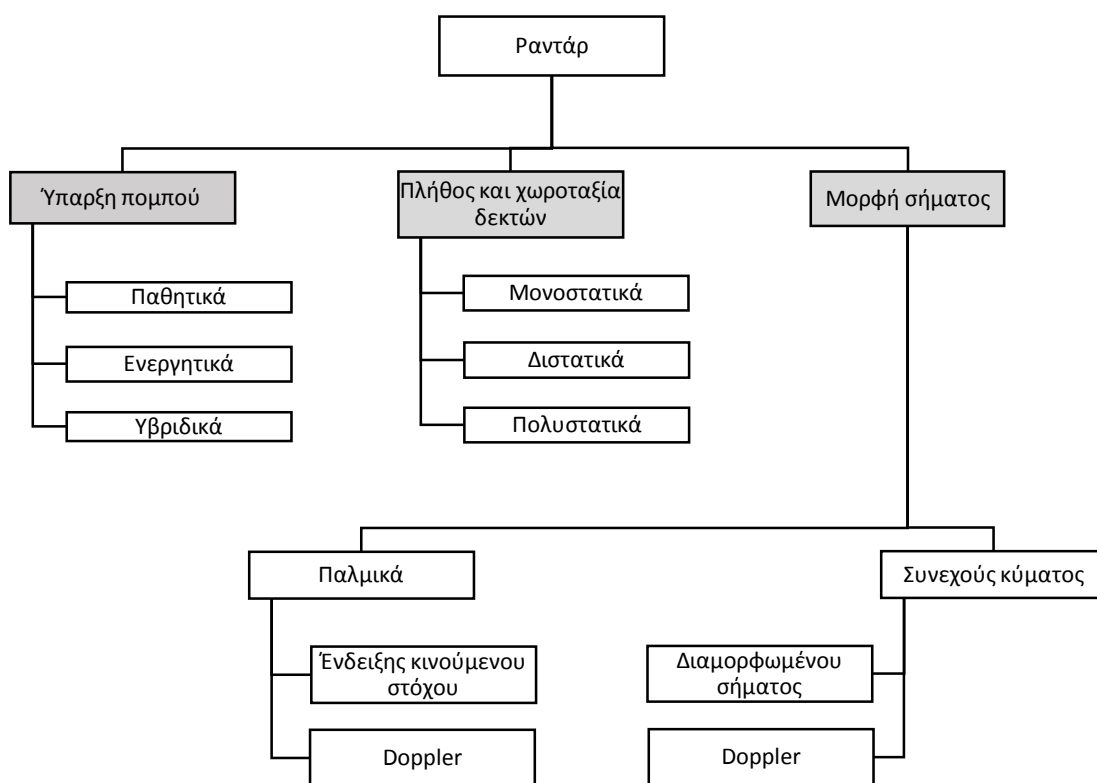
Εάν ληφθούν υπόψη οι απώλειες που οφείλονται σε πολυάριθμους παράγοντες (ατμοσφαιρικοί, απώλειες γραμμών μεταφοράς, προσαρμογής φίλτρων, επεξεργασίας σήματος, κλπ), αυτές μπορούν να περιγραφούν από ένα παράγοντα L το μέγεθος του οποίου είναι αντιστρόφως ανάλογο της R_M και βρίσκεται στον παρονομαστή της (2.10) δίνοντας

$$R_M = \sqrt[4]{\frac{P_\Pi \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_{min} \cdot L}} \quad (2.11)$$

2.1.4 Τύποι ραντάρ

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται μια κατηγοριοποίηση των διάφορων τύπων ραντάρ σύμφωνα με τρία κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά αφορούν την τεχνολογία/υλοποίησή τους ενώ υπάρχουν και κατηγοριοποιήσεις σύμφωνα με το σκοπό/χρήση τους, όπως π.χ. ανίχνευσης εδάφους, εναέριων μέσων, κλπ. Η εκτενής παρουσίαση των διάφορων τύπων δεν είναι εκ των σκοπών της παρούσας, γι' αυτό και θ' ακολουθήσει σύντομη περιγραφή.

Ενεργητικά (primary) χαρακτηρίζονται τα συστήματα ραντάρ που διαθέτουν πομπό, ενώ **παθητικά (secondary)** εκείνα που έχουν μόνο δέκτη. Τα τελευταία ανιχνεύουν πηγές ΗΜ ακτινοβολίας και αποτελούν ένα είδος «αισθητήρα». **Υβριδικά (hybrid)** είναι τα συστήματα που ενώ έχουν τα χαρακτηριστικά των παθητικών, εντούτοις διαθέτουν και πομπό ώστε κατ' απαίτηση να μπορούν να «φωτίσουν» αυτοδύναμα κάποιο στόχο, χωρίς να στηρίζονται στην ύπαρξη ή όχι πηγής ΗΜ κυμάτων σ' αυτόν.



Σχήμα 2.3: Κατηγοριοποίηση συστημάτων ραντάρ

Μονοστατικά (monostatic) είναι τα συστήματα στα οποία πομπός και δέκτης βρίσκονται στο ίδιο σημείο ενώ μπορεί και να ταυτίζονται, μέσω της χρήσης του διπλέκτη που επιτρέπει τη χρήση μιας κεραίας είτε ως πομπό είτε ως δέκτη αδιαφανώς προς το χρήστη. Εάν πομπός – δέκτης βρίσκονται σε σχετική απόσταση μεταξύ τους (ενδεχομένως και

συγκρίσιμη με την εμβέλεια του ραντάρ) τότε πρόκειται για **διστατικά (bistatic)** ραντάρ. Σημειώνεται πως όταν η απόσταση πομπού – δέκτη είναι πολύ μικρή, αυτό σημαίνει ότι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των νοητών ευθειών που ενώνουν πομπό – στόχο – δέκτη είναι πρακτικά 0° και τότε το σύστημα ονομάζεται «**οιονεί μονοσταστικό**» (**quasi – monostatic**). **Πολυσταστικά (multistatic)** είναι τα συστήματα τα οποία διαθέτουν πλέον του ενός δέκτη και μάλιστα διασκορπισμένους σε μια (εκτεταμένη) γεωγραφική περιοχή.

Τα **παλμικά ραντάρ (pulse radar)** χρησιμοποιούν παλμούς οι οποίοι όταν έχουν χαμηλή συχνότητα επανάληψης (Pulse Repetition Frequency – PRF) χαρακτηρίζουν το ραντάρ ως **ένδειξης κινούμενου στόχου (Moving Target Indicator – MTI)**. υψηλό PRF χαρακτηρίζει το ραντάρ ως **παλμικό Doppler (Pulse Doppler)**.

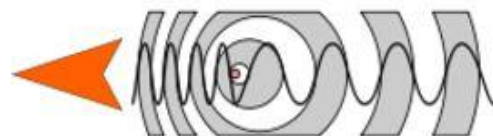
Τέλος, όταν αντί για παλμούς ο πομπός του ραντάρ εκπέμπει συνεχές κύμα έχουμε τις κατηγορίες **Doppler συνεχούς κύματος (Continuous Wave Doppler – CW Doppler)** και στην περίπτωση που το κύμα είναι κατάλληλα διαμορφωμένο, ανήκει στην κατηγορία **διαμορφωμένου σήματος (Frequency Modulated Continuous Wave – FMCW)**

2.2 Φαινόμενο Doppler

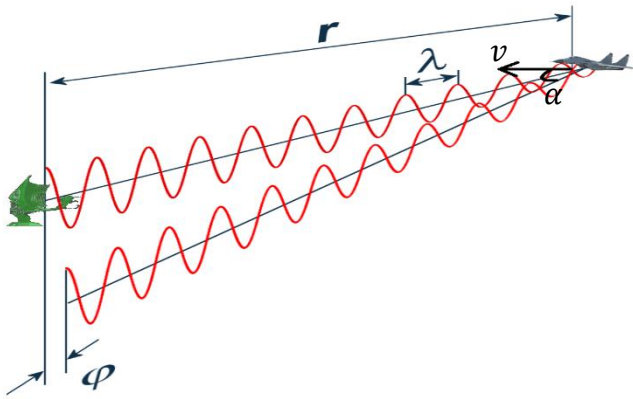
2.2.1 Γενική αρχή

Όταν μια πηγή που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό (ή άλλο) κύμα κινείται σε σχέση με ένα παρατηρητή, παρατηρείται μια διαφορά συχνότητας ανάμεσα στο εκπεμπόμενο σήμα της πηγής και το σήμα που λαμβάνει ο παρατηρητής.

Διαισθητικά και με τη βοήθεια του Σχήματος 2.4, η ολίσθηση συχνότητας εξηγείται ως εξής: καθώς η πηγή κινείται για παράδειγμα προς τον παρατηρητή, κάθε μέτωπο κύματος εκπέμπεται από όλο και πλησιέστερο προς αυτόν σημείο. Έτσι κάθε κύμα έχει να διανύσει όλο και μικρότερη απόσταση προς τον παρατηρητή και ο παρατηρητής φαινομενικά λαμβάνει περισσότερα μέτωπα κύματος στη μονάδα του χρόνου.



Σχήμα 2.4: Πύκνωση μετώπων κύματος



Σχήμα 2.5: Μεγέθη που εμπλέκονται στην ολίσθηση Doppler

Η διαφορά φάσης φ ανάμεσα σε ένα ΗΜ κύμα που εκπέμπει η κεραία του ραντάρ και στην καθυστερημένη ηχώ του που ανακλάται από το στόχο προς το δέκτη, οφείλεται στη διαφορά δρόμου που διανύει το κύμα.

Το παραπάνω δείχνεται στο Σχήμα 2.5, από όπου προκύπτει ότι η διαφορά (ή «ολίσθηση») φάσης μπορεί να γραφεί ως

$$\varphi = 2\pi \frac{2r}{\lambda} \quad (2.12)$$

Σημειώνεται ότι η απόσταση που διανύει το κύμα θεωρείται $2r$, όσο δηλαδή χρειάζεται το κύμα για μετ' επιστροφής ταξίδι στο στόχο.

Το σήμα εκπομπής S_t και το σήμα λήψης S_r αναπαρίστανται από τις σχέσεις

$$S_t = A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.13)$$

$$S_r = B \cdot \sin(2\pi ft - \varphi) \quad (2.14)$$

όπου **A, B**: τα τυχαία (σταθερά) πλάτη των αντίστοιχων σημάτων

φ : η μεταξύ τους διαφορά φάσης που δίνεται από τη (2.12)

Λόγω της ταχύτητας v του στόχου, η ακτινική του απόσταση r είναι συνάρτηση του χρόνου και αν α είναι η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση κίνησης και την κατεύθυνση της ανάκλασης προς το δέκτη, μπορούμε να γράψουμε

$$r(t) = r_0 - vtc\alpha \quad (2.15)$$

όπου r_0 : η απόσταση πομπού στόχου τη στιγμή $t = 0$.

Με τη (2.15) η (2.14) γράφεται

$$\begin{aligned} S_r &= B \cdot \sin\left[2\pi ft - \frac{4\pi}{\lambda}(r_0 - vtc\alpha)\right] \\ &= B \cdot \sin\left[2\pi\left(f + \frac{2vc\alpha}{\lambda}\right)t - \varphi_0\right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

με τον όρο $\varphi_0 = \frac{4\pi r_0}{\lambda} v$ αναπαριστά μια σταθερή αμελητέα αρχική διαφορά φάσης.

Συγκρίνοντας τις (2.13) και (2.16) βλέπουμε ότι η συχνότητά τους διαφέρει κατά $\frac{2v \cos \alpha}{\lambda}$ που είναι και αυτό που ονομάζεται ολίσθηση συχνότητας Doppler (Doppler frequency shift) f_d :

$$f_d = \Delta f = f_r - f_0 = \frac{2v \cos \alpha}{\lambda} \quad (2.17)$$

όπου f_r : η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο δέκτης

f_0 : η συχνότητα που εκπέμπει ο πομπός.

Θεωρώντας μονοστατικό ή οιονεί μονοσταστικό ραντάρ όπου πομπός και δέκτης συνυπάρχουν, η γωνία $\alpha \rightarrow 0^\circ$ οπότε $\cos \alpha \rightarrow 1$ και έχουμε από τη (2.17)

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.18)$$

Από τις τελευταίες σχέσεις, εύκολα προκύπτει ότι όταν ο στόχος κινείται προς τον παρατηρητή ($v > 0$) έχουμε αύξηση της φαινόμενης συχνότητας σ' αυτόν ($f_d > 0$), ενώ αντιλαμβάνεται μείωση της συχνότητας ($f_d < 0$) όταν ο στόχος απομακρύνεται ($v < 0$).

Αντικαθιστώντας το μήκος κύματος $\lambda = c/f_0$, λαμβάνουμε

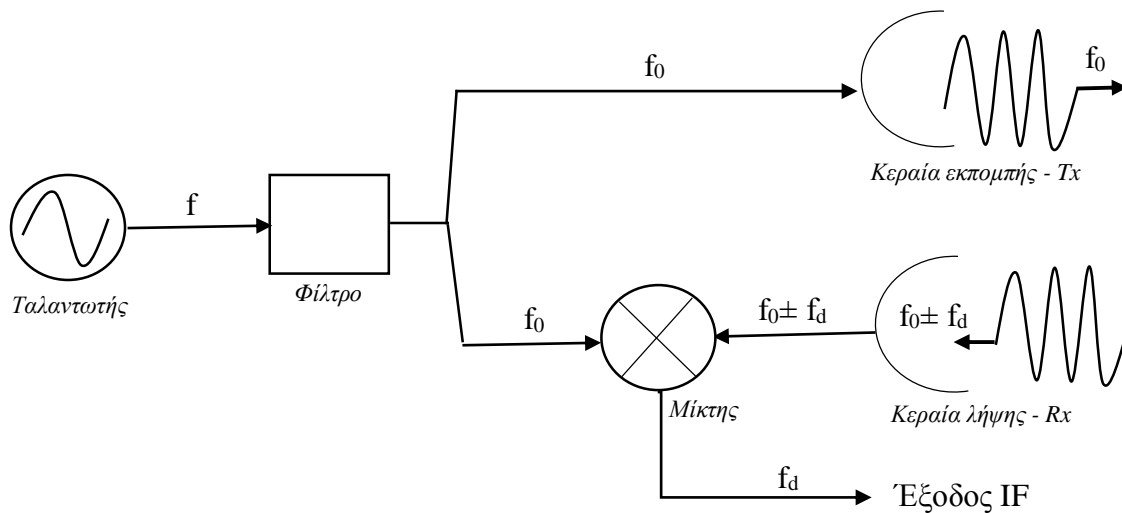
$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \quad (2.19)$$

2.2.2 Εφαρμογή σε συστήματα radar

Θα αναφερθούμε στην περίπτωση του συνεχούς κύματος Doppler ραντάρ (CW Doppler), καθώς μια τέτοια υλοποίηση είχαμε στη διάθεσή μας για την εκπόνηση της παρούσας.

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ένα απλοποιημένο δομικό διάγραμμα ενός τέτοιου ραντάρ.

Ο τοπικός ταλαντωτής παράγει μια σχετικά σταθερή συχνότητα, η οποία εκπέμπεται από την κεραία εκπομπής του ραντάρ (f_0). Το επιστρεφόμενο σήμα από το στόχο, έχει υποστεί ολίσθηση Doppler και έτσι η συχνότητα που λαμβάνει ο δέκτης θα είναι διαφορετική ($f_0 \pm f_d$).



Σχήμα 2.6: Block διάγραμμα ενός CW Doppler ραντάρ.

Συγκρινόμενο με το αρχικό σήμα μέσω του μίκτη, λαμβάνουμε την ενδιάμεση συχνότητα Doppler μέσω της οποίας μπορούμε να προσδιορίσουμε την ταχύτητα του στόχου. [Στο Σχήμα 2.6 παραλείφθηκαν ορισμένα ενδιάμεσα στάδια και βαθμίδες όπως ενισχύσεις σημάτων, φιλτραρίσματα, A/D μετατροπείς, κλπ.]

Μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα v του στόχου με χρήση της f_d που λαμβάνουμε στην έξοδο IF, της γνωστής f_0 και της σχέσης (2.19)

$$v = \frac{f_d \cdot c}{2 \cdot f_0} \quad (2.20)$$

Ως μια απλοποιημένη εφαρμογή, μπορούμε να θεωρήσουμε το παρακάτω παράδειγμα: έστω ραντάρ με συχνότητα λειτουργίας $f_0 = 10GHz$ ή μήκος κύματος $\lambda = c/f_0 = 0.03m$.

Για παρατηρούμενη ολίσθηση Doppler $f_d = 500Hz$, συμπεραίνουμε ότι ο στόχος κινείται με ταχύτητα:

$$v = \frac{f_d \cdot c}{2 \cdot f_0} = \frac{500 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10 \cdot 10^9} = 7.5 \text{ m/s ή } 27 \text{ km/h}$$

2.3 Ανάλυση I/Q

Πρόκειται ουσιαστικά για την αναπαράσταση σημάτων με ορθογώνιες (καρτεσιανές) συντεταγμένες. Αυτή η «μετάφραση» των δεδομένων για τη φάση και τη γωνία του σήματος

από το πολικό σύστημα συντεταγμένων, εξυπηρετεί αφενός στην περιγραφή της διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης σημάτων όσο και –κυρίως– στην υλοποίηση των διαμορφωτών/αποδιαμορφωτών.

Χρησιμοποιώντας τις τριγωνομετρικές ταυτότητες και ισότητες

$$\cos(x + y) = \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y) \quad (2.21)$$

$$\sin(x + y) = \sin(x)\cos(y) + \cos(x)\sin(y) \quad (2.22)$$

$$\cos(x) = \sin(x + \pi/2) \quad (2.23)$$

μπορούμε ν' αναπαραστήσουμε οποιοδήποτε σήμα πλάτους A , συχνότητας f_c και τυχαίας φάσης φ ως

$$A \cdot \cos(2\pi f_c t + \varphi) = A \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \cos(\varphi) - A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \sin(\varphi) \quad (2.24)$$

ή διαφορετικά

$$A \cdot \sin(2\pi f_c t + \varphi) = A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \cos(\varphi) + A \cdot \sin(2\pi f_c t + \pi/2) \cdot \sin(\varphi)$$

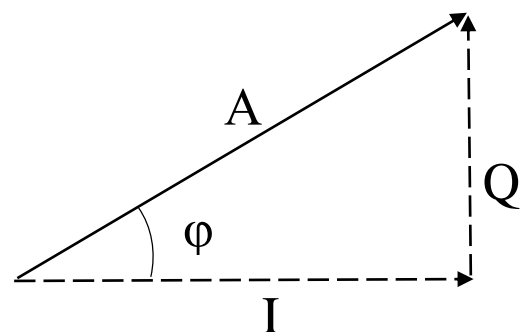
$$A \cdot \sin(2\pi f_c t + \varphi) = A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \cos(\varphi) + A \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \sin(\varphi) \quad (2.25)$$

Έτσι, κάθε διαμορφωμένο σήμα μπορεί ν' αναπαρασταθεί από τη **συμφασική – I συνιστώσα** $I = A\cos(\varphi)$ και την **ορθογώνια – Q συνιστώσα** $Q = A\sin(\varphi)$. Εάν μάλιστα και το πλάτος κάθε συνιστώσας είναι συνάρτηση του χρόνου, γράφουμε

$$I(t) = A(t)\cos(\varphi)$$

$$Q(t) = A(t)\sin(\varphi) \quad (2.25)$$

Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει το τελικά διαμορφωμένο σήμα από τις ορθογώνιες συνιστώσες I και Q όπως αυτό περιγράφεται στη σχέση (2.24).



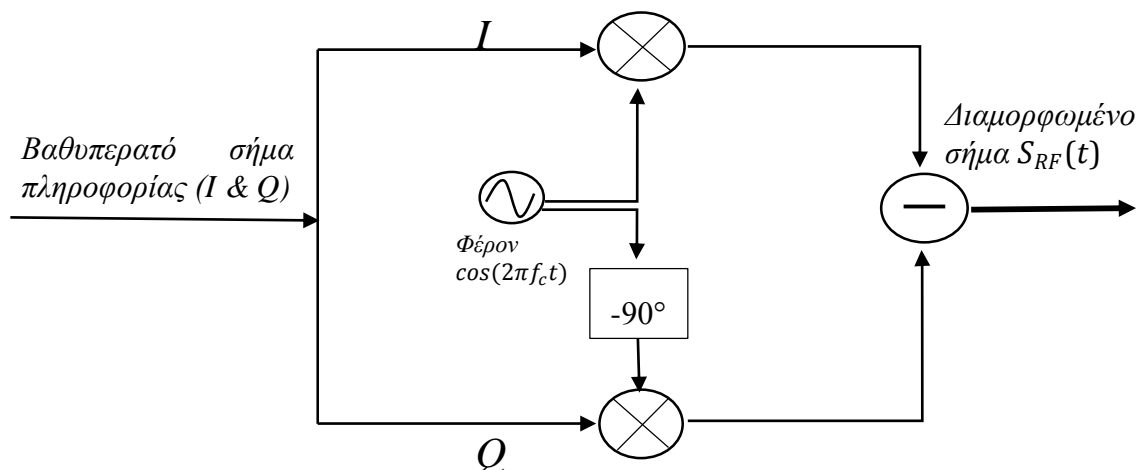
Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση συμφασικής – ορθογώνιας συνιστώσας

Όπως γίνεται φανερό, μπορούμε να επηρεάσουμε το πλάτος και τη γωνία (φάση και συχνότητα) του τελικού σήματος τροποποιώντας κατάλληλα μόνο το πλάτος των – βαθυπερατών – συνιστωσών I & Q .

Το διαμορφωμένο σήμα μπορεί ν' αναπαρασταθεί είτε ως μιγαδικός ($I + iQ$), είτε ως διάνυσμα $[I, Q]$, είτε ως απλά δύο μεταβλητές I & Q .

Το πώς προκύπτουν οι ονομασίες «συμφασική» και «ορθογώνια» συνιστώσα, γίνεται φανερό αν εξετάσουμε τη διαδικασία διαμόρφωσης που φαίνεται στο Σχήμα 2.8.

Οι μίκτες πραγματοποιούν τον απαιτούμενο πολλαπλασιασμό και προς τα άνω μετάθεση συχνότητας του σήματος βασικής ζώνης. Η I – συνιστώσα πολλαπλασιάζεται με το αδιαμόρφωτο φέρον $[\cos(2\pi f_c t)]$ ενώ η Q – συνιστώσα με την κατά 90° καθυστερημένη εκδοχή του φέροντος $[\cos(2\pi f_c t - \pi/2) = \sin(2\pi f_c t)]$. Η εισαγωγή αυτής της διαφοράς φάσης των 90° καθιστά τα σήματα ορθογώνια μεταξύ τους και σ' αυτήν αποδίδονται οι όροι συμφασική (με διαφορά φάσης 0°) και ορθογώνια (διαφορά φάσης 90°). Στο πεδίο της συχνότητας, η αναπαράσταση της μετάθεσης φάσης κατά 90° ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό με το μετασχηματισμό Hilbert: $H(j2\pi f) = -j \cdot \text{sgn}(2\pi f)$.

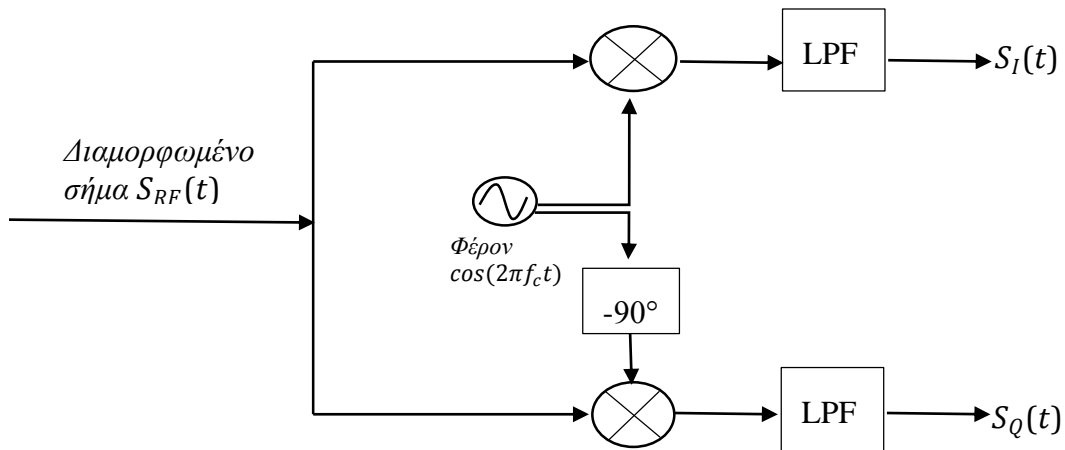


Σχήμα 2.8: Block διάγραμμα υλοποίησης διαμορφωτή I/Q

Το διαμορφωμένο σήμα $S_{RF}(t)$ του Σχήματος 2.8. που μπορεί να γραφεί και ως

$$S_{RF}(t) = S_I(t) + S_Q(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (2.26)$$

εισέρχεται στην είσοδο του αποδιαμορφωτή (Σχήμα 2.9) όπου εκτελείται η αποδιαμόρφωση – χωρισμός στις βαθυπερατές συνιστώσες I & Q .

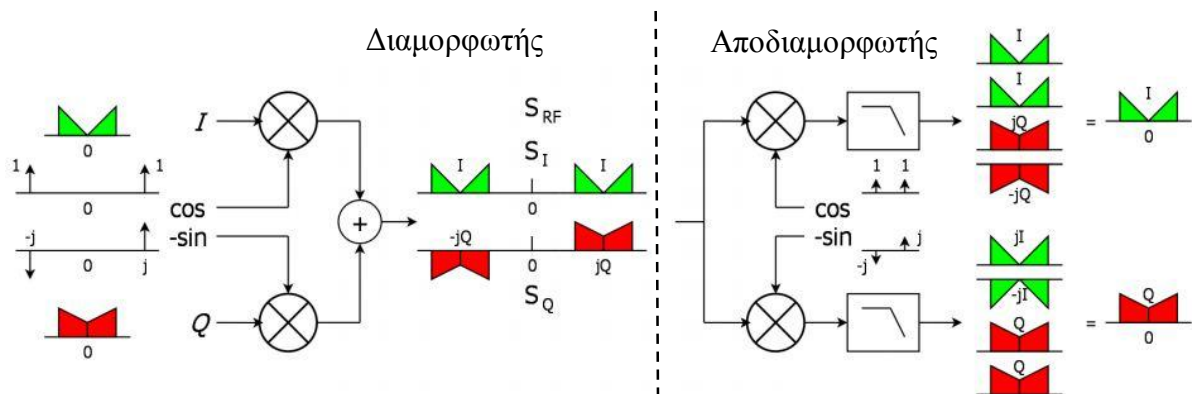


Σχήμα 2.9: Block διάγραμμα υλοποίησης αποδιαμορφωτή I/Q

Ο αποδιαμορφωτής I/Q εκμεταλλεύομενος την ορθογωνιότητα μεταξύ των σημάτων $S_I(t)$ και $S_Q(t)$ ανακτά τις βαθυπερατές συνιστώσες του μηνύματος πληροφορίας $I(t)$ και $Q(t)$.

Με αναφορά στο Σχήμα 2.10, βλέπουμε ότι ο αποδιαμορφωτής μετατρέπει ένα φάσμα με άρτια συμμετρία περί τη μηδενική συχνότητα ($f = 0$ ή $\omega = 0$) σε φάσμα με περιττή συμμετρία και αντίστροφα. Έτσι το $S_I(t)$ έχει άρτια συμμετρία ενώ το $S_Q(t)$ περιττή.

Η μίξη (πολλαπλασιασμός και κάτω μετατροπή) της συνιστώσας $S_I(t)$ με το $\cos(2\pi f_c t)$ του τοπικού ταλαντωτή (άρτια συνάρτηση επίσης) θα δώσει τη συμφασική συνιστώσα $I(t)$ ενώ η περιττή $S_Q(t)$ με το περιττό $\sin(2\pi f_c t)$ θα δώσει την ορθογώνια $Q(t)$. Οι συνδυασμοί άρτιων με περιττές δίνουν μηδέν.



Σχήμα 2.10: I/Q διαμόρφωση – αποδιαμόρφωση στο πεδίο της συχνότητας

2.4 Radar Cross Section (RCS) και ανιχνευσιμότητα

Η ραδιοδιατομή ή ενεργός διατομή (RCS) ενός αντικειμένου που είναι στόχος ραντάρ, είναι μια σχετικά αφαιρετική έννοια που ποσοτικοποιεί το βαθμό ανιχνευσιμότητάς του. Είναι ένα μέτρο της ισχύος που σκεδάζεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση όταν ο στόχος φωτίζεται από προσπίπτον κύμα.

Ο ακριβέστερος ορισμός που θα μπορούσε να δοθεί είναι «η νοητή επιφάνεια που απαιτείται για να συλληφθεί τόση πυκνότητα ισχύος στο στόχο ώστε αν η συνολική ισχύς επανεκπέμπονταν ισοτροπικά, θα προκαλούσε την ίδια πυκνότητα ισχύος που παρατηρείται στο δέκτη».

Επεκτείνοντας τη σχέση (2.6) που επαναλαμβάνεται για λόγους ευχέρειας

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi}}{4\pi r^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (2.6)$$

ώστε να περιληφθεί η ενεργός επιφάνεια του δέκτη του ραντάρ $A_{\epsilon\nu}$ και ο παράγοντας ισοτροπικής (σφαιρικής) εξάπλωσης της ανακλώμενης ισχύος $1/4\pi r^2$, μπορούμε να δούμε ότι η ανακλώμενη ενέργεια που λαμβάνει το ραντάρ από το στόχο είναι

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi} \cdot G}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot A_{\epsilon\nu} \cdot \sigma \quad (2.27)$$

Καθώς όμως κανένας ακτινοβολητής στην πράξη δεν ακτινοβολεί ισοτροπικά – πόσο μάλλον ο στόχος του ραντάρ που ανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία – μόνο εκτιμήσεις του σ μπορούν να γίνουν ώστε να προσεγγιστεί ο λόγος ανακλώμενη προς προσπίπτουσα ισχύ, δηλαδή P_{σ}/P_{Π} .

Για τον υπολογισμό του RCS στις τρεις διαστάσεις, αναγκαστεί η εύρεση του σκεδαζόμενου πεδίου

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\mathbf{E}_{\Pi}|^2}{|\mathbf{E}_{\sigma}|^2} \quad (2.28)$$

όπου \mathbf{E}_{σ} : το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, \mathbf{E}_{Π} : το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο.

Διαφορετικά χρησιμοποιώντας την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος στο στόχο S_{Π} και την σκεδαζόμενη από αυτόν S_{σ} σε απόσταση r , έχουμε για το RCS

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_{\Pi}}{S_{\sigma}} \quad (2.29)$$

Όπως αναμένεται από τις (2.28) και (2.29), μονάδα μέτρησης της ενεργού διατομής RCS είναι το m^2 και δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τις φυσικές διαστάσεις του αντικειμένου. Καθώς επίσης η κλίμακα του RCS διάφορων αντικειμένων εκτείνεται σε πολλές τάξεις μεγέθους ($10^{-5} \sim 10^6$) χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα με αναφορά στο $1m^2$

$$\sigma_{dBsm} = \sigma_{dBm^2} = 10 \log_{10} \left(\frac{RCS}{1m^2} \right) \quad (2.30)$$

Ως παράδειγμα εφαρμογής της (2.30), αν ένα μαχητικό αεροσκάφος stealth έχει ενεργό διατομή $\sigma = 0.01m^2$, αυτό αντιστοιχεί σε $\sigma_{dBsm} = 10 \log_{10} \frac{0.01}{1} = -20dBsm$. Αντίστροφα, αν ένα μικρό σκάφος έχει RCS $5dBsm$, βρίσκουμε ότι έχει ενεργό διατομή $10^{\frac{5}{10}} = 3.16m^2$.

Το RCS ενός αντικειμένου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- Σχετική θέση πομπού – στόχου
- Σχετική θέση στόχου – δέκτη
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά στόχου
- Μέγεθος στόχου (φυσικό αλλά και σχετικό ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του πομπού)
- Υλικό στόχου
- Συχνότητα κύματος
- Γωνίες πρόσπτωσης και σκέδασης του κύματος
- Πόλωση προσπίπτοντος και σκεδαζόμενου κύματος

Οι δύο τελευταίοι παράγοντες που αφορούν τη γωνία και την πόλωση, εκφράζονται με τον παράγοντα

$$\sigma^{tr}(\theta^t, \varphi^t, \theta^r, \varphi^r) \quad (2.31)$$

όπου οι δείκτες t και r αφορούν τον πομπό και το δέκτη αντίστοιχα.

Η πειραματική μέτρηση του RCS πραγματοποιείται είτε σε πεδίο μέτρησης ανακλαστικότητας όπου το αντικείμενο τοποθετείται σε μη ανακλαστικό στήριγμα είτε σε ανηχοϊκό θάλαμο απουσία ανακλάσεων.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι παρόλο που στην ανιχνευσιμότητα ενός στόχου παίζουν σημαντικό ρόλο η απόσταση πομπού – δέκτη – στόχου και η ισχύς της δέσμης του ραντάρ, εντούτοις κανένα από αυτά τα μεγέθη δεν εμπλέκονται στο υπολογισμό του RCS που χαρακτηρίζει αποκλειστικά το στόχο.

Αντικείμενο – στόχος	RCS (σε m^2)
Έντομο	10^{-5}
Πουλί	0.01
Αεροσκάφος stealth τεχνολογίας	~0.1
Άνθρωπος	1
Μαχητικό αεροσκάφος	4
Μεγάλο μεταφορικά αεροσκάφος	100
Φρεγάτα	10^5

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων - στόχων

Με βάση τους παραπάνω παράγοντες, μπορεί να λεχθεί σε γενικές γραμμές ότι ένα αντικείμενο – στόχος έχει μεγάλο RCS όταν:

- Είναι ευμεγέθες
- Έχει μεγάλα εκτεθειμένα μεταλλικά τμήματα στην επιφάνειά του
- Έχει λεία και καμπύλη επιφάνεια

Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων – στόχων φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

2.5 Συσχέτιση σημάτων

Η συσχέτιση σημάτων είναι ένα μέτρο της ομοιότητας μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα της είναι ένα άλλο σήμα η τιμή του οποίου μεγιστοποιείται στα σημεία όπου η ομοιότητα μεταξύ των σημάτων είναι μέγιστη.

Ως μαθηματικό εργαλείο χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ενός γνωστού σήματος σε ένα άλλο θορυβώδες σήμα, την παρουσία περιοδικότητας που ενδεχομένως «κρύβεται» σε ένα φαινομενικά τυχαίο σήμα, την εύρεση της χρονικής καθυστέρησης ανάμεσα σε δυο σήματα ή την εύρεση της θεμελιώδους συχνότητας ενός σήματος που μπορεί να υποδεικνύουν οι αρμονικές του.

2.5.1 Ετεροσυσχέτιση (Cross correlation)

Η ετεροσυσχέτιση $c(t)$ δυο σημάτων συνεχούς χρόνου $x(t)$ και $y(t)$ υπολογίζεται ως

$$c(t) = x(t) \otimes y(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} x^*(\tau)y(\tau+t)d\tau \xrightarrow{\tau=\tau-t} \int_{-\infty}^{\infty} x^*(\tau-t)y(\tau)d\tau \quad (2.32)$$

όπου το όρισμα της $c(t)$ ονομάζεται «καθυστέρηση» (lag). Στη (2.32) ο συζυγής $x^*(t)$ του σήματος $x(t)$ υπερκαλύπτει την περίπτωση πραγματικού, επεκτείνοντας την ισχύ της σχέσης και για μιγαδικά σήματα.

Η (2.32) για διακριτά σήματα γράφεται ως

$$c[n] = x[n] \otimes y[n] \triangleq \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^*[m]y[m+n] \quad (2.33)$$

Πιο κοινή γραφή για την ετεροσυσχέτιση είναι $R_{xy}(\tau)$, δηλαδή ως συνάρτηση της καθυστέρησης τ . Επιπλέον, χρησιμοποιείται ο κανονικοποιημένος συντελεστής (ετερο)συσχέτισης r_{xy} που ορίζεται ως

$$r_{xy} = \frac{x(t) \otimes y(t)}{\sqrt{E_x E_y}} = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{E_x E_y}} \quad (2.34)$$

όπου

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$$

$$E_y = \int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt \quad (2.35)$$

και για διακριτά σήματα

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2[n]$$

$$E_y = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y^2[n] \quad (2.36)$$

Για το συντελεστή r_{xy} ισχύει ότι

$$|r_{xy}(t)| \leq 1, \forall t \quad (2.37)$$

λόγω της κανονικοποίησης, ενώ για δεδομένη χρονική στιγμή t_0 κατά την οποία τα δύο σήματα ταυτίζονται, ισχύει η ισοδυναμία

$$|r_{xy}(t_0)| = 1 \Leftrightarrow x(\tau) = ay(\tau - t_0) \quad (2.38)$$

όπου a : σταθερά.

Σημαντική επίσης ιδιότητα είναι η εφαρμογή της ανισότητας Cauchy – Schwarz η οποία δίνει

$$|R_{xy}(t)| \leq \sqrt{E_x E_y} \quad (2.39)$$

με τις E_x και E_y να υπολογίζονται από τις (2.35) ή (2.36).

Οι (2.37) και (2.39) καταδεικνύουν ότι η τιμή της ετεροσυσχέτισης δυο σημάτων όταν αυτά ταυτίζονται πλήρως είναι ίση με 1.

2.5.2 Αυτοσυσχέτιση (Autocorrelation)

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, μπορούμε να πούμε πως αυτοσυσχέτιση είναι η (ετερο)συσχέτιση ενός σήματος με τον εαυτό του· κατ' επέκταση της (2.32) μπορούμε να γράψουμε

$$a(t) = x(t) \otimes x(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} x^*(\tau - t)x(\tau)dt \quad (2.40)$$

ενώ η (2.34) γίνεται

$$r_{xx} = \frac{x(t) \otimes x(t)}{\sqrt{E_x E_x}} = \frac{R_{xx}(\tau)}{E_x} \quad (2.41)$$

Για μηδενική καθυστέρηση ($t = 0$) εύκολα προκύπτει από τη (2.40) ότι η αυτοσυσχέτιση ενός σήματος δίνει την ενέργειά του

$$a(0) = R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(\tau - 0)x(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} |x(\tau)|^2 d\tau = E_x \quad (2.42)$$

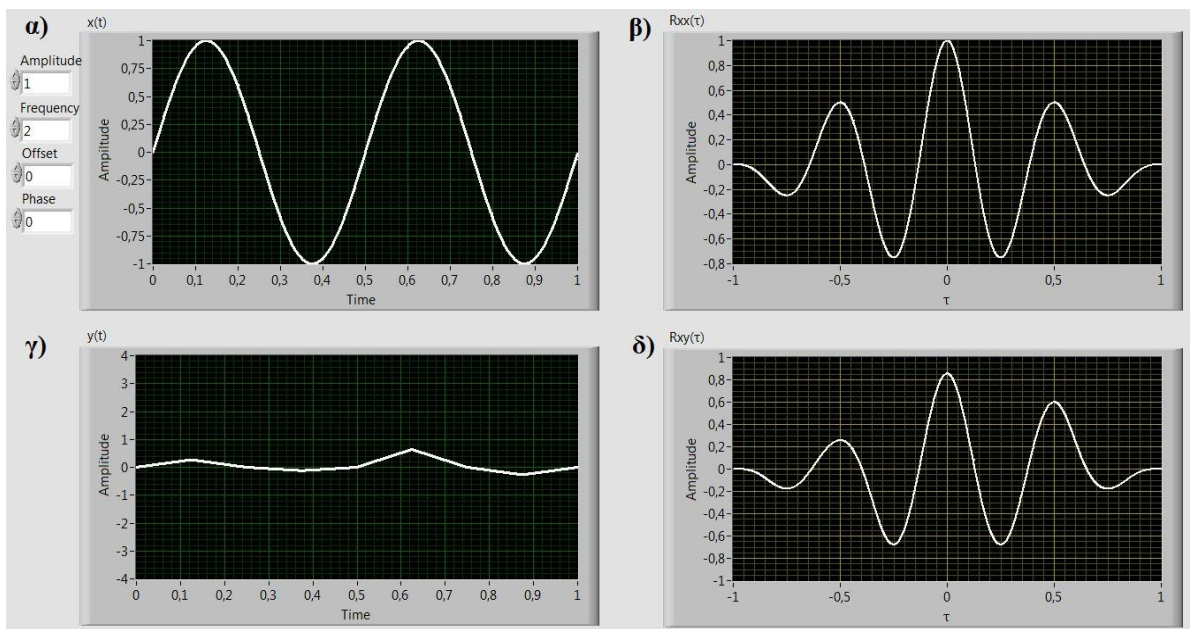
και από τη (2.42) αντικαθιστώντας στη (2.41)

$$r_{xx}(0) = \frac{R_{xx}(0)}{E_x} = \frac{E_x}{E_x} = 1 \quad (2.43)$$

Ισχύει βέβαια και η (2.37) που γράφεται

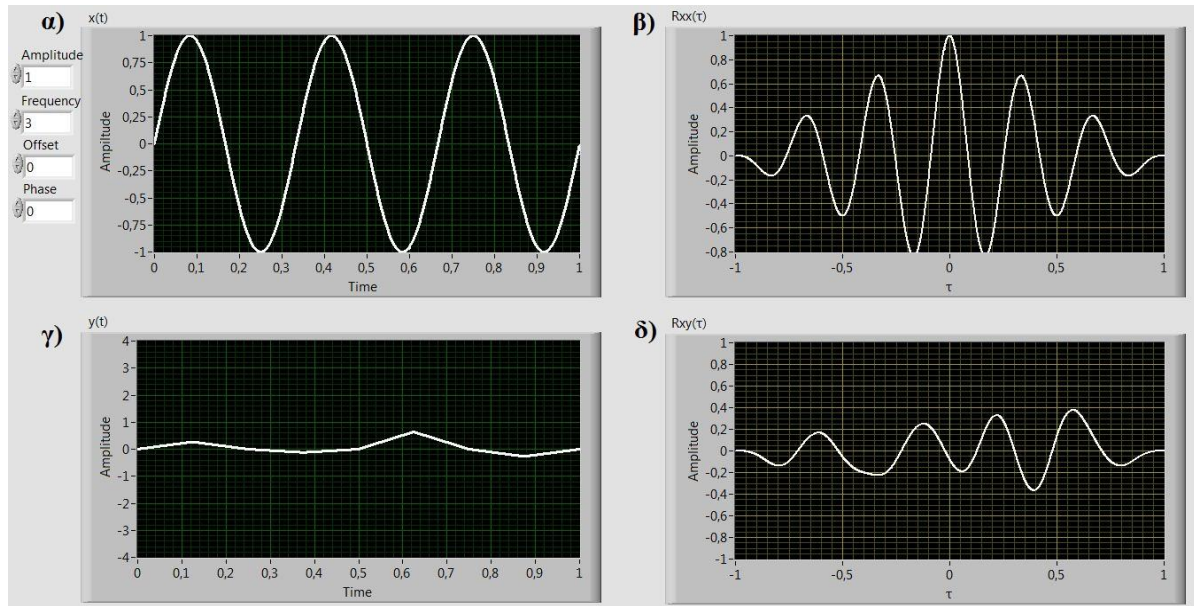
$$|r_{xx}(t)| \leq 1, \forall t \quad (2.44)$$

Ως εφαρμογή της σχέσης (2.43) μπορούμε να θεωρήσουμε το σήμα α) του Σχήματος 2.11, το οποίο είναι ένα απλό ημίτονο πλάτους 1 και συχνότητα 2Hz ($\sin 4\pi t$). Η αυτοσυσχέτισή του φαίνεται στο β) του ίδιου σχήματος, όπου φαίνεται καθαρά ότι στο $\tau = 0$ ισχύει $r_{xx}(0) = 1$. Στο γ) δημιουργήσαμε ένα τυχαίο σήμα που να προσομοιάζει το παραπάνω ημίτονο. Το $r_{xy}(0) \approx 0.82$ που υπολογίζεται στο δ), φανερώνει ότι παρόλο που εκ πρώτης όψεως το τυχαίο σήμα έχει ασαφή περιοδικότητα, πρόκειται για ένα «κρυφό» ημίτονο συχνότητας 2Hz.



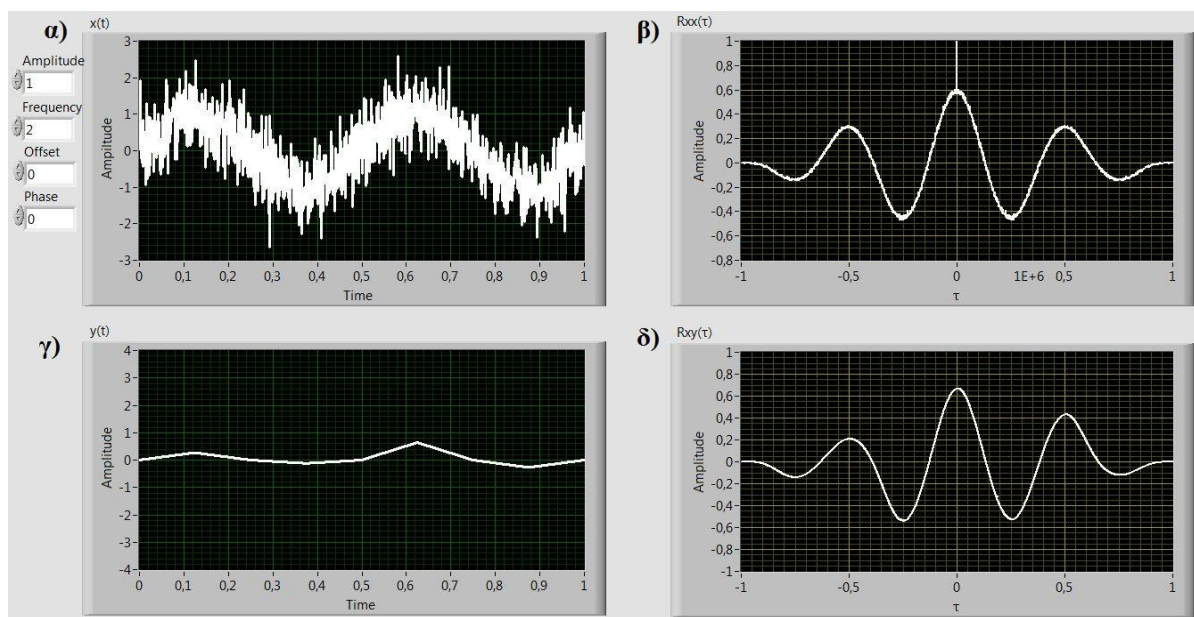
Σχήμα 2.11: Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης – ετεροσυσχέτισης σημάτων 1

Στο Σχήμα 2.12 δ), το τυχαίο σήμα συσχετίστηκε με ένα νέο ημίτονο με συχνότητα 3Hz αντί 2Hz. Η μορφή της $r_{xy}(\tau)$ δείχνει ότι τα δύο σήματα είναι αρκετά ανόμοια μεταξύ τους, αφού $r_{xy}(\tau) < 0.4$ για κάθε τ .



Σχήμα 2.12: Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης – ετεροσυσχέτισης σημάτων 2

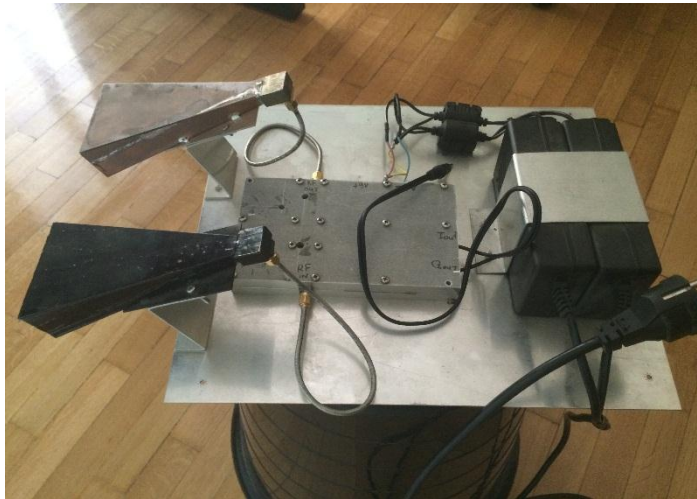
Τέλος, σε σχέση με την ικανότητα της συσχέτισης να διακρίνει την τυχούσα περιοδικότητα ή/και την αναγνώριση θεμελιωδών συχνοτήτων όταν δεν είναι προφανής εξ όψεως, στο Σχήμα 2.13 α) προσθέσαμε σημαντικό λευκό προσθετικό θόρυβο (της τάξης των 0.6 τυπικών αποκλίσεων) στην κυματομορφή του ημιτόνου. Η τιμή του $r_{xy}(0) \approx 0.64$ υποδεικνύει ικανοποιητικά και πάλι την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των σημάτων.



Σχήμα 2.13: Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης – ετεροσυσχέτισης σημάτων παρουσία θορύβου

3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

3.1 Περιγραφή λειτουργίας radar



Πρόκειται για ένα ραντάρ Doppler συνεχούς κύματος (CW Doppler) στη συχνότητα των 24GHz, οιονεί μονοστατικό καθώς όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 οι κεραίες εκπομπής και λήψης βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους – πρακτικά στο ίδιο σημείο.

Εικόνα 3.1: Το CW Doppler ραντάρ της εργασίας.

Τα χαρακτηριστικά των χοανοκεραιών εκπομπής – λήψης, υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$G = \frac{10A}{\lambda^2} \quad (3.1)$$

$$\varphi_v = \frac{51\lambda}{b} \quad (3.2)$$

$$\varphi_h = \frac{70\lambda}{a} \quad (3.3)$$

όπου G : το κέρδος της χοανοκεραίας, A : η επιφάνεια του ανοίγματος, λ : το μήκος κύματος στη συχνότητα λειτουργίας, φ_v, φ_h : το κατακόρυφο και οριζόντιο εύρος δέσμης της χοανοκεραίας αντίστοιχα, a, b : η μεγάλη και μικρή διάσταση της χοανοκεραίας αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στη διπλανή Εικόνα

3.2, έχουμε

$$a = 0.07m$$

$$b = 0.015m$$



Εικόνα 3.2: Διαστάσεις χοανοκεραιών

και για συχνότητα 24GHz το μήκος κύματος

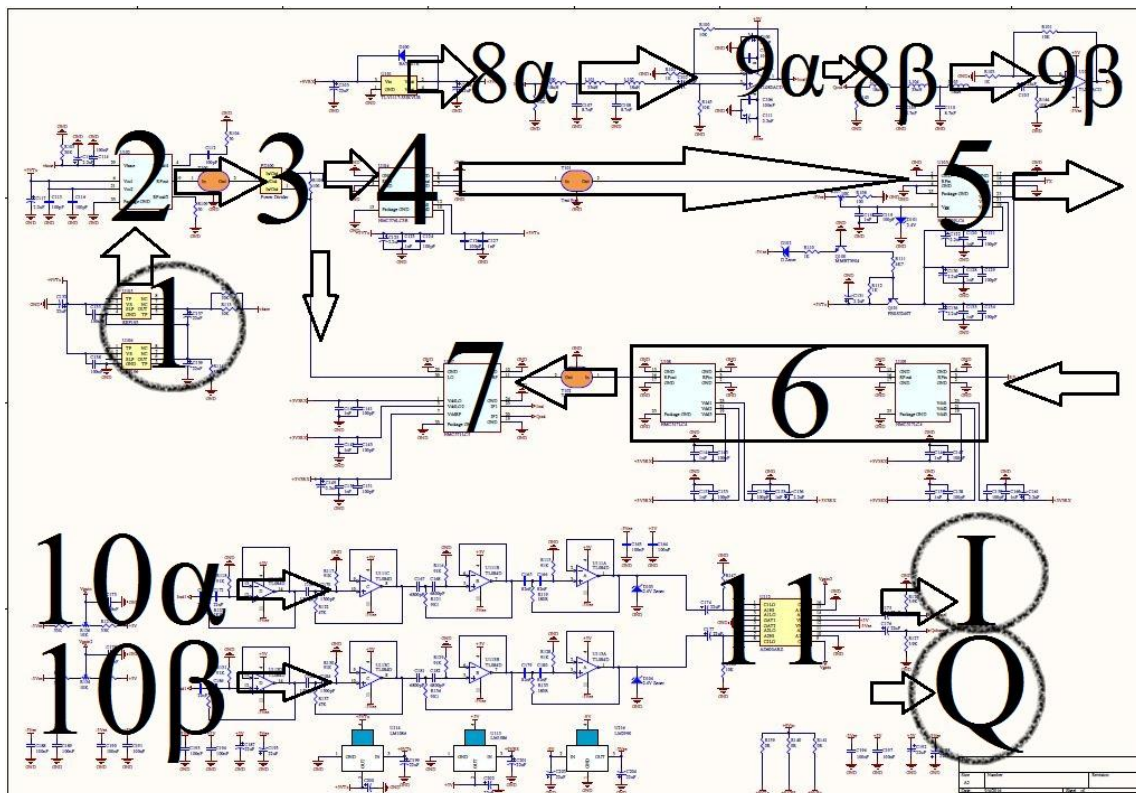
$$\lambda = c/f = \frac{3 \cdot 10^8}{24 \cdot 10^9} = 0.0125m$$

Οπότε από τις (3.1) έως (3.3) έχουμε τα εξής χαρακτηριστικά:

$$G = 18.27dB, \varphi_v = 42.5^\circ, \varphi_h = 12.5^\circ$$

Η γενική αρχή λειτουργίας του έχει ως εξής: ένα συνεχές σήμα 24GHz εκπέμπεται από τη χοανοκεραία εκπομπής και φωτίζει το στόχο. Μέρος της ενέργειας του κύματος σκεδάζεται από την επιφάνεια του στόχου και επιστρέφει στη χοανοκεραία λήψης. Εάν ο στόχος κινείται ακτινικά προς τη δέσμη, λόγω του φαινομένου Doppler που περιγράφηκε στις ενότητες 2.2.1 & 2.2.2 η συχνότητα που θα λάβει ο δέκτης θα παρουσιάζει ολίσθηση από την αρχική των 24GHz του πομπού. Η επεξεργασία αυτής της διαφοράς συχνότητας μας επιτρέπει να εντοπίσουμε κινούμενα αντικείμενα αλλά και να εξάγουμε πληροφορίες για την ταχύτητά τους.

Για μια πιο αναλυτική περιγραφή, στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του ραντάρ όπου για ευκολία έχουν αριθμηθεί ορισμένες χαρακτηριστικές βαθμίδες του.



Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα του ραντάρ 24GHz

Ακολουθώντας τη ροή του σχεδίου και ξεκινώντας από το σημείο 1, έχουμε:

1. Παραγωγή σταθερής τάσης που θα χρησιμοποιηθεί από τον τοπικό ταλαντωτή
2. Ένας VCO που θα δώσει τη βασική συχνότητα των 12GHz (αρχικά)
3. Διαχωριστής ισχύος, ώστε το σήμα να επαναχρησιμοποιηθεί για μελλοντική σύγκριση
4. Πολλαπλασιαστής συχνότητα x2.
5. Medium power ενισχυτής του σήματος 24GHZ

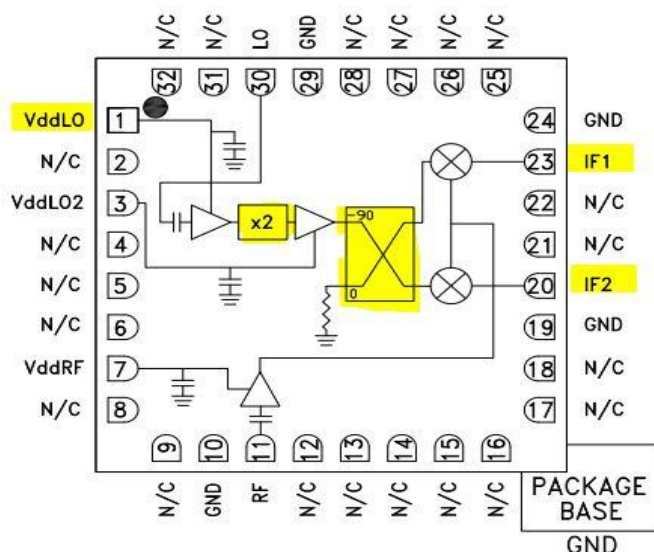
Το σήμα εκπέμπεται από τη χοανοκεραία εκπομπής T_x .

Το σκεδαζόμενο (ασθενές) σήμα επιστρέφει στη χοανοκεραία εκπομπής R_x και

6. Ενισχύεται από μια σειρά LNA ενισχυτών
7. Κάτω – μετατροπέας I/Q (I/Q downconverter)· η λειτουργία του θ' αναλυθεί παρακάτω
8. Η έξοδος του downconverter θα δώσει 2 σήματα (I & Q) 8α και 8β
9. Τα σήματα αυτά ενισχύονται από LNA δίνοντας τα 9α,9β
10. Ακόμα μεγαλύτερη ενίσχυση
11. Τελική ενίσχυση από χαμηλού θορύβου, μεταβλητού κέρδους, δυο καναλιών ενισχυτή

Στην έξοδο, μέσω απλού αρσενικού jack 3.5mm λαμβάνουμε τις δυο ορθογώνιες συνιστώσες σε μορφή ηχητικού σήματος (μια σε κάθε κανάλι ήχου).

Στην «καρδιά» της διαδικασίας, ο κάτω μετατροπέας I/Q βρίσκεται στο βήμα 7. Από το σχηματικό του στο Σχήμα 3.2 βλέπουμε ότι οδηγείται από ένα σήμα το οποίο διπλασιάζεται

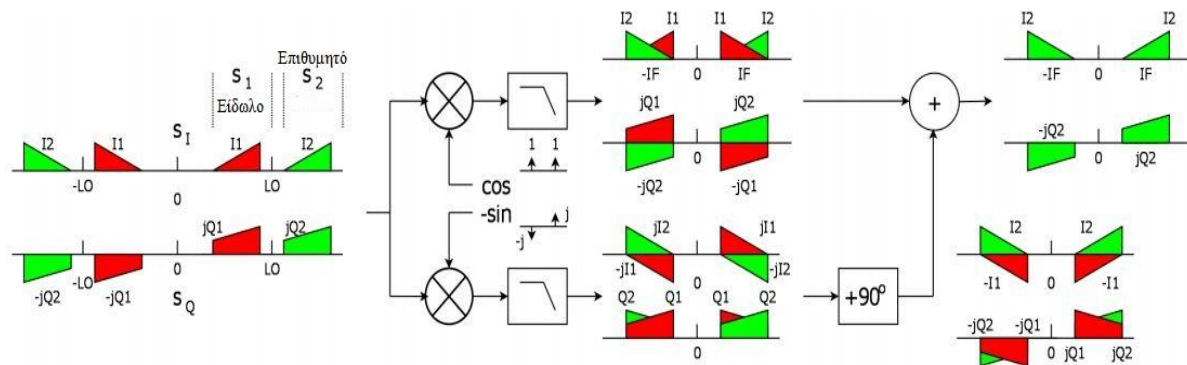


Σχήμα 3.2: Σχηματικό I/Q downconverter

(σήμα 12GHz του βήματος 3), ενισχύεται από ένα LNA και οδηγείται σε ένα κύκλωμα απόρριψης ειδώλου. Η χρήση αυτού του κυκλώματος απαλείφει την ανάγκη για χρήση φίλτρου μετά τον ενισχυτή, κρατώντας χαμηλά τα επίπεδα του θερμικού θορύβου.

Για την επιλογή της επιθυμητής συνιστώσας (I ή Q) απαιτείται η χρήση ενός υβριδικού κυκλώματος 90° .

Στο πεδίο της συχνότητας, η διαδικασία απόρριψης ειδώλου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3 που ουσιαστικά είναι ένας δέκτης Hartley.



Σχήμα 3.3: Διαδικασία απόρριψης ειδώλου του downconverter

Η επιπλέον ολίσθηση φάσης κατά 90° , αποκαθιστά την αρχική συμμετρία της ορθογώνιας Q συνιστώσας αλλά με αντίθετο πρόσημο για το επιθυμητό σήμα και το είδωλο. Εάν προστεθεί στη συμφασική I συνιστώσα (όπως στο σχήμα), ανακτάται το επιθυμητό σήμα ($s_2(t)$ στο σχήμα). Εάν αφαιρεθεί, προκύπτει το είδωλο ($s_1(t)$ στο σχήμα).

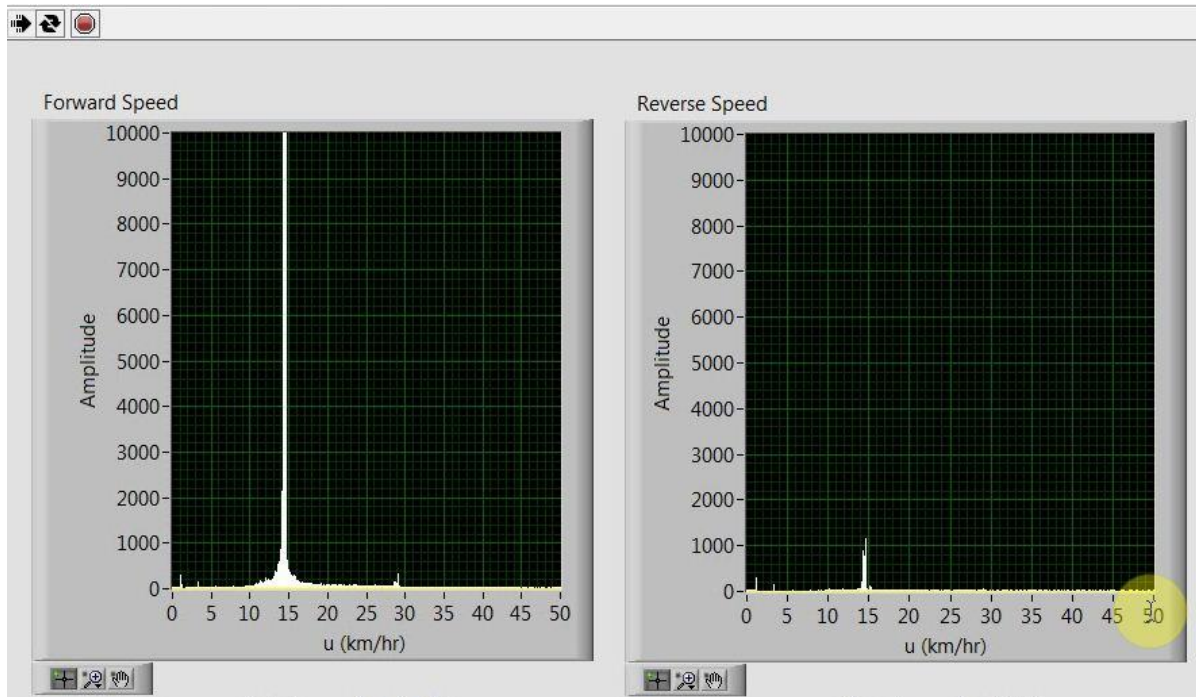
3.2 Δοκιμαστική εφαρμογή χρήσης ραντάρ

Για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του ραντάρ που είχαμε στη διάθεσή μας, πραγματοποιήσαμε μέτρηση της ταχύτητας αυτοκινήτου.

Η εφαρμογή “**Doppler_Detect**” για την εποπτεία των διάφορων παρατηρήσεων του ραντάρ, υλοποιήθηκε στο περιβάλλον LabVIEW της National Instruments για λειτουργικό σύστημα Windows. Το λειτουργικό διάγραμμα («πηγαίος κώδικας») του προγράμματος LabVIEW δεν ήταν στη διάθεσή μας προκειμένου να δούμε τις λεπτομέρειες λειτουργίας του.

Αφού θέσουμε σε λειτουργία το ραντάρ συνδέοντας την τροφοδοσία του σε πηγή τάσης, συνδέουμε το ακουστικό jack την κάρτα ήχου του H/Y μας στην υποδοχή του μικροφώνου (είσοδος ή Line in).

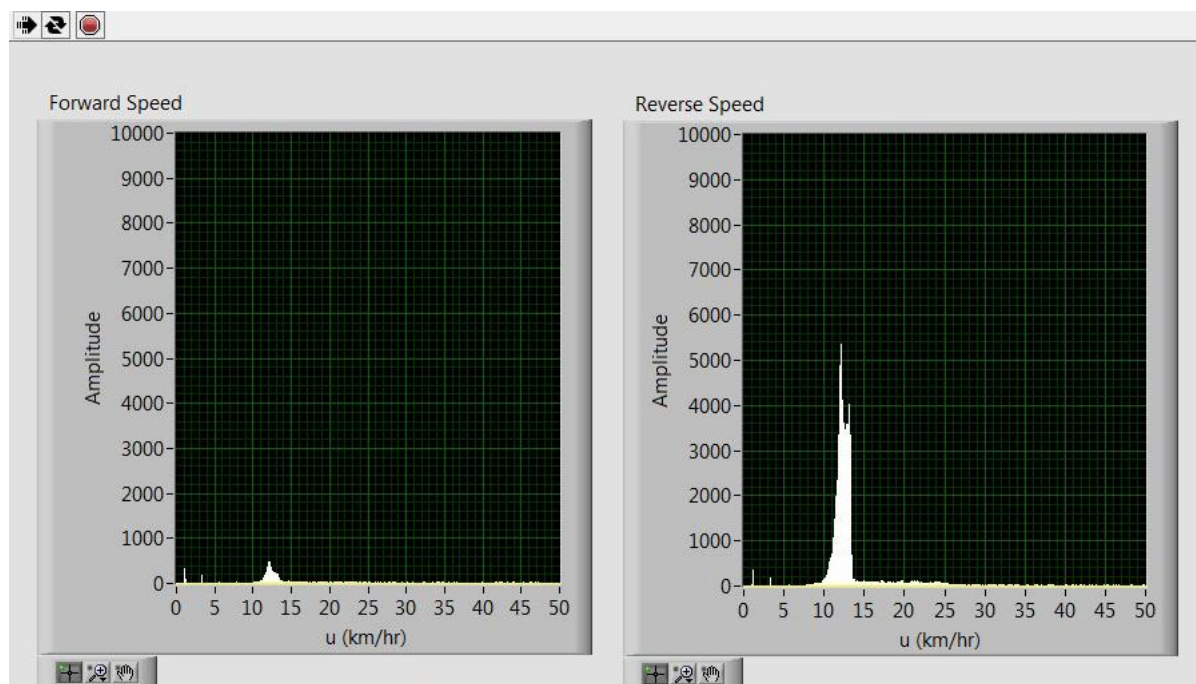
Η επεξεργασία σε επίπεδο software της συχνότητας Doppler που λαμβάνει το ραντάρ, αποτυπώνεται σε δυο παράθυρα όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.4 και 3.5.



Σχήμα 3.4: Εφαρμογή Doppler_Detect – κίνηση αυτοκινήτου προς τα εμπρός

Στο Σχήμα 3.4, παρατηρούμε μια κορυφή μεγάλου πλάτους που τοποθετείται στον οριζόντιο άξονα στην ταχύτητα $\sim 15\text{km/h}$ (4.16m/s) κατά την κίνηση του αυτοκινήτου προς τα εμπρός: μέτρηση που συμφωνούσε με την ένδειξη του ταχυμέτρου του αυτοκινήτου.

Αντιστοίχως στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η εικόνα που δίνει η εφαρμογή κατά την κίνηση του αυτοκινήτου με την όπισθεν (πλησιάζοντας το ραντάρ).



Σχήμα 3.5: Εφαρμογή Doppler_Detect – κίνηση αυτοκινήτου προς τα πίσω

Σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 2.2.2 και τη σχέση (2.20) που επαναλαμβάνεται για ευκολία

$$v = \frac{f_d \cdot c}{2 \cdot f_0} \quad (2.20)$$

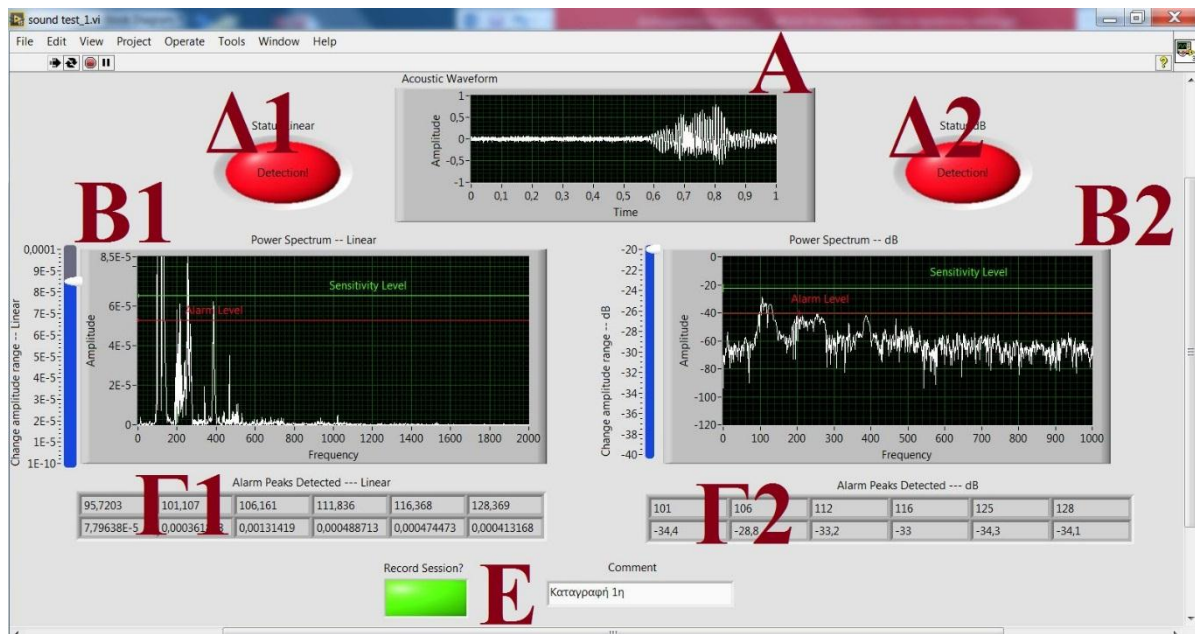
λύνοντας ως προς f_d έχουμε μια προσέγγιση της συχνότητας Doppler που ανιχνεύει το ραντάρ

$$f_d = \frac{v \cdot 2 \cdot f_0}{c} = \frac{4.16 \cdot 2 \cdot 24 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} = 665.6 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

3.3 Χρήση για ανίχνευση UAS

3.3.1 Περιγραφή περιβάλλοντος εφαρμογής

Για τις ανάγκες της εργασίας και με το υφιστάμενο ραντάρ, υλοποιήσαμε μια νέα εφαρμογή LabVIEW προκειμένου να ανιχνεύουμε στο πεδίο της συχνότητας σημαντικό πλάτος κορυφές.



Σχήμα 3.6: Εφαρμογή επιτήρησης ραντάρ

Το περιβάλλον λειτουργίας της εφαρμογής παρουσιάζεται με τη βοήθεια του Σχήματος 3.6 και χωρίζεται στα εξής τμήματα:

A: Στο παράθυρο αυτό παρουσιάζεται η κυματομορφή του ακουστικού σήματος στο πεδίο του χρόνου – δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διαδικασία της ανίχνευσης και υπάρχει κυρίως για εποπτικούς λόγους που βοηθούν διαισθητικά. Το ακουστικό σήμα είναι το ίδιο σήμα εξόδου του ραντάρ που εισάγεται στην κάρτα ήχου του H/Y μας.

B1 – B2: Στο ηχητικό σήμα εισόδου εκτελούμε φασματικές μετρήσεις σε γραμμική κλίμακα (αριστερά – B1) και σε κλίμακα dB (δεξιά – B2). Πραγματοποιείται μετασχηματισμός Fourier και απεικονίζεται το φάσμα ισχύος (power spectrum) χρησιμοποιώντας παράθυρο Hamming στα δεδομένα. Η ευαισθησία – κλίμακα του πλάτους ρυθμίζεται από μια κατακόρυφη μπάρα ώστε να μπορούμε να επιλέξουμε από ποιο μέγεθος συνιστώσας και πάνω επιθυμούμε ν’ ανιχνεύουμε.

Γ1 – Γ2: Σε αυτά τα clusters δεδομένων με τη μορφή πινάκων, έχουμε τα ζεύγη συχνότητα – πλάτος για κάθε κορυφή που επιλέξαμε ν’ ανιχνεύουμε. Η επιλογή αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας της οριζόντιες μπάρες “Alarm Level” που εμφανίζονται στα γραφήματα B1 – B2. Μέσω αυτών έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για τα δεδομένα έχοντας τις αριθμητικές τιμές συχνότητα – πλάτος για κάθε κορυφή που παρατηρείται.

Δ1 – Δ2: LED ενδείξεις τύπου συναγερμού· όταν κάποιο peak ξεπεράσει το κατώφλι Alarm Level που ορίσαμε παραπάνω, υπονοείται ανίχνευση αντικειμένου με το ραντάρ.

E: Μέσω αυτής της επιλογής έχουμε τη δυνατότητα να καταγράψουμε το session του προγράμματος προκειμένου να αναλύσουμε σε κατοπινό χρόνο τα δεδομένα.

Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται σε μορφή δυαδικού αρχείου TDMS (Technical Data Management Streaming) που επιτρέπει τη γρήγορη καταγραφή δεδομένων. Υπάρχει και ο αντίστοιχος TDM importer για το MS Excel ώστε τα δεδομένα ν’ απεικονίζονται σε περισσότερο οικεία μορφή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Time	Time*	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3
0	0	104,84956	-34,519866	104,86726	0,0003525
1	1	108,5618	-33,69741	108,58555	0,0004134
2	2	112,14671	-37,262665	112,12143	0,0001871
0	3	92,868279	-40,38143	212,28875	6,567E-05
1	4	108,81149	-36,820731	92,881832	9,149E-05
				96,887686	5,422E-05
				108,82523	0,0002077

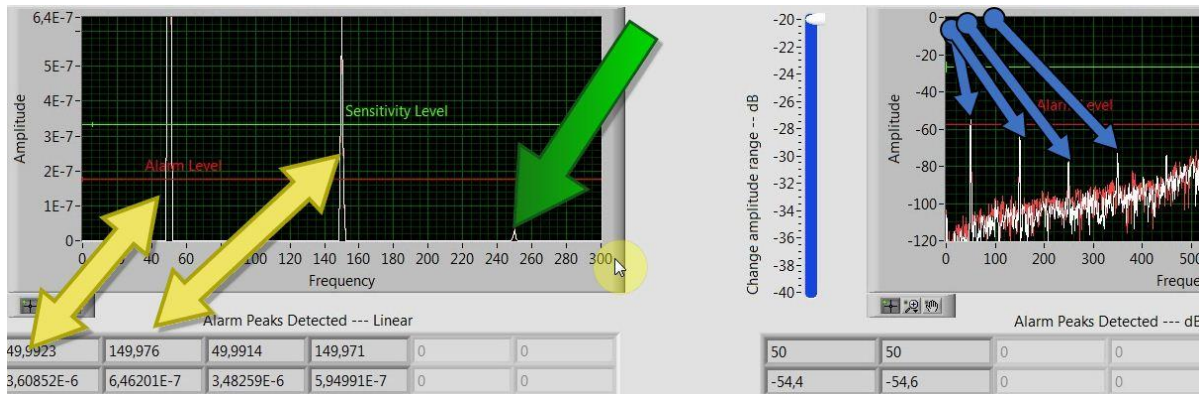
Πίνακας 3.1: Πίνακας δεδομένων TDMS

Παρόλο που τα δεδομένα του πίνακα αφορούν τυχαία δοκιμή, αξίζει ν' αναφέρουμε ότι η στήλη "Time" είναι η σχετική αρίθμηση (διαδοχικά peaks μιας «ριπής» ανιχνεύσεων) ενώ "Time*" η απόλυτη αρίθμηση των μετρήσεων.

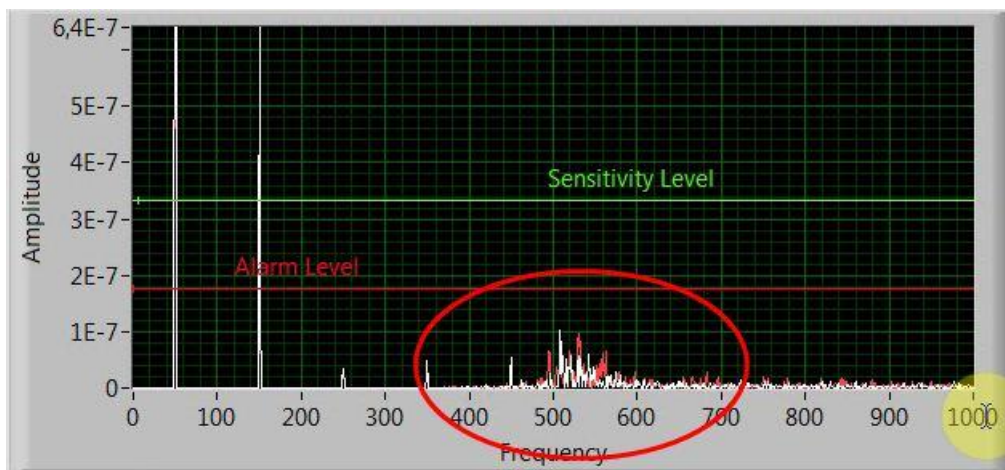
Οι στήλες "Untitled" και "Untitled 1" είναι τα ζεύγη των κορυφών στην κλίμακα dB ενώ "Untitled 2" και "Untitled 3" τα αντίστοιχα στη γραμμική κλίμακα. Η διαφορά που παρουσιάζονται οφείλονται στο ότι είχε οριστεί διαφορετική ευαισθησία ανίχνευσης για κάθε κλίμακα, όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

3.3.2 Ανίχνευση UAS

Ως πρώτη παρατήρηση μπορούμε να δούμε το Σχήμα 3.7 όπου με βέλη φαίνονται κάποιες κορυφές πλάτους σε συχνότητες πολλαπλάσια των 50Hz – πρόκειται για το αποτέλεσμα της τροφοδοσίας του ραντάρ από το δίκτυο 50Hz της ΔΕΗ, αρμονικές συχνότητες (150 – 250 - 350Hz) οι οποίες περνούν αναπόφευκτα προς το σήμα εξόδου λόγω απλής σχεδίασης του τροφοδοτικού του.



Σχήμα 3.7: Κορυφές αρμονικών τάσης 50Hz

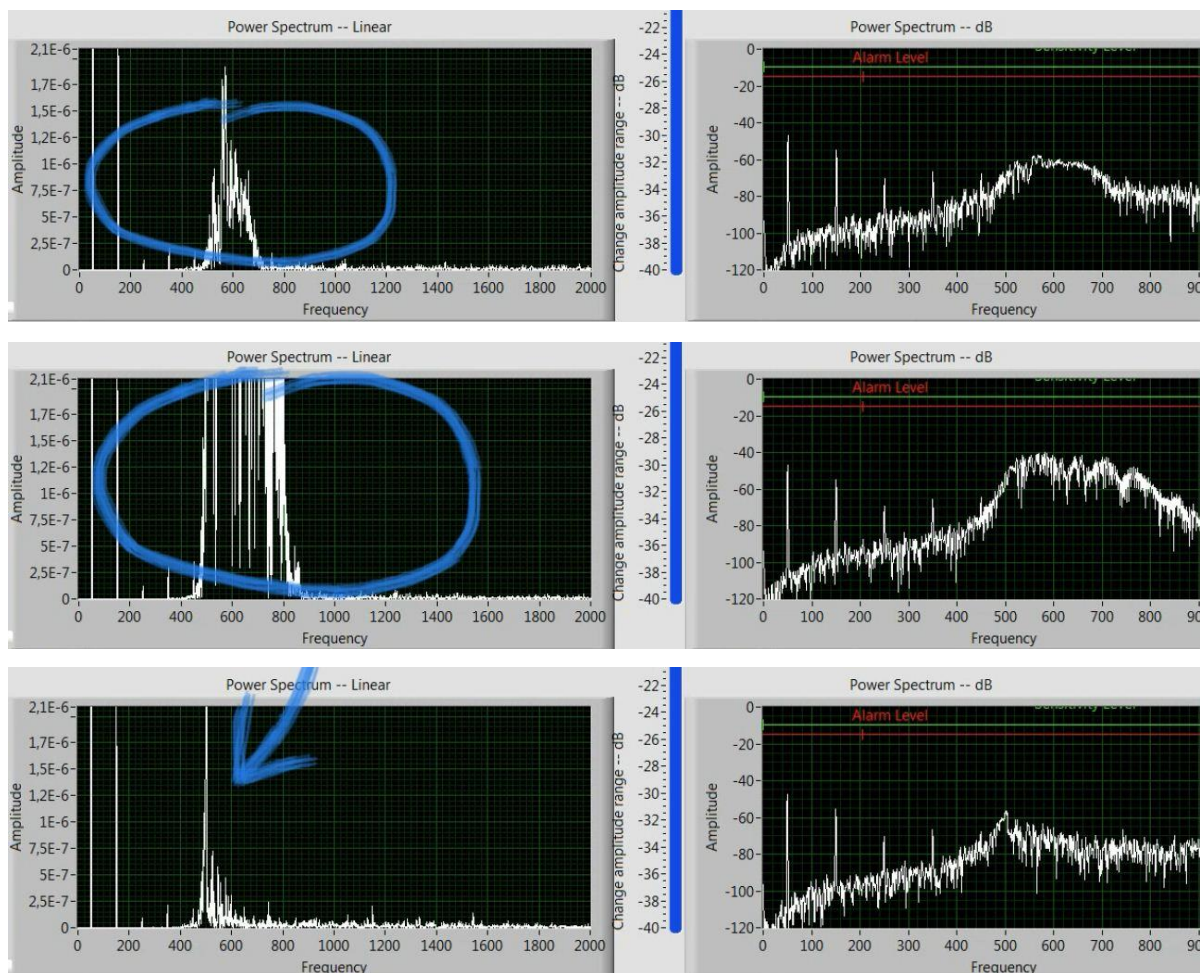


Σχήμα 3.8: Θόρυβος στην περιοχή 480 Hz – 600 Hz.

Δεύτερη αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι μια διακριτή στάθμη θορύβου (clutter) που παρατηρείται στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 480Hz και 600Hz και φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.8.

Χρησιμοποιώντας τη (2.20), το εύρος συχνότητας Doppler 480 ~ 600Hz αντιστοιχεί σε ταχύτητες κινούμενων στόχων 3 ~ 3.75m/s ή 10.8 ~ 13.5km/h.

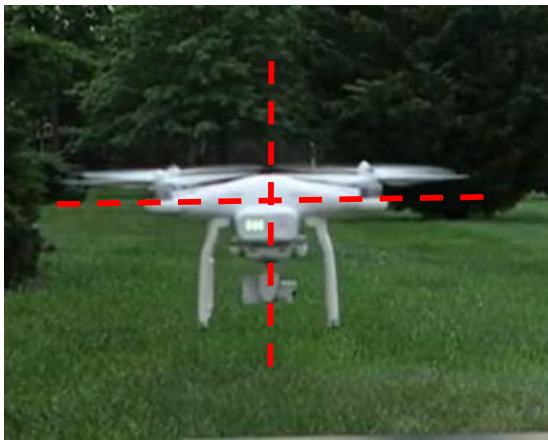
Οι δοκιμές ανίχνευσης του drone με την εφαρμογή που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.1 έδωσαν σε ανοιχτό χώρο εικόνα παρόμοια με αυτή του Σχήματος 3.7. Μέσα από το clutter που αναφέρθηκε πρωτύτερα, ξεχωρίζουν κάποιες κορυφές στην ίδια περιοχή συχνοτήτων που διαφέρουν από τις αρμονικές της τροφοδοσίας. Στο πρώτο από τα σχήματα του 3.9 η επικρατέστερη κορυφή είναι στα 580Hz ενώ στο τελευταίο 505Hz.



Σχήμα 3.9: Κορυφές κατά την προσπάθεια ανίχνευσης του drone

Η σημαντικότερη παρατήρηση αφορά στο εξής: οι κορυφές εμφανίζονταν μόνο κατά την ακτινική κίνηση του drone πλησιάζοντας ή απομακρύνοντας από το ραντάρ. Με άλλα λόγια όταν αυτό βρισκόταν σε αιώρηση, δεν ανιχνεύονταν από το ραντάρ. Το γεγονός αυτό υπέδειξε

ότι μάλλον η κίνηση των ελίκων είναι αυτό που ανιχνεύεται από το ραντάρ. Στις Εικόνες 3.3 και 3.4 δίνεται μια εξήγηση των παραπάνω:



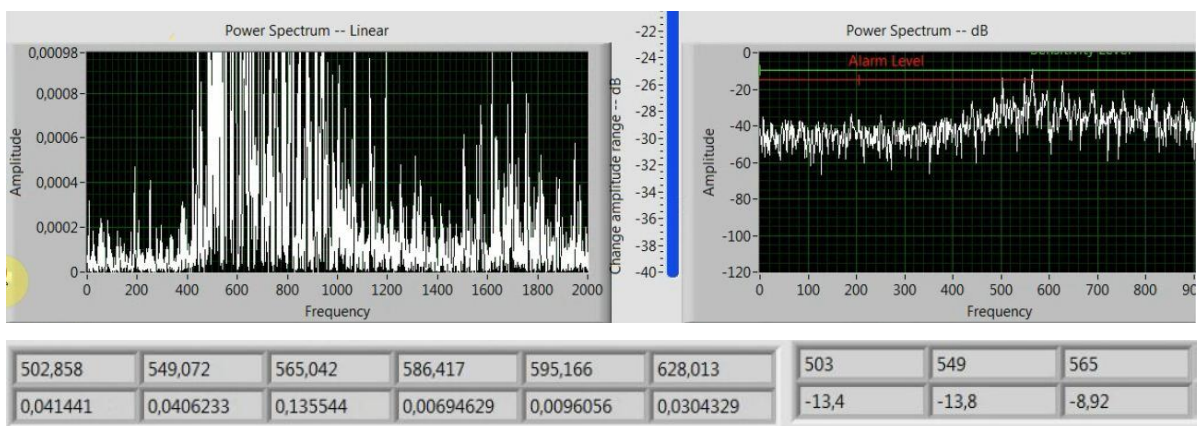
Εικόνα 3.3: Το drone σε αιώρηση



Εικόνα 3.4: Το drone κατά την κίνηση

Σε κατάσταση αιώρησης το drone βρίσκεται σε οριζόντια θέση, με τις έλικές του σε επίπεδο παράλληλο με το έδαφος (Εικόνα 3.3). Εάν κινηθεί π.χ. προς τα αριστερά (Εικόνα 3.4) βλέπουμε ότι πλέον οι άξονές του δεν είναι κάθετοι μεταξύ τους, αλλά παίρνει μια κλίση προς τα αριστερά. Έτσι, εκτίθεται μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας των περιστρεφόμενων ελίκων προς τη δέσμη του ραντάρ, οπότε αυξάνεται η ανιχνευσιμότητά τους.

Για να διαπιστώσουμε την ανίχνευση των πτερύγων σε σχέση με την καθετότητα της δέσμης του ραντάρ ως προς αυτές, τοποθετούμε το ραντάρ ακριβώς επάνω από το drone, με τις χοανοκεραίες του να κοιτάζουν προς το έδαφος και σε απόσταση 1 m από τις περιστρεφόμενες πτέρυγες του drone.

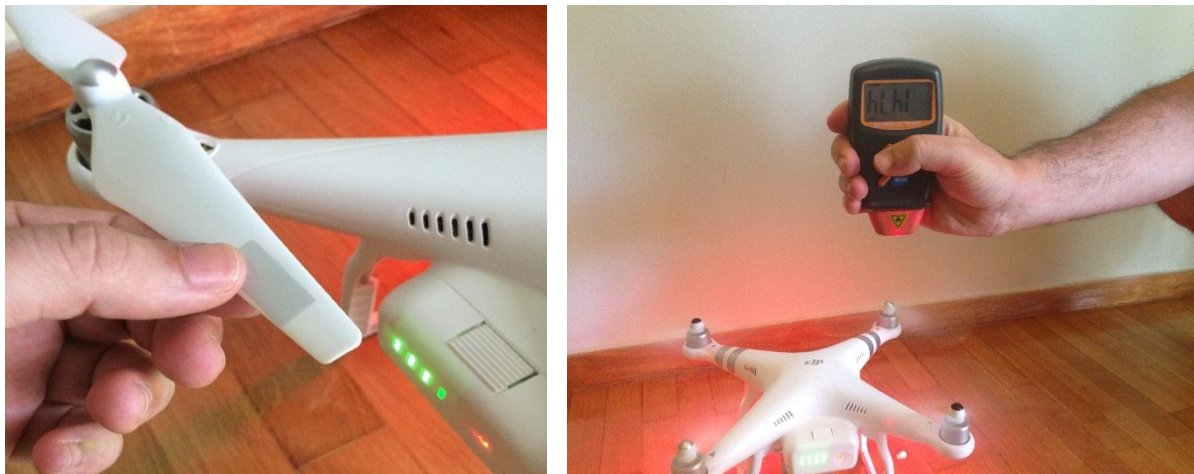


Σχήμα 3.10: Ραντάρ κάθετο στο επίπεδο των πτερύγων του drone

Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται καθαρά ότι έχουμε πολύ υψηλότερες τιμές κορυφών από αυτές του Σχήματος 3.9 κατά το οποίο το drone απλώς πραγματοποιούσε κίνηση εμπρός – πίσω. Η

στάθμη θορύβου από τα -100dB στην περιοχή 0 – 400Hz πλέον εντοπίζεται στα -50dB, ενώ τα peaks στην περιοχή των ~550Hz έχουν τιμή της τάξης των -10dB έναντι -50dB της προηγούμενης παρατήρησης.

Όταν το drone αφεθεί σε λειτουργία χωρίς να δοθεί εντολή μέσω του χειριστηρίου για ανύψωση, θεωρούμε ότι λειτουργεί σε κατάσταση «ρελαντί». Η ταχύτητα περιστροφής κάθε πτέρυγας παρουσίαζε συνεχείς μεταβολές σε ένα εύρος μεταξύ 1470 ~ 1530 σ.α.λ. (rpm). Τοποθετώντας ανακλαστική ταινία στην επιφάνεια των πτερύγων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Μπορούμε να θεωρήσουμε για τις ανάγκες της παρούσας ότι οι πτέρυγες στο ρελαντί περιστρέφονται με 1500rpm. Επιταχύνοντας ελάχιστα τις πτέρυγες χωρίς να απογειωθεί το drone, είδαμε στιγμιαίες ενδείξεις που ξεπερνούσαν εύκολα τις 3500 rpm.



Εικόνα 3.5: Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής πτερύγων

Οι 1500rpm αντιστοιχούν σε 25 στροφές το δευτερόλεπτο, ήτοι βασική συχνότητα 25Hz. Κάθε πτέρυγα αποτελείται από 2 τμήματα έλικας, οπότε αναμένεται οι ταλαντώσεις που προέρχονται από κάθε πτέρυγα στο ρελαντί να είναι πολλαπλάσια των 50Hz.

4. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕ ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

4.1 Γενικά

Παρατηρώντας ότι σε περιοχές όπου υπερίπταται κάποιο drone ακούγεται χαρακτηριστικός βόμβος, εύλογη μοιάζει η διερεύνηση της δυνατότητας για ανίχνευση μέσω του ακουστικού του «αποτυπώματος».

Έχοντας συλλάβει το ακουστικό σήμα που εκπέμπει το drone, από την κυματομορφή αυτού μπορούμε να επιλέξουμε δυο οδούς:

A. Τη συσχέτιση της λαμβανόμενης κυματομορφής με μια άλλη γνωστή\καταγεγραμμένη που έχει ηχογραφηθεί εκ των προτέρων, με γνωστά τα χαρακτηριστικά πτήσης του drone (ύψος, απόσταση από μικρόφωνο)

B. Την εξαγωγή συμπερασμάτων από τις αρμονικές της βασικής συχνότητας, μέσω της συσχέτισης αρμονικών γραμμών του (Harmonic Line Association).

Σημειώνεται ότι οι δυο παραπάνω μέθοδοι δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενες· τμήματα της μιας μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την άλλη.

Για τη σύλληψη του ηχητικού σήματος, χρησιμοποιήθηκε το μικρόφωνο του φορητού Η/Υ που είχαμε για τις δοκιμές. Καταλληλότερο μικρόφωνο θα ήταν σίγουρα κάποιο πυκνωτικό μικρόφωνο εξωτερικών χώρων, πλην όμως δεν είχαμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε κάτι παρόμοιο.

4.2 Cross correlation ηχητικού σήματος με γνωστή κυματομορφή

Για τις ανάγκες της εργασίας, ηχογραφήσαμε το drone σε λειτουργία στις αποστάσεις από το μικρόφωνο που φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Η ηχογράφηση έγινε χρησιμοποιώντας το δωρεάν διαθέσιμο πρόγραμμα Audacity με τα εξής χαρακτηριστικά:

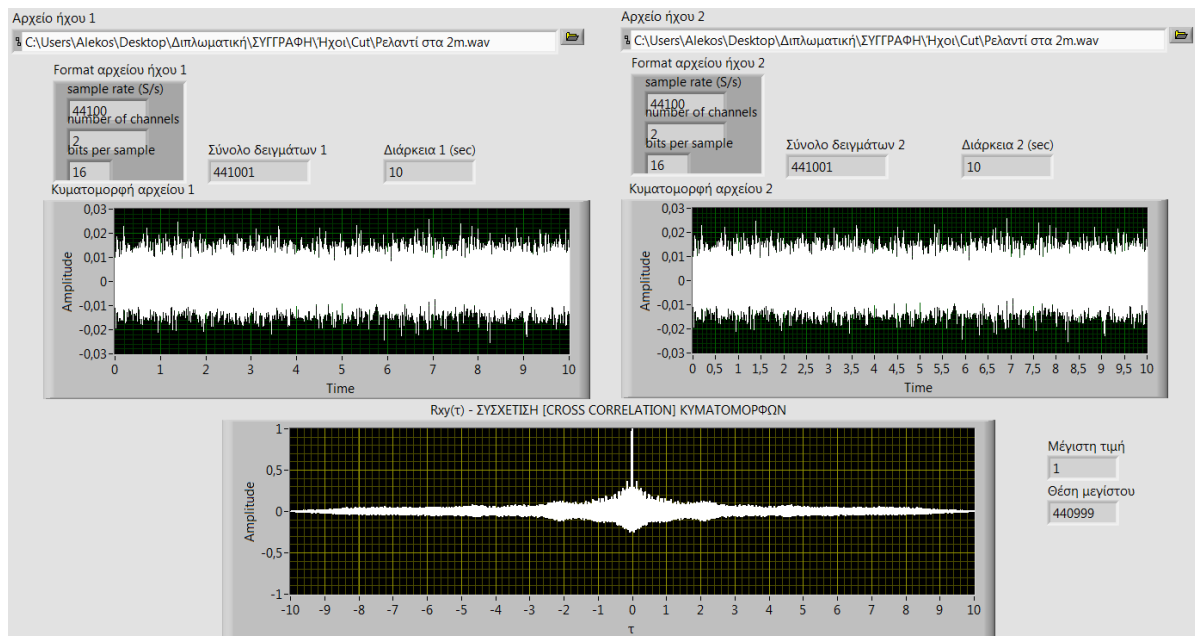
- Στερεοφωνικά (δεξί – αριστερό κανάλι)
- Ρυθμός δειγματοληψίας 44100Hz
- Μορφή δειγμάτων I-32 (αριθμός κινητής υποδιαστολής 32 δυαδικών, αντί της PCM 16 ή 24 δυαδικών)

Τα αρχεία .wav που προέκυψαν στη συνέχεια περικόπηκαν ακριβώς στα 10s το καθένα ώστε να έχουμε προς απευθείας σύγκριση κομμάτια των ($10\text{sec} * 44100\text{samples/sec} =$) 441000 δειγμάτων.

α/α	Ύψος	Απόσταση	α/α	Ύψος	Απόσταση	α/α	Ύψος	Απόσταση
1	0	2	11	50	100	21	100	200
2	2	10	12	50	150	22	120	50
3	10	10	13	50	200	23	120	100
4	10	30	14	80	50	24	120	150
5	20	50	15	80	100	25	120	200
6	30	30	16	80	150	26	120	250
7	30	50	17	80	200	27	150	100
8	30	100	18	100	50	28	150	150
9	40	50	19	100	100			
10	50	50	20	100	150			

Πίνακας 4.1: Πίνακας μετρήσεων κατά απόσταση

Στη συνέχεια, τα αρχεία ήχου εισάγονται σε κατάλληλη εφαρμογή που φτιάχτηκε στο LabVIEW ώστε να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του cross correlation μεταξύ των κυματομορφών όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το παράδειγμα που εμφανίζεται στην εν λόγω



Σχήμα 4.1: Το περιβάλλον της εφαρμογής συσχέτισης κυματομορφών

εικόνα, παρουσιάζει τη συσχέτιση της κυματομορφής ήχου που καταγράφηκε όταν το drone λειτουργούσε στο ρελαντί και σε απόσταση 2m από το μικρόφωνο με την ίδια κυματομορφή – πρόκειται δηλαδή για περίπτωση αυτοσυσχέτισης. Όπως αναμένονταν, η αυτοσυσχέτιση

της κυματομορφής με τον εαυτό της δίνει το μέγιστο κανονικοποιημένη συντελεστή ίσο με τη μονάδα.

Τροποποιώντας το πρόγραμμα LabVIEW ώστε να εκτελεί επαναληπτικά το cross correlation μεταξύ των αρχείων .wav, προκύπτει ένας πίνακας 28x28 με τις τιμές των συντελεστών ετεροσυσχέτισης. Διατηρώντας ως αναφορά την αρίθμηση του Πίνακα 4.1, η ευθεία απόσταση (LOS – Line Of Sight) ανάμεσα στο μικρόφωνο και το drone προκύπτει εύκολα από το πυθαγόρειο θεώρημα ο Πίνακας 4.2 (όλες οι αποστάσεις είναι σε m):

α/α	Ύψος	Απόσταση	LOS	α/α	Ύψος	Απόσταση	LOS
1	0	2	2	15	80	100	128,06248
2	2	10	10,198039	16	80	150	170
3	10	10	14,142136	17	80	200	215,40659
4	10	30	31,622777	18	100	50	111,8034
5	20	50	53,851648	19	100	100	141,42136
6	30	30	42,426407	20	100	150	180,27756
7	30	50	58,309519	21	100	200	223,6068
8	30	100	104,40307	22	120	50	130
9	40	50	64,031242	23	120	100	156,20499
10	50	50	70,710678	24	120	150	192,09373
11	50	100	111,8034	25	120	200	233,23808
12	50	150	158,11388	26	120	250	277,30849
13	50	200	206,15528	27	150	100	180,27756
14	80	50	94,339811	28	150	150	212,13203

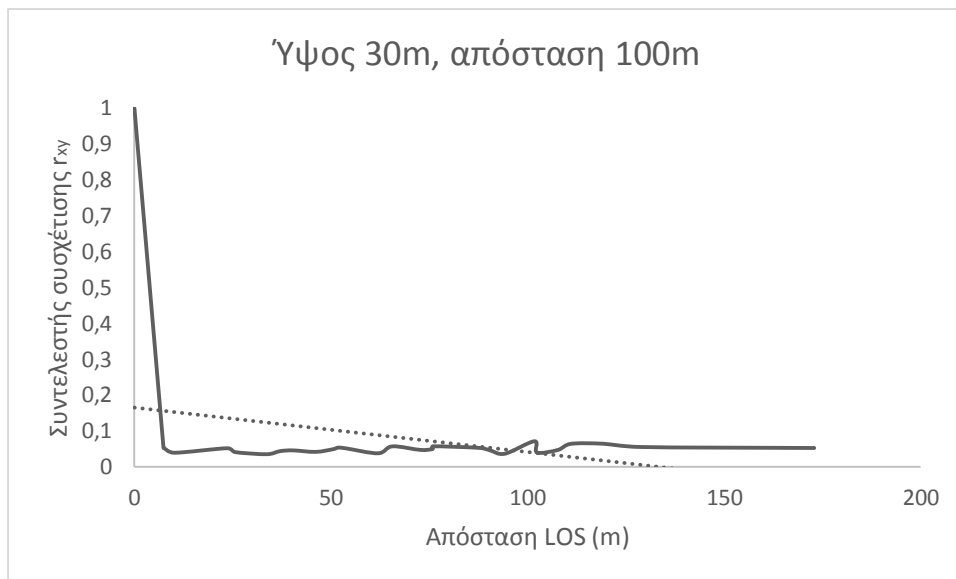
Πίνακας 4.2: Πίνακας με τις αποστάσεις LOS

Επιλέγουμε ενδεικτικά 4 σημεία με αποστάσεις που φαίνονται σημειωμένες στον παραπάνω πίνακα. Πρόκειται για αποστάσεις οι οποίες είναι μεγαλύτερες των 100m και στις οποίες το drone είναι σχετικά δυσδιάκριτο με γυμνό μάτι, οπότε και έχει νόημα η προσπάθεια ανίχνευσής του με αισθητήρες (μικρόφωνο εν προκειμένω).

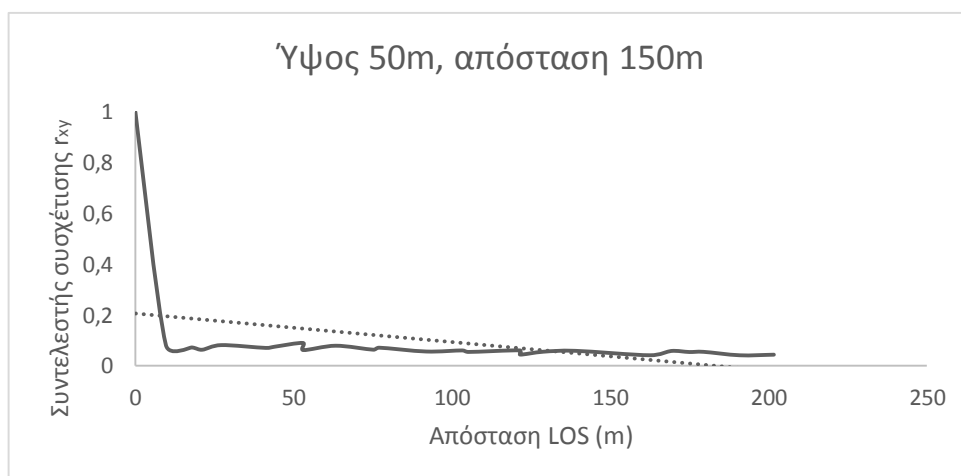
Αφού υπολογίσουμε τις διαφορές απόστασης μεταξύ των σημείων, ταξινομούμε με αύξουσα σειρά τις αποστάσεις σε ευθεία γραμμή και τις απεικονίζουμε σε διάγραμμα Vs συντελεστή συσχέτισης. Αυτό που θα περίμενε κανείς διαισθητικά, είναι ότι όσο απομακρυνόμαστε από μια συγκεκριμένη απόσταση – λόγου χάρη ξεκινώντας από την #8 στα 104.4m LOS απόστασης – τόσο ο συντελεστής συσχέτισης με πιο «μακρινές» κυματομορφές θα μειωνόταν.

Η παραπάνω λογική θεώρηση φαίνεται να επιβεβαιώνεται από τα γραφήματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 4.2 έως και 4.5. Σ' αυτά έχει προσδιοριστεί επιπλέον με

διακεκομμένη γραμμή η τάση της καμπύλης, η οποία είναι εμφανώς πτωτική όσο αυξάνει η απόσταση παρατήρησης από δεδομένο σημείο.



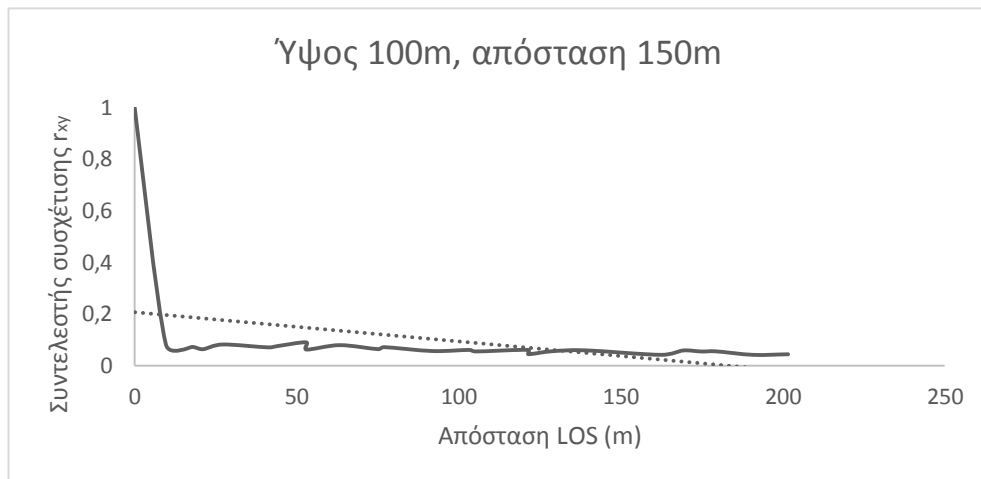
Σχήμα 4.2: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #1



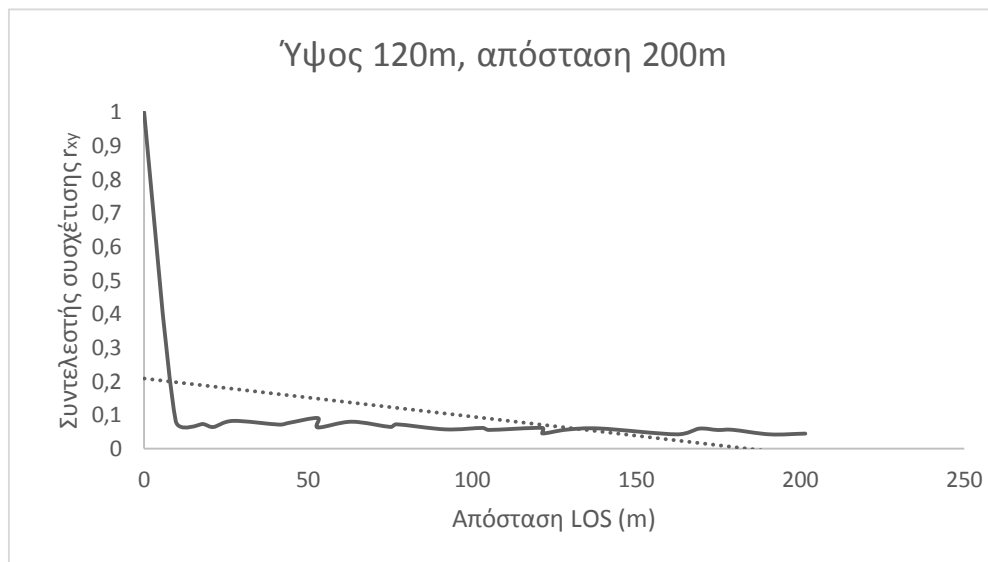
Σχήμα 4.3: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #2

Τα τελευταία μάλιστα τρία γραφήματα 4.3, 4.4 και 4.5 μοιάζουν μακροσκοπικά εντελώς πανομοιότυπα.

Σε απόσταση μηδέν από την εκάστοτε κυματομορφή αναφοράς είναι η ίδια η κυματομορφή, οπότε ως αναμένονταν στο σημείο 0 κάθε γραφήματος απεικονίζεται η αυτοσυσχέτιση κάθε σήματος με τον εαυτό του. Έτσι, κάθε γράφημα ξεκινάει από την τιμή 1 και συνεχίζει με φθίνουσα πορεία όσο η απόσταση από το σημείο αναφοράς αυξάνεται.



Σχήμα 4.4: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #3

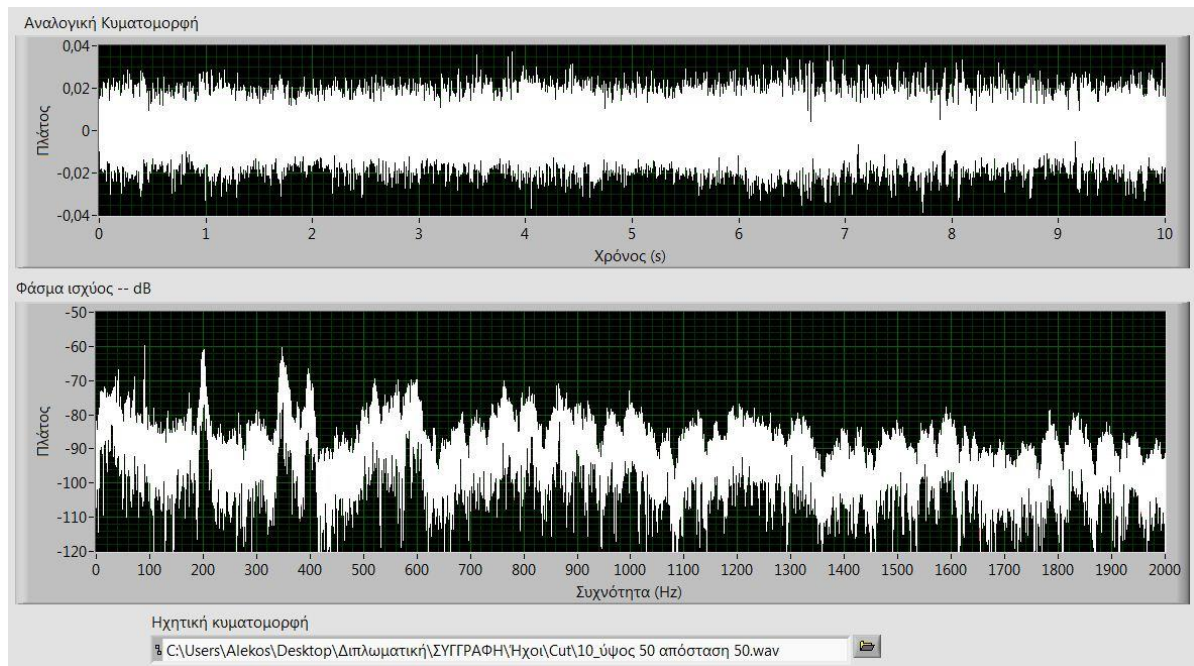


Σχήμα 4.5: Σχέση συντελεστή συσχέτισης – απόστασης #4

4.3 Εξαγωγή φασματικού περιεχομένου κυματομορφής

Η δεύτερη προσέγγιση στην προσπάθεια ανίχνευσης βρίσκεται στο πεδίο της συχνότητας. Το φασματικό περιεχόμενο θα προκύψει με την εκτέλεση DFT. Για τη διαδικασία αυτή υπάρχει πληθώρα εργαλείων στο LabVIEW που μας επιτρέπει να εξάγουμε τις συχνότητες που κρύβονται πίσω από την κυματομορφή και να της αντιστοιχήσουμε χρονικά με το αρχικό σήμα.

Ένας τρόπος απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6, όπου με κατάλληλο πρόγραμμα LabVIEW απεικονίσαμε την κυματομορφή στη θέση #10 (ύψος 50m, απόσταση 50m).



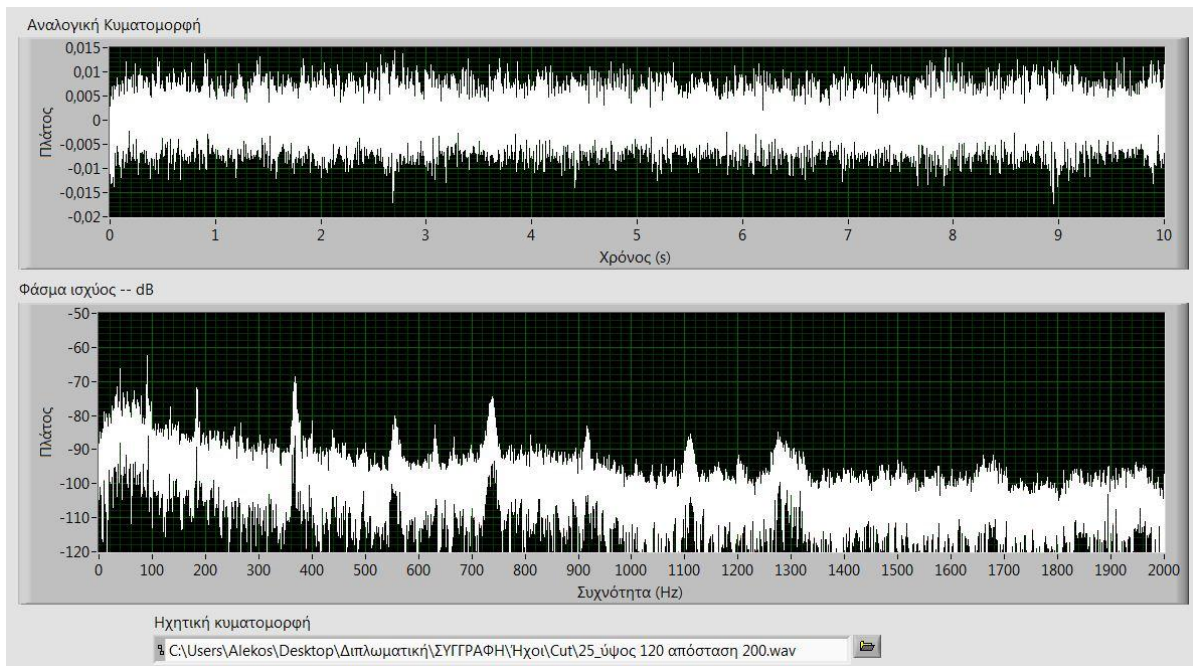
Σχήμα 4.6: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – power spectrum #10

Στο πάνω μέρος βρίσκεται η ακουστική κυματομορφή για λόγους πληρότητας ενώ κάτω έχει εξαχθεί το φάσμα ισχύος (power spectrum).

Εποπτικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το κύριο φασματικό περιεχόμενο του σήματος εντοπίζεται στη χαμηλόσυχη περιοχή 0~400Hz. Βεβαίως το σήμα έχει υποστεί μεγάλη εξασθένιση ώστε να φτάνει στο μικρόφωνο στα επίπεδα των -60dB για τις κορυφές, ενώ ο θόρυβος βρίσκεται περίπου 30dB χαμηλότερα στα -90dB.

Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται η αντίστοιχη διαδικασία για το σημείο #25 (ύψος 120m, απόσταση 200m) που απέχει περίπου 163m σε LOS από το προηγούμενο #10. Και στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε εμφανώς ότι το κύριο φασματικό περιεχόμενο βρίσκεται πάλι στην περιοχή 0~400Hz. Το επίπεδο του θορύβου είναι επίσης αυξημένο σε σχέση με την προηγούμενη θέση κατά 15dB (-105dB έναντι -90dB) ενώ η μεγαλύτερη κορυφή (~90Hz) εμφανίζεται κατά 4dB περίπου ασθενέστερη από την προηγούμενη.

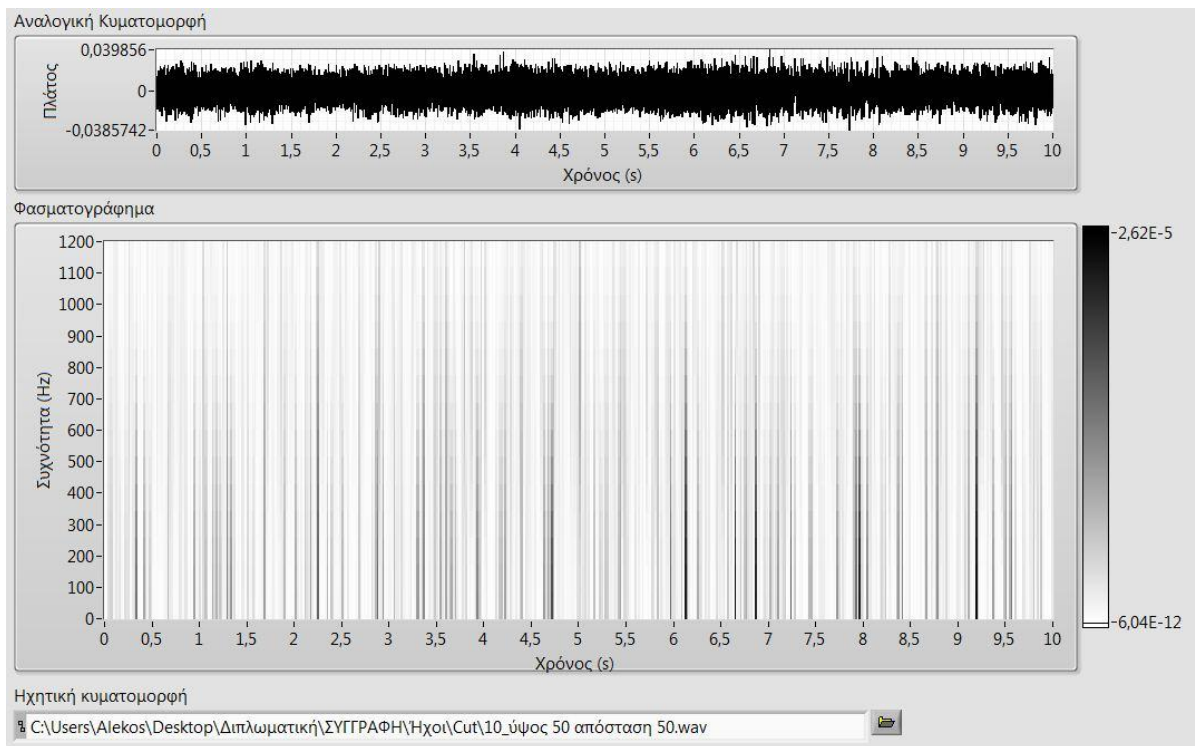
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν ακόμα οι κορυφές στις συχνότητες (με αναφορά στο Σχήμα 4.7) 90, 185, 367, 555, 740Hz που μοιάζουν να είναι πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας. Λόγω υψηλού θορύβου και μη καθαρής κυματομορφής, δε μπορούμε να βγάλουμε σίγουρο συμπέρασμα περί αυτού.



Σχήμα 4.7: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – power spectrum #25

Άλλος τρόπος αναπαράστασης του συχνοτικού περιεχομένου ως προς το χρόνο για κάθε κυματομορφή, είναι το φασματογράφημα (Spectrogram).

Το φασματογράφημα του Σχήματος 4.8 απεικονίζει με διαφορετική μορφή τα δεδομένα που φαίνονται στο Σχήμα 4.6 που προηγήθηκε. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο χρόνος που είναι μοναδικός για το ηχητικό σήμα. Το ύψος κάθε κατακόρυφης μπάρας αντιστοιχεί στην

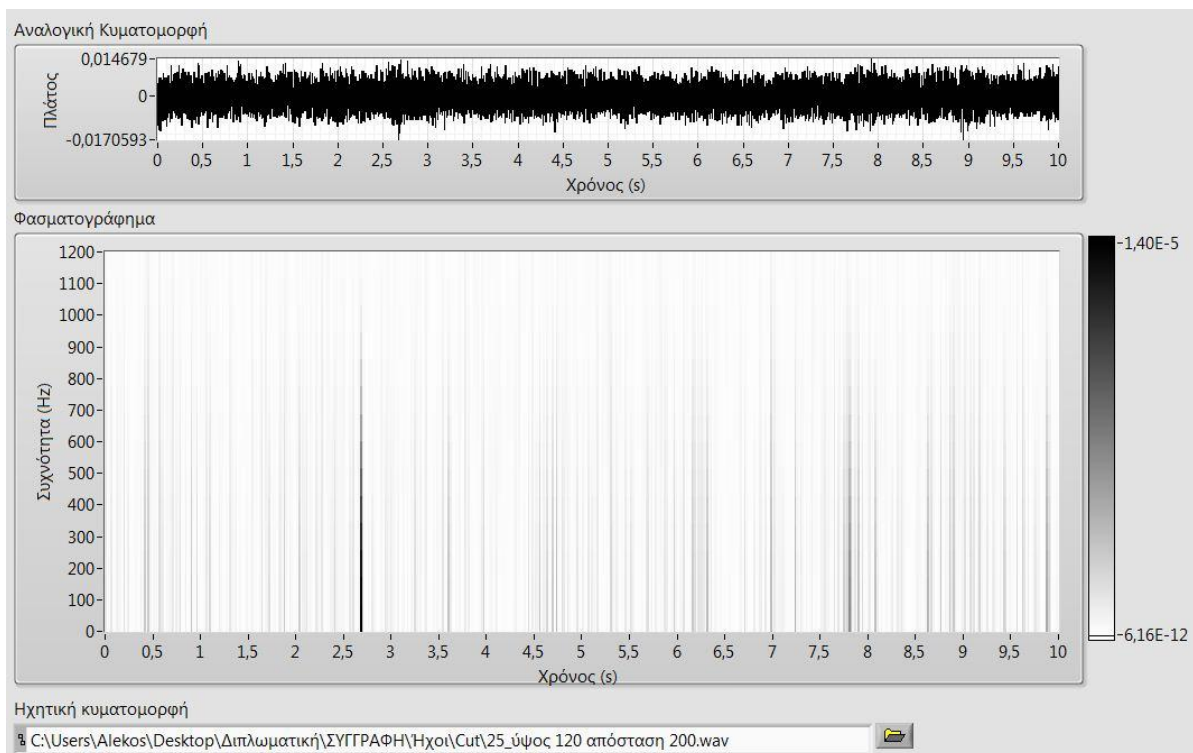


Σχήμα 4.8: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – spectrogram #10

παρατηρούμενη επικρατέστερη συχνότητα για τη δεδομένη χρονική στιγμή ενώ η χρωματική ένταση κάθε μπάρας (το πόσο «σκούρα» είναι) δείχνει το αντίστοιχο πλάτος στο πεδίο του χρόνου.

Και στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι για τις έντονες μπάρες το ύψος δεν υπερβαίνει τα 500Hz περίπου ενώ το πλάτος των συνιστωσών άνω των 1000Hz είναι αμελητέο.

Για λόγους πληρότητας, παραθέτουμε το αντίστοιχο του Σχήματος 4.7 φασματογράφημα στο Σχήμα 4.9 που ακολουθεί.



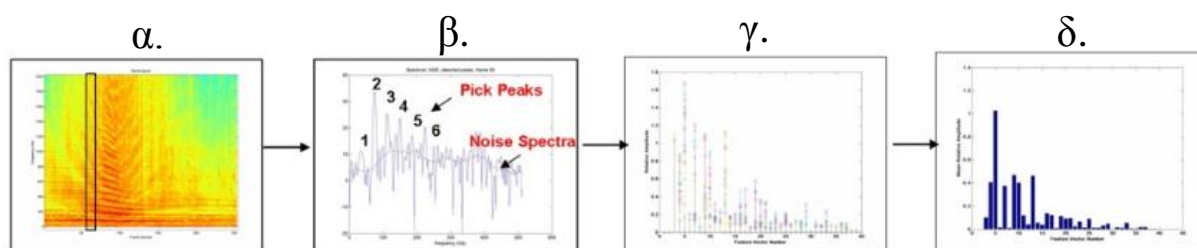
Σχήμα 4.9: Εύρεση φασματικού περιεχομένου – spectrogram #25

Παρατηρούμε μια παράταιρη κορυφή περίπου στα 2.7sec, η οποία οφείλεται σε εξωτερικό οξύ θόρυβο του περιβάλλοντος. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης φασματογραφημάτων: με την παρατήρηση του περιβάλλοντος και την αντιστοίχιση διάφορων γεγονότων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, μπορούμε να ερμηνεύσουμε καλύτερα τα δεδομένα αφαιρώντας περιττή ή λάθος πληροφορία. Εν προκειμένω, ο ήχος από πουλιά που παρατηρήθηκε στο δευτερόλεπτο 2.7 μπορεί να αγνοηθεί· σε διαφορετική περίπτωση ίσως προβλημάτιζε η ύπαρξη τόσο επικρατούς φασματικής συνιστώσας στο συγκεκριμένο σημείο.

4.3.1 Harmonic Line Association (HLA)

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης spectrograms, είναι η διευκόλυνση εφαρμογής της μεθόδου Συσχέτισης Αρμονικών Γραμμών (HLA – Harmonic Line Association).

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.10, μπορούμε να περιγράψουμε τη διαδικασία ως εξής: δεδομένης της ακουστικής κυματομορφής/χρονοσειράς, σχηματίζουμε μέσω FFT το φασματογράφημά της όπως στο 4.10α. Με ορισμένο κριτήριο (για παράδειγμα 3 διαδοχικές κορυφές – frequency bins) επιλέγουμε ανάμεσα στο θόρυβο κορυφές που αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά «οικογένειες συχνοτήτων» όπως δείχνεται στο 4.10β. Χρησιμοποιώντας ως κέντρο τη σημαντικότερη κορυφή, προσαρμόζουμε με κατάλληλα βάρη μια καμπύλη που αντιστοιχεί στο στατιστικό ανάλογο της προηγούμενης κυματομορφής που θα δώσει με τη σειρά του μια χαρακτηριστική σειρά – 4.10γ. Το τελικό αποτέλεσμα, θα είναι ένα διάγραμμα αναφοράς όπως αυτό του Σχήματος 4.10δ, το οποίο θα εμπεριέχει τη χαρακτηριστική πληροφορία μέσω της οποίας μπορούμε να ανιχνεύουμε patterns σε οποιοδήποτε τυχαίο σήμα.



Σχήμα 4.10: Εφαρμογή HLA για εξαγωγή ακουστικών χαρακτηριστικών

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3.2 η βασική συχνότητα περιστροφής των πτερύγων είναι 50Hz, οπότε αναμένεται οι αρμονικές που θα προκύπτουν να είναι πολλαπλάσιας αυτής. Επίσης όπως έχουμε παρατηρήσει προηγουμένως, το κύριο φασματικό περιεχόμενο των ακουστικών κυμάτων εντοπίζεται στην περιοχή 0~500Hz. Εάν για λόγους πληρότητας θεωρήσουμε την περιοχή 0~1500Hz ως το «σημαντικό» φασματικά εύρος, τότε μπορούμε να πούμε ότι αρκεί να λάβουμε υπόψη τις 30 πρώτες αρμονικές. Αυτές θα σχηματίσουν το διάγραμμα – αναφορά (Σχήμα 4.10δ) που θα συγκρίνεται με το λαμβανόμενο σήμα ώστε να επιτευχθεί ανίχνευση.

Προκειμένου να εξαλειφθεί η σημαντική επίδραση της απόσβεσης του ηχητικού σήματος λόγω διάδοσης στον αέρα, το μέτρο κάθε αρμονικής που είναι στοιχείο του διανύσματος – αναφοράς μπορεί να κανονικοποιηθεί ως προς το άθροισμα των μέτρων των δυο επικρατέστερων αρμονικών κάθε συνόλου, όπως περιγράφηκε στο 4.10β.

4.4 Beamforming

Τα ακουστικά κύματα που παράγονται από μηχανές – όπως στην περίπτωση μας από τις πτέρυγες και τους ηλεκτροκινητήρες του drone – χαρακτηρίζονται ως «ευρείας ζώνης». Το χαρακτηριστικό τους αυτό απορρέει από τη μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις χαμηλότερες και τις υψηλότερες συχνότητες που αυτά παράγουν.

Για παράδειγμα, είδαμε ότι σημαντικές αρμονικές εξαιτίας της κίνησης των πτερύγων εντοπίζονται στο εύρος 50Hz – 1500Hz δίνοντας ένα λόγο $\frac{f_H}{f_L} = 30$. Αντίθετα, στην περιοχή των RF ο λόγος αυτός είναι πολύ μικρότερος προσεγγίζοντας τη μονάδα: το χειριστήριο του drone που λειτουργεί με το πρωτόκολλο LightBridge (μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου WiFi - IEEE 802.11) στην περιοχή συχνοτήτων 2.4Ghz – 2.483GHz δίνοντας λόγο $\frac{f_H}{f_L} = 1.035$.

Τα σήματα αυτά χαρακτηρίζονται ως «στενής ζώνης» και έχουν σαφώς ορισμένο ονομαστικό μήκος κύματος εν αντιθέσει με τα στενής ζώνης – ακουστικά κύματα, των οποίων η κυματομορφή δε διαθέτει συγκεκριμένο χαρακτηριστικό μήκος κύματος.

Θεωρώντας ότι το ακουστικό κύμα διαδίδεται στο χώρο σε σφαιρική μορφή, μπορούμε να διακρίνουμε δυο περιοχές γύρω από την πηγή: το κοντινό πεδίο (near – field) όπου το κύμα έχει τη μορφή καμπύλης\σφαίρας και το μακρινό πεδίο (far – field) όπου το κύμα είναι επίπεδο και τα διαδοχικά του μέτωπα παράλληλα μεταξύ τους.

Στο μακρινό πεδίο και με την παραδοχή της σταθερής ταχύτητας διάδοσης του ήχου στον αέρα (~345m/s), γνωρίζοντας τη χρονική στιγμή της εκπομπής του ηχητικού κύματος από την πηγή μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση από αυτή μετρώντας τη χρονική καθυστέρηση στη διάδοση του κύματος. Στο κοντινό πεδίο απαιτείται η συλλογή πολλών χρονικά καθυστερημένων εκδοχών του σήματος, η επεξεργασία των οποίων μπορεί να προσδιορίσει τη θέση της πηγής.

Επιπρόσθετα το φαινόμενο της αντήχησης λόγω ανάκλασης των κυμάτων από μεγάλα αντικείμενα του περιβάλλοντος δυσκολεύει ακόμα περισσότερο την εκτίμηση της απόστασης και της κατεύθυνσης της πηγής, αφού μια μεμονωμένη πηγή εμφανίζεται στο δέκτη ως πολλαπλές.

Μια λύση σ' αυτά τα προβλήματα εκτίμησης απόστασης και κατεύθυνσης άφιξης (DOA – Direction of Arrival), αποτελεί η **διαμόρφωση δέσμης (beamforming)**. Πρόκειται για μια επέκταση στο χώρο του προσαρμοσμένου φίλτρου: ενισχύει το σήμα από συγκεκριμένη επιθυμητή κατεύθυνση ενώ καταπιέζει το σήμα από άλλες ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Για

την παραπάνω διαδικασία απαιτείται η σύλληψη του ηχητικού σήματος από περισσότερους από έναν αισθητήρες\μικρόφωνα, από διάταξη που καλούμε «**συστοιχία αισθητήρων**» (**sensor array**). Πρόκειται για διατάξεις με γνωστή γεωμετρία, όπου οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε γνωστές, προκαθορισμένες θέσεις ώστε να μπορεί να μετρηθεί, να ερμηνευτεί και ενδεχομένως να απαλειφθεί η χρονική καθυστέρηση της άφιξης του ακουστικού σήματος. Παράδειγμα συστοιχίας μικροφώνων που συναντάται στη βιβλιογραφία, φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Παράδειγμα υλοποίησης συστοιχίας μικροφώνων

Έτσι ενώ στα στενής ζώνης σήματα η πληροφορία για τη DOA περιέχεται στη συγκεκριμένη και μετρήσιμη διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων που λαμβάνουν οι αισθητήρες, ο διαμορφωτής δέσμης συνδυάζει τα σήματα των (διάσπαρτων στο χώρο) αισθητήρων γραμμικά με κατάλληλα βάρη ώστε να πετύχει χωρικό φιλτράρισμα. Με άλλα λόγια, το ρόλο της διαφοράς φάσης στα

στενής ζώνης σήματα αναλαμβάνουν οι χρονικές καθυστερήσεις στα ευρείας ζώνης σήματα. Επίσης, καθόσον τα ακουστικά σήματα είναι αδιαμόρφωτα και ευρείας ζώνης, οι τιμές των σημάτων από τους αισθητήρες είναι πραγματικές· το ίδιο και τα βάρη του διαμορφωτή δέσμης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η λειτουργία της διαμόρφωσης δέσμης απαιτεί μια αρχική εκτίμηση κατεύθυνσης ώστε να καταναίμει τα διάφορα βάρη στους αισθητήρες. Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί προς αυτό το σκοπό όπως η λύση μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood solution) ή υποβέλτιστη αλλά οικονομικότερη ως προς το υπολογιστικό κόστος τεχνική MUSIC (MULTiple SIGNAL Classification). Ακόμα και στην περίπτωση που μια τέτοια λύση δεν είναι εφικτή ή διαθέσιμη, η τεχνική «τυφλής διαμόρφωσης δέσμης» (blind beamforming) μπορεί να δώσει αποτελέσματα χωρίς τη γνώση της ακριβούς απόκρισης ή/και θέσης του κάθε αισθητήρα.

Η αναλυτική περιγραφή και υλοποίηση των παραπάνω διαδικασιών είναι εκτός των σκοπών της παρούσας εργασίας.

5. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

5.1 Επισκόπηση διαδικασίας

Αναγνωρίζοντας το βαθμό διάδοσης στη χρήση των UAS τόσο σε καθημερινές όσο και σε εξειδικευμένες δραστηριότητες, καταδείχθηκαν οι λόγοι για τους οποίους παρουσιάζει ενδιαφέρον η μελέτη για τη δυνατότητα ανίχνευσής τους.

Η προσπάθειά μας στράφηκε προς την αξιοποίηση υφιστάμενου υλικού χωρίς την κατασκευή – αγορά εξοπλισμού παρά μόνο με την επεξεργασία των σημάτων που είμασταν σε θέση να καταγράψουμε με τη χρήση του εν λόγω υλικού. Οι εφαρμογές που υλοποιήθηκαν ήταν ad hoc προσαρμοσμένες στα προβλήματα που επιδιώξαμε να λύσουμε και σίγουρα επιδέχονται βελτιώσεις – τροποποιήσεις.

5.1.1 Συμπεράσματα διαδικασίας ενεργού ανίχνευσης

Στη διάθεσή μας είχαμε μια υλοποίηση ενός CW Doppler ραντάρ σε συχνότητα λειτουργίας 24GHz. Με το περιβάλλον επιτήρησης που υλοποιήθηκε μπορέσαμε να παρατηρήσουμε το drone ως στόχο τόσο σε ανοιχτό όσο και σε κλειστό περιβάλλοντα χώρο.

Προκειμένου να έχει νόημα η ανίχνευση με οποιοδήποτε μέσο θα πρέπει αυτή να γίνεται σε ικανή απόσταση, σίγουρα μεγαλύτερη από αυτή με την οποία ο στόχος γίνεται αντιληπτός με «γυμνό μάτι». Διαφορετικά η τεχνική ανίχνευσης δεν έχει ουσία παρά μόνο σε θεωρητικό επίπεδο και κάτι τέτοιο δεν ήταν στους σκοπούς της εργασίας.

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση με σχετική βεβαιότητα μπορούμε να πούμε ότι η ανίχνευση χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο ραντάρ δεν πέτυχε. Υπήρξε οιοσδήποτε ανίχνευση σε πολύ κοντινές αποστάσεις, σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις κίνησης του drone και υπό συγκεκριμένες γωνίες. Σαφής ένδειξη ανίχνευσης με το ραντάρ σταθερά τοποθετημένο με το drone να ίπταται σε ικανή απόσταση (π.χ. 30 μέτρων LOS) δεν υπήρξε.

Οι λόγοι που φαίνεται να οδηγούν στη μη-ανιχνευσιμότητα από τη συγκεκριμένη διάταξη αναπτύχθηκαν στην εργασία και θα μπορούσαν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- Πιθανόν η συχνότητα των 24GHz να είναι κατάλληλη για την ανίχνευση μεγάλων αντικειμένων όπως αυτοκίνητα (γι' αυτό το σκοπό είχε αρχικά σχεδιαστεί εξάλλου) αλλά να μην ενδείκνυται για ανίχνευση μικρών αντικειμένων όπως ένα drone.

- Το μικρό μέγεθος, η επιφάνεια με ασυνέχειες και το πλαστικό υλικού κατασκευής του drone κρατούν το RCS του σε πολύ μικρές τιμές.
- Το κατευθυντικό κέρδος ή/και η ισχύς του συγκεκριμένου ραντάρ ενδεχομένως δεν ενδείκνυνται για την ανίχνευση στόχων τέτοιας φύσης.

5.1.2 Συμπεράσματα διαδικασίας παθητικής ανίχνευσης

Παρόλο που τα ευρείας ζώνης ακουστικά κύματα υφίστανται την επίδραση πολλών δυσμενών παραγόντων κατά τη διάδοσή τους (εξασθένηση, αντήχηση, παρεμβολή από άλλες πηγές, παραμόρφωση) εντούτοις διαφαίνεται ότι μπορούν να συνεισφέρουν στην προσπάθεια για ανίχνευση UAS.

Είδαμε δυο διαφορετικές προσεγγίσεις προς την κατεύθυνση της παθητικής ανίχνευσης: μια στο πεδίο του χρόνου (ετεροσυσχέτιση αναλογικών ηχητικών κυματομορφών) και μια στο πεδίο της συχνότητας (Συσχέτιση Αρμονικών Γραμμών). Οι μέθοδοι δοκιμάστηκαν με τη σύλληψη ήχου σε πραγματικό χρόνο – σύγκρισή του με γνωστή με ενθαρρυντικά αποτελέσματα όμως η διαδικασία δεν περιγράφηκε στην παρούσα εργασία καθώς ξεφεύγει από τους σκοπούς της.

Προς τη δυνατότητα ανίχνευσης μέσω ακουστικών συχνοτήτων συνηγορούν τα εξής αποτελέσματα που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 4:

- Επαληθεύεται η διαισθητική προσέγγιση του γεγονότος ότι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ δυο ηχητικών κυματομορφών που λήφθηκαν σε δυο διαφορετικές αποστάσεις είναι αντιστρόφως ανάλογος με την απόστασή τους από τον αισθητήρα\μικρόφωνο. Κάτι που μοιάζει λογικά προφανές (όσο πιο μακριά το drone, τόσο λιγότερο θα ομοιάζει η κυματομορφή του ήχου του με κάποια που λήφθηκε από πλησιέστερο σημείο).
- Μέσω των φασματογραμμάτων και της μεθόδου HLA μπορεί να δημιουργηθεί ένα πρότυπο – αποτύπωμα της ακουστικής ταυτότητας του drone. Έτσι μέσω την ανίχνευσης επαρκούς αριθμού αρμονικών του που εντοπίζονται στο εύρος 20Hz – 2kHz, μπορεί να ταυτοποιηθεί η παρουσία του με παθητικό τρόπο.

Να σημειωθεί ότι ο εξοπλισμός για τη λήψη των ακουστικών σημάτων κατά τις πτήσεις του drone ήταν μάλλον κάτω του αναμενόμενου επιπέδου για αξιόπιστες μετρήσεις: το ενσωματωμένο μικρόφωνο του H/Y μας με την ταυτόχρονη λειτουργία του ανεμιστήρα και η επεξεργασία των αρχείων κυματομορφών με τη χρήση του Audacity, δεν παρέχουν τα εχέγγυα για τη λήψη «καθαρής» κυματομορφής ικανοποιητικής έντασης ούτε για την

επεξεργασία της χωρίς παραμόρφωση (στην περίπτωση post processing ψηφιακής ενίσχυσης του ηχητικού σήματος). Παρόλα αυτά και σύμφωνα με τους σκοπούς της εργασίας, δείχθηκε ότι με πολύ φθηνό τρόπο είναι δυνατή η παθητική ανίχνευση UAS.

5.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη διατάξεων

Παρακολουθώντας τη βιβλιογραφία αλλά και το χώρο της βιομηχανίας που προχωρά σε αντίστοιχες υλοποιήσεις, για την ενεργή ανίχνευση UAS αξίζει να διερευνηθεί η δυνατότητα ανίχνευσης χρησιμοποιώντας πιο χαμηλόσυχνη δέσμη και όχι στην K-band όπως αυτό που διαθέταμε. Ελκυστικές επιλογές μοιάζουν οι S (2GHz – 4GHz) και C (4GHz – 8GHz) bands για τρεις λόγους:

- έχουν δοκιμαστεί σε πειραματικές διατάξεις με ενθαρρυντικά αποτελέσματα
- υπάρχουν φθηνοί και διαδεδομένοι transceivers όπως συσκευές Wi-Fi (routers, κλπ.)
- η πλειονότητα των χειριστηρίων UAS για την επικοινωνία τους με το αεροσκάφος χρησιμοποιούν συχνότητες σ' αυτή την RF περιοχή (συνήθως Wi-Fi ή κάποια παραλλαγή του)

Αναφορικά με τον πομπό, θα πρέπει να αναζητηθεί το βέλτιστο tradeoff μεταξύ στατικότητας\κατευθυντικότητας Vs κινητικότητας\ομοιοκατευθυντικότητας. Με άλλα λόγια, χρήζει διερεύνησης το αν είναι πιο κατάλληλη μια ομοιοκατευθυντική αλλά στατική κεραία ή μια κεραία υψηλής κατευθυντικότητας η οποία θα κινείται «σαρώνοντας» κάποιο χώρο.

Χρήσιμα συμπεράσματα εκτιμάται ότι θα προκύψουν από: α) τον προσδιορισμό του RCS ενός drone σε ανηχοϊκό θάλαμο και β) τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η πόλωση της δέσμης του ραντάρ σε σχέση με το επίπεδο περιστροφής των πτερύγων του drone.

Σαν πρώτο βήμα για την παθητική ανίχνευση, θα πρέπει ν' αναζητηθούν υλοποιήσεις υψηλότερης πιστότητας ήτοι καλύτερα μικρόφωνα (ιδανικά: πυκνωτικά μικρόφωνα εξωτερικού χώρου) και πολυκάναλη κάρτα ήχου για καλύτερη επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο.

Η υλοποίηση συστοιχίας μικροφώνων από απλά μικρόφωνα σε γνωστή διάταξη και ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου για την εκτίμηση DOA και απόστασης, είναι ένας στόχος που επιδιώκεται ενεργά στη βιβλιογραφία.

Τέλος να σημειωθεί ότι οι πιο ολοκληρωμένες προσπάθειες για ανίχνευση UAS επιτυγχάνουν χάρη στη συνδυαστική χρήση των παραπάνω μεθόδων: RF ανίχνευση για προσεγγιστική εκτίμηση απόστασης ακολουθούμενη από beamforming συστοιχίας μικροφώνων για εκτίμηση DOA και τέλος κάμερα IR ή/και στο ορατό φάσμα για ταυτοποίηση και κατηγοριοποίηση του στόχου σύμφωνα με προ - αποθηκευμένα χαρακτηριστικά signatures για κάθε τύπο στόχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ουζούνουγλου Ν.Κ., «Συστήματα ραντάρ», Αθήνα 2006
- [2] Καψάλης Χ., Κωττής Π., «Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2008
- [3] Μάκκα Ιουλία, «Διπλωματική εργασία: Εφαρμογή των μεθόδων φυσικής οπτικής και φυσικής θεωρίας της περίθλασης σε προβλήματα ραδιοκάλυψης και υπολογισμού RCS», Ιούλιος 2011
- [4] Skolnick, M.I., “*Introduction to Radar Systems*”, McGraw-Hill, 1980.
- [5] Chen, J. C.; Yao, K. and Hudson, R. E., “*Source localization and beamforming*”, IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19, 30-39
- [6] Tien Pham and Nino Srour, “*TTCP AG-6: Acoustic Detection and Tracking of UAVs*”, Proc. SPIE 5417, September 1, 2004
- [7] Sadasivan, S.; Gurubasavaraj, M. and Ravi Sekar, S., “*Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localization and Parameter Estimation*”, DEF SCI J, Vol 51, No 3, July 2001
- [8] Reiff, C.; Pham, T.; Scanlon, M. and Noble, J.; Van Landuyt, A.; Petek, J. and Ratches, J., “*Acoustic detection from aerial balloon platform*”, AMSRD-ARL, ADA432916, December 2004
- [9] Shi, W.; Arabadjis, G.; Bishop, B.; Hill, P.; Plasse, R. and Yoder, J., “*Detecting, Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence, Sensor Fusion - Foundation and Applications*”, Dr. Ciza Thomas (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/17666, 2011
- [10] Vasquez, J.R.; Tarplee, K.M.; Case, E.E.; Zelnio, A.M.; Rigling, B.D., “*Multisensor 3D tracking for counter small unmanned air vehicles (CSUAV)*”, Proc. SPIE 6971, March 24, 2008
- [11] <http://www.e-volo.com/index.php/en/>
- [12] <http://www.uasvision.com/>
- [13] <http://www.caci.com/Skytracker/>
- [14] www.faa.gov/
- [15] www.mitre.com/

- [16] www.ypa.gr/
- [17] <https://www.droneshield.com/products>
- [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [19] <http://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.en.html>
- [20] <http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ>
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/In-phase_and_quadrature_components
- [22] <http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>
- [23] <http://www.microwavejournal.com/ext/resources/pdf-downloads/IQTheory-of-Operation.pdf?1336590796>
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Radar_cross-section
- [25] <http://www.radartutorial.eu/11.coherent/Radial%20Speed.en.html>
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Radar_signal_characteristics#The_radar_signal_in_the_time_domain