



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Συμβολή Στην Ανάπτυξη Συνδυαστικών Μεθόδων Ανίχνευσης**

**Μικρών Μη – Επανδρωμένων Ιπτάμενων Συστημάτων**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Αλέξανδρος Λ. Κυρίτσης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Συμβολή Στην Ανάπτυξη Συνδυαστικών Μεθόδων Ανίχνευσης**

**Μικρών Μη – Επανδρωμένων Ιπτάμενων Συστημάτων**

Αλέξανδρος Λ. Κυρίτσης

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Νικόλαος Ουζούνογλου

Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη

Ροδούλα Μακρή

**Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 1η Φεβρουαρίου 2023.**

.....  
Νικόλαος Ουζούνογλου  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Ροδούλα Μακρή  
Ερευνήτρια Α' ΕΠΙΣΕΥ

.....  
Ειρήνη Καρανάσιου  
Καθηγήτρια Σ.Σ.Ε.

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

.....  
Παύλος – Πέτρος Σωτηριάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

.....

Αλέξανδρος Λ. Κυρίτσης

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

Copyright © Αλέξανδρος Λ. Κυρίτσης

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Στην παρούσα διατριβή μελετάται η ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος ανίχνευσης μικρών μη – επανδρωμένων ιπτάμενων συστημάτων (ΣμηΕΑ - UAS) χρησιμοποιώντας συνδυασμό ενεργητικής και παθητικής μεθόδου. Η ευρεία διάδοση στη χρήση των UAS σε πολλούς τομείς δραστηριοτήτων, αναπόφευκτα δημιουργεί την ανάγκη για την υλοποίηση συστημάτων ικανών να ανιχνεύουν πτήσεις πάνω από περιοχές ενδιαφέροντος. Η πολύ χαμηλή ενεργός διατομή (RCS) τους, σε συνδυασμό με το χαμηλό ύψος και ταχύτητα πτήσης, καθιστούν τα UAS δύσκολα ανιχνεύσιμα από τα παραδοσιακά συστήματα ραντάρ. Η χρησιμοποίηση παθητικών μεθόδων λειτουργώντας συνεργατικά, εκμεταλλεύεται τα εκπεμπόμενα σήματα από το UAS καθιστώντας δυνατή και την ταυτοποίησή τους.

Η διατριβή ξεκινά με σύντομη παρουσίαση στοιχείων της νεοφυούς τεχνολογίας των UAS, ώστε να αναδειχθεί η πολυδιάστατη προσέγγιση που απαιτείται για την ανίχνευσή τους. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε βασικές αρχές της ΗΜ θεωρίας στην οποία βασίζεται η ενεργητική μέθοδος ανίχνευσης· αντίστοιχα, για την παθητική μέθοδο που αξιοποιεί τα εκπεμπόμενα ακουστικά (ηχητικά) κύματα, παρουσιάζονται οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές επεξεργασίας σήματος συστοιχιών μικροφώνων και μηχανικής μάθησης. Ακολουθεί η λεπτομερής ανάλυση των προτεινόμενων μεθόδων (α) ενεργητικής ανίχνευσης με χρήση ραντάρ Doppler συνεχούς κύματος, (β) του αλγόριθμου εντοπισμού γωνίας άφιξης του λαμβανόμενου ηχητικού σήματος και (γ) της τεχνικής μηχανικής μάθησης που υλοποιήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση UAS μέσω ακουστικού σήματος, διακρίνοντάς τα από άλλες πηγές.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική αναφορά στα διάφορα συστήματα ραντάρ που δοκιμάστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, με έμφαση στο προτεινόμενο σύστημα CW Doppler ραντάρ συχνότητας 24 GHz και στα διάφορα στάδια εξέλιξής του. Με κατάλληλο λογισμικό που δημιουργήθηκε για τον έλεγχο και τη συλλογή δεδομένων του ραντάρ, χρησιμοποιείται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) της συμφασικής (I) και ορθογώνιας (Q) συνιστώσας της εξόδου του σε πραγματικό χρόνο, για την αξιόπιστη ανίχνευση πτήσης UAS σε μεγάλη απόσταση. Τα δεδομένα των μετρήσεων από δοκιμές της διάταξης τόσο σε στατική λειτουργία,

όσο και σε λειτουργία περιμετρικής σάρωσης μιας περιοχής ενδιαφέροντος, επιβεβαίωσαν την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος κατά την ανίχνευση.

Όσον αφορά τον τομέα των παθητικών μεθόδων για την ανίχνευση και ταυτοποίηση UAS, εξετάστηκε η λειτουργία συστοιχίας μικροφώνων σε ευθύγραμμη διάταξη και σε διάταξη σταυρού. Λόγω της εγγενούς αδυναμίας της (μονοδιάστατης) ευθύγραμμης συστοιχίας για εκτίμηση γωνίας άφιξης του ακουστικού σήματος, δόθηκε βαρύτητα στη μελέτη της συστοιχίας 4 πυκνωτικών μικροφώνων σε διάταξη σταυρού. Με κατάλληλες αποστάσεις ανάμεσα στα στοιχεία που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης, προσδιορίστηκε -κατόπιν δοκιμών σε 3 διαφορετικούς τύπους περιβάλλοντος- η μέγιστη απόσταση στην οποία είναι εφικτή η εκτίμηση της γωνίας άφιξης του σήματος UAS. Για την ταυτοποίηση του ακουστικού σήματος, εξετάστηκε η χρήση (α) συσχέτισης αρμονικών γραμμών και (β) τεχνικών μηχανικής μάθησης. Έμφαση δόθηκε στο (β), με την ανάπτυξη και εκπαίδευση πολυεπίπεδου συνελκτικού νευρωνικού δικτύου, το οποίο αξιοποιώντας τα spectrograms των λαμβανόμενων ηχητικών σημάτων ως είσοδο, επιτυγχάνει ταυτοποίηση του σήματος διάφορων εναέριων μέσων σε πραγματικό χρόνο.

Το προτεινόμενο ενοποιημένο σύστημα που ενσωματώνει τις δυο παραπάνω μεθόδους, δοκιμάστηκε εκτενώς σε εξωτερικούς χώρους εκτελώντας μετρήσεις πεδίου κατά την πτήση πραγματικών αεροχημάτων, επαληθεύοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του στην ανίχνευση και ταυτοποίηση.

### Λέξεις κλειδιά

ενεργητικές μέθοδοι, παθητικές μέθοδοι, ανίχνευση UAS, ραντάρ συνεχούς κύματος Doppler, συστοιχία μικροφώνων, εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης, ταυτοποίηση ηχητικού σήματος, συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα, μηχανική μάθηση

# ABSTRACT

---

The present thesis studies the development and implementation of an original system aiming to detect small Unmanned Aerial Systems (UAS) using a combination of active and passive methods. The wide use of UAS applications in many fields of activities inevitably creates the need for systems able to detect flights over specific areas of interest. Low radar cross-section (RCS), flight altitude and speed, all render UASs difficult targets for traditional radar systems to detect. The cooperation of passive methods, that exploit signals emitted by the UAS, produces a synergy that leads to facilitating their identification.

The study begins by briefly presenting aspects of the emerging UAS technology, in order to outline the multi-layered approach necessary to address the task of UAS detection. Basic principles of EM theory involved in UAS detection using active methods are presented; respectively, for passive methods that exploit acoustic (sound) waves emitted by UASs, suitable techniques of microphone array signal processing and machine learning are reported. A detailed analysis follows, describing the proposed methods for (a) active detection using continuous wave Doppler radar, (b) estimating the direction of arrival (DOA) of incoming sound signal and (c) UAS sound identification using machine learning, discerning them from other sound sources.

Next, a report of radar systems that were tested for the purposes of the thesis is presented, with emphasis given to the proposed 24 GHz CW Doppler radar and its development stages. Using custom made software created for radar control and data acquisition, the FFT of the in-phase (I) and quadrature (Q) component of its output is exploited for real-time, reliable UAS detection over significant distances. Measurement data from live test runs performed using both static mode and 360° scanning mode, confirmed the system's detection effectiveness.

Regarding the use of passive methods for UAS detection and identification, two setups were examined: a linear microphone array and a cross-shaped array. Because of the inherent inability of the linear (one-dimensional) array for sound DOA angle estimation, the main focus shifted towards examining the cross-shaped array that consisted of 4 condenser microphones. Optimal distances between the array elements were determined through simulation and the maximum distance for DOA estimation was measured during live tests conducted at 3 different types of



locations. For the task of UAS sound identification, (a) harmonic line association and (b) machine learning techniques were explored; emphasis was given in (b), by designing and training a multi-layered convolutional neural network that utilizes spectrograms of the sound signal captured by the microphones to identify UAS flights in real-time.

The proposed system integrating the abovementioned active and passive methods, has been extensively tested outdoors, performing live measurements of real-life airborne vehicles, confirming the results for reliable detection and identification.

### Keywords

active methods, passive methods, UAS detection, continuous wave Doppler radar, microphone array, DOA estimation, sound signal identification, convolutional neural networks, machine learning

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εκφράζω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή της διδακτορικής διατριβής, κ. Νικόλαο Ουζούνογλου. Η καθοδήγησή του υπήρξε ελαστικά αυστηρή και πειστικά υπομονετική. Με εμπιστεύτηκε προτείνοντάς μου το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα της διατριβής και έμαθα πολλά από αυτόν, σε πολλά επίπεδα. Επίσης θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα μέλη της 3μελούς συμβουλευτικής επιτροπής, την Καθηγήτρια ΕΜΠ κα Δήμητρα Κακλαμάνη για τη στήριξη και τις συμβουλές της καθώς και την Ερευνήτρια βαθμού Α' του ΕΠΙΣΕΥ, κα Ροδούλα Μακρή, για την ανεκτίμητη βοήθεια που μου προσέφερε από τα αρχικά στάδια έως και την ολοκλήρωση εκπόνησης της διατριβής. Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της 5μελούς επιτροπής ενδιάμεσης κρίσης, τον Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο και την Καθηγήτρια ΣΣΕ κα Ειρήνη Καρανάσιου για τις κατευθύνσεις τους. Τα μέλη της 7μελούς εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Παύλο – Πέτρο Σωτηριάδη και τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Γεώργιο Ματσόπουλο, για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή της διδακτορικής διατριβής μου.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ το Δρ. Σπύρο Αθανασιάδη, το Δρ. Ευάγγελο Γρούμπα και τον κ. Μιχάλη Σοφρά· η συνεισφορά τους σε κάθε τομέα ήταν πολύτιμη. Ευχαριστώ πολύ τον κ. Θανάση Γιδά για την τεχνική βοήθεια σε όλες τις απαιτούμενες κατασκευές. Τον κ. Αναστάσιο Γκαρέτσο και το Δρ. Γεώργιο Στρατάκο για την παραχώρηση συσκευών και εξοπλισμού. Τον κ. Τάκη Κελέφα και την κα Χαρά Ψάρρη για όλες τις βοήθειές τους.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου· τη μητέρα μου, Ελένη και τα αδέρφια μου, Δημοσθένη και Λάμπρο. Χωρίς τη στήριξη της συζύγου μου Χριστίνας, η εκπόνηση της διατριβής θα ήταν αδύνατη. Και γι' αυτό, την ευχαριστώ. Στα παιδιά μου, Αλίκη και Αχιλλέα, υπόσχομαι ότι θα προσπαθήσω να αναπληρώσω μαζί τους το χρόνο που επένδυσα στην παρούσα εργασία.

Στη μνήμη του πατέρα μου, Λεωνίδα.

Αλέξανδρος Κυρίτσης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xiii
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Συστήματα Μη-Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAS).....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Κατηγορίες UAS.....	2
1.1.2. Χρήσεις και Εφαρμογές.....	3
1.1.3. Κανονιστικό Πλαίσιο.....	6
<b>1.2. Συστήματα Ανίχνευσης – Αντιμετώπισης UAS (c – UAS).....</b>	<b>9</b>
1.2.1. Παρούσα Κατάσταση.....	9
1.2.2. Προκλήσεις στην Ανίχνευση.....	13
<b>1.3. Σκοπός της Διατριβής.....</b>	<b>17</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. Βασικές Αρχές.....</b>	<b>19</b>
2.1.1. Ενεργητικές Μέθοδοι.....	19

2.1.2. Παθητικές Μέθοδοι.....	32
<b>2.2. Μέθοδοι Που Αναπτύσσονται Από Ερευνητικές Ομάδες Και Τη Βιομηχανία .....</b>	<b>37</b>
2.2.1. Ενεργητικές Μέθοδοι – Προσδιορισμός RCS .....	38
2.2.2. Παθητικές Μέθοδοι.....	41
2.2.3. Συνδυαστικές – Καινοτόμες Μέθοδοι .....	48
<b>2.3. Γενική Περιγραφή Διάταξης – Λειτουργίας Πρωτότυπου Συστήματος Ανίχνευσης με Συνδυασμό Ενεργού Ραντάρ και Ακουστικών Διαισθητήρων.....</b>	<b>54</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1. Ανίχνευση Πτήσης UAS με Ραντάρ CW Doppler.....</b>	<b>57</b>
<b>3.2. Αλγόριθμος Προσδιορισμού Γωνίας Αφίξης Ακουστικού Σήματος .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3. Ταυτοποίηση Ηχητικού Σήματος με τη Χρήση Τεχνικών Machine Learning .....</b>	<b>66</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1. Συστήματα που Μελετήθηκαν.....</b>	<b>72</b>
4.1.1. RADAR 875 MHz.....	72
4.1.2. RADAR 2.45 GHz.....	74
4.1.3. RADAR 24 GHz.....	75
4.1.4. Ευθύγραμμη Συστοιχία Μικροφώνων.....	77
4.1.5. Συστοιχία Μικροφώνων σε Διάταξη Σταυρού.....	80
<b>4.2. Προτεινόμενο Ενοποιημένο Σύστημα.....</b>	<b>83</b>
4.2.1. Αρχικά Στάδια .....	84
4.2.2. Τελικό Στάδιο .....	85

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>106</b>
<b>5.1. Ενεργητική μέθοδος.....</b>	<b>106</b>
<b>5.2. Παθητική μέθοδος .....</b>	<b>107</b>
<b>5.3. Τελικό συμπέρασμα .....</b>	<b>108</b>
<b>5.4. Μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>109</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>111</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>124</b>

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

---

Εικόνα 1.1: Tri – copter .....	3
Εικόνα 1.2: Quad – copter .....	3
Εικόνα 1.3: Six – copter.....	4
Εικόνα 1.4: Eight – copter .....	4
Εικόνα 1.5: Συνδυασμός πολλών UAS στην ίδια εφαρμογή.....	4
Εικόνα 1.6: UAS για αγροτικό ψεκασμό ακριβείας .....	6
Εικόνα 1.7: Σχέδιο UAS για αποστολή δεμάτων στο σπίτι από την Amazon.....	6
Εικόνα 1.8: Οι λειτουργίες του UAS-FRSS σχηματικά .....	7
Εικόνα 1.9: Δενδρικό διάγραμμα απόφασης δήλωσης UAS στο UAS-FRSS .....	8
Εικόνα 1.10: Ενδεικτικό στιγμιότυπο του χάρτη DAGR .....	8
Εικόνα 2.1: Εκπομπή κύματος από ραντάρ .....	19
Εικόνα 2.2: Επιστροφή ανακλώμενου κύματος από στόχο .....	19
Εικόνα 2.3:Πηγές αλλοίωσης ακουστικών σημάτων.....	34
Εικόνα 2.4: Σχηματική περιγραφή ενοποιημένου συστήματος.....	54
Εικόνα 2.5 Το UAS που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις της παρούσας διατριβής.....	55
Εικόνα 3.1 Προσομοίωση για την εύρεση της βέλτιστης απόστασης στοιχείων συστοιχίας μικροφώνων προς μεγιστοποίηση του SNIR .....	65

Εικόνα 3.2: Δείγμα ακουστικής κυματομορφής (πάνω) και αντίστοιχου spectrogram (κάτω)....	68
Εικόνα 3.3: Ενδεικτικό γράφημα διαδικασίας εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου .....	68
Εικόνα 3.4: Το μοντέλο CNN που χρησιμοποιήθηκε στο προτεινόμενο σύστημα.....	70
Εικόνα 4.1: Ραντάρ 875 MHz.....	72
Εικόνα 4.2: Διάταξη ενισχυτή σήματος εκπομπής .....	72
Εικόνα 4.3: Κεραία εκπομπής corner reflector.....	73
Εικόνα 4.4: Κεραία λήψης corner reflector .....	73
Εικόνα 4.5: Πλήρης διάταξη ραντάρ 875 MHz.....	73
Εικόνα 4.6: Ραντάρ 2.45 GHz.....	74
Εικόνα 4.7: Αρχική μορφή ραντάρ 24 GHz .....	76
Εικόνα 4.8: Διαστάσεις χοανοκεραιών.....	77
Εικόνα 4.9: (α) Σχηματικό διάγραμμα και (β) υλοποίηση ευθύγραμμης συστοιχίας μικροφώνων .....	78
Εικόνα 4.10: Interface της 1 <sup>ης</sup> εφαρμογής για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης ακουστικού σήματος.....	80
Εικόνα 4.11: (α) Σχηματικό διάγραμμα και (β) υλοποίηση συστοιχίας μικροφώνων σε διάταξη σταυρού.....	80
Εικόνα 4.12: Αρχικό περιβάλλον εφαρμογής για την εκτίμηση τεταρτημορίου και γωνίας άφιξης (DOA).....	82
Εικόνα 4.13: Φασματογραφήματα ηχητικών σημάτων από πτήσεις διάφορων μέσων .....	83

Εικόνα 4.14: 1 <sup>η</sup> φάση ενοποίησης του συστήματος .....	84
Εικόνα 4.15: 2 <sup>η</sup> φάση ενοποίησης του συστήματος .....	84
Εικόνα 4.16: Τελική μορφή του ραντάρ 24 GHz .....	86
Εικόνα 4.17: Μηχανισμός Περιστροφής Ανακλαστήρα.....	88
Εικόνα 4.18: (α) Interface εφαρμογής για ανίχνευση 360° και (β) αποτελέσματα σάρωσης.....	89
Εικόνα 4.19: (α) Interface εφαρμογής για την ανίχνευση σε τομείς και (β) αποτελέσματα σάρωσης.....	89
Εικόνα 4.20: Ανάπτυξη του συστήματος ανίχνευσης-ταυτοποίησης σε ανοιχτό χώρο .....	90
Εικόνα 4.21: UAS που χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές, (α) εξακόπτερο και (β) μικρό ελικόπτερο .....	91
Εικόνα 4.22: Φάσμα ισχύος του λαμβανόμενου σήματος στο χρόνο.....	94
Εικόνα 4.23: Λαμβανόμενες κορυφές FFT από την πτήση του UAS πάνω από το ραντάρ .....	95
Εικόνα 4.24: Οι τρεις διαφορετικοί τύποι περιβάλλοντος που επιλέχθηκαν για τις δοκιμές του αλγόριθμου DOA: (α) αγροτικό, (β) ημιαστικό και (γ) αστικό .....	98
Εικόνα 4.25: Τελικό interface της εφαρμογής για την εκτίμηση DOA .....	99
Εικόνα 4.26: Interface εφαρμογών για (α) τη συλλογή ακουστικών δειγμάτων για την εκπαίδευση του CNN και (β) την ταυτοποίηση «στόχων».....	102
Εικόνα 4.27: Παραδείγματα κυματομορφών/spectrogram κυλιόμενου παραθύρου για (α) τυχαίο σήμα, (β) πτήση CH-47, (γ) UH-1H και (δ) τυχαίου ήχου σήματος .....	104
Εικόνα 4.28: Διαγράμματα σύγχυσης για την επίδοση του συστήματος κατά την (α) μη-δυναδική και (β) δυναδική ταξινόμηση.....	105



# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση UAS.....	3
Πίνακας 1.2: Μέθοδοι ανίχνευσης, παρακολούθησης και ταυτοποίησης .....	12
Πίνακας 1.3: Μέθοδοι απαγόρευσης – αδρανοποίησης UAS .....	13
Πίνακας 1.4: Πλατφόρμες - φορείς συστημάτων c – UAS.....	13
Πίνακας 2.1: Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων - στόχων .....	25
Πίνακας 2.2 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά DJI Phantom 3 Advanced.....	56
Πίνακας 3.1: Στοιχεία αποτελεσμάτων προσομοίωσης SNIR συστοιχίας μικροφώνων.....	65
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα επιδόσεων εκπαίδευσης CNN. ....	70
Πίνακας 4.1: Κυριότερα χαρακτηριστικά εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την παθητική ανίχνευση UAS .....	81
Πίνακας 4.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών χρονοκεραίων .....	87
Πίνακας 4.3: Ενδεικτικές τιμές πλάτους των επιστροφών Doppler (κορυφές) από το UAS κατά την αιώρηση.....	92
Πίνακας 4.4: Σύνοψη των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις εκτίμησης DOA σε διάφορα περιβάλλοντα .....	101
Πίνακας 4.5: Σύνοψη του πλήθους πτήσεων που παρατηρήθηκαν .....	102
Πίνακας 4.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων επίδοσης των δυο μεθόδων .....	105

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 1.1: Κατανομή αγοράς drone για το έτος 2018 .....	5
Σχήμα 1.2: Πρόβλεψη εξέλιξης αγοράς drone για τη Β. Αμερική .....	5
Σχήμα 1.3: Εξέλιξη διαθέσιμων συστημάτων c - UAS κατά τα έτη 2018-2019 .....	11
Σχήμα 2.1: Κατευθυντικότητα κεραίας ραντάρ – ανακλώμενη ισχύς.....	20
Σχήμα 2.2: Εκτίμηση κατεύθυνσης στόχου .....	21
Σχήμα 2.3: Πύκνωση μετώπων κύματος .....	26
Σχήμα 2.4: Μεγέθη που υπεισέρχονται στην ολίσθηση Doppler .....	27
Σχήμα 2.5: Αναπαράσταση συμφασικής – ορθογώνιας συνιστώσας.....	30
Σχήμα 2.6: Block διάγραμμα υλοποίησης διαμορφωτή I/Q.....	30
Σχήμα 2.7: Block διάγραμμα υλοποίησης αποδιαμορφωτή I/Q.....	31
Σχήμα 2.8: I/Q. διαμόρφωση – αποδιαμόρφωση στο πεδίο της συχνότητας .....	32
Σχήμα 2.9: Εφαρμογή HLA για εξαγωγή ακουστικών χαρακτηριστικών.....	35
Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα του ραντάρ 24 GHz.....	57
Σχήμα 3.2: Σχηματικό I/Q downconverter.....	58
Σχήμα 3.3: Διαδικασία απόρριψης ειδώλου του downconverter.....	59
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα λειτουργιών του συστήματος ραντάρ 24 GHz (λειτουργία περιμετρικής σάρωσης) .....	59

Σχήμα 3.5: Σχηματικά διαγράμματα μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν: (α) Διάταξη αναφοράς της συστοιχίας και (β) πολικό διάγραμμα απόκρισης του πυκνωτικού μικροφώνου για συχνότητες 1 – 2 kHz.....	60
Σχήμα 3.6: Περιπτώσεις κατεύθυνσης άφιξης σήματος (α) 1ο , (β) 2ο, (γ) 3ο, (δ) 4ο τεταρτημόριο.....	61
Σχήμα 3.7: Περιπτώσεις κατεύθυνσης άφιξης σήματος (α) 1ο , (β) 2ο, (γ) 3ο, (δ) 4ο τεταρτημόριο.....	63
Σχήμα 3.8: Καμπύλες SNIR με δεδομένο (α) πλήθος και (β) απόσταση στοιχείων. ....	66
Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό γράφημα κυματομορφής από τις επιστροφές του ραντάρ 875 MHz.....	74
Σχήμα 4.2: Ενδεικτικά γραφήματα κυματομορφών από τις επιστροφές του ραντάρ 2.45 GHz ..	75
Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικά Standard Gain Horn Antenna .....	86
Σχήμα 4.4: Beamwidth κεραιών ραντάρ.....	87
Σχήμα 4.5: Περιοχή (θεωρητική) αποκάλυψης ραντάρ.....	87
Σχήμα 4.6: Κορυφές FFT στο φάσμα των επιστροφών Doppler, χωρίς παρουσία UAS (στάθμη θορύβου) .....	91
Σχήμα 4.7: Ίχνη διαδρομής πτήσης του UAS (με το ραντάρ σε στατική λειτουργία) σε (α) ευθείες γραμμές και (β) διαδρομή σε μορφή «X» .....	93
Σχήμα 4.8: Ίχνος πτήσης του UAS κατά τις δοκιμές λειτουργίας σάρωσης 360° .....	96
Σχήμα 4.9: Πολικά διαγράμματα των κορυφών FFT που λαμβάνονται από το ραντάρ: (α) κατά τη βαθμονόμηση – λήψη προφίλ θορύβου, (β), (γ),(δ) με το UAS – στόχο αιωρούμενο στα 150 m σε διάφορους προσανατολισμούς.....	97
Σχήμα 4.10: Μέγιστη απόσταση ανίχνευσης για κάθε τύπο περιβάλλοντος.....	100

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1. Συστήματα Μη-Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAS)

Επισήμως [1], **ΣμηΕΑ** 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 κ.λπ.) ο οποίος είναι απαραίτητος για την λειτουργία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους. 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 τα Τηλεχειριζόμενα Αεροσκάφη (Remotely-Piloted Aircraft – RPA), τα Τηλεχειριζόμενα Συστήματα Αεροσκαφών (Remotely-Piloted Aircraft Systems – RPAS), καθώς και τα αυτόνομα αεροσκάφη (autonomous aircraft).

Ο παραπάνω ορισμός περιέχεται στον «Κανονισμό - γενικό πλαίσιο πτήσεων Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών – ΣμηΕΑ» (στο εξής: «Κανονισμός») που προτάθηκε και τέθηκε σε διαβούλευση από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ), αρμόδιο φορέα για την αδειοδότηση των ΣμηΕΑ.

Σύμφωνα με τον ίδιο φορέα [2] τα ΣμηΕΑ (*Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών*) είναι ιπτάμενες μηχανές χωρίς πλήρωμα - τα ευρέως γνωστά ως “drone”. Το μέγεθός τους ξεκινάει από πολύ μικρό (σε μέγεθος παιχνιδιού) και φτάνει μέχρι μεγέθους κανονικού αεροπλάνου. Αντί πιλότου έχουν έναν “χειριστή” που είτε τα κατευθύνει ο ίδιος από το έδαφος (“τηλεκατευθυνόμενα”) ή προγραμματίζει την πορεία τους πριν από την πτήση, ώστε να κινούνται αυτόματα ακολουθώντας προδιαγεγραμμένη πορεία στον αέρα (“αυτοκατευθυνόμενα” - πλοηγούνται δηλαδή από πρόγραμμα “ηλεκτρονικών εντολών” το οποίο φορτώνεται στη μνήμη από πριν και εκτελείται την ώρα της πτήσης). Υπάρχουν επίσης ΣμηΕΑ που πλοηγούνται και με τις 2 μεθόδους.

### 1.1.1. Κατηγορίες UAS

Λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

1. τη μέγιστη μάζα απογείωσης (Maximum Take Off Mass – MTOM)
2. το είδος χρήσης
3. το ύψος άνωθεν της γης ή της θάλασσας όπου επιτρέπεται να ίπτανται
4. τις περιοχές (αποκλειστικές ή μη) όπου ίπτανται
5. τις τεχνικές δυνατότητές του
6. 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).

Η «ανοικτή» κατηγορία, υποδιαιρείται επιπλέον σε:

1. **A0:** «Μίνι Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών» με MTOM μικρότερη του ενός κιλού (<1Kg).
2. **A1:** «Πολύ Μικρά Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών» με MTOM ίση ή μεγαλύτερη από ένα κιλό ( $\geq 1$  Kg) έως τα τέσσερα κιλά (<4 Kg).
3. **A2:** «Μικρά Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών» με MTOM ίση ή μεγαλύτερη από τα τέσσερα κιλά ( $\geq 4$  Kg) και έως τα είκοσι πέντε κιλά (<25 Kg).

Η κατηγοριοποίηση των UAS που χρησιμοποιείται διεθνώς, ακολουθεί τα πρότυπα του NATO<sup>1</sup>. Το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας συγκεντρώνεται αποκλειστικά στην κατηγορία micro της Class I (<150 kg) της κατηγοριοποίησης που φαίνεται στον Πίνακα 1.1 .

---

<sup>1</sup> ATP-3.3.7 – NATO STANAG 4670 (Edition 3) Guidance for the Training of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Operators. NATO Standardization Agency, 2014

Κατηγοριοποίηση UAS				
Κλάση	Κατηγορία	Ύψος λειτουργίας	Ακτίνα λειτουργίας	Ωφέλιμο φορτίο
Class I (<150 kg)	Micro (<2 kg)	Έως 90 m	5 km	0.2 – 0.5 kg
Class I (<150 kg)	Mini (2-20 kg)	Έως 900 m	25 km	0.5 – 10 kg
Class I (<150 kg)	Small (<150 kg)	Έως 1500 m	50 – 100 km	5 – 50 kg
Class II (150 - 600kg)	Tactical	Έως 3000 m	200 km	25 – 200 kg

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση UAS

### 1.1.2. Χρήσεις και Εφαρμογές

Ακόμη και αν περιοριστούμε στην «ανοιχτή» κατηγορία UAS, η ποικιλία στις εφαρμογές τους είναι τεράστια και η καταγραφή της έξω από τους σκοπούς της εργασίας. Στην ενότητα αυτή, θα αναφερόμαστε στα ΣμηΕΑ αυτής της κατηγορίας συλλήβδην ως «**drones**»: όρος που άλλωστε χρησιμοποιείται ευρέως ανεπίσημα, 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: Tri – copter



Εικόνα 1.2: Quad – copter

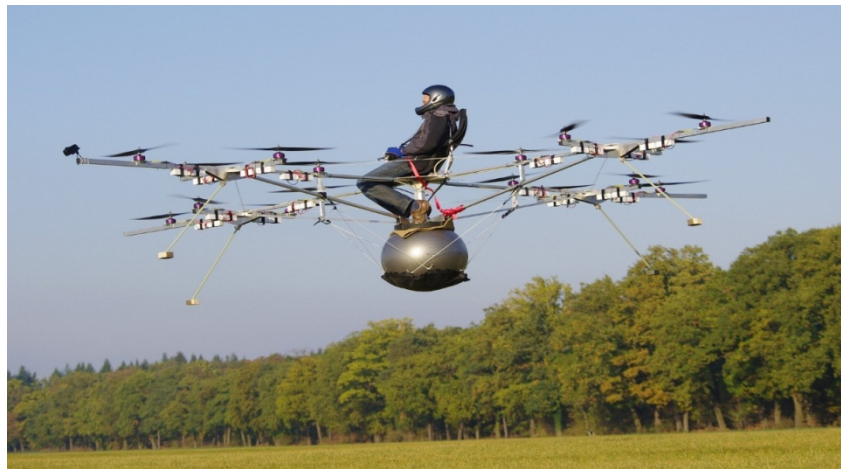


*Εικόνα 1.3: Six – copter*



*Εικόνα 1.4: 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 UAS στην ίδια εφαρμογή*

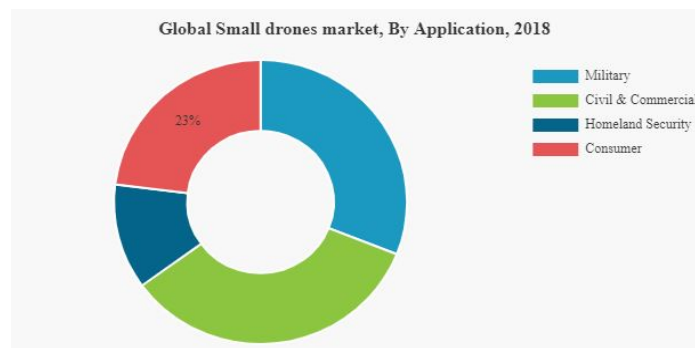
Στο Σχήμα 1.1, φαίνεται η κατανομή της αγοράς των drone για το έτος 2018<sup>2</sup>. Κύρια πεδία εφαρμογής είναι:

- Εφαρμογές ψυχαγωγίας – consumer (αερομοντελισμός, ερασιτεχνική φωτογραφία).

---

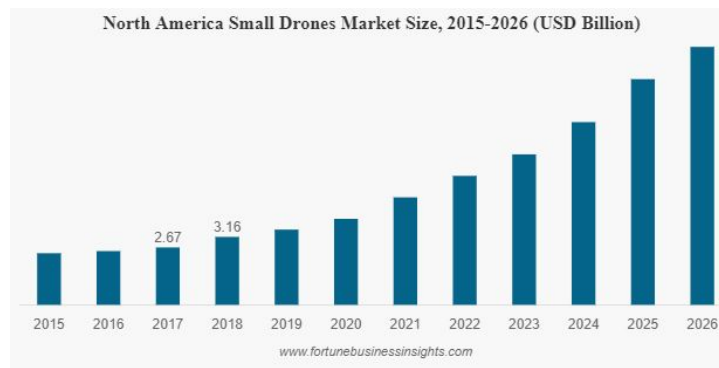
<sup>2</sup> Πηγή: <https://www.fortunebusinessinsights.com/small-drones-market-102227>

- Επαγγελματικές εφαρμογές – civil & commercial (φωτογράφιση\βιντεοσκόπηση γεγονότων, γεωδαισία, επιθεώρηση κτιρίων/αγωγών/ανεμογεννητριών, γεωργία).
- Εφαρμογές επιτήρησης και ασφάλειας – homeland security (συνόρων, χώρων ενδιαφέροντος, αντίδραση σε περιπτώσεις καταστροφών, εντοπισμός σε αποστολές SAR ανακούφιση θυμάτων καταστροφών).
- Εφαρμογές άμυνας – military (στρατιωτικές εφαρμογές).



Σχήμα 1.1: Κατανομή αγοράς drone για το έτος 2018

Σε παγκόσμιο επίπεδο η αξία της αγοράς drone για το 2018 αποτιμήθηκε σε 6.46\$ δις και η πρόβλεψη ανέρχεται σε 22.55\$ δις για το 2026. Στο Σχήμα 1.2, φαίνεται η πρόβλεψη για σχεδόν τετραπλασιασμό της αγοράς drone στη Β. Αμερική.



Σχήμα 1.2: Πρόβλεψη εξέλιξης αγοράς drone για τη Β. Αμερική

Επιπλέον αξιοσημείωτες εφαρμογές είναι:



- εκτός της κατηγορίας open λόγω MTOM>25Kg, η πραγματοποίηση ψεκασμών ακριβείας (precision spraying)<sup>3</sup> σε δύσβατες καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Εικόνα 1.6).
- για μικρότερα βάρη και “last mile” παράδοση προϊόντων, έχει αναπτυχθεί το project της Amazon για κατ’ οίκο παράδοση προϊόντων με τη χρήση drone (Εικόνα 1.7)<sup>4</sup>



Εικόνα 1.6: UAS για αγροτικό ψεκασμό ακριβείας



Εικόνα 1.7: Σχέδιο UAS για αποστολή δεμάτων στο σπίτι από την Amazon

### 1.1.3. Κανονιστικό Πλαίσιο

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί αναφορά στο κανονιστικό πλαίσιο των πτήσεων UAS στην Ελλάδα για δύο λόγους:

- Η περιγραφή της προβλεπόμενης διαδικασίας για την εξασφάλιση μιας αδειοδοτημένης πτήσης UAS, αναδεικνύει τις συνθήκες υπό τις οποίες οι μη-αδειοδοτημένες πτήσεις μπορεί να γίνουν παράνομες ή/και επικίνδυνες.

- Κατά τις πτήσεις UAS που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, οι προβλέψεις του Κανονισμού έγιναν απολύτως σεβαστές και τηρήθηκαν απαρέγκλιτα.

Ειδική άδεια χειριστή UAS απαιτείται οπωσδήποτε για την «ειδική» και την «πιστοποιημένη» κατηγορία, καθώς και για την υποκατηγορία A2 της «ανοικτής» κατηγορίας· για τις υποκατηγορίες A0 και A1 της «ανοικτής» κατηγορίας, απαιτείται ειδική άδεια χειριστή μόνο για επαγγελματική χρήση [1].

---

<sup>3</sup> Πηγή: Associated Press

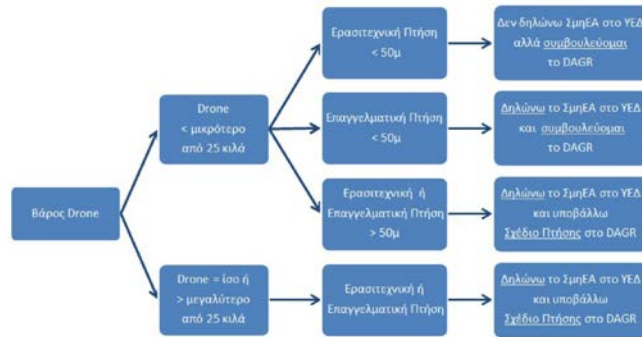
<sup>4</sup> Πηγή: forbes.com

Ως διεπαφή των χειριστών με τις απαιτούμενες διαδικασίες για τη σύννομη πτήση UAS, η ΥΠΑ έχει δημιουργήσει το σύστημα **UAS-FRSS** (Unmanned Aircraft Systems – Flight Regulation Support System). Το UAS-FRSS είναι ένα διαδικτυακό σύστημα το οποίο βοηθάει τους πολίτες (ερασιτέχνες ή επαγγελματίες) κατόχους UAS, την ΥΠΑ και τις άλλες δημόσιες Αρχές, να συνεργάζονται καλύτερα μεταξύ τους, εφαρμόζοντας από κοινού τον Κανονισμό των ΣμηΕΑ, συμβάλλοντας έτσι, τόσο στην ασφάλεια των πτήσεων αεροπλάνων και ελικοπτέρων (αεροδρόμια και ελικοδρόμια), όσο και στην προστασία όλων από ατυχήματα, ζημιές ή από απλές παραβιάσεις αποκλεισμένων περιοχών που προστατεύονται από πτήσεις UAS για διάφορους λόγους όπως π.χ. δράσεις εθνικής άμυνας και ασφάλειας, πυρόσβεσης, προστασίας υποδομών, προστασίας αρχαιοτήτων, προστασίας περιβάλλοντος, κλπ. Το UAS-FRSS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα και αποτελείται από 2 κύρια μέρη, το **DAGR** (Drone Aware - GR) και το **ΥΕΔ** (Υποσύστημα Εγγραφής και Διεκπεραίωσης). Σχηματικά, οι λειτουργίες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 1.8 [2].



Εικόνα 1.8: Οι λειτουργίες του UAS-FRSS σχηματικά

Έτσι, οποιοσδήποτε επιθυμεί να πραγματοποιήσει πτήση UAS στον ελληνικό εναέριο χώρο, θα πρέπει να χρησιμοποιήσει οπωσδήποτε το DAGR, αλλά πιθανόν και τα δύο μέρη του συστήματος (ΥΕΔ και DAGR). Εξαρτάται από το είδος της πτήσης και η απόφαση από το χειριστή ακολουθεί τη ροή του διαγράμματος της Εικόνας 1.9 [2].

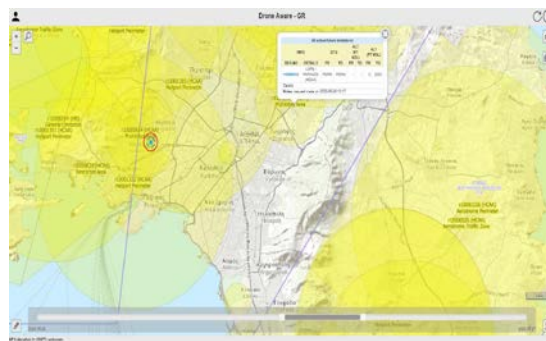


Εικόνα 1.9: Δενδρικό διάγραμμα απόφασης δήλωσης UAS στο UAS-FRSS

Εφόσον λοιπόν κάποιος διαθέτει UAS πρέπει, βάσει του Κανονισμού, να πληροφορηθεί αν η πτήση στην περιοχή ενδιαφέροντός του είναι επιτρεπόμενη ή απαγορευμένη. Επομένως, αρχικά συμβουλευέται το DAGR, όπου μπορεί να δει τις απαγορευμένες περιοχές στο χάρτη του DAGR χωρίς να έχει κάνει σύνδεση σε αυτό και χωρίς να έχει εγγραφεί στο Μητρώο της ΥΠΑ μέσω του ΥΕΔ.

Αν απαιτείται η υποβολή σχεδίου πτήσης, τότε πρέπει πρώτα να εγγραφεί στο Μητρώο ΣμηΕΑ της ΥΠΑ (χρησιμοποιώντας το ΥΕΔ) και στη συνέχεια να υποβάλει πληροφορίες της πτήσης στο DAGR.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, για πτήσεις UAS της «ανοικτής» κατηγορίας (υποκατηγορία A0), όχι για επαγγελματικούς λόγους και σε αποστάσεις που δεν ξεπερνούν τα 50m προς οποιαδήποτε κατεύθυνση από το σημείο χειρισμού, χρειάζεται μόνο επίσκεψη (συμβουλευτικά) στο DAGR και δε χρειάζεται η υποβολή σχεδίου πτήσης. Στην Εικόνα 1.10 φαίνεται το περιβάλλον της εφαρμογής DAGR [3]:



Εικόνα 1.10: Ενδεικτικό στιγμιότυπο του χάρτη DAGR

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο το κανονιστικό πλαίσιο έχει καταρτιστεί από την EASA (European Union Aviation Safety Agency) το Μάρτιο του 2020 [4]. Η δημοσίευση περιλαμβάνει τους κανόνες και τις διαδικασίες για τη λειτουργία των UAS. Παρουσιάζονται σε ενοποιημένη μορφή με προηγμένες λειτουργίες πλοήγησης μέσω συνδέσμων και σελιδοδεικτών [5]. Καλύπτει τον Εκτελεστικό Κανονισμό (ΕΕ) 2019/947 (Commission Implementing Regulation EU) της Επιτροπής, τους συναφείς αποδεκτούς τρόπους συμμόρφωσης (Acceptable Means Of Compliance (AMC) και το υλικό καθοδήγησης (Guidance Material – GM), καθώς και τον κατ' εξουσιοδότηση κανονισμό 2019/945 της Επιτροπής (Commission Delegated Regulation – EU) σχετικά με τα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών καθώς και για τους χρήστες UAS τρίτων χωρών.

Στις ΗΠΑ, κάθε πολιτεία ακολουθεί δική της νομοθεσία σχετικά με τη χρήση UAS. Σε ομοσπονδιακό επίπεδο, η FAA αναφέρει ότι [6] «η πτήση UAS στις ΗΠΑ είναι νόμιμη, αλλά συστήνεται η γνώση των κανονισμών και συμμόρφωση προς αυτούς». Για την απλοποίηση των διαδικασιών, (και σε αντιστοιχία με το σύστημα UAS-FRSS της ελληνικής ΥΠΑ και τα υποσυστήματα της DAGR και ΥΕΔ) έχουν δημιουργηθεί οι εφαρμογές “B4UFLY” [7] και “FAADroneZone” [8].

## **1.2. Συστήματα Ανίχνευσης – Αντιμετώπισης UAS (c – UAS)**

### **1.2.1. Παρούσα Κατάσταση**

Τα συστήματα ανίχνευσης – αντιμετώπισης UAS (c – UAS, counter – UAS), αναπτύσσονται ταχύτατα ως απάντηση στις πολυεπίπεδες προκλήσεις που επέφερε η ραγδαία διάδοσή τους. Οι εν λόγω προκλήσεις, αφορούν στην ασφάλεια τόσο σε πολιτικό (civilian) όσο και στρατιωτικό (military) επίπεδο. Ενδεικτικά αναφέρονται τα παρακάτω περιστατικά ασφάλειας, που απασχόλησαν τις πολιτικές Αρχές στο πρόσφατο παρελθόν:

- Το Σεπτέμβριο του 2013, τετρακόπτερο μικρό UAS πέταξε και συνετρίβη μπροστά στην Angela Merkel κατά τη διάρκεια ομιλίας της.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> <https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2013/09/18/watch-the-pirate-party-fly-a-drone-in-front-of-germanys-chancellor/>

- Τον Ιανουάριο του 2015, τετρακόπτερο συνετρίβη στο Λευκό Οίκο των ΗΠΑ.<sup>6</sup>
- Τον Αύγουστο του 2018, 2 UAS με φορτίο 1 kg εκρηκτικό C – 4 εξεράγησαν πάνω από συγκέντρωση του προέδρου Nicolas Maduro στο Καράκας.<sup>7</sup>
- Το Δεκέμβριο του 2018, οι αρχές του αεροδρομίου Gatwick του Λονδίνου αναγκάστηκαν να διακόψουν για 36 ώρες την εναέρια κυκλοφορία εξαιτίας παρουσίας UAS, γεγονός που κόστισε περίπου 64\$ εκατομμύρια.<sup>8</sup>

Πέραν των ανωτέρω, διαρκείς απειλές αποτελούν:

- Η λαθραία μεταφορά αντικειμένων (π.χ. σε χώρους φυλακών),
- Η ενδεχόμενη σύγκρουση με αεροσκάφος που μπορεί να οδηγήσει στην κατάρριψή του,
- Παραβιάσεις προσωπικών δεδομένων μέσω της παράνομης κρυφής βιντεοσκόπησης ή φωτογράφισης της ιδιωτικής ζωής ατόμων, διεξαγωγή προπαγάνδας, κ.ά.

Στο [9] δίνεται περιγραφή και ανάλυση των παραπάνω απειλών, καθώς και παρουσίαση των βημάτων για την αντιμετώπισή τους.

Λεπτομερής καταγραφή και ανάλυση των εξελίξεων στον τομέα των c – UAS, πραγματοποιείται από το “The Center for the Study of the Drone” του Bard College<sup>9</sup>. Έως σήμερα, τα αποτελέσματα των μελετών που έχουν δημοσιευτεί με τα [10] και [11] αποτελούν σημαντική πηγή πληροφόρησης για το σύνολο των θεμάτων που αφορούν στον κλάδο. Επιπλέον, κατάλογος με συνεχώς επικαιροποιημένο περιεχόμενο σχετικά με τα συστήματα UAS είναι

---

<sup>6</sup> <https://www.nytimes.com/2015/01/27/us/white-house-drone.html>

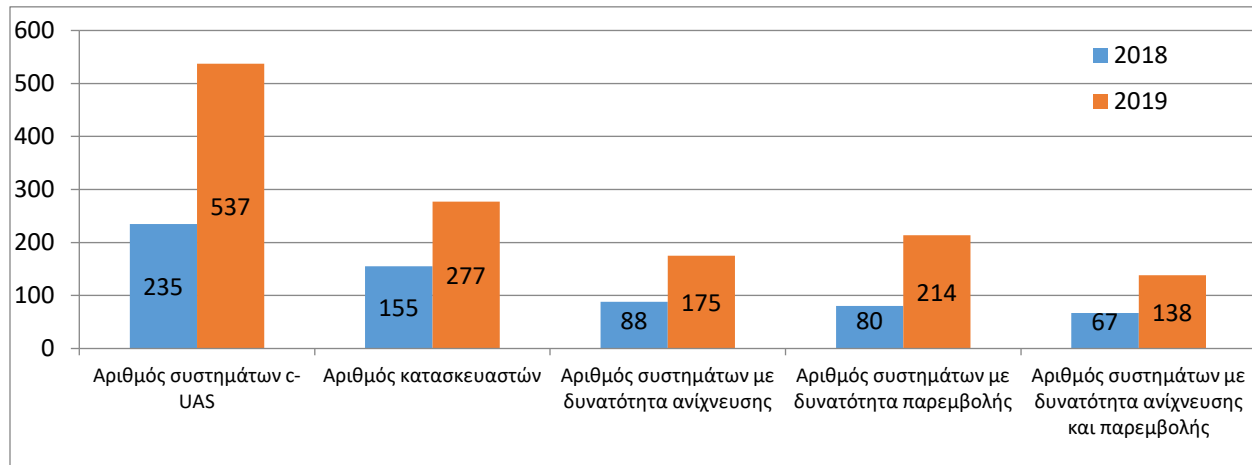
<sup>7</sup> <https://www.businessinsider.com/drone-attack-on-venezuela-nicolas-maduro-may-be-first-against-leader-2018-8>

<sup>8</sup> <https://fortune.com/2019/01/22/gatwick-drone-closure-%20cost/>

<sup>9</sup> [dronecenter.bard.edu](http://dronecenter.bard.edu)

διαθέσιμος στο διαδίκτυο σε ελεύθερη μορφή<sup>10</sup>, όπως επίσης και ξεχωριστός κατάλογος για τη χρήση τους σε στρατιωτικές εφαρμογές<sup>11</sup>.

Ενδεικτικά, το 2018 συνολικά 33 χώρες συμμετείχαν στην ανάπτυξη και παραγωγή συστημάτων c – UAS, με τον αριθμό τους να αυξάνεται σε 38 το 2019. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3., δείχνουν ότι κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, τα διαθέσιμα συστήματα σχεδόν διπλασιάστηκαν.



Σχήμα 1.3: Εξέλιξη διαθέσιμων συστημάτων c - UAS κατά τα έτη 2018-2019<sup>12</sup>

Τα συστήματα ανίχνευσης, παρακολούθησης και ταυτοποίησης που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούν μεθόδους που φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 1.2.

<sup>10</sup> <https://www.unmannedairspace.info/wp-content/uploads/2020/10/Counter-UAS-directory.-August-2020.v4.pdf>

<sup>11</sup> <https://dronecenter.bard.edu/projects/drone-proliferation/drone-databook-update-march-2020/>

<sup>12</sup> Πηγή δεδομένων: [9], [10].

**Ανίχνευση, παρακολούθηση και ταυτοποίηση UAS (Detection, Tracking and Identification)**

Ραντάρ	Χρησιμοποίηση ιδίων παλμών του ραντάρ
RF – Ραδιοσυχνότητες	Ανίχνευση της ζεύξης χειριστή – UAS
EO – Ηλεκτρο-οπτικές	Ανίχνευση του οπτικού αποτυπώματος (κάμερα)
IR – Υπέρυθρες	Ανίχνευση του θερμικού αποτυπώματος
Ακουστικές συχνότητες	Ανίχνευση του χαρακτηριστικού ακουστικού αποτυπώματος
Συνδυασμός αισθητήρων	Αισθητήρες που λειτουργούν συνεργικά (π.χ. Ραντάρ σε συνδυασμό με ακουστικές μεθόδους)

*Πίνακας 1.2: Μέθοδοι ανίχνευσης, παρακολούθησης και ταυτοποίησης*

Μετά την ανίχνευση – ταυτοποίηση του «UAS – στόχου», μπορεί να εφαρμοστεί κατά περίπτωση μια σειρά από αντίμετρα που αποσκοπούν στην απαγόρευση προσέγγισης σε κάποια περιοχή ενδιαφέροντος, την αδρανοποίηση ή και καταστροφή του υπόψη UAS. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα c – UAS, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3.

**Απαγόρευση - αδρανοποίηση**

RF jamming (Παρεμβολή)	Διακοπή ζεύξης μέσω παλμού υψηλής ισχύος
GNSS jamming	Διακοπή ζεύξης UAS – δορυφόρου (GPS ή/και GLONASS)
Spoofing («Απατηλή μίμηση»)	Ανάληψη ελέγχου του UAS μιμούμενο τον πομπό της ζεύξης
Dazzling («Τύφλωση»)	Δέσμη φωτός ή laser που επιχειρεί να «τυφλώσει» τα οπτικά όργανα του UAS
Laser	Καταστροφή εξαρτημάτων του UAS μέσω κατευθυνόμενης ισχυρής δέσμης laser
Υψηλής ισχύος μικροκυματική ακτινοβολία	Καταστροφή των ηλεκτρονικών του UAS με ΗΜ παλμούς μεγάλης ισχύος

**Απαγόρευση - αδρανοποίηση**

Δίχτυα	Με την εμπλοκή του σκάφους/οχήματος σε δίχτυ
Με βλήματα	Κανονικά ή ειδικού σχεδιασμού βλήματα
UAS σύγκρουσης	“Kamikaze – Drone” που καταστρέφουν UAS προσκρούοντας πάνω τους
Συνδυασμός μεθόδων	Συνήθως χρησιμοποίηση RF και GNSS jamming

*Πίνακας 1.3: Μέθοδοι απαγόρευσης – αδρανοποίησης UAS*

Τέλος, η διάκριση των συστημάτων c – UAS ανάλογα με τη δυνατότητα μετακίνησής τους και τα μέσα στα οποία βρίσκονται εγκατεστημένα, συνοψίζεται στον Πίνακα 1.4.

**Πλατφόρμες – φορείς συστημάτων c – UAS**

Επίγεια (ground – based)	Σχεδιασμένα για σταθερούς σταθμούς ή πάνω σε οχήματα
Φορητά (hand – held)	Υπό τύπο τυφεκίου ή άλλου φορητού οπλισμού
Επί αεροχημάτων (UAS – based)	Προσαρμόζονται σε UAS και δρουν από μικρή απόσταση

*Πίνακας 1.4: Πλατφόρμες - φορείς συστημάτων c – UAS*

**1.2.2. Προκλήσεις στην Ανίχνευση**

**1.2.2.1. Απόσταση Ανίχνευσης – Χρόνος Αντίδρασης**

Η ελάχιστη απόσταση στην οποία θα πρέπει ένα ολοκληρωμένο σύστημα c – UAS να πραγματοποιεί ανίχνευση ή/και ταυτοποίηση, ακολουθεί την παρακάτω συλλογιστική (π.χ. [12]): έστω ότι επιθυμούμε ένα UAS να μην πλησιάσει κάποιο χώρο ενδιαφέροντος σε απόσταση 300 m. Επίσης, θεωρούμε ένα UAS με χαρακτηριστικά αντίστοιχα του DJI Phantom που κινείται με ταχύτητα 16 m/sec. Αν απαιτούνται 10 sec για την ανίχνευση/ταυτοποίηση και 20 sec για την



εκτίμηση κινδύνου και εφαρμογή αντίμετρων, η ελάχιστη απόσταση ανίχνευσης που απαιτείται είναι:  $300m + (10sec + 20sec) \times 16 \frac{m}{sec} = 780 m$ .

Αντίστοιχα, ο χρόνος αντίδρασης για τη λήψη απόφασης/μέτρων c – UAS μπορεί να διατυπωθεί σε σχέση με τη μέγιστη απόσταση αποκάλυψης στόχου όπως παρακάτω (π.χ. [11]): έστω ένα σύστημα με μέγιστο range αποκάλυψης UAS στα 750 m. Ένα UAS αντίστοιχο του προηγούμενου παραδείγματος που κινείται με ταχύτητα 16 m/sec, δίνει στο χειριστή/σύστημα λιγότερο από 47 sec να αποφασίσει για την επιλογή τρόπου αντίδρασης (εφαρμογή ή όχι αντίμετρων).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένα αποτελεσματικό σύστημα c – UAS, παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση επιτυγχάνοντας range ανίχνευσης που αγγίζει το 1 km ή όταν παρέχει ένδειξη για την πτήση UAS σε χρόνο ~1 min προτού αυτό φτάσει στην περιοχή ενδιαφέροντος. Σημειώνεται ότι για την ικανοποίηση των παραπάνω συνθηκών, μπορεί να χρησιμοποιούνται και απομακρυσμένοι αισθητήρες που λειτουργούν αυτόνομα, παρέχοντας έγκαιρη προειδοποίηση σε ένα κεντρικά ελεγχόμενο σύστημα.

### **1.2.2.2. Χαρακτηριστικά UAS**

Όσον αφορά στην ανίχνευση με ενεργητικές μεθόδους (ραντάρ), μια συγκεντρωτική παρουσίαση των παραγόντων που δυσχεραίνουν την ανίχνευση UAS δίνεται στο [12]. Επιπλέον, σκιαγραφούνται τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ένα c – UAS ραντάρ προκειμένου να είναι αποτελεσματικό. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν την υψηλή ευαισθησία σε στόχους χαμηλού ίχνους, ικανότητα μέτρησης ύψους/απόστασης, μεγάλο όγκο αποκάλυψης στόχων, υψηλό ρυθμό ανανέωσης των σαρώσεων, καταπίεση clutter. Στα συμπεράσματα της εργασίας, οι συγγραφείς διαπιστώνουν την αναγκαιότητα χρησιμοποίησης πολλαπλών αισθητήρων για τη μέγιστη αποτελεσματικότητα ενός συστήματος c – UAS.

Η αναφορά [13] ομάδας εργασίας της Sandia National Laboratories που συστήθηκε για τη διερεύνηση της πρόκλησης ανίχνευσης UAS, χρησιμοποίησε τον όρο “LSS – low, slow and small” για να συνοψίσει τα χαρακτηριστικά των μικρών UAS που δυσχεραίνουν την ανίχνευσή

τους. Με δεδομένο το μικρό RCS τους, προς αναζήτηση τίθεται η καταλληλότερη συχνότητα για την ανίχνευση.

Η γρήγορη απόσβεση του ακουστικού (μηχανικού) κύματος που εκπέμπουν, αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την εφαρμογή παθητικών ακουστικών μεθόδων. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του ηχητικού σήματος, όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2, είναι τα broadband χαρακτηριστικά που διαθέτει εγγενώς. Συνεπώς η επεξεργασία του με τεχνικές narrowband σημάτων (όπως τα RF) που είναι κατά πολύ πιο ώριμες, απαιτεί τροποποιήσεις ή και εξολοκλήρου νέες τεχνικές. Η τεχνικές μηχανικής μάθησης που βρίσκονται σε προχωρημένο επίπεδο ανάπτυξης, αντιπαρέρχονται εξολοκλήρου το πρόβλημα προσεγγίζοντάς το με νέο τρόπο όπως θα αναλυθεί στα Κεφάλαια 3 και 4.

### ***1.2.2.3. Νομικά Ζητήματα – Παράπλευροι Κίνδυνοι***

Η πολυνομία και η αλληλοεπικάλυψη αρμοδιοτήτων μεταξύ φορέων τόσο σε διεθνές όσο και εθνικό επίπεδο (Υπουργεία Υποδομών - Μεταφορών, Ενέργειας, Δικαιοσύνης, Άμυνας), δεν έχει επιτρέψει έως σήμερα τη δημιουργία ενός ενιαίου και ξεκάθਾਰου νομικού πλαισίου για την ανάπτυξη συστημάτων c – UAS.

Η παρεμβολή στο ΗΜ φάσμα που δε μπορεί να ελεγχθεί επακριβώς χωρικά, ενδέχεται να επηρεάσει απρόβλεπτα εκτός κάποιου κακόβουλου UAS και μη - επιθυμητές γειτονικές συσκευές και είναι παράνομη. Ομοίως και για την παρεμβολή του συστήματος GNSS (GPS, GLONASS) που χρησιμοποιείται για την πλοήγηση εκτός των UAS και από πλήθος άλλων φορητών συσκευών.

Ενδεχόμενο κατάρριψης ενός UAS, δημιουργεί κίνδυνο σε κτίριο ή/και ανθρώπους που βρίσκονται κάτω από τον εναέριο χώρο τους και είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί η προσεδάφισή τους σε ασφαλές σημείο.

Αλληλένδετη με τα παραπάνω, είναι η πρόκληση ως προς την διάκριση σύννομων και παράνομων πτήσεων UAS· παράδειγμα αποτελεί η βιντεοσκόπηση ενός μεγάλου αθλητικού γεγονότος, το οποίο ενδέχεται να καλύπτεται από αδειοδοτημένα UAS ενώ ταυτόχρονα

«κακόβουλα» UAS να επιχειρήσουν να προκαλέσουν επεισόδια σε συγκεντρωμένα πλήθη θεατών.

#### ***1.2.2.4. Εξέλιξη της Τεχνολογίας UAS***

Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, καθιστά τα UAS όλο και περισσότερο αυτόνομα: δυνατότητα πλοήγησης ακόμα και χωρίς GNSS, πτήση σε προδιαγεγραμμένο flight path χωρίς την παρέμβαση του χειριστή, χειρισμός πέραν του οπτικού ορίζοντα (BVLOS – **Beyond Visual Line of Sight**) και σε τελείως διαφορετικές συχνότητες από τις συνηθισμένες του Wi-Fi (2.4 – 5.8 GHz) εκμεταλλευόμενα τα LTE δίκτυα.

Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα χειρισμού πολλών UAS ταυτόχρονα σε σχηματισμό «σμήνους» (“swarm”) δυσχεραίνουν και περιπλέκουν ακόμα περισσότερο τις διαδικασίες ανίχνευσης και αντιμετώπισής τους από τα υπάρχοντα συστήματα c – UAS.

#### ***1.2.2.5. Κόστος Συστημάτων – Τυποποίηση Διαδικασιών Αξιολόγησης Επίδοσης***

Σύμφωνα με το [14], από τα 123 c – UAS συστήματα για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία κόστους, τα 77 κόστιζαν περισσότερο από \$100.000. Μετά το περιστατικό ασφαλείας στο Gatwick (παρ. 1.2.1), το αεροδρόμιο ανακοίνωσε την εγκατάσταση συστημάτων c – UAS με κόστος μεγαλύτερο από \$6 εκατομμύρια<sup>13</sup>, ενώ για την εγκατάσταση αντίστοιχων συστημάτων στα 16 μεγαλύτερα αεροδρόμια της Γερμανίας, το κόστος υπολογίζεται σε άνω του μισού δις ευρώ.<sup>14</sup>

Στον τομέα του στρατιωτικού εξοπλισμού, εφαρμογή βρίσκει η στροφή προς την τροποποίηση υφιστάμενων συστημάτων μεγάλων ραντάρ, οι οποίες δίνουν δυνατότητες ανίχνευσης στόχων LSS όπως τα UAS. Ως παραδείγματα αναφέρονται τα: (α) C-RAM της Raytheon, το οποίο

---

<sup>13</sup> Josh Spero, “Gatwick spends £5m on airport anti-drone measures,” Financial Times, January 3, 2019. <https://www.ft.com/content/cdaa19e6-0f97-11e9-a3aa-118c761d2745>

<sup>14</sup> “Integrating drone detection systems into airport surveillance networks in Germany ‘will cost EUR500 million,’” Unmanned Airspace, October 1, 2019. <https://www.unmannedairspace.info/counter-uas-systems-and-policies/integrating-drone-detection-systems-into-airport-surveillance-networks-in-germany-will-cost-eur500-million/>

χρησιμοποιείται κυρίως για άμυνα ενάντια σε πυρά όλμων και λοιπών όπλων καμπύλης τροχιάς, (β) AN/TPS-80 (G/ATOR) αντιαεροπορικό (A/A) ραντάρ της Northrop Grumman και (γ) AN/TPQ-53 της Lockheed Martin, η αναβάθμιση του οποίου για την ανίχνευση UAS ανήλθε σε \$27 εκατομμύρια [10].

Στα παραπάνω που καταδεικνύουν το υψηλό κόστος των c – UAS συστημάτων, προστίθεται η έλλειψη ενός κοινού προτύπου για την αξιολόγηση της επίδοσής τους. Μόλις το 2017, προτάθηκε με το [15] μια μεθοδολογία για την τυποποίηση της αξιολόγησης συστημάτων, η οποία περιλαμβάνει δοκιμές 72ωρης συνεχούς λειτουργίας, 30 ήμερο έλεγχο αξιοπιστίας (“burn-in”), κλπ.

### **1.3. Σκοπός της Διατριβής**

Σκοπός της διατριβής είναι ο συνδυασμός ενεργητικών και παθητικών μεθόδων σε ένα σύστημα για την ανίχνευση UAS χαμηλού RCS, μέσω της ταυτόχρονης χρήσης ραντάρ και συστοιχίας ακουστικών αισθητήρων υπό κεντρικό έλεγχο.

Στη βιβλιογραφία δεν έχει εξερευνηθεί επαρκώς η K-band στη συχνότητα των 24 GHz όσον αφορά στη δυνατότητα ανίχνευσης UAS χαμηλού RCS με CW Doppler ραντάρ – αντί αυτών, χρησιμοποιούνται ευρέως pulsed, FMCW και staring ραντάρ. Οι υλοποιήσεις των υπόψη ραντάρ είναι στην πλειονότητά τους μεγάλου μεγέθους και ισχύος, υψηλού κόστους και πολυπλοκότητας ενώ συχνά δεν παρέχονται πληροφορίες μετρήσεων της απόδοσής τους στην ανίχνευση. Επιπλέον, κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές αναφορές για την εκτίμηση του RCS των αεροχημάτων, με την πλειονότητα των προσπαθειών να επικεντρώνεται στην περιοχή συχνοτήτων X-band (8-12 GHz) και χαμηλότερα.

Η εκμετάλλευση της καρδιοειδούς μορφής του πολικού διαγράμματος απόκρισης των πυκνωτικών μικροφώνων για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης του ακουστικού σήματος και η παράλληλη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης για την ταυτοποίησή του σε πραγματικό χρόνο, αποτελούν ακόμη 2 χαρακτηριστικά της συμβολής που επιδιώκεται με την παρούσα διατριβή.

Τέλος, παρόλο που έχουν παρουσιαστεί συνδυαστικές μέθοδοι οι οποίες περιλαμβάνουν RF και ηλεκτροοπτικές μεθόδους, ελλείπουν οι υλοποιήσεις ενοποιημένων συστημάτων για την ανίχνευση και ταυτοποίηση UAS με την παράλληλη/ταυτόχρονη αξιοποίηση RF και ακουστικών (ηχητικών) συχνοτήτων. Η ενσωμάτωση των παραπάνω δυνατοτήτων σε ένα φορητό, εύκολο στην εγκατάσταση/λειτουργία, χαμηλού κόστους και πολυπλοκότητας σύστημα, συμπληρώνει τη συνεισφορά της διατριβής στον τομέα της ανίχνευσης UAS.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ

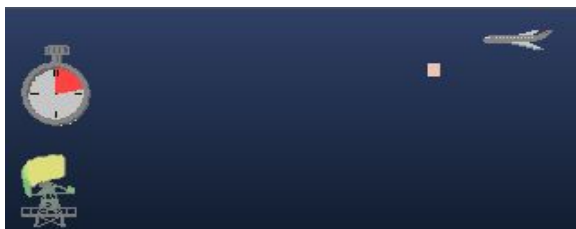
## 2.1. Βασικές Αρχές

Στις παρακάτω ενότητες, περιγράφονται βασικά στοιχεία για τα φαινόμενα και τις μεθοδολογίες που υπαισέρχονται στην ανάλυση του συστήματος που αναπτύχθηκε.

### 2.1.1. Ενεργητικές Μέθοδοι

#### 2.1.1.1. Ανίχνευση με Μεθόδους Ραντάρ

Η λειτουργία του ραντάρ που απεικονίζεται στις Εικόνες 2.1 και 2.2, μπορεί 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  $\Delta t$  ( $t = t_0 + \Delta t$ ) 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  $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s και μετρώντας τη χρονική καθυστέρηση  $\Delta t$ , 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)

$\Delta t$ : 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:

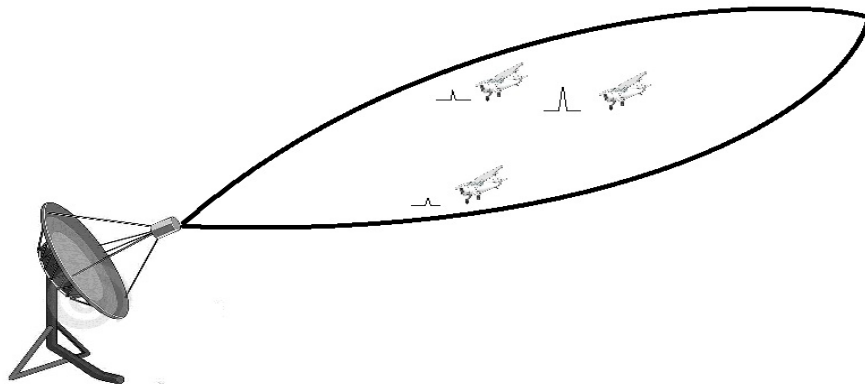
$$v = \frac{s}{t} \quad (2.2)$$

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  $\Delta t$  έχουμε:

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

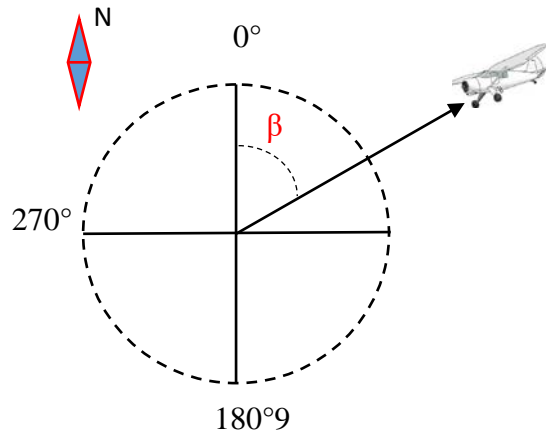
από την οποία προκύπτει η (2.1).

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  $\beta$  σε σχέση με τον πραγματικό βορρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Εκτίμηση κατεύθυνσης στόχου

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  $P_{\Pi}$ : 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  $P_{\sigma}$  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  $\sigma$  και θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα) και χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (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  $S_{\lambda}$  που λαμβάνει ο δέκτης του ραντάρ είναι:

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

Η Εξίσωση (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  $\lambda$ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, προκύπτει η ισχύς λήψης  $P_{\lambda}$ :

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

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 του, 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:

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

### 2.1.1.2. Ενεργός Διατομή Στόχου (RCS)

Η ραδιοδιατομή ή ενεργός διατομή  $\sigma$  (**R**adar **C**ross **S**ection – **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».

Μπορούμε να αποτυπώσουμε τις παραπάνω έννοιες στη σχέση:

$$\sigma = \frac{\text{ενέργεια που επανεκπέμπεται προς την πηγή ανά μονάδα στερεάς γωνίας}}{\text{προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος}/4\pi} \quad (2.12)$$

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  $A_{εν}$  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:

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi} \cdot G}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot A_{εν} \cdot \sigma \quad (2.13)$$

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

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

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_{\sigma}|^2}{|E_{\Pi}|^2} \quad (2.14)$$

όπου  $E_{\sigma}$ : το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο,  $E_{\Pi}$ : το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο.

Διαφορετικά χρησιμοποιώντας την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος στο στόχο  $S_{\Pi}$  και την σκεδαζόμενη από αυτόν  $S_{\sigma}$  σε απόσταση  $r$ , έχουμε για το RCS:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_{\sigma}}{S_{\Pi}} \quad (2.15)$$

Όπως αναμένεται από τις (2.14) και (2.15), 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  $1m^2$ :

$$\sigma_{dBsm} = \sigma_{dBm^2} = 10 \log_{10} \left( \frac{RCS}{1m^2} \right) \quad (2.16)$$

Ως παράδειγμα εφαρμογής της (2.16), αν ένα μαχητικό αεροσκάφος stealth έχει ενεργό διατομή  $\sigma = 0.01m^2$ , αυτό αντιστοιχεί σε  $\sigma_{dBsm} = 10 \log_{10} \frac{0.01}{1} = -20 \text{ dBsm}$ . Αντίστροφα, αν ένα μικρό σκάφος έχει RCS 5 dBsm, βρίσκουμε ότι έχει ενεργό διατομή  $10^{\frac{5}{10}} = 3.16 m^2$ .

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:

$$\sigma^{tr}(\theta^t, \varphi^t, \theta^r, \varphi^r) \quad (2.17)$$

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

Η πειραματική μέτρηση του RCS πραγματοποιείται [16] 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. Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων – στόχων φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Αντικείμενο – στόχος	RCS	
	( $m^2$ )	(dBsm)
Έντομο	$10^{-5}$	-50
Πουλί	0.01	-20
Αεροσκάφος stealth τεχνολογίας	~0.1	-10
Άνθρωπος	1	0
Μαχητικό αεροσκάφος	4	6
Μεγάλο μεταφορικό αεροσκάφος	100	20
Φρεγάτα	$10^5$	50

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων - στόχων

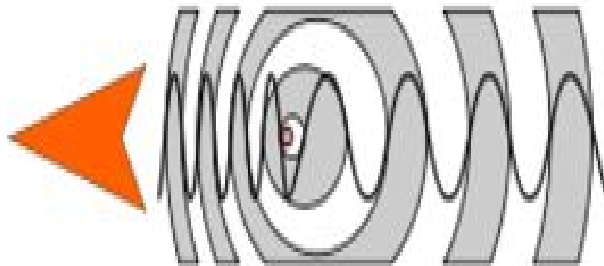
Το RCS τεσσάρων ευρέως διαδεδομένων τύπων UAS προσδιορίστηκε πειραματικά στην περιοχή 0.05 έως 0.2 dBsm στο [17], ενώ στην κατάταξη στόχων σύμφωνα με το RCS κατά Swerling [18], ανήκουν στην κατηγορία SW1 όπου το RCS αλλάζει σε “scan-to-scan basis” [19]. Περισσότερα για τις μετρήσεις RCS των UAS, θα αναφερθούν στην Ενότητα 2.2.1.

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

- Μεγάλο μέγεθος
- Μεγάλα εκτεθειμένα μεταλλικά τμήματα στην επιφάνειά του
- Λεία και καμπύλη επιφάνεια

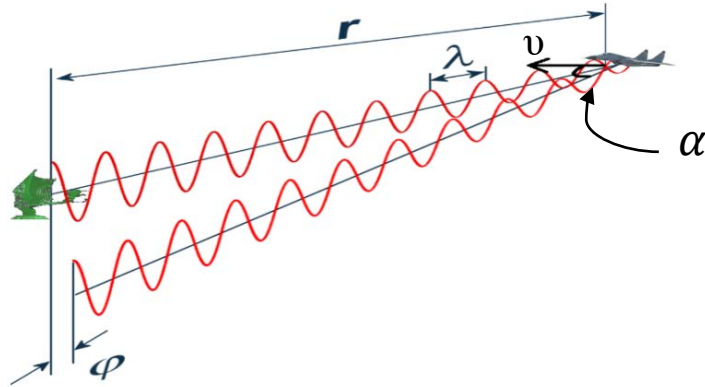
### 2.1.1.3. Φαινόμενο Doppler

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.



Σχήμα 2.3: Πύκνωση μετώπων κύματος

Διαισθητικά και με τη βοήθεια του Σχήματος 2.3, 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: Μεγέθη που υπεισέρχονται στην ολίσθηση Doppler

Η διαφορά φάσης  $\varphi$  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 φαίνεται στο Σχήμα 2.4, από όπου προκύπτει ότι η διαφορά (ή «ολίσθηση» φάσης) μπορεί να γραφεί ως:

$$\varphi = 2\pi \frac{2r}{\lambda} \quad (2.18)$$

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:

$$S_t = A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.19)$$

$$S_r = B \cdot \sin(2\pi ft - \varphi) \quad (2.20)$$

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

$\varphi$ : η μεταξύ τους διαφορά φάσης που δίνεται από τη (2.18)

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

$$r(t) = r_0 - v t \cos \alpha \quad (2.21)$$

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

Με τη (2.21) η (2.20) γράφεται:

$$\begin{aligned} S_r &= B \cdot \sin\left[2\pi f t - \frac{4\pi}{\lambda}(r_0 - v t \cos \alpha)\right] \\ &= B \cdot \sin\left[2\pi\left(f + \frac{2v \cos \alpha}{\lambda}\right)t - \varphi_0\right] \end{aligned} \quad (2.22)$$

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

Συγκρίνοντας τις (2.19) και (2.22) βλέπουμε ότι η συχνότητά τους διαφέρει κατά  $\frac{2v \cos \alpha}{\lambda}$ , μέγεθος που ονομάζεται ολίσθηση συχνότητας Doppler (Doppler frequency shift)  $f_d$ :

$$f_d = \Delta f = f_r - f_0 = \frac{2v \cos \alpha}{\lambda} \quad (2.23)$$

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 (2.23):

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.24)$$

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

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \quad (2.25)$$

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 ( $v < 0$ ).

#### 2.1.1.4. Ανάλυση I/Q

Πρόκειται 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:

$$\cos(x + y) = \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y) \quad (2.26)$$

$$\sin(x + y) = \sin(x)\cos(y) + \cos(x)\sin(y) \quad (2.27)$$

$$\cos(x) = \sin(x + \pi/2) \quad (2.28)$$

μπορούμε ν' αναπαραστήσουμε οποιοδήποτε σήμα πλάτους  $A$ , συχνότητας  $f_c$  και τυχαίας φάσης  $\varphi$  ως:

$$A \cdot \cos(2\pi f_c t + \varphi) = A \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \cos(\varphi) - A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \sin(\varphi) \quad (2.29)$$

ή διαφορετικά:

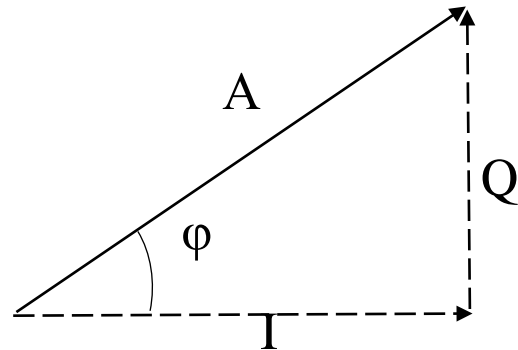
$$\begin{aligned} A \cdot \sin(2\pi f_c t + \varphi) &= A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \cos(\varphi) + A \cdot \sin(2\pi f_c t + \pi/2) \cdot \sin(\varphi) \\ A \cdot \sin(2\pi f_c t + \varphi) &= A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \cos(\varphi) + A \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (2.30)$$

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:



$$\begin{aligned}
 I(t) &= A(t)\cos(\varphi) \\
 Q(t) &= A(t)\sin(\varphi)
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει το τελικά διαμορφωμένο σήμα από τις ορθογώνιες συνιστώσες  $I$  και  $Q$  όπως αυτό περιγράφεται στη σχέση (2.29).

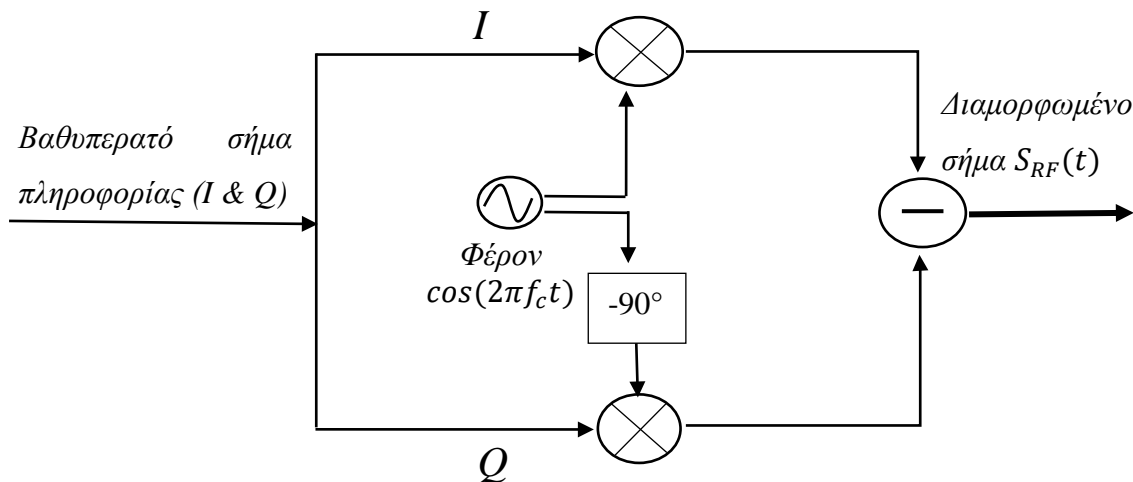


Σχήμα 2.5: Αναπαράσταση συμφασικής – ορθογώνιας συνιστώσας

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  $I$  και  $Q$ .

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

Το πώς προκύπτουν οι ονομασίες «συμφασική» και «ορθογώνια» συνιστώσα, γίνεται φανερό αν εξετάσουμε τη διαδικασία διαμόρφωσης που φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



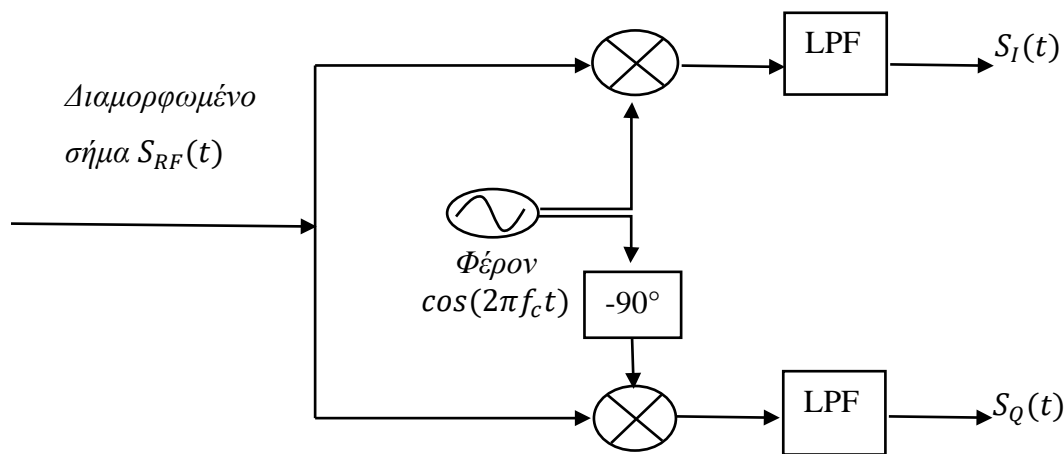
Σχήμα 2.6: Block διάγραμμα υλοποίησης διαμορφωτή  $I/Q$

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  $90^\circ$  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  $90^\circ$  καθιστά τα σήματα ορθογώνια μεταξύ τους και σ’ αυτήν αποδίδονται οι όροι συμφασική (με διαφορά φάσης  $0^\circ$ ) και ορθογώνια (διαφορά φάσης  $90^\circ$ ). Στο πεδίο της συχνότητας, η αναπαράσταση της μετάθεσης φάσης κατά  $90^\circ$  ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό με το μετασχηματισμό Hilbert:  $H(j2\pi f) = -j \cdot \text{sgn}(2\pi f)$ .

Το διαμορφωμένο σήμα  $S_{RF}(t)$  του Σχήματος 2.6. που μπορεί να γραφεί και ως:

$$S_{RF}(t) = S_I(t) + S_Q(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (2.32)$$

εισέρχεται στην είσοδο του αποδιαμορφωτή (Σχήμα 2.7) όπου εκτελείται η αποδιαμόρφωση – χωρισμός στις βαθυπερατές συνιστώσες  $I$  και  $Q$ .

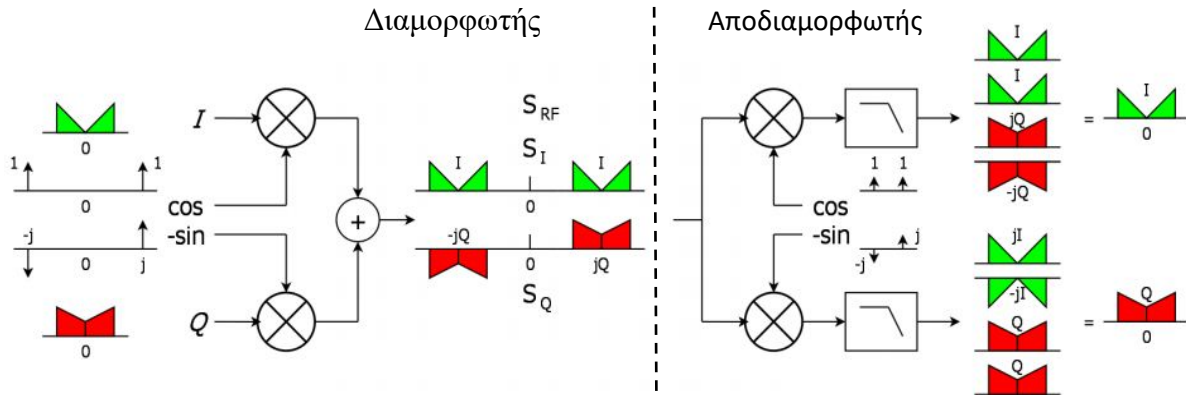


Σχήμα 2.7: Block διάγραμμα υλοποίησης αποδιαμορφωτή I/Q

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 2.8, 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 2.8:  $I/Q$  διαμόρφωση – αποδιαμόρφωση στο πεδίο της συχνότητας

### 2.1.2. Παθητικές Μέθοδοι

Από τις 4 κυριότερες παθητικές μεθόδους που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 1.2 (RF, EO, IR και ακουστικές), η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε στην εκμετάλλευση των ακουστικών συχνοτήτων. Ένα στοιχείο που επιδρά δυσμενώς στην προσπάθεια ανίχνευσης είναι η πολύ γρήγορη απόσβεσή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στον αντίποδα, η μέθοδος δεν περιορίζεται από την ανάγκη για επαφή LOS με το αντικείμενο – στόχο, όπως οι υπόλοιπες παθητικές και ενεργητικές μέθοδοι.

#### 2.1.2.1. Συστοιχίες Μικροφώνων – Ακουστικά (Ηχητικά) Σήματα

Μια συστοιχία μικροφώνων αποτελείται από σειρά μικροφώνων, τοποθετημένα ώστε να λαμβάνεται το ακουστικό σήμα από τον περιβάλλοντα χώρο. Η επεξεργασία σήματος που ακολουθεί έχει στόχο την εκτίμηση παραμέτρων από ορισμένα σήματα ενδιαφέροντος, ανάλογα με την εφαρμογή, χρησιμοποιώντας τη χωρική – χρονική πληροφορία που είναι διαθέσιμη στην έξοδο της συστοιχίας.

Η γεωμετρία της συστοιχίας που χρησιμοποιείται, εξαρτάται και πάλι από την εφαρμογή, ενώ παίζει σημαντικό ρόλο και στο σχεδιασμό του αλγόριθμου επεξεργασίας. Επί παραδείγματι, σε προβλήματα εντοπισμού πηγής (source localization), η γεωμετρία της συστοιχίας πρέπει να είναι γνωστή και μάλιστα μια ομοιόμορφη γεωμετρία μπορεί να απλοποιεί το πρόβλημα της εκτίμησης· γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως χωρικά ομοιόμορφες γραμμικές<sup>15</sup> και κυκλικές συστοιχίες, ενώ τρισδιάστατες σφαιρικές διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποτύπωση ακουστικού πεδίου (sound field). Εντούτοις, σε άλλα προβλήματα όπως η μείωση θορύβου, η γεωμετρία της συστοιχίας έχει μικρή έως μηδενική επίδραση, αναλόγως του αλγόριθμου. Στις περιπτώσεις αυτές, στη βιβλιογραφία απαντάται ορισμένες φορές ο όρος «σύστημα πολλαπλών μικροφώνων» [20] αντί για «συστοιχία μικροφώνων».

Πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στην προσέγγιση των ακουστικών σημάτων και σημάτων ραδιοσυχνοτήτων (RF). Εκτός της θεμελιώδους διάκρισης ότι τα ακουστικά/ηχητικά είναι μηχανικά κύματα (τα δε RF ηλεκτρομαγνητικά), σημαντικές διαφορές είναι:

- Το ακουστικό σήμα είναι ευρείας ζώνης (wideband) ενώ τα RF στενής ζώνης (narrowband)
- Το περιβάλλον και το ακουστικό σήμα είναι κυρίως μη-στατικά (non – stationary)
- Ο θόρυβος μπορεί να έχει τα ίδια φασματικά χαρακτηριστικά με το (επιθυμητό) ακουστικό σήμα
- Το δυναμικό εύρος της ανθρώπινης ακοής είναι εξαιρετικά μεγάλο (περί τα 120 dB) και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις ασθενείς φασματικές ουρές των αποκρίσεων του «καναλιού». Έτσι, για τη μοντελοποίηση τους απαιτούνται φίλτρα πολύ μεγάλου μήκους (σε αριθμό δειγμάτων)

Για τους παραπάνω κυρίως λόγους, πολλοί από τους narrowband αλγόριθμους, δεν αποδίδουν ικανοποιητικά στην επεξεργασία wideband σημάτων όπως τα ηχητικά. Στο πεδίο της ανάλυσης

---

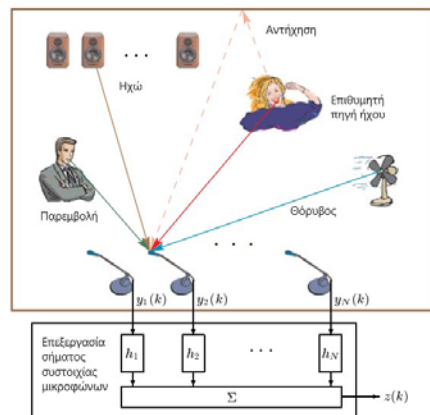
<sup>15</sup> Ο όρος χρησιμοποιείται κατ' αντιστοιχία των «χωρικά ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραίων» που αναφέρεται σε narrowband RF αναλύσεις [112].

wideband σημάτων, πολλοί αλγόριθμοι αποτελούν γενικεύσεις αντίστοιχων narrowband αλγορίθμων οι οποίοι υπάρχουν και έχουν χρησιμοποιηθεί τεκμηριωθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες, πλην όμως δεν είναι σχεδιασμένοι εξ αρχής για σήματα ευρέως φασματικού περιεχομένου.

Συστοιχίες μικροφώνων χρησιμοποιούνται για την:

- Μείωση θορύβου
- Μείωση επιστροφών (ηχώ)
- Αφαίρεση αντήχησης (dereverberation)
- Εντοπισμό μιας πηγής
- Εκτίμηση αριθμού πηγών
- Διαχωρισμό πηγών
- Φαινόμενο “cocktail party”

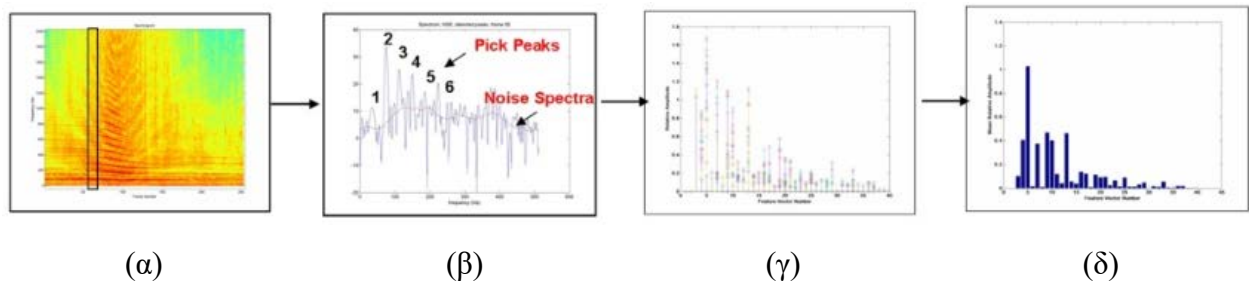
Στην Εικόνα 2.3, παρουσιάζονται σχηματικά τα αίτια που μπορεί να αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά των ακουστικών σημάτων που λαμβάνονται από μια συστοιχία μικροφώνων.



Εικόνα 2.3: Πηγές αλλοίωσης ακουστικών σημάτων

Παραδείγματα μεγάλων συστοιχιών από μικρόφωνα και της χρήσης beamforming, μπορούν να ανευρεθούν στα [21], [22] και [23]. Ωστόσο, δε χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση UAS, αλλά για εφαρμογές όπως η απεικόνιση του «ακουστικού χάρτη» κατά την πτήση μεγάλων αεροσκαφών, εντοπισμός πηγών θορύβου σε κινητήρες, κ.ά.

Μια μέθοδος που χρησιμοποιεί φασματογραφήματα (spectrograms) από το λαμβανόμενο ηχητικό σήμα, είναι η Συσχέτιση Αρμονικών Γραμμών (**HLA** – **H**armonic **L**ine **A**ssociation). Με αναφορά στο Σχήμα 2.9 [24], μπορούμε να περιγράψουμε τη διαδικασία ως εξής: δεδομένης της ακουστικής κυματομορφής\χρονοσειράς, σχηματίζουμε μέσω FFT το φασματογράφημά της όπως στο (α). Με ορισμένο κριτήριο (για παράδειγμα 3 διαδοχικές κορυφές – frequency bins) επιλέγουμε ανάμεσα στο θόρυβο κορυφές που αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά «οικογένειες συχνοτήτων» όπως δείχνεται στο (β). 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 όπως στο (γ). Το τελικό αποτέλεσμα, θα είναι ένα διάνυσμα αναφοράς όπως αυτό του (δ), το οποίο θα εμπεριέχει τη χαρακτηριστική πληροφορία μέσω της οποίας μπορούμε να ανιχνεύουμε patterns σε οποιοδήποτε τυχαίο σήμα.



Σχήμα 2.9: Εφαρμογή HLA για εξαγωγή ακουστικών χαρακτηριστικών

Μια διαφορετική τεχνική εξαγωγής χαρακτηριστικών ηχητικού σήματος, χρησιμοποιεί τους συντελεστές mel (**MFCCs** – **M**el **F**requency **C**epstral **C**oefficients). Ευρεία χρήση των MFCCs γίνεται από τους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, που περιγράφονται παρακάτω.

### 2.1.2.2. Μηχανική Μάθηση

Πριν την ανάπτυξη που παρουσιάζουν τα τελευταία έτη οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης (**ML** – **M**achine **L**earning), η προσέγγιση για την αυτοματοποίηση της αναγνώρισης ηχητικών σημάτων ενδιαφέροντος ακολουθούσε τη λογική της σύγκρισης με γνωστά σήματα: το λαμβανόμενο σήμα από μικρόφωνο, χωρίζονταν σε μικρότερα segments και στη συνέχεια συγκρίνονταν – με μεθόδους ετεροσυσχέτισης (cross correlation) – με γνωστά προηχογραφημένα σήματα. Η

αναγνώριση θεωρούνταν επιτυχής όταν ο συντελεστής cross correlation πλησίαζε τη μονάδα ή κάποιο κατώφλι που είχε επιλεγεί.

Σε έναν αλγόριθμο ML, ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων είναι απαραίτητος για την εκπαίδευση μιας σειράς από επίπεδα νευρωνικών δικτύων (ANNs ή NNs – Artificial Neural Networks), τα οποία στη συνέχεια, αφού έχουν εξάγει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά, προβαίνουν στην πρόβλεψη της «κατηγορίας» που ανήκει το σήμα ενδιαφέροντος. Υποστηριζόμενα από το πολύ γρήγορο hardware (κυρίως GPU), μπορούν να δίνουν προβλέψεις για την κατηγοριοποίηση/ταυτοποίηση στόχων σε ελάχιστα ms.

Περνώντας από κατάλληλο κυλιόμενο παράθυρο, το ηχητικό σήμα διαιρείται σε τμήματα από τα οποία εξάγονται χαρακτηριστικά φάσματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως οι MFCCs που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη Ενότητα, συγκρίνονται με τα χαρακτηριστικά που έχει αποδώσει σε κάθε ετικέτα (ή «κατηγορία ενδιαφέροντος») ο εκπαιδευμένος αλγόριθμος ML και μια συνάρτηση ενεργοποίησης «λαμβάνει την απόφαση» σε ποια ετικέτα κατατάσσεται το ηχητικό σήμα. Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι οι MFCCs, ίσως δεν αποτελούν τη βέλτιστη πρακτική στην αναγνώριση σημάτων που ομοιάζουν με θόρυβο και των οποίων το φάσμα είναι σχετικά επίπεδο [25].

Στη σχεδίαση αλγόριθμων ML που σκοπεύουν στην αναγνώριση χαρακτηριστικών, πολλές τεχνικές feature extraction/matching είναι προερχόμενες από τον τομέα της αναγνώρισης/επιβεβαίωσης ομιλητή (speaker identification/verification) που είναι σε υψηλό επίπεδο ωριμότητας και ευρέως διαδεδομένος. Μια επίσης σημαντική διαφοροποίηση είναι η εξής: οι παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας σήματος, απαιτούν μια προεπεξεργασία του σήματος προκειμένου να εντοπιστούν χαρακτηριστικά που είναι σημαντικά για το σκοπό της δεδομένης εφαρμογής (π.χ. αναγνώριση προτύπων, ομιλίας σε τυχαίο ακουστικό σήμα). Η προσέγγιση του προβλήματος με μηχανική μάθηση αυτοματοποιεί και απλοποιεί τη διαδικασία σημαντικά, μετατρέποντας το πρόβλημα αναγνώρισης χαρακτηριστικών μέσα σε τυχαίο ακουστικό σήμα σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης εικόνων, για την επίλυση του οποίου υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων τεχνικών με εξαιρετική απόδοση. Εκτενής ανάλυση για τα παραπάνω, δίνεται σε αντίστοιχες ενότητες των Κεφαλαίων 3 και 4.

## ***2.2. Μέθοδοι Που Αναπτύσσονται Από Ερευνητικές Ομάδες Και Τη Βιομηχανία***

Σε μια πλήρη ανάλυση των Herrera *et al.* [26] το 2017 (με στοιχεία έρευνας του 2015), παρουσιάστηκαν οι τάσεις της έρευνας και της βιομηχανίας τόσο στην κατασκευή UAS όσο και στον τομέα των συστημάτων ανίχνευσης – αντιμετώπισης σε χρονικό ορίζοντα 5ετίας. Σημειώνεται ότι κατά τη συγγραφή του [26], καταγράφηκε η ύπαρξη περί των 12 συστημάτων c-UAS.

Συγκεντρωτική βιβλιογραφική αναφορά που χρησιμοποιεί παραδείγματα σε κάθε μέθοδο ανίχνευσης, πραγματοποιήθηκε στο [27], η οποία καλύπτει όλες τις τεχνικές ανίχνευσης που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1.2.

Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό Κεφάλαιο, πιο πρόσφατα στοιχεία περιλαμβάνονται στα [10] και [11], σύμφωνα με τα οποία στα τέλη του 2019 εντοπίζονται διαθέσιμα 537 συστήματα c-UAS. Στις υπόψη εργασίες, συγκεντρώνονται, κατηγοριοποιούνται και παρουσιάζονται με πληρότητα οι λύσεις c-UAS τόσο για πολιτική όσο και για στρατιωτική χρήση, χωρίς ωστόσο να περιλαμβάνει αναλυτική τεχνική περιγραφή.

Μια ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας στον τομέα της ενεργητικής και παθητικής ανίχνευσης UAS, παρουσιάστηκε από τους J.Patel, Fioranelli και Anderson στο [28], χωρίς να περιλαμβάνει τις ακουστικές μεθόδους (μόνον RF συχνότητες).

Ακόμη εκτενέστερη ως προς τον αριθμό των μεθόδων που αναλύθηκαν και τους τύπους UAS που συμμετείχαν σε δοκιμές είναι η εργασία των Farlik, Kratky, *et al.* [17]. Συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν για μεθόδους που περιλαμβάνουν την απλή οπτική και ακουστική ανθρώπινη παρατήρηση, αισθητήρες IR, οπτικές συσκευές (κιάλια, διόπτρες) και τέλος X-band ραντάρ. Επιπλέον, το RCS 4 ευρέως διαδεδομένων τύπων UAS προσδιορίστηκε πειραματικά στην περιοχή 0.05 έως 0.2 dBsm. Τέλος, από τους συγγραφείς προτείνεται η χρήση συνδυασμού μεθόδων/αισθητήρων για την ανίχνευση UAS, ενώ έγινε μνεία και την νεοφυή πρόκληση της ανίχνευσης σμήνους UAS (UAS swarms).



Συναφώς προς το [28], στο [29] συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές που περιλαμβάνουν και τις μεθόδους ανίχνευσης με ακουστικές συχνότητες, όπως επίσης και τις προσομοιώσεις με λογισμικό ray-tracing, η οποία εκτιμάται ότι αδυνατεί να αναδείξει τα χαρακτηριστικά micro-Doppler της πτήσης ενός UAS.

Οι Shi, Yang, *et al.* [30] αφού περιέγραψαν 4 βασικές μεθόδους\τεχνολογίες ανίχνευσης UAS (ραντάρ, ήχος, βίντεο και RF), κατέγραψαν 7 υλοποιήσεις συστημάτων που έχουν παρουσιαστεί από τη βιομηχανία και χρησιμοποιούν συνδυασμούς των παραπάνω μεθόδων. Στη συνέχεια, πρότειναν τη δική τους υλοποίηση ενός c-UAS συστήματος με την ονομασία ADS-ZJU, το οποίο χρησιμοποιεί μόνον μεθόδους παθητικής ανίχνευσης (ήχο, βίντεο και RF) ενσωματώνοντας τεχνικές μηχανικής μάθησης.

### 2.2.1. Ενεργητικές Μέθοδοι – Προσδιορισμός RCS

Δεδομένα από το ραντάρ AEXAR (μια πειραματική παραλλαγή του PicoSAR της Leonardo) χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με ένα φίλτρο Bernoulli Gaussian Sum στο [31]. Με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ραντάρ και μια εκτίμηση του RCS στόχου στα -24.6 dBsm, προσδιορίστηκε από την εξίσωση ραντάρ η μέγιστη απόσταση ανίχνευσης στα 1.2 km. Οι δοκιμές της διάταξης σε ανοιχτό χώρο, έδειξαν επιτυχή παρακολούθηση του στόχου σε απόσταση ~950 m.

Χρησιμοποιώντας ένα CW step-frequency (CWSF) ραντάρ στα 16.8 GHz με ισχύ εκπομπής 30 dBm (αρχικά σχεδιασμένο για έλεγχο δομικών κατασκευών [32]), οι Pieraccini και Miccinesi [33] συσχέτισαν το ρυθμό περιστροφής των πτερύγων ενός UAS με το φαινόμενο κατά το οποίο η εκτιμώμενη από το ραντάρ απόσταση του κινούμενου στόχου (πτέρυγα ή UAS), παρουσιάζει ένα εύρος τιμών (range spread) γύρω από μια κεντρική τιμή. Κατά τις δοκιμές ελέγχθηκε η περιστροφή μιας μεμονωμένης πτέρυγας σε απόσταση περί τα 11 m από το ραντάρ και ένα μικρό εμπορικό UAS, η κίνηση του οποίου ανιχνεύθηκε σε απόσταση 10 έως 20 m.

Στο [34] παρουσιάστηκε η χρήση ενός Gunnplexer στην X-band (10.5 GHz) στην ανίχνευση και ταυτοποίηση UAS. Πρόκειται για σχετικά απλή υλοποίηση, σχεδιασμένη για να τοποθετείται πάνω σε UAS αρχικά ως σύστημα αποφυγής σύγκρουσης (TCAS – Traffic Collision Avoidance

System) και με περιορισμένες δυνατότητες ανίχνευσης/ταυτοποίησης, χάρις στην επεξεργασία του Doppler στην έξοδο του Gunnplexer.

Η θεώρηση ότι τα υφιστάμενης τεχνολογίας κύρια ραντάρ (“primary radars”) κρίνονται ανεπαρκή στον τομέα της ανίχνευσης στόχων με χαμηλό RCS όπως τα UAS, παρουσιάζεται στο [35]. Η αλυσίδα της επεξεργασίας σήματος σ’ αυτούς τους τύπους ραντάρ, δεν εκμεταλλεύεται μέρος της διαθέσιμης πληροφορίας προς χάριν της ταχύτητας επεξεργασίας. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το ποσοστό αυτό πληροφορίας θα μπορούσε να βελτιώσει τη διακριτική ικανότητα του ραντάρ και να οδηγήσει στην ανίχνευση στόχων μικρού RCS. Στο προτεινόμενο νέο μοντέλο της αλυσίδας επεξεργασίας σήματος, το κύκλωμα απόφασης (“extractor”) του τελευταίου σταδίου της αλυσίδας, δεν εφαρμόζεται στο άθροισμα/ολοκλήρωση των παλμών/σημάτων στη λήψη του ραντάρ, αλλά απευθείας στους ίδιους επιστρεφόμενους παλμούς/σήματα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται περισσότερη πληροφορία για τα χαρακτηριστικά του στόχου, κάτι όμως που αυξάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ.

Ένα ubiquitous<sup>16</sup> ραντάρ FMCW στην X-band 8.75 GHz, με 500 MHz bandwidth και ισχύ εκπομπής 5 W χρησιμοποιήθηκε στα [36], [37], [38]. Η λήψη των επιστροφών του ραντάρ γίνεται με συστοιχία 8 κεραιών, παράγοντας πρωτογενή δεδομένα (raw data) με ρυθμό 3 Gbps γεγονός που επιβάλλει την offline επεξεργασία των δεδομένων. Ανίχνευση ενός DJI Phantom 4 πραγματοποιήθηκε σε απόσταση περί τα 2 km, ενώ με στατιστική ανάλυση των επιστροφών του ραντάρ, υπολογίστηκε το RCS του UAS κοντά στο 0.01 m<sup>2</sup> και ταξινομήθηκε στην κατηγορία στόχων SW1 κατά το [18]. Σε συνέχεια των παραπάνω εργασιών, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές [39] όπου η μέγιστη απόσταση ανίχνευσης έφτασε τα 3.2 km, επαληθεύτηκε ότι το RCS του UAS είναι της τάξης του 0.01 m<sup>2</sup>, ενώ διαφοροποιήθηκαν τα συμπεράσματα ως προς την κατάταξη του στόχου κατά Swerling [18], καθώς η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) του RCS δεν ακολουθεί πιστά την αντίστοιχη του μοντέλου της κατηγορίας SW1. Υπενθυμίζεται ο πειραματικός προσδιορισμός RCS 4 ευρέως διαδεδομένων τύπων UAS στην περιοχή 0.05 έως 0.2 dBsm που δημοσιεύτηκε στο [17].

---

<sup>16</sup> Συναντάται στη βιβλιογραφία και ως “staring” ή “holographic” ή “omnidirectional” ή “persistent” ραντάρ.

Μια εκτίμηση RCS μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό χώρο και στη συχνότητα των 2.4 GHz (S-band, Wi-Fi), δόθηκε στο [40] για ένα UAS Parrot AR Drone 2.0. Παρόλο που δεν υπήρξε μεγάλη ακρίβεια κατά τη βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας αντικείμενο γνωστού RCS, η μέση μετρηθείσα τιμή RCS προέκυψε μεταξύ -17.3 και -18.6 dBsm (0.019 και 0.014 m<sup>2</sup> αντίστοιχα).

Η χρήση των υπογραφών micro-Doppler για τη διάκριση ανάμεσα σε φυσικούς και τεχνητούς στόχους (πουλιά Vs UAS), διερευνήθηκε στο [41]. Μέσω της παρατήρησης διάφορων spectrogram με μεγάλο/μικρό χρόνο ολοκλήρωσης και cepstrogram, επιχειρήθηκε η αντιστοίχιση με παράγοντες όπως RCS, ταχύτητα στόχου, περιοδικότητα και συμμετρία φασματογραφήματος, εύρος φάσματος, ενώ διαπιστώθηκε και η αναγκαιότητα υψηλού ρυθμού δειγματοληψίας (μερικών δεκάδων kHz) για την ανάκτηση του φάσματος Doppler.

Στο [42] χρησιμοποιήθηκε interferometric radar στα 5.8 GHz, με bandwidth 300 MHz και ισχύ εκπομπής 19 dBm για την ανίχνευση ενός DJI Phantom 3. Παρακολούθηση της τροχιάς του αναφέρθηκε έως περίπου τα 10 m, ενώ λήφθηκαν και πληροφορίες για το micro-Doppler αποτύπωμα του UAS που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίησή του.

Τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών με τη χρήση ultra-wideband (UWB) ραντάρ για την ανίχνευση του ίδιου τύπου UAS, παρουσιάστηκαν στο [43]. Η μέση τιμή του RCS του UAS προσδιορίστηκε σε ανηχοϊκό θάλαμο στα -13 dBsm στα 24 GHz και λήφθηκαν μετρήσεις για το range profile του UAS σε πτήση σε απόσταση 3 – 7 m.

Προσομοίωση και πειραματικές μετρήσεις RCS της πτέρυγας ενός εμπορικού UAS DJI Phantom 2 παρουσιάστηκαν στο [44]. Οι μετρήσεις έγιναν στο εύρος L, S και C – band (1 – 6 GHz) και επιβεβαίωσαν την ισχυρή εξάρτηση του RCS από την πόλωση: μεγάλο RCS στο HH επίπεδο, 30-40 dB χαμηλότερο στο VV επίπεδο. Σημειώνεται ότι το μετρούμενο RCS ήταν σημαντικά μικρότερο (κατά 60 dB περίπου) του αναμενόμενου από τις προσομοιώσεις, οι οποίες έγιναν θεωρώντας υλικό κατασκευής το αλουμίνιο. Επιπλέον, ένα πειραματικό pulsed Doppler ραντάρ με την ονομασία netRAD στα 2.4 GHz και ισχύ 0.2 W, χρησιμοποιήθηκε σε ανοιχτό πεδίο και σε αποστάσεις πτήσεων 70 – 150 m για την επιβεβαίωση των συμπερασμάτων σχετικά με τη σχέση της πόλωσης με το επιστρεφόμενο σήμα.

Στο [45] συνεχίστηκε η παραπάνω εργασία και το πολυστατικό ραντάρ netRAD χρησιμοποιήθηκε με 1 κόμβο Tx/Rx και 2 κόμβους Rx για την ανίχνευση και ταυτοποίηση ενός DJI Phantom 2, υπό διαφορετικά σενάρια πτήσης (χωρίς φορτίο και μεταφέροντας φορτία 200/300/400/500 g) προκειμένου να παρατηρηθεί η επίδραση του payload και κατ' επέκταση του RCS στην ανιχνευσιμότητα του UAS. Τεχνικές machine learning χρησιμοποιήθηκαν για την ταυτοποίηση ενώ σύμφωνα με τους συγγραφείς, από την ανάλυση των δεδομένων τους προκύπτει ότι η πολυστατική διάταξη ραντάρ υπερέρχει της μονοστατικής για το συγκεκριμένο τύπο εφαρμογής.

Μια ακόμη εργασία προσομοίωσης του RCS ενός DJI Phantom 3 Advanced Vision [46], τοποθετεί το RCS του UAS για τη συχνότητα των 10 GHz μεταξύ  $0.01 \text{ m}^2$  έως  $2.34 \text{ m}^2$  (ή  $-20$  έως  $3.69 \text{ dBsm}$ ). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η μεγαλύτερη συνεισφορά στο RCS προέρχεται από την κεντρική πλακέτα ελέγχου του UAS, ενώ ακολουθεί η μπαταρία και το σύστημα gimbal με την κάμερα. Τα συμπεράσματα της εργασίας έρχονται σε συμφωνία με αυτά του [47], όπου το RCS (με γωνία θέασης την κάτω όψη) του UAS προσδιορίστηκε στα  $-15$  έως  $-5 \text{ dBsm}$  για την X – band.

### 2.2.2. Παθητικές Μέθοδοι

Ερευνητικές προσπάθειες για εκτίμηση παραμέτρων πτήσης αεροπλάνων με τη χρήση ακουστικών αισθητήρων ανευρίσκονται ήδη από τη δεκαετία του '80 ([48], [49], [50]). Ακολούθησε η διερεύνηση narrowband τεχνικών, δανεισμένων από την ήδη ώριμη τεχνολογία radar, χρησιμοποιώντας ένα μόνο αισθητήρα/μικρόφωνο [51].

Το ζήτημα της παθητικής ανίχνευσης επίγειων και ιπτάμενων οχημάτων καθώς και των κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας narrowband και wideband σημάτων, άρχισε να μελετάται περισσότερο εντατικά από τη δεκαετία του '90 ([52], [53]). Παρατηρείται ότι το ηχητικό αποτύπωμα των ιπτάμενων μέσων, παρουσιάζει περισσότερο στατικό (stationary) φασματικό αποτύπωμα σε σχέση με τα επίγεια οχήματα [54]. Η χρήση του φασματικού αυτού περιεχομένου και τα εξαγόμενα ίχνη των αρμονικών συχνοτήτων (“frequency tracks”) για την συσχέτιση με οχήματα – στόχους διερευνήθηκε στο [55].

Πολλαπλές δοκιμές της χρήσης παθητικών αισθητήρων πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του TTCP-AG6 (The Technical Cooperative Program – Action Group 6) για την ακουστική ανίχνευση και παρακολούθηση UAS. Για το υπόψη εγχείρημα, συγκεντρώθηκαν ηχητικά δείγματα από 4 διαφορετικά UAS σταθερών πτερύγων [56], χρησιμοποιώντας 2 συστοιχίες μικροφώνων: μία 16 στοιχείων σε διάταξη σταυρού (“16-X Array”) και μια 4 στοιχείων σε διάταξη «L» (“4-L Array”). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα [54] και [57] από τους συγγραφείς, είναι δυνατή η επίτευξη ανίχνευσης και εκτίμησης κατεύθυνσης άφιξης σε απόσταση έως 2 km.

Μια προσπάθεια ανίχνευσης επίγειων οχημάτων χρησιμοποιώντας ισχυρά χαρακτηριστικά (“robust features”) του εκπεμπόμενου ήχου παρουσιάστηκε στο [58]. Η μέθοδος διαφοροποιείται από τη μέθοδο συσχέτισης αρμονικών γραμμών (HLA – Harmonic Line Association), εκμεταλλεύομενη μόνο τα δυναμικά χαρακτηριστικά της επικρατέστερης/ισχυρότερης αρμονικής. Από μια βάση δεδομένων περίπου 200 ακουστικών υπογραφών από 6 διαφορετικά οχήματα, εξετάστηκαν οι STFT και RID (Reduced Interference Distribution) κατανομές χρόνου-συχνότητας. Εξετάζοντας μια σειρά από πιθανά χαρακτηριστικά όπως λόγος συχνοτήτων μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> ισχυρότερου σήματος, μέσο εύρος φάσματος ισχυρότερου σήματος, κ.ά., οι συγγραφείς κατέληξαν σε μια σειρά 8 χαρακτηριστικών, η χρήση των οποίων έδωσε κατά 75% μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατηγοριοποίηση των υπόψη οχημάτων.

Η εφαρμογή narrowband και wideband τεχνικών, διερευνήθηκε από τους Lo και Ferguson [59], [60] τόσο σε αεροχήματα σταθερών πτερύγων όσο και αντίστοιχα turboprop με περιστροφικές πτέρυγες. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε 5 αισθητήρες σε διάταξη σταυρού – 4 στις γωνίες ενός τετραγώνου πλευράς 10 m, 1 τοποθετημένος στο κέντρο – και λήφθηκαν μετρήσεις από 39 πτήσεις μέσω, εξάγοντας χαρακτηριστικά πτήσης όπως ταχύτητα, απόσταση, γωνίες αζιμούθιου και ανύψωσης. Σημειώνεται ότι η συστοιχία χρησιμοποιήθηκε και για τη μελέτη ακουστικού αποτυπώματος επίγειων μέσω στο [60].

Ανάλυση του ακουστικού σήματος ενός τακτικού UAS (TUAV – Tactical Unmanned Aerial Vehicle) πραγματοποιήθηκε από τους ίδιους συγγραφείς [61]. Παρατηρήθηκε ότι ο ήχος που εκπέμπει το UAS, περιέχει ισχυρούς αρμονικούς τόνους στενής ζώνης υπερτιθέμενους σε τυχαία ευρείας ζώνης συνιστώσα. Το στενής ζώνης φασματικό περιεχόμενο εμφανίζεται στην περιοχή

κάτω του 1 kHz ενώ το ευρείας ζώνης στην περιοχή έως 4 kHz. Η λήψη του σήματος για narrowband επεξεργασία έγινε από 1 αισθητήρα ενώ για το broadband από μια διάταξη 3 αισθητήρων σε διάταξη ισόπλευρου τριγώνου πλευράς 0.7 m. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο ανίχνευσης η ορατότητα αρμονικών γραμμών και εξήχθησαν πληροφορίες για την ταχύτητα του UAS με μέγιστη αναφερόμενη απόσταση ανίχνευσης το 1.4 km. Στη δεύτερη χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ετεροσυσχέτισης των σημάτων από τους 3 αισθητήρες με κριτήριο ανίχνευσης την ευδιάκριτη σχετική χρονική καθυστέρηση άφιξης του σήματος στους αισθητήρες ενώ εξήχθησαν πληροφορίες για την τροχιά του UAS με μέγιστη αναφερόμενη απόσταση ανίχνευσης τα 2.8 km. Σημειώνεται ότι δε δίνονται στοιχεία για το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό όπως κινητήρας\έλικες του UAS, αισθητήρες, συσκευές καταγραφής δεδομένων.

Μια ακόμα σειρά μετρήσεων πάνω στο ηχητικό αποτύπωμα TUAV πραγματοποιήθηκε από τους Massey και Gaeta [62]. Χρησιμοποιήθηκαν 4 μικρόφωνα σε διάταξη σταυρού για τη στατική μέτρηση (όχι σε πτήση) και 5 μικρόφωνα σε παρόμοια διάταξη -με ένα επιπλέον στο κέντρο- κατά τις πτήσεις. Το UAV της εργασίας ήταν ένα δίχρονο, δικύλινδρο ελικοφόρο TUAV, το ακουστικό ίχνος του οποίου σύμφωνα με τους συγγραφείς ήταν ορατό ακόμα και σε απόσταση 7.500 ft (~2.29 km).

Χρησιμοποιώντας COTS (Commercial Off-The-Shelf) εξοπλισμό, μια γραμμική συστοιχία 24 μικροφώνων παρουσιάστηκε στο [63] για την ανίχνευση και παρακολούθηση της τροχιάς μικρού UAV. Στην εργασία δόθηκε έμφαση στην αρχική ρύθμιση (calibration) της συστοιχίας και αξιοποιήθηκε η πληροφορία της χρονικής διαφοράς άφιξης (TDOA – Time Difference of Arrival) μέσω τεχνικής beamforming για την εκτίμηση του ίχνους πτήσης μικρού τηλεχειριζόμενου UAV, εντός ενός τομέα  $\pm 45^\circ$  από το κέντρο της συστοιχίας χωρίς να αναφέρεται η μέγιστη απόσταση στην οποία επιτεύχθηκε η ανίχνευση.

Προς την κατεύθυνση ανάπτυξης ενός συστήματος χαμηλού SWaP-C (Size, Weight, Power and Cost), στο [64] υλοποιήθηκε συστοιχία 4 μικροφώνων σε διάταξη τετράεδρου για την ανίχνευση ενός UAS Class I. Η αποτίμηση της επίδοσης των αλγόριθμων ανίχνευσης και παρακολούθησης, οι οποίοι βασίστηκαν σε προσαρμοστικό φίλτρο Kalman με είσοδο από delay-and-sum beamformer, έγινε μέσω χαρακτηριστικών καμπύλων λειτουργίας δέκτη (ROC – Receiver

Operating Characteristic). Η καλύτερη επίδοση του συστήματος ανίχνευσης παρατηρήθηκε μετά από φιλτράρισμα του ηχητικού σήματος στη ζώνη 800 – 1700 Hz, με 99.5% πιθανότητα ανίχνευσης και 3% ρυθμό false positive ενδείξεων για απόσταση κάτω από 600 m, ενώ η αντίστοιχη επίδοση των αλγόριθμων παρακολούθησης γωνίας και ανύψωσης κρίθηκε μη ικανοποιητική.

Συστοιχία 16 μικροφώνων (6, 6, 4 στους άξονες x, y και z αντίστοιχα) χρησιμοποιήθηκε από τους Tong, *et al.* στο [65] προκειμένου να συλλεχθούν ακουστικά σήματα από 4 τύπους ιπτάμενων οχημάτων: 2 μικρά αεροπλάνα (XT-912, LB-3C) και 2 UAS (DH-II, DH-III). Με την επεξεργασία των αρμονικών γραμμών που παρατηρήθηκαν στην περιοχή κάτω των 2 kHz και λαμβάνοντας υπόψη την καταστροφική συμβολή των συνιστωσών του ήχου λόγω πολλαπλών ανακλάσεων, σύμφωνα με τους συγγραφείς επιτεύχθηκε η εκτίμηση χαρακτηριστικών πτήσης των οχημάτων (ταχύτητα, ύψος και θεμελιώδης συχνότητα) σε απόσταση ~550 m για τα μικρά αεροπλάνα και ~430 m για τα UAS.

Δύο μέθοδοι που στηρίζονται στην ανίχνευση του ακουστικού σήματος των UAS, διερευνήθηκαν από τους Mezei, *et al.* στο [66]. Πρόκειται για τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης με γνωστό προηχογραφημένο σήμα και του ακουστικού αποτυπώματος (“*Audio Fingerprinting*”), κατά την έννοια που αυτό χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογές αυτόματης αναγνώρισης μουσικού περιεχομένου, όπως π.χ. το Shazam. Κατά τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν πολύ βασικά εργαλεία τόσο για τη δειγματοληψία του ήχου όσο και για την επεξεργασία των σημάτων, με αποτέλεσμα πενιχρές επιδόσεις στην ανίχνευση, τουλάχιστον όσον αφορά την απόσταση (1 με 2 m).

Παθητική ανίχνευση και παρακολούθηση UAS μέσω κάμερας χρησιμοποιώντας COTS υλικά και κόστος ~115\$ παρουσιάστηκε στο [67]. Το πρωτότυπο που αναπτύχθηκε διέθετε μια κάμερα με ανάλυση 640x480 και frame rate 30 fps, η οποία μέσω του αλγόριθμου SURF (**S**peed **U**p **R**obust **F**eatures) επιχείρησε την ταυτοποίηση UAS και το διαχωρισμό τους από άλλα αντικείμενα. Οι δοκιμές έγιναν τόσο σε κλειστούς όσο και ανοιχτούς χώρους, με μέγιστη απόσταση ανίχνευσης σε ανοιχτό χώρο με καθαρό ουρανό περίπου στα 60 m.

Το ακουστικό σήμα από τετρακόπτερο (“X4”) και οκτακόπτερο (“X8”) UAS μελετήθηκε στα [68], [69] και [70]. Μετρήθηκε η ακουστική ένταση για διάφορα ύψη πτήσης του οκτακόπτερου,

το κύριο φασματικό περιεχόμενο του σήματος εντοπίστηκε στο εύρος 1 – 4 kHz (για τα τετρακόπτερα) και 1 – 8 kHz (για το οκτακόπτερο) και χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές συχνότητας Mel cepstrum (MFCCs) για την εξαγωγή χαρακτηριστικών του ήχου. Τα συμπεράσματα των εργασιών συμφωνούν με τα διαισθητικά αναμενόμενα αναφορικά την πτώση της ακουστικής έντασης του μηχανικού ηχητικού σήματος με την απόσταση από την πηγή και τη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του σήματος σε συνάρτηση με το ύψος πτήσης.

Συνδυασμός παθητικών μεθόδων (ακουστικές συχνότητες, βίντεο και RF συχνότητες για τον εντοπισμό της ζεύξης UAS – χειριστή) παρουσιάστηκε όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη Ενότητα από τους Shi, Yang, *et al* [30]. Το εν λόγω σύστημα ADS-ZJU σύμφωνα με τους συγγραφείς, επέτυχε συνδυασμένη πιθανότητα ανίχνευσης 94% στα 80m και 97.3% στα 100 m για 10.000 πτήσεις ενός DJI Phantom 4. Σημειώνεται ότι για την ανίχνευση χρησιμοποιήθηκε επιβλεπόμενη μάθηση (“*supervised learning*”) χωρίς να δίνονται λεπτομέρειες για το γραμμικό SVM (LSVM – Linear Support Vector Machine) κατά την εκπαίδευση των classifiers.

Μια προσπάθεια για την ανίχνευση και ταυτοποίηση UAS μέσω «ακρόασης» της ζεύξης χειριστηρίου – σκάφους παρουσιάστηκε από τους Ezuma *et al.* [71]. Με βάση τα φασματογραφήματα του σήματος εκπομπής από τα χειριστήρια 14 διαφορετικών τύπων UAS στη συχνότητα των 2.4 GHz, εξάγονται στατιστικά στοιχεία της μορφής τους ( $\gamma, \sigma^2, H, k$ ) που χρησιμοποιούνται ως «υπογραφή» ενός εκάστου. Διερευνήθηκαν διάφοροι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για την ταυτοποίηση και για διαφορετικούς SNR, ενώ οι δοκιμές έγιναν σε κλειστό χώρο εργαστηρίου και σε αποστάσεις 5 – 80 m που αντιστοιχούσαν σε SNR 10 – 25 dB. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το σύστημα ήταν σε θέση να εντοπίσει όλα τα UAS των δοκιμών, όταν ο SNR ήταν μεγαλύτερος των 12 dB.

Παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε στο [72] για την ανίχνευση/κατηγοριοποίηση τριών τύπων εμπορικών UAS (Bebop, AR και Phantom 3). Τα αποτυπώματα των ζεύξεων RF των εν λόγω UAS καταχωρήθηκαν σε open source βάση δεδομένων διαθέσιμη online<sup>17</sup>. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν τεχνικές machine learning για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σε διάφορα

---

<sup>17</sup> <http://dx.doi.org/10.17632/f4c2b4n755.1>



σενάρια πτήσεων (UAS προσγειωμένο, σε αιώρηση, καταγράφοντας βίντεο), χωρίς να γίνεται μνεία για την απόσταση και τις συνθήκες που αυτό επιτεύχθηκε.

Στο [73] χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές όρασης υπολογιστών και μηχανικής μάθησης για τον εντοπισμό drone σε εικόνα ή βίντεο. Δημιουργήθηκε ένα τεχνητό dataset από τυχαίες εικόνες και βίντεο που περιέχουν απεικονίσεις UAS και πουλιών και κατόπιν χρησιμοποιήθηκε η YOLOv2 ([74], [75]) ως τεχνική μηχανικής μάθησης. Στην εργασία δεν αναφέρθηκαν χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός ή/και απόσταση επιτυχούς ταυτοποίησης.

Εικόνες στο φάσμα του ορατού φωτός και των υπέρυθρων, χρησιμοποιήθηκαν στο [76] για την αναγνώριση μικρών UAS από αλγόριθμο μηχανικής μάθησης. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσίασε εφάμιλλη απόδοση με τους baseline αλγόριθμους κατά τις δοκιμές που έγιναν με στατική κάμερα και σε άγνωστη απόσταση από το στόχο.

Στο [77] εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης συντελεστών γραμμικής προγνωστικής κωδικοποίησης (LPC – **L**inear **P**redictive **C**oding) για τη διάκριση του ηχητικού σήματος ελικοφόρων UAS έναντι σήματος από κινητήρα diesel. Η εκτίμηση των συγγραφέων είναι ότι επαρκούν οι 8 πρώτοι συντελεστές LPC ώστε να ταυτοποιηθεί ο τύπος του UAS, χωρίς ωστόσο να δίνονται πληροφορίες για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, για την απόσταση ανίχνευσης ή για τον αριθμό των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Μια μεθοδολογία για την ανίχνευση παρουσίας μικρού UAS μέσα σε κλειστό περιβάλλον, παρουσιάστηκε στο [78], πραγματοποιώντας μετρήσεις του παραγόμενου ήχου κατά τη πτήση. Προκαταρκτικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ανηχοϊκό θάλαμο, και κατόπιν εντός βιομηχανικής αποθήκης χρησιμοποιώντας ως πηγή ανθρωπογενούς ήχου (μουσικής και θορύβου) ένα ηχείο. Το UAS τοποθετήθηκε πάνω σε τρίποδο και οι μετρήσεις λήφθηκαν με sound level meter τοποθετημένο σε αποστάσεις 5, 10 και 15 m από το τρίποδο. Διαπιστώθηκε η ύπαρξη τονικής συνιστώσας (tonal component) στη συχνότητα των 5.000 Hz, η οποία σύμφωνα με τους συγγραφείς αποτελεί τη «χαρακτηριστική» συχνότητα του συγκεκριμένου τύπου UAS: ενός τετρακόπτερου από υλικό κατασκευής ABS (**A**crylonitrile-**B**utadiene-**S**tylene) και διαστάσεις 31 x 31 x 12 cm (Μήκος x Πλάτος x Ύψος). Σε άλλη εργασία με παρόμοιο τύπο UAS [79], το κύριο φασματικό περιεχόμενο του ακουστικού σήματος ενός DJI Mavic με μέσο

ρυθμό περιστροφής των πτερύγων του στις 6.000 rpm εντοπίζεται στην περιοχή συχνοτήτων χαμηλότερη των 3 kHz.

Συνδυασμός οπτικών αισθητήρων και μικροφώνων χρησιμοποιήθηκε από τους Christnacher, *et al.* στο [80]. Το κομμάτι της ηχητικής ανίχνευσης υλοποιείται από μια συστοιχία 4 μικροφώνων σε διάταξη τετράεδρου, χρησιμοποιώντας τεχνικές beamforming, η οποία σύμφωνα με τους συγγραφείς πέτυχε την παρακολούθηση της τροχιάς mini UAS όπως το DJI Phantom 2 και τριών παρεμφερών, σε απόσταση 100 m έως 300 m. Για την οπτική ανίχνευση, υπέρυθρη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (SWIR – **Short-Wave Infrared**) χρησιμοποιείται για να «φωτίσει» μια περιοχή, ενώ μια κάμερα IR τροφοδοτεί την εικόνα σε ένα αλγόριθμο. Η “gated view” που παρέχει ο αλγόριθμος, καθιστά ευδιάκριτο το UAS τύπου Phantom μπροστά από clutter (όπως δάσος), σε απόσταση έως και 1 km.

Στο [81], γίνεται προσπάθεια εκμετάλλευσης του σήματος από Wi-Fi router που χρησιμοποιείται ως περιστασιακός εκπομπός (“illuminator of opportunity”) ενώ το σήμα λαμβάνεται από 3 κεραιές λήψης. Δοκιμές έγιναν για την ανίχνευση μικρού διαθέσιμου αεροπλάνου και μικρού UAS, καταφέροντας την παρακολούθηση της τροχιάς τους σε τρεις διαστάσεις στα περίπου 100 m και 40 m αντίστοιχα. Παρόμοια, μια διάταξη κεραιών που λειτουργεί ως πολυστατικό ραντάρ εκμεταλλευόμενο το σήμα της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης ως illuminator of opportunity [υλοποίηση **M**ultiple **S**ingle-Antenna **D**igital television based **P**assive **R**adar (MSDPR)] παρουσιάστηκε στο [82].

Το σύστημα AAD (**A**ircraft **A**coustic **D**etection) παρουσιάστηκε στο [83], πραγματοποιώντας αυτόματη ανίχνευση, ταξινόμηση και παρακολούθηση αεροσκάφους σε χαμηλή πτήση, με τη χρήση δικτύου παθητικών ακουστικών αισθητήρων που βρίσκονταν σε αυτόνομους κόμβους. Κάθε κόμβος διέθετε συστοιχία μικροφώνων και κάμερες, μαζί με τις παρελκόμενες ηλεκτρονικές διατάξεις. Η εργασία συνεχίστηκε στο [84] όπου ο μετασχηματισμός SRP-PHAT (**S**teered-**R**esponse **P**hase **T**ransform) διερευνήθηκε και αναφέρθηκε η ικανότητα του συστήματος για την ανίχνευση μικρού UAS σε αποστάσεις 294 m.

Παρατηρώντας ότι ο διαφορετικός ρυθμός περιστροφής των πτερύγων των UAS δημιουργεί περισσότερες από μια ομάδες αρμονικών στην «ακουστική υπογραφή», στο [85] παρουσιάστηκε

το DADS (**D**rone **A**coustic **D**etection **S**ystem). Δοκιμάζοντας διάφορες διατάξεις (3 κόμβους των τεσσάρων μικροφώνων που αποτελούμενα εσωτερικά από 15 μικρόφωνα έκαστο, 16 μικρόφωνα σε διάταξη σταυρού, συστοιχία OptiNav, μικρόφωνα shotgun, παραβολικά) πραγματοποιήθηκε εκτίμηση DOA, παρακολούθηση διάφορων μικρών UAS και ταυτοποίησή τους, διακρίνοντάς τα από άλλα πτητικά μέσα και πηγές ήχου όπως αυτοκίνητα, ελικόπτερα, κλπ. Το DADS δεν παρουσιάστηκε ως μια χαμηλού κόστους ή/και φορητή λύση και σύμφωνα με τους συγγραφείς, επέτυχε εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης ηχητικού σήματος ενός DJI Phantom 4 σε απόσταση έως 360 m κάτω από συνθήκες χαμηλού θορύβου.

Μια εκτενής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για την ακουστική αντίληψη (“auditory perception”) των UAV, παρουσιάστηκε στο [86]. Παρέχει ένα κατάλογο συστημάτων που αναπτύχθηκαν για διάφορους σκοπούς, ένας εκ των οποίων ήταν η ανίχνευση UAS. Όπως αναφέρεται στην εργασία, δεν υπάρχει μια τυποποιημένη μετρική απόδοσης που χρησιμοποιείται σε όλες τις υλοποιήσεις, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη σύγκρισή τους. Οι συγγραφείς ταξινόμησαν τις εργασίες ανάλογα με την τον αριθμό των μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν, τις τεχνικές εντοπισμού, κ.ο.κ.

### 2.2.3. Συνδυαστικές – Καινοτόμες Μέθοδοι

Η δυνατότητα ανίχνευσης με τη χρήση COTS τεχνολογιών διερευνήθηκε στο [87]. Στον τομέα των ενεργητικών μεθόδων, α) επαληθεύτηκε η δυνατότητα ανίχνευσης μέσω ανάλυσης του σήματος που ανακλάται από τις έλικες του UAS σε απόσταση περί τα 5 m με τη χρήση της κάρτας prototyping WARP (Mango Communications – διεκόπη η παραγωγή της) χωρίς να παρέχονται στοιχεία για το κέρδος ή/και το είδος των κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές και β) αναφέρθηκε -χωρίς ανάλυση- η σχέση της επιστρεφόμενης ισχύος σήματος (RSS – **R**eceived **S**ignal **S**trength) με τις ταλαντώσεις του σκάφους του UAS. Ως παθητική μέθοδος παρουσιάστηκε η «ακρόαση» των σημάτων επικοινωνίας του UAS με το χειριστήριο, με τη χρήση της κάρτας SDR USRP Ettus B200 σε συνδυασμό με κεραία πάνελ κέρδους 6 dBi· το λαμβανόμενο σήμα κατέστη δυσδιάκριτο μόλις η απόσταση από το χειριστήριο πλησίασε τα 50 m.

Η αυτόματη αναγνώριση στόχου (ATR – **A**utomatic **T**arget **R**ecognition) από «γνωστικό» ραντάρ (“cognitive radar”), είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με την ενσωμάτωση τεχνολογιών μηχανικής μάθησης. Στο [88] μελετήθηκε η παραπάνω δυνατότητα με τη χρήση ενός πειραματικού CW ραντάρ στα 9.5 GHz και συχνότητα δειγματοληψίας 96 kHz. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν 5 τύποι UAV – UAS: 2 σταθερών πτερύγων, 1 μικρού μεγέθους ελικόπτερο, 1 οκτακόπτερο και 1 τετρακόπτερο. Το σήμα του ραντάρ, αφού μετατραπεί σε φάσμα micro-Doppler μέσω STFT, χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση αλγόριθμου deep learning μαζί με εικόνες φασμάτων micro-Doppler που προέκυψαν από προσομοιώσεις απλοποιημένων μοντέλων σύμφωνα με το [89]. Η καλύτερη επίδοση από τα διάφορα test cases των πειραμάτων έδωσε ακρίβεια της τάξης του 97.7%, χωρίς να αναφέρεται η απόσταση στην οποία αυτή επιτεύχθηκε.

Συνδυασμός μεθόδων ανίχνευσης σε ένα περιμετρικό δίκτυο αισθητήρων (netted sensor fence) πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο proof-of-concept στο [24]. Κατά τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν 3 κόμβοι αισθητήρων, καθένας από τους οποίους περιελάμβανε ένα NobelTec IR2 X-band ναυτικό ραντάρ και μια τετραγωνική συστοιχία 4 μικροφώνων B&K. Στον κεντρικό κόμβο ελέγχου, τοποθετήθηκε κάμερα IR για την τελική διαδικασία κατηγοριοποίησης στόχου, ο οποίος ήταν ένα μικρό αεροπλάνο Beech BE-76 Duchess. Η ανίχνευσή του επετεύχθη σε απόσταση περίπου 800 m.

Μια μέθοδος ανίχνευσης βασισμένη στο θερμικό αποτύπωμα των UAS παρουσιάστηκε στο [90]. Η υλοποίηση περιελάμβανε μια μικρή θερμική κάμερα (FLIR Lepton) συνδεδεμένη σε ένα Raspberry Pi και επιχειρήθηκε η ανίχνευση τριών μοντέλων UAS: ενός Parrot AR Drone 2, ενός DJI Phantom 4 και ενός custom made εξακόπτερου σχεδόν διπλάσιου μεγέθους σε σχέση με το Phantom. Όπως διαπιστώθηκε, η κυριότερη πηγή θερμικής ενέργειας είναι η μπαταρία των UAS (και όχι οι πολύστροφοι ηλεκτροκινητήρες των ελίκων, όπως αναμενόταν) και η ακτίνα ανίχνευσης ανήλθε σε 41 m για το μικρό, 51 m για το μεσαίο και πλέον των 100 m για το μεγάλο UAS της δοκιμής αντίστοιχα.

Το ραντάρ Flir Ranger R6SS-U-3D με συχνότητα λειτουργίας στην X-band και τυπική ισχύ 85W, χρησιμοποιήθηκε [12] για την ανίχνευση ενός UAS DJI Phantom 2. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εν λόγω ραντάρ, η αναμενόμενη απόσταση ανίχνευσης UAS με RCS της

περί τα  $0.01 \text{ m}^2$  ήταν το  $1 \text{ km}$ . Μετά την πραγματοποίηση δοκιμών, η επιτευχθείσα απόσταση ανίχνευσης ήταν μεγαλύτερη των  $700 \text{ m}$ , η δε ακρίβεια υπολογισμού ανύψωσης του στόχου ήταν της τάξης των  $1.3^\circ$ . Το ποσοστό επιτυχημένων ταξινομήσεων στόχου για την κλάση με το υψηλότερο ποσοστό ταυτοποιήσεων (ανάμεσα σε κατηγορίες όπως «άνθρωπος», «όχημα», "UAS" και «πουλί») φτάνει στο  $86\%$ , αξιοποιώντας πληροφορίες για το πλάτος του επιστρεφόμενου σήματος και χαρακτηριστικά Doppler.

Μια προσπάθεια ανίχνευσης με Ka-band ραντάρ περιγράφεται στο [91]. Από τις δύο καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος (λειτουργία «ευρείας περιοχής» και λειτουργία «στενής δέσμης» - "area" και "barrier" mode αντίστοιχα) δοκιμάστηκε μόνο το barrier mode. Χρησιμοποιήθηκε FMCW ραντάρ φέρουσας συχνότητας  $35 \text{ GHz}$  και bandwidth  $1 \text{ GHz}$  με 2 κεραίες λήψης στενής δέσμης ( $3^\circ$  στο αζιμούθιο), γωνία ανύψωσης  $30^\circ$  και ισχύ εκπομπής  $20 \text{ mW}$  και  $2 \text{ W}$ . Κατά τις δοκιμές, επιχειρήθηκε η ανίχνευση 2 τύπων UAS, ενός «μικρού» τετρακόπτερου DJI Phantom 2 και ενός «μεγάλου» οκτακόπτερου DJI S1000 Premium, τα οποία πραγματοποίησαν πτήσεις σε αποστάσεις  $30\text{-}90\text{m}$ , χωρίς να αναφέρεται σαφώς η απόσταση στην οποία επιτεύχθηκε η ανίχνευση για κάθε τύπο UAS. Τέλος, σημειώνεται ότι το ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε, είχε αναπτυχθεί στο πλαίσιο άλλης εργασίας με τίτλο "The use of microwave techniques for ground surface monitoring"<sup>18</sup>.

Στην Ku-band, η σχέση ανάμεσα στο SNR στην έξοδο του δέκτη και την πιθανότητα ανίχνευσης  $P_D$  διερευνήθηκε στο [92]. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση και εργαστηριακή μέτρηση σε ανηχοϊκό θάλαμο του RCS για 3 τύπους UAS (Iris+, X8 και High One) και στις συχνότητες  $3 \text{ GHz}$ ,  $9.7 \text{ GHz}$ ,  $15 \text{ GHz}$  και  $24.3 \text{ GHz}$ . Από τους συγγραφείς, σημειώνεται η υψηλή διακύμανση στο RCS των UAS, το οποίο ακολουθεί κατανομή « $\chi^2$ » (η διακύμανση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή) εξαιτίας των υλικών κατασκευής, της δομής του σκάφους και της σχετικής γωνίας ως προς τη δέσμη του ραντάρ. Σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς και τα κατασκευαστικά στοιχεία του ραντάρ (παλμικό ραντάρ, με ισχύ εκπομπής  $250\text{W}$ ), ανίχνευση UAS με ικανοποιητική πιθανότητα ανίχνευσης  $P_D$  μπορεί να γίνει μέχρι την

---

<sup>18</sup> (PBS1/A9/15/2012) με χρηματοδότηση του Polish Centre for Research and Development και υλοποίηση από το Warsaw University of Technology και το Air Force Institute of Technology.

απόσταση των 3 km. Οι πειραματικές ενδείξεις για την ανίχνευση των μεγαλύτερων από τα UAS του πειράματος με αρκούντως υψηλή  $P_D$ , δείχνουν απόσταση ανίχνευσης στα 1 έως 2 km.

Σε παρόμοια περιοχή συχνοτήτων (K-band, ~24.6 GHz) δοκιμάστηκε μια διάταξη «κατανεμημένου» FMCW ραντάρ (Distributed FMCW radar) [93]. Πρόκειται επί της ουσίας για δισταστικό ραντάρ, με απόσταση 12 m ανάμεσα σε κεραιές εκπομπής και λήψης, τοποθετημένες σε εξέδρες ύψους 3 m για την αποφυγή ανακλάσεων από το έδαφος. Η ιδιαιτερότητα αυτού του συστήματος, έγκειται στη χρήση οπτικών ινών για τη διασύνδεση των RF απαρτίων του radar, εξασφαλίζοντας χαμηλές απώλειες μετάδοσης, μεγάλο εύρος ζώνης και ευρωστία έναντι σε ΗΜ παρεμβολές. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ εκπομπής – λήψης, οδήγησε σε μείωση της διαρροής ενέργειας (leakage) κατά 75 dB σε σχέση με διάταξη μονοστατικού ραντάρ, επιτυγχάνοντας σύμφωνα με τους συγγραφείς υψηλή ευαισθησία και ανίχνευση εξακόπτερου UAS BumbleBee F820 σε απόσταση έως 500 m.

Η εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών micro – Doppler που προκαλείται από τη γρήγορη περιστροφή των πτερύγων μικρών UAS για την ταυτοποίησή τους διερευνήθηκε στο [94]. Ένα ιντερφερομετρικό ραντάρ CW με 2 κανάλια λήψης στα 24 GHz χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή μετρήσεων σχετικά με τη γωνιακή και την ακτινική ταχύτητα περιστροφής των πτερύγων, όπου κατόπιν εφαρμογής STFT προκύπτει χαρακτηριστική υπογραφή micro – Doppler. Στα συμπεράσματα της εργασίας, παρατηρείται πως η ύπαρξη πολλών πτερύγων με διαφορετική αρχική φάση περιστροφής, καθιστά δυσδιάκριτη την περιοδικότητα της διαμόρφωσης Doppler στη συνδυασμένη micro – Doppler υπογραφή.

Σε ακόμα υψηλότερες RF συχνότητες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στα [95] και [96]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν FMCW ραντάρ στα 94 GHz και ισχύ εκπομπής στα 100 mW: το SSRS (Scanning Surveillance Radar System) με bandwidth 750 MHz/20 cm range resolution και το MuRPS (Multi-Channel Radar for Perimeter Surveillance) με bandwidth 1 GHz/15 cm range resolution. Το πρώτο διέθετε στενή δέσμη  $1.25^\circ$  στο αζιμούθιο και χρησιμοποιήθηκε ως 2D ραντάρ για την ανίχνευση και παρακολούθηση ενός DJI Phantom σε αποστάσεις 5 m έως 100 m. Το δεύτερο διέθετε 4 κεραιές/κανάλια λήψης και 1 εκπομπής, ενώ αναφέρθηκε ανίχνευση ενός DJI Phantom σε απόσταση 80 m.

Μια μέθοδος που ενσωματώνει τεχνικές μηχανικής μάθησης στην αλυσίδα της επεξεργασίας σήματος ραντάρ προτάθηκε στο [97]. Χρησιμοποιήθηκε ένα X-band LFM CW ραντάρ επιτήρησης της IDS (Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.), στη συχνότητα των 9.35 GHz, με ισχύ εκπομπής 4 W και μεταβλητή ακτίνα αποκάλυψης από 600 m έως 4 km. Συνδυάζοντας τα δεδομένα (raw data) από τα I και Q κανάλια λήψης του ραντάρ, δημιουργείται ο πίνακας Range Profiles Matrix, ο οποίος αποτελεί και την είσοδο στο προτεινόμενο μοντέλο DNN (Deep Neural Network). Η συνολική ακρίβεια κατηγοριοποίησης στόχων από το μοντέλο υπολογίστηκε στο 95%, ενώ οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ρυθμίσεις ραντάρ για μικρό range και σε αποστάσεις  $\leq 450\text{m}$ .

Στο [98], χρησιμοποιώντας την αναλυτική έκφραση για τη baseband επιστροφή σήματος ραντάρ micro – Doppler, παρήχθησαν «συνθετικά» δείγματα στο πεδίο του χρόνου. Τα δείγματα αυτά, χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου, το οποίο επιχείρησε να εξάγει συμπεράσματα ως προς (α) τον αριθμό των ελίκων, (β) τον αριθμό των πτερύγων ανά έλικα, (γ) το μήκος των πτερύγων και (δ) τη συχνότητα περιστροφής κάθε έλικα ενός UAS. Συναφώς, στο [99] προσομοιώθηκε η εξαγωγή χαρακτηριστικών micro – Doppler από UAS χρησιμοποιώντας σταθμούς βάσης 5G ως πομπούς και λαμβάνοντας τις επιστροφές των στόχων μέσω ενός wideband ραντάρ. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σύμφωνα με τους συγγραφείς, υποδεικνύουν ότι είναι δυνατός ο προσδιορισμός των βασικών χαρακτηριστικών ενός UAS (πλήθος ελίκων, ταχύτητα περιστροφής) πλην όμως η ακρίβεια των μοντέλων σε όλα τα μετρούμενα μεγέθη, δεν επαληθεύτηκε από πραγματικές μετρήσεις.

Μια ανάλυση της χαρακτηριστικής επιστροφής ραντάρ (“*radar signature*”) μικρού UAS σε πτήση καθώς, των επιστροφών micro-Doppler του ρότορα των πτερύγων καθώς και του υπολογισμού χρόνων αποσυσχέτισης (“*decorrelation time*”) με τη χρήση διάφορων μεθόδων, παρουσιάστηκε στο [100]. Το ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές, είχε την ονομασία “Obsidian”, κατασκευασμένο από την εταιρία QinetiQ. Πρόκειται για ένα X-band FMCW ραντάρ, που διαθέτει πέντε (έως δέκα) βαθμίδες πομποδεκτών (TR modules). Κάθε TR module περιλαμβάνει κεραία εκπομπής και κεραία λήψης σε μορφή συστοιχίας, λειτουργώντας συνολικά ως “ubiquitous” ραντάρ με μεγάλα διαστήματα συναφούς ολοκλήρωσης από 0.2 s έως 0.5 s. Οι παραπάνω μεγάλοι χρόνοι, κατά τον συγγραφέα της εργασίας, επιτυγχάνουν υψηλή ανάλυση επιστροφών Doppler και χαμηλή ελάχιστη ανιχνεύσιμη ταχύτητα (MDV – Minimum

Detectable Velocity). Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια πτήσεων με διαφορετικές ταχύτητες, σε αποστάσεις 20 m έως 200 m από το ραντάρ· τα UAS που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Parrot AR Drone, DJI FJ550 και DJI Phantom 2. Στα συμπεράσματα της εργασίας σημειώνεται η εκτίμηση ότι στη σχεδίαση συστημάτων για την ανίχνευση και αναγνώριση UAS, ενδείκνυται μια σχετικά ευρεία δέσμη ραντάρ και σχετικά μεγάλοι χρόνοι παραμονής στο στόχο (“dwell time”).

Σε προηγούμενη εργασία [101] του ίδιου συγγραφέα, είχε εκτιμηθεί θεωρητικά η μορφή των επιστροφών ραντάρ (παρόμοιου τύπου με το [100]) διάφορων τύπων πτερυγών UAS. Από τα συμπεράσματα της εργασίας, σημειώνεται η παρατήρηση ότι όσο χαμηλότερη η συχνότητα παρατήρησης, η επιστρεφόμενη ενέργεια τείνει να συγκεντρώνεται σε μικρότερο αριθμό φασματικών γραμμών. Σε μια σειρά μετρήσεων στις συχνότητες 5 GHz, 10 GHz και 24 GHz, το φασματικό περιεχόμενο των επιστροφών του ραντάρ εντοπίστηκε στις περιοχές 0-2 kHz, 0-3.8 kHz και 0-10 kHz αντίστοιχα.

Η χρήση ακόμη ενός staring ραντάρ της εταιρίας QinetiQ παρουσιάστηκε στο [102]· πρόκειται για το ραντάρ Alarm™, ένα FMCW ραντάρ στην G-band (4-6 GHz), ισχύ εκπομπής περί τα 100 W, μια κεραία εκπομπής και 18 κεραίες λήψης που καλύπτουν τομέα 120° στο αζιμούθιο και 30° στο κατακόρυφο. Το ραντάρ αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε αρχικά για τον εντοπισμό και πρόβλεψη σημείου πτώσης βλημάτων, ενώ στην προκειμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν συμπεράσματα από τη σύγκριση των ραντάρ έρευνας (“scanning radars”) με τα staring ραντάρ. Για στόχους με Swerling Type 1 RCS (SW 1- όπως παρουσιάστηκαν στο [18]) φαίνεται ότι η επίδοση των ραντάρ έρευνας είναι οριακά καλύτερη από την αντίστοιχη των staring· εντούτοις, συνολικά εκτιμήθηκε ότι τα staring ραντάρ παρέχουν μεγαλύτερη βεβαιότητα στην ανίχνευση και παρακολούθηση στόχων τύπου UAV.

Μια καινοτόμα μέθοδος ανίχνευσης και ταυτοποίησης UAS με χρήση ραντάρ και τεχνικών μηχανικής μάθησης προτάθηκε στο [103], με την ονομασία merged Doppler image (MDI). Πρόκειται για συνδυασμό micro Doppler signature (MDS) και cadence – velocity diagrams (CVDs) σε ενιαία εικόνα που τροφοδοτείται ως είσοδος στο μοντέλο CNN GoogLeNet, αναπαριστώντας τα χαρακτηριστικά του σήματος Doppler τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Οι μετρήσεις έγιναν με ραντάρ FMCW 14 GHz, τόσο σε ανηχοϊκό

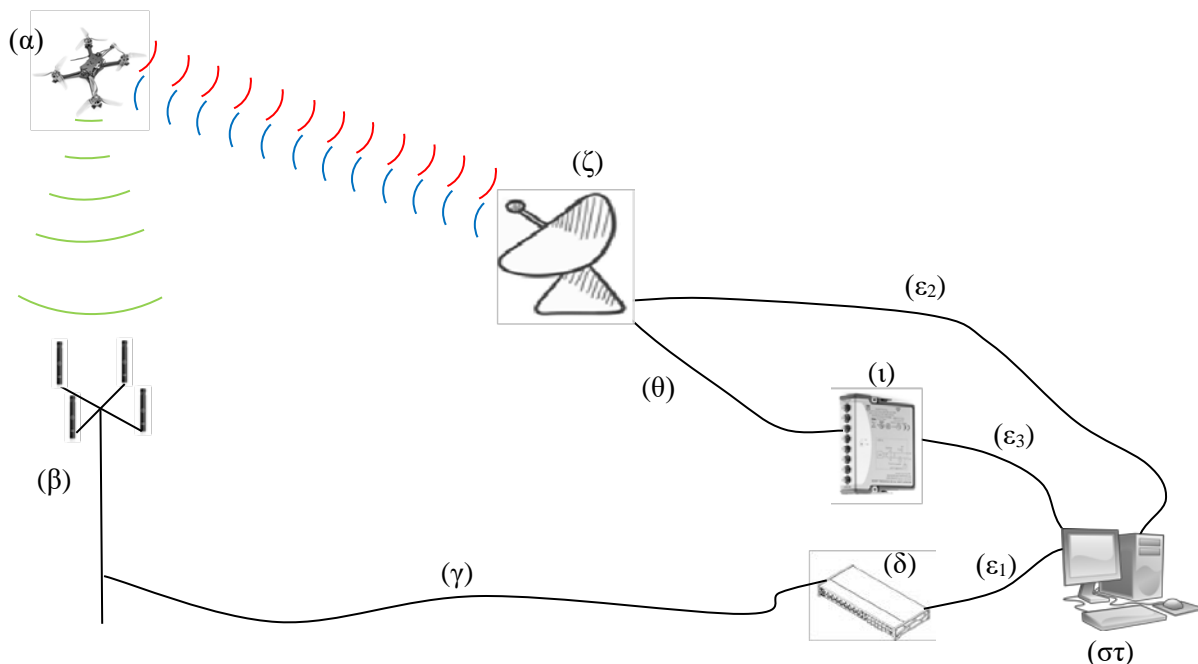


θάλαμο (με ισχύ εξόδου 1 W και απόσταση στόχου 5 m), όσο και σε ανοιχτό πεδίο (με ισχύ εξόδου 20 W και απόσταση στόχου 50/100 m), χρησιμοποιώντας 2 εμπορικά UAS (τετρακόπτερο DJI Inspire 1 και εξακόπτερο HobbyLord F820), επιτυγχάνοντας ανίχνευση και ταυτοποίηση.

Στο [104] παρουσιάστηκε μια εν εξελίξει πειραματική πλατφόρμα ικανή να δέχεται ως είσοδο στοιχεία από smartphone χρηστών που αντιλαμβάνονται UAS στο οπτικό τους πεδίο και να τα παρουσιάζει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο σε χάρτη. Οι χρήστες παρέχουν προσεγγιστικά δεδομένα για την πτήση των UAS τα οποία συνδυάζονται για να προβλέψουν την κίνησή τους, ενημερώνοντας ταυτόχρονα γειτονικούς χρήστες.

### 2.3. Γενική Περιγραφή Διάταξης – Λειτουργίας Πρωτότυπου Συστήματος Ανίχνευσης με Συνδυασμό Ενεργού Ραντάρ και Ακουστικών Αισθητήρων

Στην Εικόνα 2.4 περιγράφεται σχηματικά η διάταξη του προτεινόμενου ενοποιημένου συστήματος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους συστημάτων, θα παρουσιαστούν κατά περίπτωση στις αντίστοιχες ενότητες.



Εικόνα 2.4: Σχηματική περιγραφή ενοποιημένου συστήματος

Θεωρούμε ένα UAS ( $\alpha$ ) που πραγματοποιεί πτήση σε χώρο ενδιαφέροντος. Το σύστημα CW ραντάρ ( $\zeta$ ), εκπέμπει στη συχνότητα των 24 GHz και λαμβάνει τα ανακλώμενα κύματα από το UAS. Ο έλεγχος της κίνησης του ραντάρ γίνεται μέσω σύνδεσης USB ( $\epsilon_2$ ), ενώ η απόκτηση δεδομένων για την ολίσθηση Doppler (κανάλια I και Q) πραγματοποιείται από τη συσκευή DAQ ( $\iota$ ) η οποία συνδέεται με το ραντάρ με ομοαξονικά καλώδια 10-32 ( $\theta$ ) και μέσω USB ( $\epsilon_3$ ) με τον Η/Υ όπου γίνεται η συνολική επεξεργασία.

Παράλληλα, η συστοιχία μικροφώνων ( $\beta$ ) συλλαμβάνει το ακουστικό σήμα, το οποίο μέσω καλωδίων XLR ( $\gamma$ ) μεταφέρεται στην κάρτα ήχου ( $\delta$ ), όπου πραγματοποιείται μετατροπή ADC και δειγματοληψία με τον επιθυμητό ρυθμό (από 44.1 έως 96 kHz). Το USB interface της κάρτας ήχου, επιτρέπει τη σύνδεση μέσω καλωδίου USB ( $\epsilon_1$ ) ώστε το σήμα να μεταφέρεται στον Η/Υ ( $\sigma\tau$ ) προς επεξεργασία.

Για τους σκοπούς της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε κυρίως το μοντέλο Advanced της σειράς Phantom 3 της DJI (Εικόνα 2.5). Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο είναι: α) είναι ευρέως διαδεδομένο, β) διαθέσιμο σε καταστήματα λιανικής και γ) σχετικά οικονομικό.



*Εικόνα 2.5 Το UAS που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις της παρούσας διατριβής*

Στοιχεία του συγκεκριμένου drone στην έκταση που ενδιαφέρει την παρούσα, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.2 και αφορούν ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και πτητικές του δυνατότητες.

<b>Σκάφος</b>	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)
<b>Τηλεχειριστήριο</b>	Συχνότητα λειτουργίας	2.400 GHz-2.483 GHz
	Μέγιστη απόσταση μετάδοσης	3.5 km (χωρίς εμπόδια, χωρίς παρεμβολές)
<b>Μπαταρία</b>	Χωρητικότητα	4480 mAh
	Βάρος	365 g

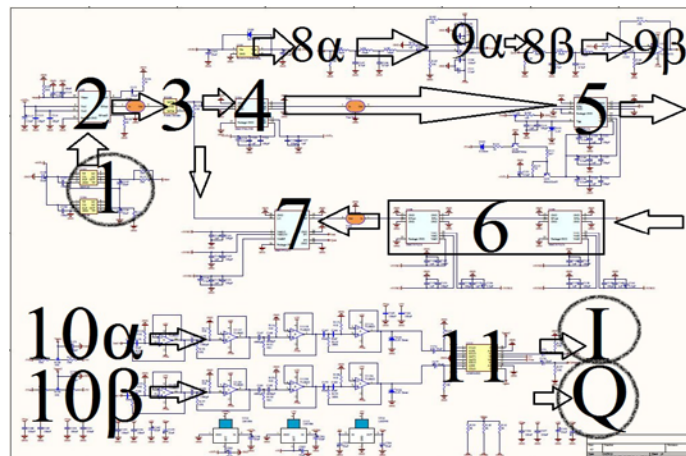
*Πίνακας 2.2 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά DJI Phantom 3 Advanced*

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

## 3.1. Ανίχνευση Πτήσης UAS με Ραντάρ CW Doppler

Η γενική αρχή λειτουργίας του ραντάρ έχει ως εξής: ένα συνεχές σήμα 24 GHz 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 η συχνότητα που θα λάβει ο δέκτης θα παρουσιάζει ολίσθηση από την αρχική των 24 GHz του πομπού. Η επεξεργασία αυτής της διαφοράς συχνότητας μας επιτρέπει να εντοπίσουμε κινούμενα αντικείμενα αλλά και να εξάγουμε πληροφορίες για την ταχύτητά τους.

Αναλυτικότερα, 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 24 GHz

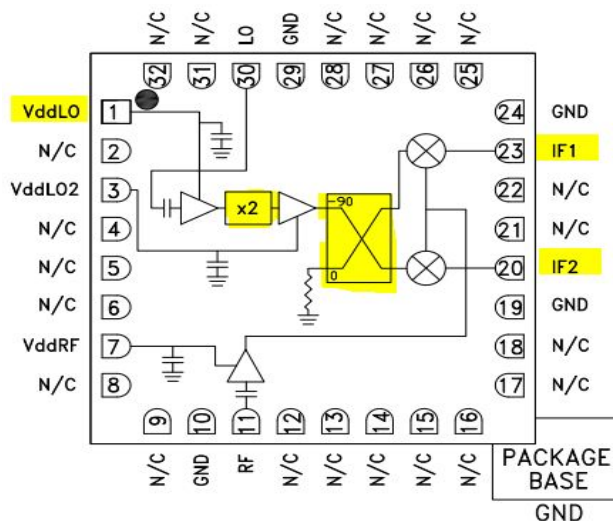
Ακολουθώντας τη ροή του σχεδίου στο Σχήμα 3.1 και ξεκινώντας από το σημείο 1, έχουμε:

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

Το σήμα εκπέμπεται από τη χαανοκεραία εκπομπής  $T_x$  ενώ το σκεδαζόμενο (ασθενές) σήμα επιστρέφει στη χαανοκεραία εκπομπής  $R_x$  και στη συνέχεια:

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 και Q) 8α και 8β.
9. Τα σήματα αυτά ενισχύονται από LNA δίνοντας τα 9α, 9β.
10. Περαιτέρω ενίσχυση.
11. Τελική ενίσχυση από χαμηλού θορύβου, μεταβλητού κέρδους, ενισχυτή δυο καναλιών.

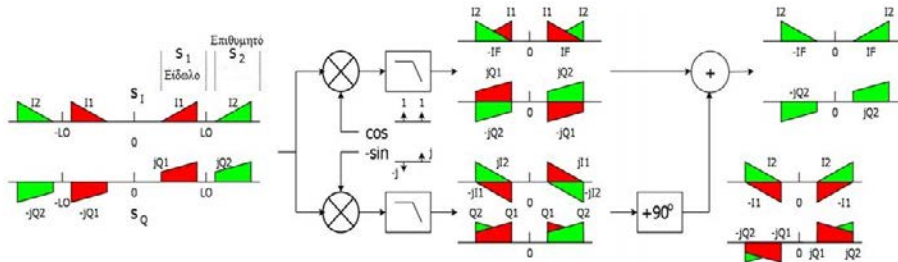
Στην έξοδο, μέσω απλού αρσενικού jack ήχου 3.5 mm λαμβάνουμε τις δυο ορθογώνιες συνιστώσες σε μορφή ηχητικού σήματος (μια σε κάθε κανάλι ήχου).



Σχήμα 3.2: Σχηματικό I/Q downconverter

Κομβικό ρόλο σε όλη τη διαδικασία έχει ο κάτω – μετατροπέας I/Q που βρίσκεται στο βήμα 7. Από το σχηματικό του διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.2, βλέπουμε ότι οδηγείται από ένα σήμα το οποίο διπλασιάζεται (σήμα 12 GHz 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.

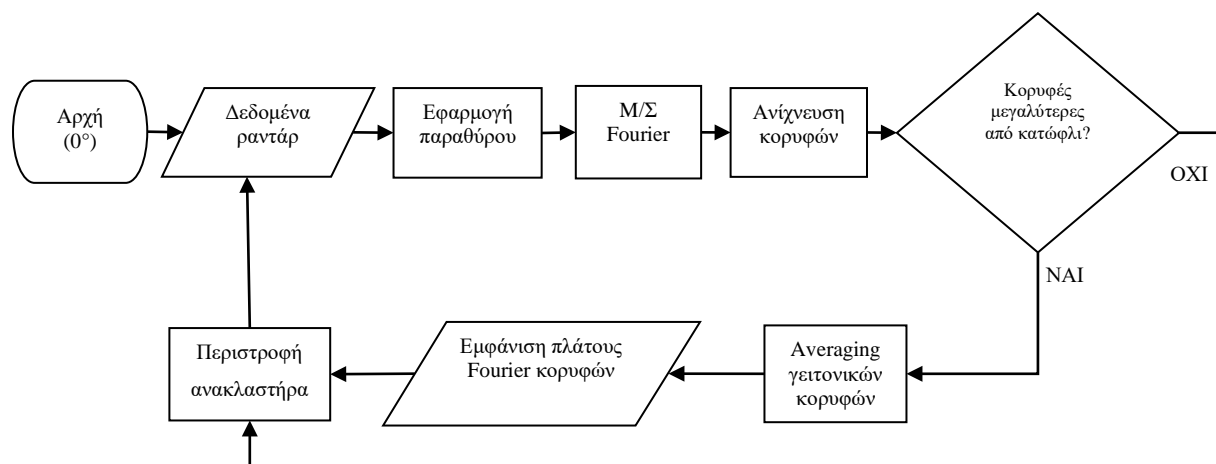
Για την επιλογή της επιθυμητής συνιστώσας ( $I$  ή  $Q$ ) απαιτείται η χρήση ενός υβριδικού κυκλώματος  $90^\circ$ . Στο πεδίο της συχνότητας, η διαδικασία απόρριψης ειδώλου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3, που ουσιαστικά είναι ένας δέκτης Hartley.



Σχήμα 3.3: Διαδικασία απόρριψης ειδώλου του downconverter

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

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η ροή των διεργασιών που πραγματοποιούνται στο σύστημα του ραντάρ. Σε κάθε βήμα διαβάζεται το σήμα επιστροφής του ραντάρ, συγκρίνεται με το κατώφλι που έχει οριστεί και αν είναι μεγαλύτερο, το πλάτος του εμφανίζεται στην αντίστοιχη γωνία που έγινε η μέτρηση.

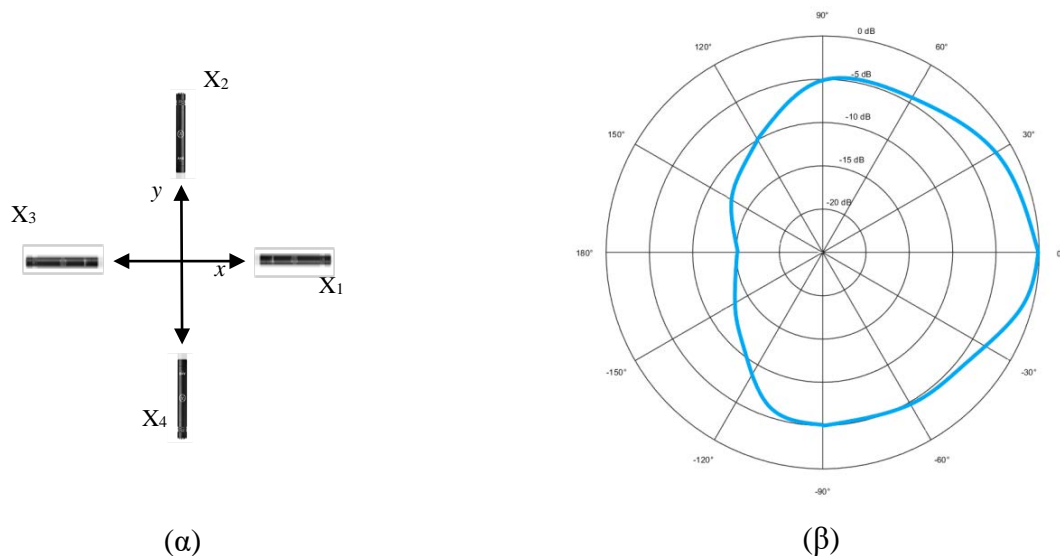


Σχήμα 3.4: Διάγραμμα λειτουργιών του συστήματος ραντάρ 24 GHz (λειτουργία περιμετρικής σάρωσης)

Ο έλεγχος της λειτουργίας του ραντάρ, γίνεται μέσω εφαρμογής LabVIEW. Αναπτύχθηκαν 2 εκδοχές: μια για στατική σάρωση του χώρου («Στατική λειτουργία») μια για περιμετρικό έλεγχο («Λειτουργία σάρωσης 360°») που εμφανίζει σε πολικό διάγραμμα τους «στόχους» στις αντίστοιχες γωνίες που αυτοί εντοπίζονται ή/και σε τομείς που καθορίζονται από το περιβάλλον της εφαρμογής. Αναλυτικά οι παραπάνω λειτουργίες θα αναπτυχθούν στις αντίστοιχες ενότητες του Κεφαλαίου 4, ενώ τα αποτελέσματα έχουν αποτυπωθεί σε σχετικό άρθρο υπό δημοσίευση [105].

### 3.2. Αλγόριθμος Προσδιορισμού Γωνίας Άφιξης Ακουστικού Σήματος

Θεωρούμε τη διάταξη αναφοράς του Σχήματος 3.5α, όπου τα μικρόφωνα της συστοιχίας είναι τοποθετημένα σε διάταξη σταυρού. Στο Σχήμα 3.5β φαίνεται μια αναπαράσταση του πολικού διαγράμματος απόκρισης για καθένα από τα πυκνωτικά μικρόφωνα και για την περιοχή συχνοτήτων 1 – 2 kHz. Το διάγραμμα έχει καρδιοειδή μορφή· παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε ήχους που προέρχονται από μπροστά του ( $\pm 30^\circ$ ) και σημαντικά μικρότερη αυτούς που προέρχονται από πίσω ( $90^\circ - 270^\circ$ ).



Σχήμα 3.5: Σχηματικά διαγράμματα μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν: (α) Διάταξη αναφοράς της συστοιχίας και (β) πολικό διάγραμμα απόκρισης του πυκνωτικού μικροφώνου για συχνοτήτες 1 – 2 kHz<sup>19</sup>

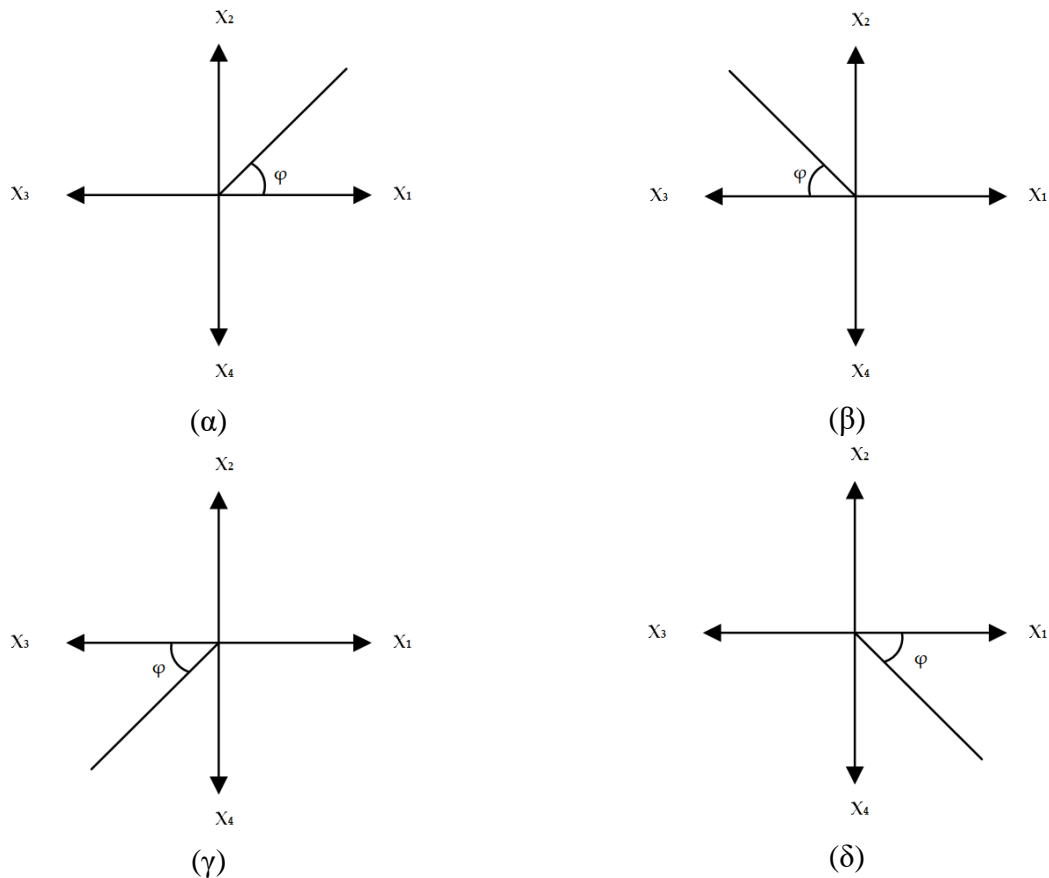
<sup>19</sup> Πληροφορίες και εργοστασιακά χαρακτηριστικά βρίσκονται διαθέσιμα στη σελίδα του κατασκευαστή [https://www.ake.com/on/demandware.static/-/Sites-masterCatalog\\_Harman/default/dw389a32f3/pdfs/AKG\\_P170\\_Manual.pdf](https://www.ake.com/on/demandware.static/-/Sites-masterCatalog_Harman/default/dw389a32f3/pdfs/AKG_P170_Manual.pdf)

Μετά την πραγματοποίηση δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι η ακριβής τοποθέτηση των μικροφώνων έχει ελάχιστη επίδραση στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη ότι σκοπός του συστήματος είναι η ανίχνευση UAS στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση, τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν οριζόντια με ελαφρά κλίση προς τα πάνω, ώστε να γίνει εκμετάλλευση της μέγιστης απόκρισής τους στις  $0^\circ$ .

Έστω  $x_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) το ηχητικό σήμα που φτάνει στο μικρόφωνο  $n$ . Για ένα μικρόφωνο, το πολικό διάγραμμα μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$x_1(\varphi) = A + B \cos \varphi \quad (3.1)$$

όπου το  $x_1(\varphi)$  αναπαριστά την απόκριση του μικροφώνου σε ένα ηχητικό σήμα που προέρχεται από γωνία  $\varphi$  (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6) και  $A, B$  είναι σταθερές.



Σχήμα 3.6: Περιπτώσεις κατεύθυνσης άφιξης σήματος (α) 1ο, (β) 2ο, (γ) 3ο, (δ) 4ο τεταρτημόριο



Χρησιμοποιώντας το πολικό διάγραμμα του Σχήματος 3.5β, για τις συχνότητες ενδιαφέροντος, υπολογίζουμε τις σταθερές  $A$  και  $B$  ως ακολούθως:

$$\varphi = 0 \stackrel{(3.1)}{\implies} A + B = 1 \quad (\text{σημείο } 0 \text{ dB}) \quad (3.2)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \stackrel{(3.1)}{\implies} A = 10^{-\frac{6}{10}} = 0.25 \quad (\text{σημείο } -6 \text{ dB}) \quad (3.3)$$

Έτσι, για τη δεδομένη μορφή του διαγράμματος, προκύπτει:

$$A = 0.25 \quad (3.4\alpha)$$

$$B = 0.75 \quad (3.4\beta)$$

Θεωρώντας ένα ζευγάρι μικροφώνων κάθετα τοποθετημένων μεταξύ τους, η απόκριση του δεύτερου μικροφώνου, με όμοιο τρόπο προς την Εξίσωση (3.1), μπορεί να γραφεί ως:

$$x_2(\varphi) = A + B \sin \varphi \quad (3.5)$$

Ο λόγος  $\eta$  των αποκρίσεων ανάμεσα σε δυο μικρόφωνα στο (ίδιο) σήμα προερχόμενο υπό γωνία  $\varphi$  μπορεί να υπολογιστεί από τις Εξισώσεις (3.1) και (3.5):

$$\eta = \frac{A + B \cos \varphi}{A + B \sin \varphi} \quad (3.6)$$

Χρησιμοποιώντας βασικές τριγωνομετρικές ταυτότητες για το μετασχηματισμό των  $\cos \varphi$  και  $\sin \varphi$  σε  $\tan \varphi$ , βρίσκουμε:

$$\tan \varphi = \frac{q^2 \eta + q(\eta - 1)\sqrt{2\eta}}{q^2 - (\eta - 1)^2} \quad (3.7)$$

ή

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{q^2 \eta + q(\eta - 1)\sqrt{2\eta}}{q^2 - (\eta - 1)^2} \right) \quad (3.8)$$

όπου ο παράγοντας  $q = \frac{B}{A} = 3$  υπολογίζεται από τις ισότητες (3.4).

Για την ικανοποίηση του κριτηρίου Nyquist, θέτουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας στα 10 kHz (η μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος είναι κάτω από 3 kHz). Ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης άφιξης του ισχυρότερου σήματος, ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- i. Υπολογισμός  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4$ , όπου με  $\hat{x}_n$  συμβολίζεται ο FFT του  $x_n$  ή  $\mathcal{F}\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ .
- ii. Υπολογισμός αθροίσματος

$$\sum_{n=1}^4 \hat{x}_n \quad (3.9)$$

iii. Για το σήμα που δίνεται από την (3.9), υπολογισμός του αριθμού κορυφών που ξεπερνούν ένα προκαθορισμένο κατώφλι και εντοπισμός των αντίστοιχων θέσεων τους.

iv. Για κάθε κορυφή του βήματος iii, εντοπισμός των 2 σημάτων με το μεγαλύτερο πλάτος του βήματος i, το οποίο και καθορίζει το τεταρτημόριο άφιξης του ισχυρότερου εισερχόμενου ακουστικού σήματος.

v. Με αναφορά στις περιπτώσεις (α), (β), (γ) και (δ) του Σχήματος 3.6, υπολογίζουμε τους λόγους  $\eta$ , ως εξής:

$$(α) \text{ 1ο τεταρτημόριο: } \eta = \frac{|x_2|}{|x_1|} \quad (3.10)$$

$$(β) \text{ 2ο τεταρτημόριο: } \eta = \frac{|x_2|}{|x_3|} \quad (3.11)$$

$$(γ) \text{ 3ο τεταρτημόριο: } \eta = \frac{|x_4|}{|x_3|} \quad (3.12)$$

$$(δ) \text{ 4ο τεταρτημόριο: } \eta = \frac{|x_4|}{|x_1|} \quad (3.13)$$

- vi. Υπολογισμός  $\tan \varphi'$ , χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (3.7).
- vii. Υπολογισμός  $\varphi = \tan^{-1}(\varphi')$ , χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (3.8).
- viii. Η τελική (αζιμουθιακή) γωνία  $\Phi$ , προκύπτει αντίστοιχα για κάθε τεταρτημόριο:

$$(α) \text{ 1ο τεταρτημόριο: } \Phi = \varphi \quad (3.14)$$

$$(β) \text{ 2ο τεταρτημόριο : } \Phi = 180^\circ - \varphi \quad (3.15)$$

$$(γ) \text{ 3ο τεταρτημόριο : } \Phi = 180^\circ + \varphi \quad (3.16)$$

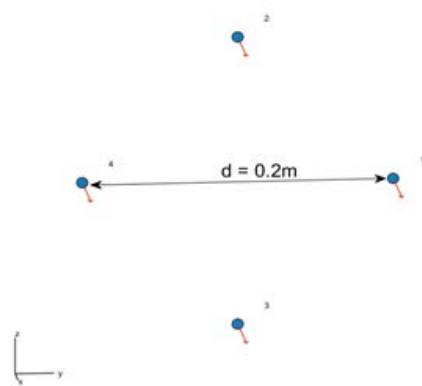
$$(δ) \text{ 4ο τεταρτημόριο : } \Phi = 360^\circ - \varphi \quad (3.17)$$

ix. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα ν έως viii για όλες τις κορυφές του βήματος iii, ώστε να εξασφαλιστεί μια μέση τιμή για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης.

Το αποτέλεσμα της ανωτέρω αλγοριθμικής διαδικασίας, είναι η εκτίμηση τεταρτημορίου και γωνίας άφιξης για το ισχυρότερο εισερχόμενο ηχητικό σήμα, η οποία (εκτίμηση) ανανεώνεται κάθε δευτερόλεπτο. Όπως παρατηρείται από τις εξισώσεις (3.10) έως (3.13), ένα εγγενές χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι εξαρτάται μόνο από το πλάτος των κορυφών FFT και όχι από τη θέση τους (FFT bin).

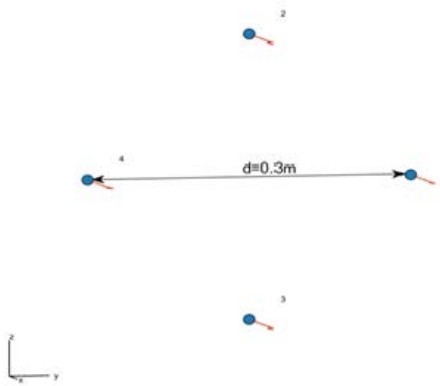
Για τις αποστάσεις μεταξύ των μικροφώνων, λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα σχετικής προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε (Εικόνα 3.1) για να υπολογιστεί –μεταξύ άλλων– η βέλτιστη απόσταση η οποία μεγιστοποιεί το λαμβανόμενο SNIR (Signal-to-Noise-plus-Interference-Ratio).

Διάταξη σταυρού, 4 μικρόφωνα, SNIR: 5.6971, Διάρκεια προσομοίωσης: 2.0521sec

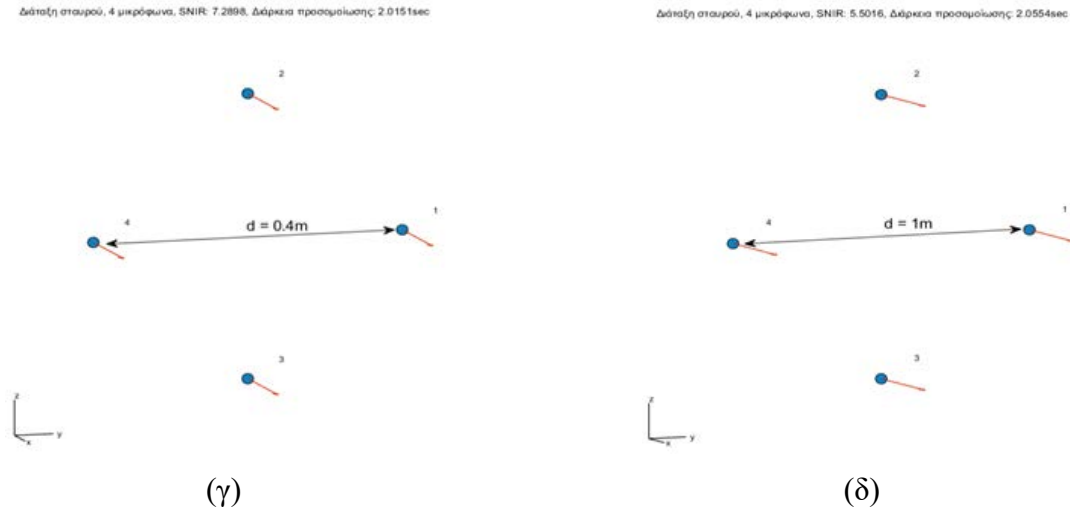


(α)

Διάταξη σταυρού, 4 μικρόφωνα, SNIR: 7.7899, Διάρκεια προσομοίωσης: 1.4505sec



(β)



Εικόνα 3.1 Προσομοίωση για την εύρεση της βέλτιστης απόστασης στοιχείων συστοιχίας μικροφώνων προς μεγιστοποίηση του SNIR

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται μερικά επιπλέον στοιχεία της προσομοίωσης, από τα οποία συμπεραίνονται τα εξής:

Απόσταση στοιχείων d (m)	Πλήθος στοιχείων M		
	4	8	16
0.2	5,6971	4,0193	3,2476
0.3	7,7889	6,2238	5,1091
0.4	7,2898	7,3014	6,2921
1	5,5016	6,0145	7,0955

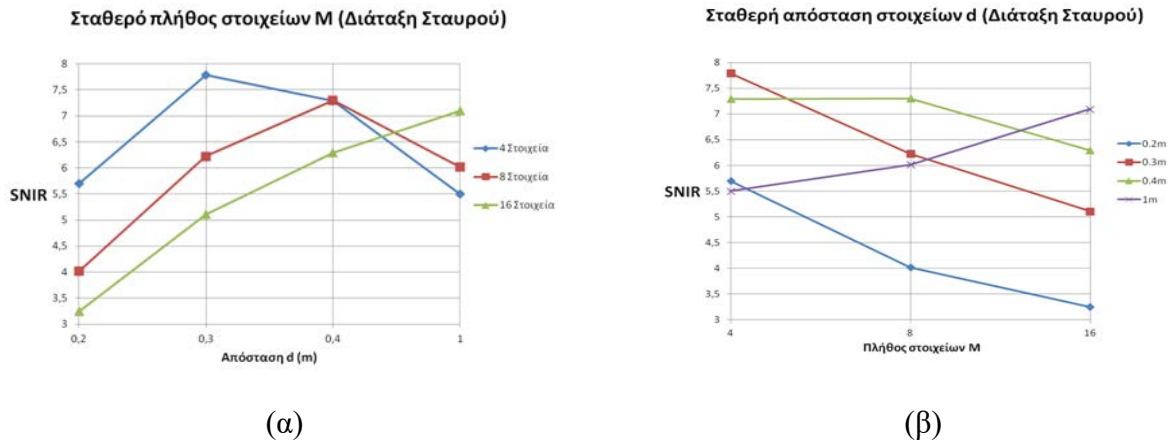
Πίνακας 3.1: Στοιχεία αποτελεσμάτων προσομοίωσης SNIR συστοιχίας μικροφώνων.

- Για σταθερό πλήθος στοιχείων M, η αύξηση της μεταξύ τους απόστασης d δε συνεισφέρει στη βελτίωση του SNIR· αντιθέτως αύξηση της απόστασης d, χειροτερεύει τον SNIR. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση διάταξης σταυρού 16 στοιχείων, όπου ο SNIR αυξάνεται οριακά (χρήζει διερεύνησης – εκτός σκοπών της διατριβής).

- Για σταθερή απόσταση d ανάμεσα στα M στοιχεία της συστοιχίας (που καθορίζει και τις φυσικές της διαστάσεις), η αύξηση του πλήθους των στοιχείων δε συνεπάγεται κατ' ανάγκην βελτίωση του SNIR, αλλά εξαρτάται από τη διάταξη. Συγκεκριμένα, σε συστοιχίες διάταξης σταυρού, αύξηση του M συνεπάγεται μείωση του SNIR, με εξαίρεση την περίπτωση d =1 m

όπου αύξηση του  $M$  συνεπάγεται αύξηση του SNIR (χρήζει διερεύνησης – εκτός σκοπών της διατριβής).

Τα παραπάνω συμπεράσματα, αποτυπώνονται σχηματικά στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Καμπύλες SNIR με δεδομένο (α) πλήθος και (β) απόσταση στοιχείων.

Κατόπιν αυτών, οι διαστάσεις τις συστοιχίας που καθορίζουν και τις αποστάσεις μεταξύ των μικροφώνων επελέγησαν και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

### 3.3. Ταυτοποίηση Ηχητικού Σήματος με τη Χρήση Τεχνικών Machine Learning

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.1.2.2, οι κλασικές μέθοδοι επεξεργασίας απαιτούν κάποιας μορφής προ-επεξεργασία του σήματος όπως φιλτράρισμα, ενίσχυση, κ.ο.κ., ώστε να έρθει σε κατάλληλη μορφή προκειμένου στη συνέχεια να εξαχθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος. Οι τεχνικές ML, επιτρέπουν το χειρισμό του προβλήματος ταυτοποίησης ήχου ως ένα πρόβλημα image classification με πολύ πιο αποδοτικό και γρήγορο τρόπο. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ο βασικός πυρήνας και οι παράμετροι του αλγόριθμου ταυτοποίησης· λεπτομέρειες σχετικά με τις διαδικασίες δειγματοληψίας και δοκιμών του θα δοθούν σε επόμενες ενότητες. Η υλοποίηση εκμεταλλεύεται τις βασικές αρχές που αναφέρονται στο [106], κατάλληλα τροποποιημένων και με επεκτάσεις προς τον σκοπό της ανίχνευσης UAS κατά την πτήση όπως δημοσιεύτηκαν στο [107]. Η τεχνική ML εκμεταλλεύεται

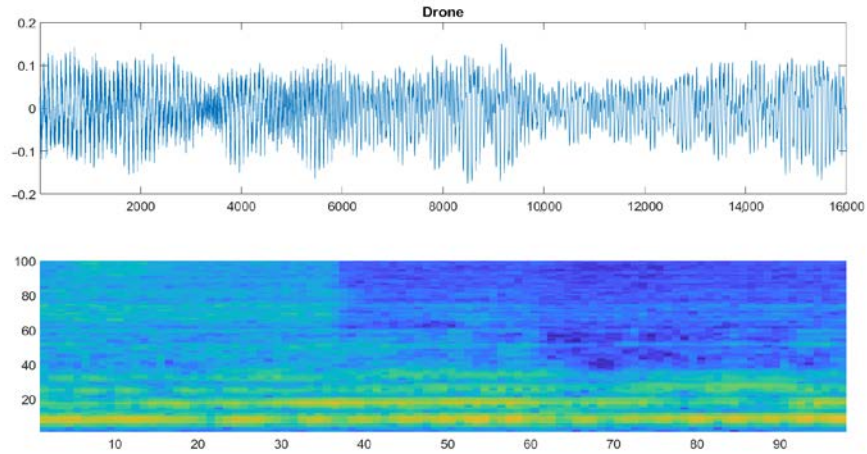
τις υψηλές ταχύτητες που προσφέρει το σύγχρονο hardware (CPU, GPU, μνήμες) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση UAS σε πραγματικό χρόνο.

Η μέθοδος ξεκινάει με τον καθορισμό των κατηγοριών στις οποίες τα ηχητικά δείγματα που συλλέγονται θα πρέπει να κατηγοριοποιηθούν, με την απόδοση αντίστοιχων ετικετών: “Aircraft”, “CH\_47”, “Drone” και “UH-1H”. Προκειμένου το σύστημα να έχει τη δυνατότητα διάκρισης ανάμεσα σε ήχο που προέρχεται από UAS (“Drone”) ή από άλλο αερόχημα, οι υπόλοιπες 3 ετικέτες ομαδοποιήθηκαν στην κατηγορία “Other”, ώστε το πρόβλημα να μπορέσει να προσεγγιστεί επιπλέον και ως πρόβλημα δυαδικής ταξινόμησης (binary classification). Στη συνέχεια, τα ηχητικά δείγματα χωρίζονται σε training, validation και test sets.

Τα δείγματα αποθηκεύονται ως αρχεία ήχου και ταξινομούνται σε κατηγορίες από τον αλγόριθμο (γραμμένο σε MATLAB), σύμφωνα με την ετικέτα που τους αποδίδεται χειροκίνητα κατά την ηχογράφηση.

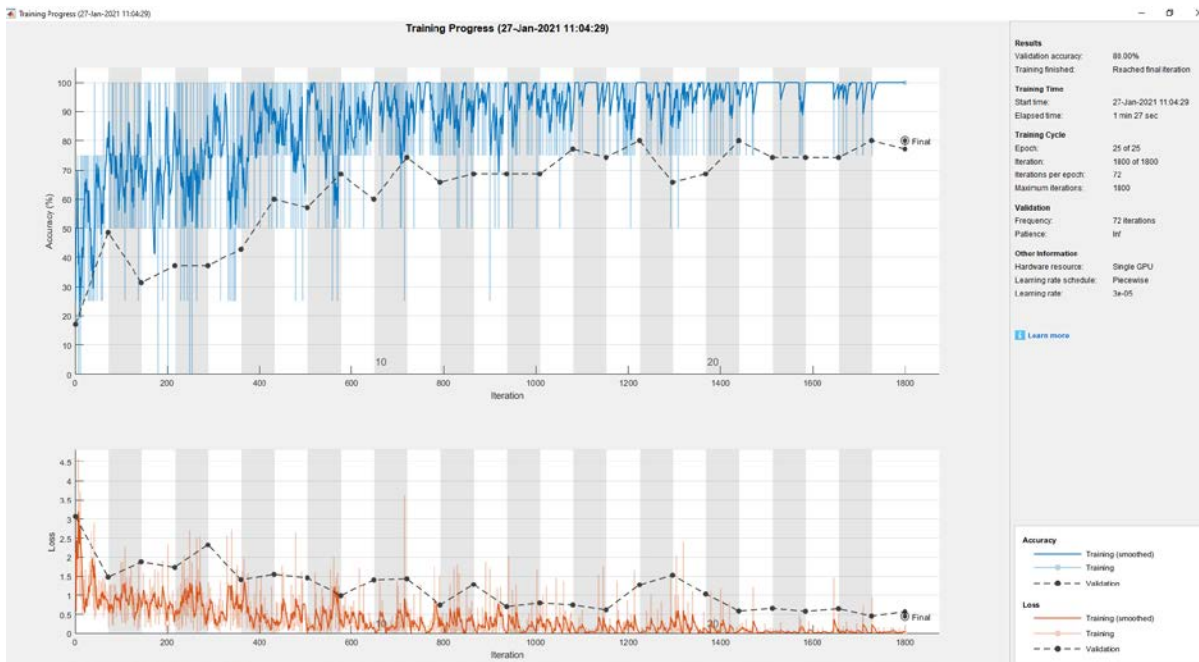
Το πρωτογενές ακουστικό σήμα υπόκειται σε μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας, παράγοντας audio spectrograms: εικόνες 2D που αναπαριστούν τα δεδομένα του φάσματος συχνοτήτων. Τα auditory spectrograms των δειγμάτων διάρκειας 1 sec, υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα κυλιόμενο παράθυρο (sliding window frame) μήκους 25 ms με βήμα 10 ms ανάμεσα στα frames.

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του μετασχηματισμού χρόνου-συχνότητας για ένα τυχαία επιλεγμένο ηχητικό δείγμα από το training set. Η ακουστική κυματομορφή σχεδιάζεται με τη μορφή δειγμάτων (άξονας x) προς πλάτος (άξονας y) ενώ το spectrogram στη μορφή βημάτων χρόνου (time steps – άξονας x) προς αριθμό φίλτρων (numbands – άξονας y) που αντιστοιχούν στη συχνότητα (100 στη συγκεκριμένη περίπτωση). Τα spectrograms παρέχουν μια οπτική αναπαράσταση των συνιστωσών υψηλής (κίτρινο χρώμα) και χαμηλής (μπλε χρώμα) ενέργειας του σήματος.



Εικόνα 3.2: Δείγμα ακουστικής κυματομορφής (πάνω) και αντίστοιχο spectrogram (κάτω)

Ακολουθεί η εκπαίδευση του δικτύου με παραμέτρους όπως learning rate, training epochs, batch size, αριθμός iterations, detection thresholds, κλπ, οι οποίες μεταβάλλονται εμπειρικά (trial and error) ώστε να επιτευχθεί το υψηλότερο δυνατό validation accuracy. Το μέγιστο που επιτεύχθηκε είναι 96.97%, ενώ ενδεικτικό γράφημα μια διαδικασίας εκπαίδευσης, φαίνεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Ενδεικτικό γράφημα διαδικασίας εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου

Λόγω του ότι τα ηχητικά δείγματα ελήφθησαν από το φυσικό/πραγματικό περιβάλλον με πραγματικά αεροσκάφη κατά την πτήση τους, η ανάγκη για προσθήκη επιπλέον θορύβου εξαλείφεται. Ωστόσο, ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων πτήσεων δεν επέτρεψε τη δημιουργία εκτενούς dataset, που κατά κανόνα απαιτεί δεκάδες χιλιάδες δείγματα. Η δυσχέρεια αντιμετωπίστηκε με τη χρησιμοποίηση της συνήθους τεχνικής data augmentation, αυξάνοντας/μειώνοντας τυχαία την ένταση (πλάτος) ακουστικών δειγμάτων έως και 10% και μεταθέτοντάς τα χρονικά έως και 10 time steps (0.1 sec), αυξάνοντας το μέγεθος του συνολικού αριθμού διαθέσιμων δειγμάτων.

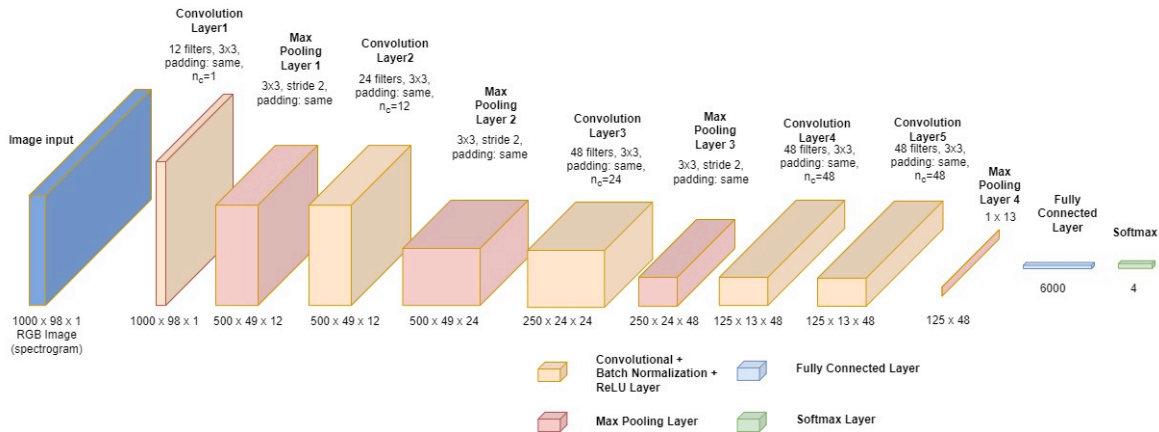
Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκπαίδευσης, εξάγονται στατιστικά στοιχεία όπως: η κατανομή των δειγμάτων στις ετικέτες/κατηγορίες ώστε το δίκτυο να εκπαιδευτεί «αμερόληπτα», μήτρα σύγκρισης που οπτικοποιεί την απόδοση του αλγόριθμου, τα ποσοστά training και validation error, το μέγεθος του εκπαιδευμένου δικτύου και ο χρόνος που απαιτείται στη CPU/GPU για την πρόβλεψη – κατηγοριοποίηση κάθε μεμονωμένης εικόνας spectrogram (της τάξης των ms, ανάλογα με τις παραμέτρους του δικτύου).

Για την παρουσίαση της πληροφορίας που αφορά την κατηγοριοποίηση του ιπτάμενου μέσου, χρησιμοποιείται το interface που φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Κάθε παράθυρο περιλαμβάνει 2 κυλιόμενα γραφήματα: στο επάνω εμφανίζεται σε σχεδόν (λόγω του αναγκαίου buffering) πραγματικό χρόνο η κυματομορφή του ηχητικού σήματος που λαμβάνεται από το μικρόφωνο, ενώ στο κάτω το αντίστοιχο φασματογράφημα της τρέχουσας κυματομορφής.

Στο χώρο πάνω από τα γραφήματα, ένα μήνυμα εμφανίζει την κατηγορία στην οποία κατατάσσει ο classifier το λαμβανόμενο ηχητικό σήμα, σύμφωνα με την πρόβλεψη του νευρωνικού δικτύου.

Στην Εικόνα 3.4, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (CNN – Convolutional Neural Network). Αποτελείται από 5 συνελκτικά επίπεδα (layers) με πυρήνες (kernels) 3x3, συμπλήρωμα “same” padding και αυξανόμενο αριθμό φίλτρων από 12 έως μέγιστο 48. Το αμετάβλητο του μοντέλου ως προς την τοπική μετάθεση των στοιχείων εισόδου, επιτυγχάνεται με την προσθήκη 4 επιπέδων max pooling πριν το επίπεδο πλήρους αντιστοίχισης (fully connected layer) και, τελικώς, τη συνάρτηση ενεργοποίησης (Softmax).





Εικόνα 3.4: Το μοντέλο CNN που χρησιμοποιήθηκε στο προτεινόμενο σύστημα

Για την επαναληπτική ενημέρωση των βαρών του δικτύου με βάση το training dataset, χρησιμοποιήθηκε ο Adam optimizer σε mini batches των 8 δειγμάτων. Τόσο για την εκπαίδευση του δικτύου όσο και για τη δοκιμή του αλγόριθμου στην ταυτοποίηση των ηχητικών δειγμάτων σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιήθηκε φορητός υπολογιστής εξοπλισμένος με επεξεργαστή Intel® i7 8750H, 32 GB RAM και κάρτα γραφικών 6 GB NVIDIA GeForce GTX 1060.

Ένα σύνολο περισσότερων από 380 ηχητικά δείγματα συλλέχθηκαν, φροντίζοντας παράλληλα ώστε ο αριθμός δειγμάτων να είναι το δυνατόν ισοκατανομημένος ανάμεσα στις διάφορες κατηγορίες προκειμένου να αποφευχθεί η «μεροληψία» (“training bias”) προς κάποια κατηγορία με μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων στο training set. Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης του δικτύου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Δείκτης (μέτρηση)	Αποτέλεσμα
CPU-time (για single image prediction)	3.55 ms
Training Error	0.57143%
Validation Error	3.3333%
Precision	0.875
Recall	0.88095
F1 Score	0.87797

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα επιδόσεων εκπαίδευσης CNN

Οι δείκτες Precision, Recall και F1 Score, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$P = \frac{T_P}{T_P + F_P} \quad (3.18)$$

$$R = \frac{T_P}{T_P + F_N} \quad (3.19)$$

$$F1 = 2 \frac{PR}{P + R} \quad (3.20)$$

όπου  $T_P$ : το πλήθος των αληθώς θετικών (true positive) προβλέψεων

$F_P$ : το πλήθος των ψευδώς θετικών (false positive) προβλέψεων

$F_N$ : το πλήθος των ψευδώς αρνητικών (false negative) προβλέψεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

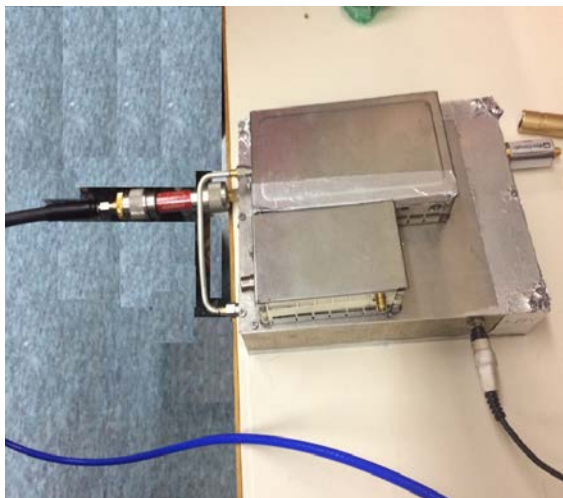
---

Στον τομέα της ενεργητικής ανίχνευσης UAS, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με 3 διαφορετικές διατάξεις ραντάρ, οι οποίες υπέστησαν τροποποιήσεις για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Μια από αυτές, το CW Doppler ραντάρ στα 24 GHz, αποδείχτηκε καταλληλότερη για την ανίχνευση UAS γι' αυτό και επιλέχθηκε για τη συνέχιση της έρευνας. Παρόμοια, 2 διατάξεις συστοιχιών για την παθητική ανίχνευση - ταυτοποίηση σχεδιάστηκαν, υλοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν, με τη συστοιχία σε διάταξη σταυρού να αποδίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Στην παρούσα Ενότητα περιγράφονται οι διατάξεις όλων των συστημάτων ραντάρ και μικροφώνων που μελετήθηκαν στη διατριβή. Σε επόμενη Ενότητα, παρουσιάζονται και αναλύονται τα συστήματα που επιλέχθηκαν και τα οποία, με βελτιώσεις – τροποποιήσεις, χρησιμοποιήθηκαν στο τελικό προτεινόμενο σύστημα.

### 4.1. Συστήματα που Μελετήθηκαν

#### 4.1.1. RADAR 875 MHz

Για το ραντάρ της Εικόνας 4.1, διαπιστώθηκε ότι η ισχύς εκπομπής του σήματος ήταν αρκετά ασθενής (της τάξης των -30 dBm). Προστέθηκε διάταξη ενισχυτή RF κέρδους 46 dBm στην εκπομπή και κατασκευάστηκαν κεραίες corner reflector τόσο για την εκπομπή όσο και για τη λήψη (Εικόνες 4.3 και 4.4).



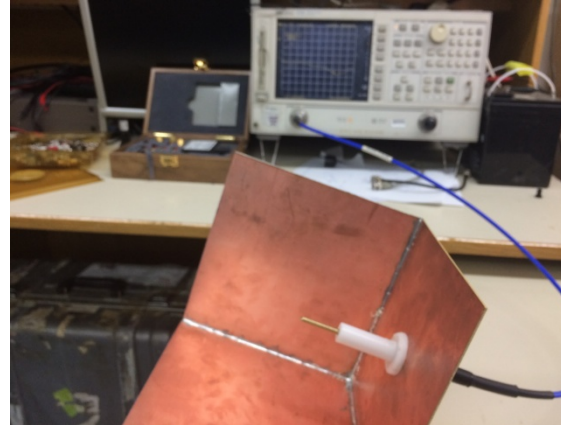
Εικόνα 4.1: Ραντάρ 875 MHz



Εικόνα 4.2: Διάταξη ενισχυτή σήματος εκπομπής



Εικόνα 4.3: Κεραία εκπομπής corner reflector



Εικόνα 4.4: Κεραία λήψης corner reflector

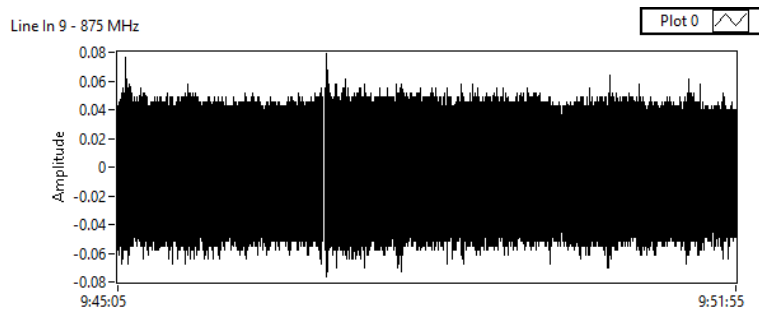
Η ανάπτυξη του συστήματος ραντάρ φαίνεται στην Εικόνα 4.5 κατά τη διεξαγωγή δοκιμών σε οροφή των παλιών κτηρίων Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.



Εικόνα 4.5: Πλήρης διάταξη ραντάρ 875 MHz

Παρά τις τροποποιήσεις και τη σημαντική αύξηση της ισχύος εκπομπής, το ραντάρ δεν είχε ικανοποιητική επίδοση στην ανίχνευση του DJI Phantom 3. Οι ενδείξεις για την παρουσία UAS εντός της δέσμης του ραντάρ παρατηρήθηκαν σε αποστάσεις μέχρι τα 10 m περίπου. Στο Σχήμα 4.1, παρατίθεται ενδεικτικά ένα γράφημα από τις επιστροφές του ραντάρ κατά την προσπάθεια ανίχνευσης UAS κατά την πτήση, σε απόσταση περίπου 15 μέτρων από τις κεραίες του ραντάρ.

Διαπιστώνεται ότι ο θόρυβος υπερिशύει κατά πολύ του σήματος, καθιστώντας το δυσδιάκριτο ήδη από κοντινές αποστάσεις.

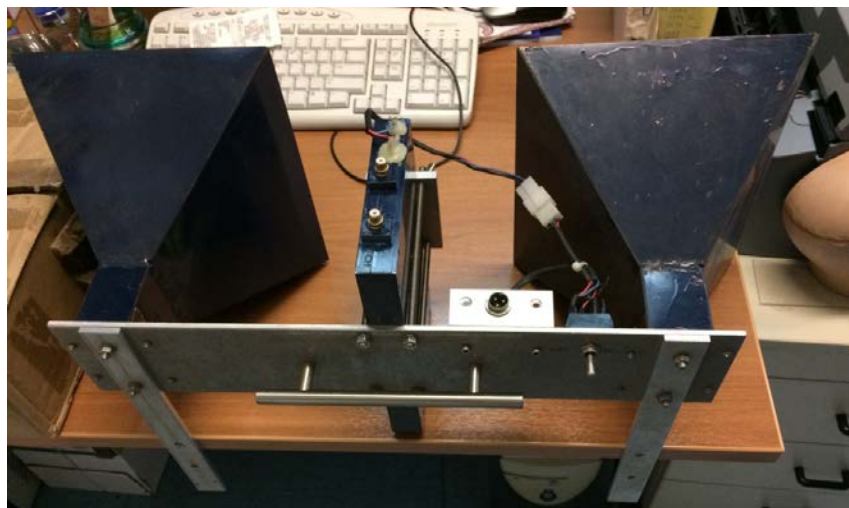


Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό γράφημα κυματομορφής από τις επιστροφές του ραντάρ 875 MHz

Ως πιθανοί λόγοι για τις χαμηλές επιδόσεις ανίχνευσης UAS του συγκεκριμένου ραντάρ, εκτιμώνται (α) η ακαταλληλότητα της συχνότητας του ραντάρ, με μήκος κύματος  $\lambda = 34$  cm οριακά συγκρίσιμο με τις φυσικές διαστάσεις του UAS, (β) οι ατέλειες στην κατασκευή των κεραιών corner reflector και (γ) η εγγύτητα στην περιοχή συχνοτήτων της ζώνης GSM-900.

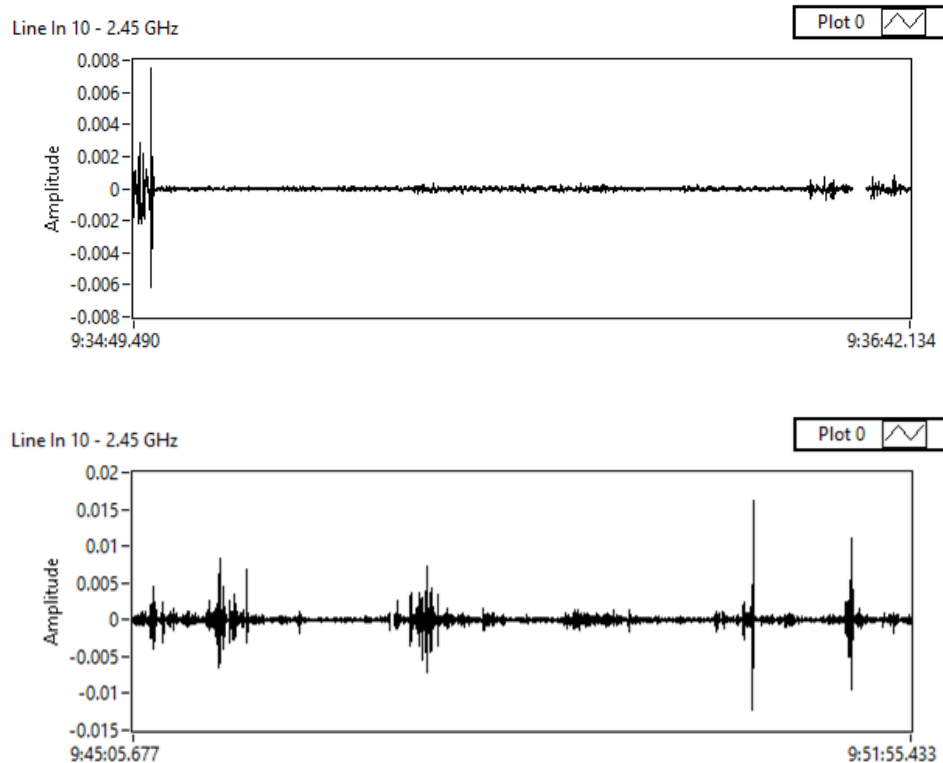
#### 4.1.2. RADAR 2.45 GHz

Η επόμενη υλοποίηση ραντάρ που δοκιμάστηκε στην ανίχνευση UAS, είναι το ραντάρ Doppler στη συχνότητα των 2.45 GHz που φαίνεται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Ραντάρ 2.45 GHz

Η διάταξη δεν αποδείχθηκε αποτελεσματική στην ανίχνευση UAS, πιθανόν λόγω της χαμηλής ισχύος του ραντάρ, ενώ δεν έγινε παρέμβαση για την αύξηση της ισχύος εκπομπής εξαιτίας της συμπαγούς κατασκευής του συστήματος.



Σχήμα 4.2: Ενδεικτικά γραφήματα κυματομορφών από τις επιστροφές του ραντάρ 2.45 GHz

Στα παραπάνω γραφήματα του Σχήματος 4.2, φαίνονται οι αποκρίσεις του ραντάρ όταν η δέσμη του στράφηκε προς άνθρωπο που κινήθηκε ξεκινώντας ακριβώς μπροστά από τη θέση του ραντάρ και βάδισε απομακρυνόμενος σε απόσταση 10 m (επάνω) και πλησιάζοντας – απομακρύνοντας το UAS κατά την πτήση σε τυχαίες διαδρομές από το ραντάρ σε απόσταση περίπου 5 m (κάτω).

#### 4.1.3. RADAR 24 GHz

Η μεγαλύτερη έμφαση της εργασίας δόθηκε στην διάταξη του ραντάρ Doppler 24 GHz, λόγω του μικρού μήκους κύματος ( $\lambda \approx 1.25$  cm) που είναι μικρότερο από τη μεγαλύτερη φυσική διάσταση των ελίκων ( $\approx 15$  cm) και του σκάφους ( $\approx 35$  cm στη διαγώνιο) του UAS. Η αρχική

του μορφή φαίνεται στην Εικόνα 4.7 και καθιστούσε δυνατή την τοποθέτηση του μόνο επί σταθερής έδρασης. Πρόκειται για ένα ραντάρ Doppler συνεχούς κύματος (CW Doppler) στη συχνότητα των 24 GHz, οιονεί μονοστατικό (quasi-monostatic) καθώς οι κεραίες εκπομπής και λήψης βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους – πρακτικά στο ίδιο σημείο.



Εικόνα 4.7: Αρχική μορφή ραντάρ 24 GHz

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

$$G = \frac{10A}{\lambda^2} \quad (4.1)$$

$$\varphi_v = \frac{51\lambda}{b} \quad (4.2)$$

$$\varphi_h = \frac{70\lambda}{\alpha} \quad (4.3)$$

όπου  $G$ : το κέρδος της χοανοκεραίας

$A$ : η επιφάνεια του ανοίγματος

$\lambda$ : το μήκος κύματος στη συχνότητα λειτουργίας

$\varphi_v, \varphi_h$ : το κατακόρυφο και οριζόντιο εύρος δέσμης της χοανοκεραίας αντίστοιχα

$\alpha, b$ : η μεγάλη και μικρή διάσταση της χοανοκεραίας αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8, έχουμε  $a = 0.07 \text{ m}$  και  $b = 0.015 \text{ m}$ , ενώ για τη συχνότητα  $24 \text{ GHz}$  το μήκος κύματος  $\lambda = c/f = \frac{3 \cdot 10^8}{24 \cdot 10^9} = 0.0125 \text{ m}$ .



Εικόνα 4.8: Διαστάσεις χοανοκεραιών

Έτσι, σύμφωνα με τις (4.1) έως (4.3), έχουμε τα εξής χαρακτηριστικά:

$$G = 18.27 \text{ dB}, \varphi_v = 42.5^\circ, \varphi_h = 12.5^\circ \quad (4.4)$$

Λεπτομέρειες για τις τροποποιήσεις που έγιναν στο ραντάρ προκειμένου να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά του και κατ' επέκταση η ικανότητά του στην ανίχνευση, δίνονται σε επόμενη Ενότητα.

#### 4.1.4. Ευθύγραμμη Συστοιχία Μικροφώνων

Στην παρούσα και την επόμενη Ενότητα, παρουσιάζονται τα παθητικά συστήματα ανίχνευσης και ταυτοποίησης, που αποτελούνται από 4 πυκνωτικά μικρόφωνα τοποθετημένα σε δύο διαφορετικές διατάξεις. Και στις δύο περιπτώσεις, για την αποφυγή σφαλμάτων που θα μείωναν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος στην εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης (DOA) ήχου UAS και η αναγνώριση/ταυτοποίηση της προέλευσης του, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:



Η συστοιχία μικροφώνων τοποθετήθηκε σε ανηχοϊκό θάλαμο για αρχικοποίηση των επιπέδων λήψης των μικροφώνων, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το σήμα που λαμβάνεται από τα 4 μικρόφωνα, θα λαμβάνουν το ίδιο επίπεδο ενίσχυσης από την κάρτα ήχου. Εάν το πλάτος σήματος μετράται υψηλότερο από το πραγματικό λόγω πιθανής ακούσιας μετατόπισης του αναλογικού επιλογέα κέρδους της κάρτας, θα προσέθετε ένα συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις, μεροληπτώντας προς την κατεύθυνση των μικροφώνων με το –εσφαλμένα– μεγαλύτερο κέρδος/πλάτος. Η παραπάνω διαδικασία calibration, ελαχιστοποιεί αυτό το ενδεχόμενο σφάλματος.

Αρχικά κατασκευάστηκε η ευθύγραμμη συστοιχία που φαίνεται στις Εικόνες 4.9. Πάνω σε μεταλλική δοκό ανοίχθηκαν διαμήκη κανάλια ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση των μικροφώνων στην επιθυμητή απόσταση, με μέγιστη δυνατή απόσταση μεταξύ διαδοχικών μικροφώνων περίπου στα 55 cm.



Εικόνα 4.9: (α) Σχηματικό διάγραμμα και (β) υλοποίηση ευθύγραμμης συστοιχίας μικροφώνων

Ένα πιθανό πρόβλημα με την απόσταση μεταξύ στοιχείων της συστοιχίας είναι το εξής: όσο η απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων αυξάνεται, τόσο μειώνεται το εύρος δέσμης της συστοιχίας. Έτσι, εάν επιθυμούμε να στενέψουμε το beamwidth μιας διάταξης, μπορούμε να αυξήσουμε την απόσταση  $d$  με τη συνεπαγόμενη αύξηση των φυσικών διαστάσεων (άνοιγμα) της συστοιχίας.

Μια τέτοια επιλογή, θα οδηγούσε στην μείωση του θορύβου, υπό ένα περιορισμό: όταν η απόσταση  $d$  γίνει μεγαλύτερη από  $\lambda_{\min}/2 = c/2f_{\max}$ , όπου  $\lambda_{\min}$  το μήκος κύματος του σήματος που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη συχνότητα, καθόσον μιλάμε για broadband σήματα, προκαλείται η δημιουργία «ψευδολοβών» (grating lobes), ύψους συγκρίσιμου με αυτό του κύριου λοβού. Αποτέλεσμα είναι, σήματα τα οποία προσπίπτουν στη συστοιχία από τις κατευθύνσεις των grating lobes, να μη μπορούν να διαχωριστούν από αυτό του κυρίου λοβού.

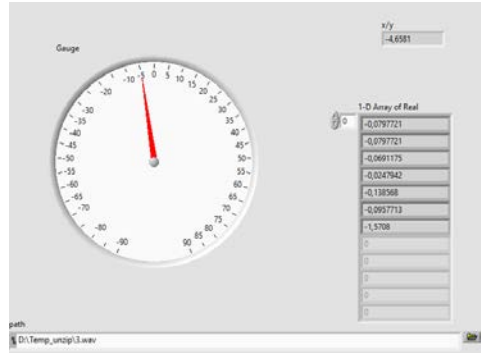
Για να αποφευχθεί αυτή η χωρική αλλοίωση (spatial aliasing), η απόσταση  $d$  μεταξύ διαδοχικών στοιχείων της συστοιχίας θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$d \leq \lambda_{\min}/2 = c/2f_{\max} \quad (4.6)$$

Εν προκειμένω, το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος ενός UAS εντοπίζεται στην περιοχή 500 – 2000 Hz, επομένως η συστοιχία επιτρέπει την τοποθέτηση των στοιχείων στις κατάλληλες αποστάσεις:

$$8.6 \text{ cm} \leq d \leq 34 \text{ cm} \quad (4.7)$$

Στην Εικόνα 4.10, φαίνεται το περιβάλλον της εφαρμογής που υλοποιήθηκε για την εμφάνιση της ένδειξης για τον υπολογισμό της διεύθυνσης άφιξης του ακουστικού σήματος. Ένας περιορισμός που τίθεται από την εν λόγω γραμμική διάταξη είναι ότι η μονοδιάστατη τοποθέτηση των στοιχείων, επιτρέπει τη σύγκριση σημάτων (και άρα την εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξής του) μόνο σε μια διάσταση, π.χ. Βορράς – Νότος, δεξιά – αριστερά, μπροστά – πίσω ως προς σημείο αναφοράς της συστοιχίας.

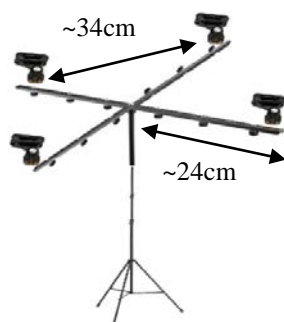


Εικόνα 4.10: Interface της 1<sup>ης</sup> εφαρμογής για την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης ακουστικού σήματος

Για το λόγο αυτό, η διάταξη δεν εξετάστηκε περαιτέρω και αντί αυτής κατασκευάστηκε και μελετήθηκε η διάταξη που παρουσιάζεται στην επόμενη Ενότητα.

#### 4.1.5. Συστοιχία Μικροφώνων σε Διάταξη Σταυρού

Στην Εικόνα 4.11 φαίνεται η συστοιχία σε διάταξη σταυρού που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ώστε να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης άφιξης σήματος σε 2 διαστάσεις. Για τις αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων (μικροφώνων), λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα σχετικής προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.2, η οποία πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης απόστασης μεταξύ μικροφώνων (τοποθετημένα σε διάφορες διατάξεις) ώστε να μεγιστοποιείται ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος SNIR (Signal-to-Noise-plus-Interference-Ratio).



(α)



(β)

Εικόνα 4.11: (α) Σχηματικό διάγραμμα και (β) υλοποίηση συστοιχίας μικροφώνων σε διάταξη σταυρού

Η συστοιχία αποτελείται από 4 πυκνωτικά μικρόφωνα τα οποία χρησιμοποιούν ως πηγή ισχύος (phantom power) μια εξωτερική κάρτα ήχου, μέσω της οποίας συνδέονται σε H/Y για τη

συλλογή δεδομένων και την επεξεργασία σήματος. Οι βάσεις στήριξης των μικροφώνων στερεώθηκαν στα άκρα δυο ελασμάτων από αλουμίνιο, κάθετα βιδωμένων μεταξύ τους. Ένας μεταλλικός σωλήνας προσαρμόστηκε στο κέντρο των ελασμάτων ώστε να διευκολύνεται η σύνδεσή της διάταξης σε πιο ψηλές δοκούς, τρίποδες ή άλλες στηρίγματα, όποτε απαιτούνταν μεγαλύτερη ανύψωση από το έδαφος.

Στον Πίνακα 4.1 δίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των βασικών στοιχείων του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.

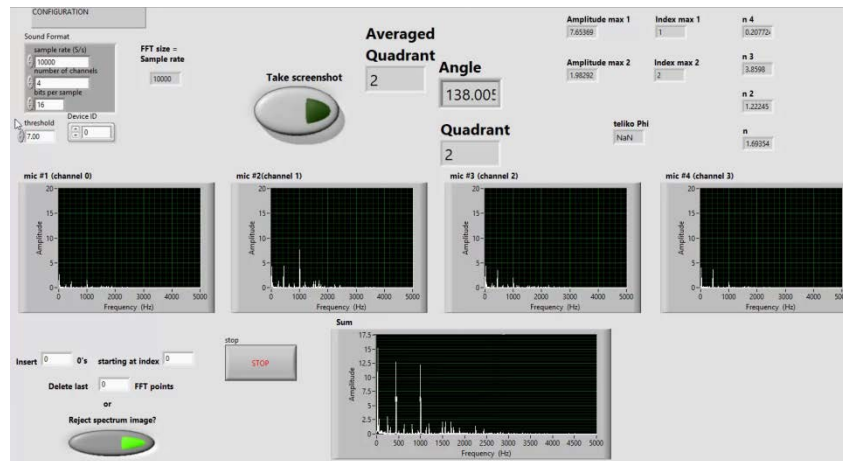
Τύπος υλικού	Κατασκευαστής/ Μοντέλο	Χαρακτηριστικά
Μικρόφωνο	AKG P170 General Purpose Instrumental Microphones	Capsule: 1/2" true condenser Frequency Response: 20 Hz to 20 kHz Sensitivity: 15 mV/Pa (-36.5 dBV)
Καλώδια	Proel CHL-250 LU10	Length: 10 m Conductor resistance: 85 Ohm/km Diameter: 6.15 ± 0.2 mm Connection: XLR
Κάρτα ήχου	TASCAM US-16x08 USB 2.0 Audio Interface/ Microphone Preamp	Sampling frequencies: 44.1, 48, 88.2, 96 kHz Quantization bit depth: 16/24-bit Phantom power: +48 V

*Πίνακας 4.1: Κυριότερα χαρακτηριστικά εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την παθητική ανίχνευση UAS*

Με τη συστοιχία, πραγματοποιούνται 2 λειτουργίες:

- 1) Εκτίμηση τεταρτημορίου και γωνίας άφιξης σήματος

Για την υλοποίηση του αλγόριθμου που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2, δημιουργήθηκε σε LabVIEW κατάλληλη εφαρμογή, της οποίας το αρχικό interface φαίνεται στην Εικόνα 4.12. Η βελτιωμένη εκδοχή του θα παρουσιαστεί στην αντίστοιχη Ενότητα 4.2.2.



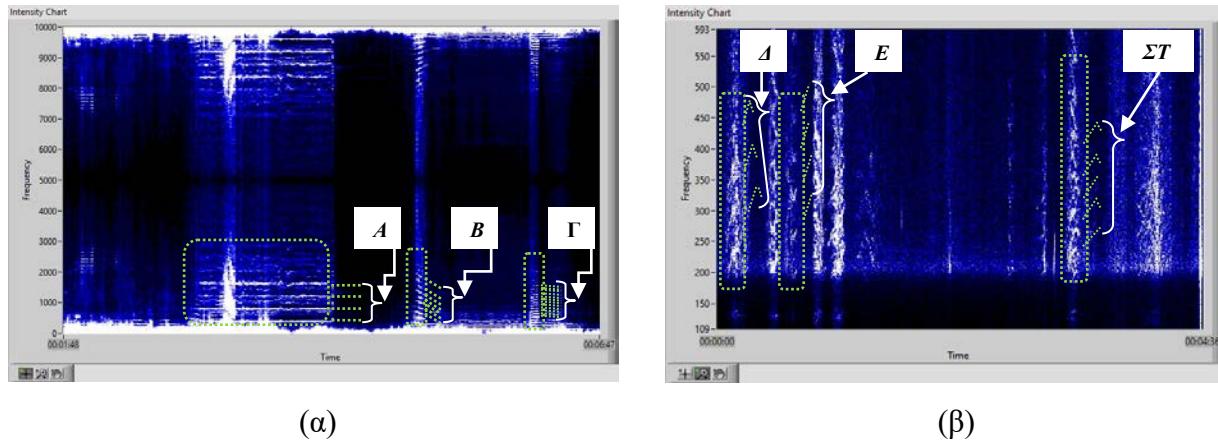
Εικόνα 4.12: Αρχικό περιβάλλον εφαρμογής για την εκτίμηση τεταρτημορίου και γωνίας άφιξης (DOA)

Κατά τις δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη απόσταση στην οποία μπορεί να επιτευχθεί ανίχνευση είναι μικρότερη από 100 m, κάτι που αναμένονταν λόγω σημαντικής εξασθένισης του (μηχανικού) ηχητικού κύματος και των περιορισμών ευαισθησίας του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Η εκτίμηση επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις που θα παρουσιαστούν στην επόμενη Ενότητα, όπου υπολογίζεται με ακρίβεια η μέγιστη απόσταση στην οποία επιτυγχάνεται εντοπισμός γωνίας με βεβαιότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εφαρμογή εντοπίζει την κατεύθυνση άφιξης του ισχυρότερου ηχητικού σήματος χωρίς να διακρίνει το είδος της πηγής του, γίνεται σαφές ότι για την αναγνώριση/ταυτοποίηση του σήματος – στόχου, είναι αναγκαία η δημιουργία εφαρμογής που να εκμεταλλεύεται το φάσμα του λαμβανόμενου ήχου. Αυτή παρουσιάζεται στη 2<sup>η</sup> λειτουργία της συστοιχίας που αναλύεται παρακάτω.

## 2) Αναγνώριση και ταυτοποίηση στόχου

Αρχική επιδίωξη ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων για το είδος του UAS, μέσω της συσχέτισης αρμονικών γραμμών που αναφέρθηκε στις Ενότητες 2.1.2.1 και 2.2.2. Για την απεικόνιση της μορφής του φάσματος του ηχητικού σήματος στο χρόνο, χρησιμοποιήθηκαν waterfall intensity charts όπως αυτά που φαίνονται στην Εικόνα 4.13. Οι χρονικές στιγμές (οριζόντιος άξονας) με ισχυρά σήματα που δίνουν μεγάλου πλάτους συντελεστές Fourier, απεικονίζονται με έντονο λευκό χρώμα στην αντίστοιχη συχνότητα του φάσματος (κατακόρυφος άξονας).



Εικόνα 4.13: Φασματογραφήματα ηχητικών σημάτων από πτήσεις διάφορων μέσων

Η απόσταση μεταξύ αρμονικών γραμμών επιτρέπει την αντιστοίχσή τους με συγκεκριμένο είδος πτητικού μέσου: οι γραμμές που φαίνονται στις περιοχές Α, Δ, Ε της Εικόνας 4.13 και αντιστοιχούν σε πτήση ελικοπτερου (με 2 στροφεία), δεν είναι το ίδιο «πυκνές» με τις γραμμές στις περιοχές Β, Γ, ΣΤ που αντιστοιχούν σε πτήση μικρού αεροσκάφους (με 3 στροφεία).

Επιπλέον, η θετική ή αρνητική κλίση των γραμμών, υποδεικνύει ότι το μέσο προσεγγίζει (περιοχή Ε), απομακρύνεται (περιοχή Β) ή παραμένει σε σταθερή απόσταση (περιοχή Α) σε σχέση με τη διάταξη μικροφώνων, λόγω του φαινομένου Doppler που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.1.1.3.

Παρόλο που η μέθοδος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ταυτοποίηση, δεν ενσωματώθηκε στο τελικά προτεινόμενο σύστημα. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτή σχετίζονται κυρίως με το ότι (α) έχει μελετηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία και δεν παρουσιάζει σημαντικό βαθμό πρωτοτυπίας ως προς την έρευνα, (β) απαιτεί περισσότερο χρόνο για την αποτύπωση των αρμονικών γραμμών και την πρόβλεψη της ταυτότητας του στόχου και κατ' επέκταση (γ) υστερεί σε απόδοση σε σχέση με τις σύγχρονες τεχνικές μηχανικής μάθησης, οι οποίες εκτελούν την παραπάνω διαδικασία σε πραγματικό χρόνο.

## 4.2. Προτεινόμενο Ενοποιημένο Σύστημα

Η ανάπτυξη των υποσυστημάτων και ενσωμάτωσή τους σε ενοποιημένο σύστημα, διακρίνεται σε επιμέρους στάδια:

### 4.2.1. Αρχικά Στάδια

Τα επιμέρους συστήματα που δοκιμάστηκαν και παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.1, τοποθετήθηκαν σε μεταλλικό ιστό ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση δοκιμών σε εξωτερικό χώρο. Στην Εικόνα 4.14, φαίνεται το ενοποιημένο σύστημα που αποτελείται από την ευθύγραμμη συστοιχία μικροφώνων, το ραντάρ 875 MHz και το ραντάρ 2.45 GHz. Η μελέτη της συγκεκριμένης διάταξης δε συνεχίστηκε, για τους λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες Ενότητες καθώς επίσης και διότι η στατική κατασκευή του δεν παρείχε τη δυνατότητα για σάρωση 360° του χώρου που απαιτεί η επιτήρηση για πτήση UAS.



Εικόνα 4.14: 1<sup>η</sup> φάση ενοποίησης του συστήματος



Εικόνα 4.15: 2<sup>η</sup> φάση ενοποίησης του συστήματος

Μετά τα συμπεράσματα για τις διατάξεις της 1<sup>ης</sup> φάσης του συστήματος, η προσπάθεια επικεντρώθηκε στο ραντάρ 24 GHz και τη συστοιχία μικροφώνων σε διάταξη σταυρού. Το ραντάρ τροποποιήθηκε από την αρχική του μορφή της Εικόνας 4.7, με τις χοανοκεραίες να τοποθετούνται κατακόρυφα προσανατολισμένες σε ένα περιστρεφόμενο ανακλαστήρα από μεταλλικό φύλο. Στη βάση του ραντάρ, προσαρμόστηκαν οι αντάπτορες συγκράτησης των

μικροφώνων και το σύνολο των υποσυστημάτων τοποθετήθηκε σε μεταλλικό ιστό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15.

Το σύστημα δοκιμάστηκε σε ανοιχτό πεδίο, όπου ανέκυψαν τα εξής ζητήματα με τη λειτουργία του:

- Μη δυνατότητα ρύθμισης των αποστάσεων των μικροφώνων ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της Ενότητας 3.2.
- Ο ήχος του ηλεκτροκινητήρα και του περιστρεφόμενου κατόπτρου, συλλέγονταν από τα μικρόφωνα που βρίσκονταν σε μικρή απόσταση και επηρέαζαν την παθητική ανίχνευση μέσω ακουστικών κυμάτων.
- Η περιστροφή του ανακλαστήρα με DC motor, δεν επέτρεπε τον ακριβή του έλεγχο.
- Το κέρδος των χοανοκεραιών δεν επαρκούσε για την ανίχνευση των ασθενών σημάτων επιστροφής λόγω Doppler του UAS.

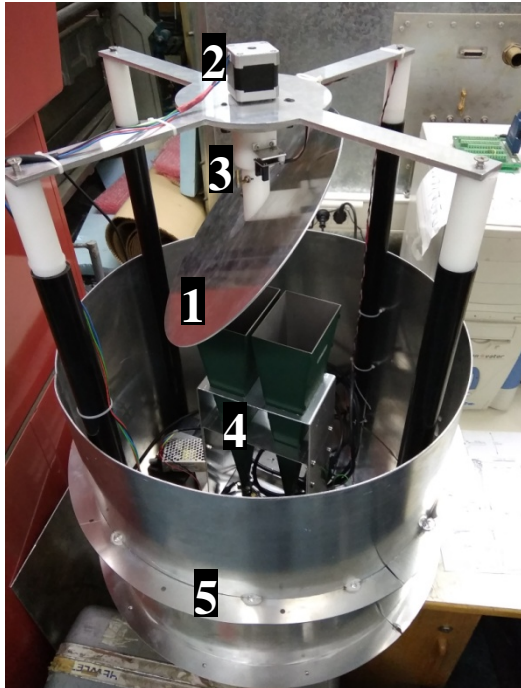
Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με τις τροποποιήσεις – βελτιώσεις που εφαρμόστηκαν στην 3<sup>η</sup> φάση (τελικό στάδιο) και παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 4.2.2. Τελικό Στάδιο

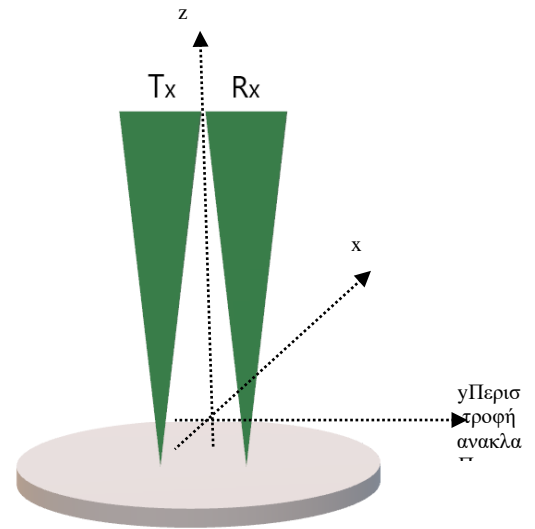
Στην Εικόνα 4.16 φαίνεται (α) η τελική μορφή του ραντάρ 24 GHz καθώς και (β) ένα σχηματικό διάγραμμα αναφοράς του. Αναλυτικά, οι παρεμβάσεις που έγιναν στο σύστημα, έχουν όπως παρακάτω:

1. Αντικατάσταση του ανακλαστήρα από πιο στιβαρό μεταλλικό φύλλο.
2. Τοποθέτηση stepper motor για την περιστροφή του ανακλαστήρα με μεγαλύτερη ακρίβεια στο χειρισμό.
3. Τοποθέτηση αισθητήρα για αρχικοποίηση των μετρήσεων γωνίας κατά τη σάρωση του χώρου.
4. Αντικατάσταση χοανοκεραιών με νέες μεγαλύτερου κέρδους από αυτές που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.1.3.





(α)



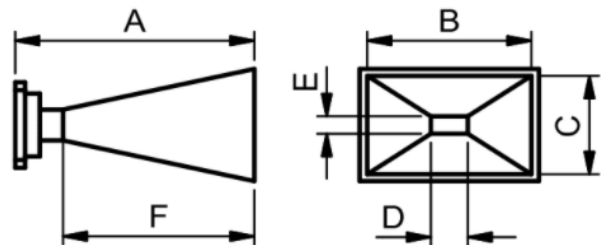
(β)

Εικόνα 4.16: Τελική μορφή του ραντάρ 24 GHz

5. Κατασκευή μεταλλικού περιβλήματος για την προστασία της διάταξης (με τεφλόν στο χώρο σάρωσης της δέσμης του ραντάρ για την αποφυγή ανακλάσεων).

Για τη βελτίωση της ικανότητας ανίχνευσης του ραντάρ, οι αρχικές του χοανοκεραίες αντικαταστάθηκαν από άλλες μεγαλύτερου κέρδους και τα χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή έχουν όπως στο Σχήμα 4.3:

Waveguide Size:	WG20 (WR42, R220)
Nominal Gain:	20 dBi
Operating Frequencies:	17.6 - 26.7 GHz
Overall Length (A):	120.3 mm (4.736 inch)
Aperture Width (B):	52.00 mm (2.047 inch)
Aperture Height (C):	37.40 mm (1.472 inch)
Waveguide Width (D):	10.668 mm (0.420 inch)
Waveguide Height (E):	4.318 mm (0.170 inch)
Flare Length (F):	115.20 mm (4.535 inch)



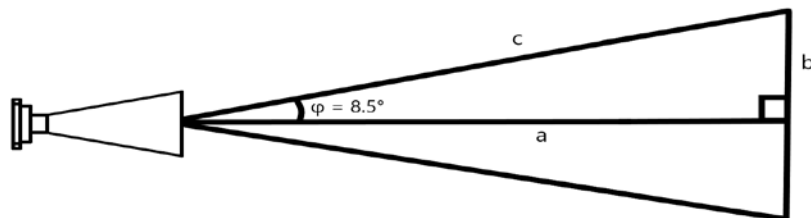
Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικά Standard Gain Horn Antenna

Το κέρδος, καθώς οι γωνίες ημίσειας ισχύος στο οριζόντιο/κατακόρυφο επίπεδο στη συγκεκριμένη συχνότητα, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2 σε σύγκριση με τις αρχικές κεραιές του συστήματος που δόθηκαν στις σχέσεις (4.4).

Αρχική κεραία	$G = 18.27dB, \varphi_v = 42.5^\circ, \varphi_h = 12.5^\circ$	(4.4)
Νέα κεραία	$G = 20.59dBi, \varphi_v = 17^\circ, \varphi_h = 16.4^\circ$	(4.5)

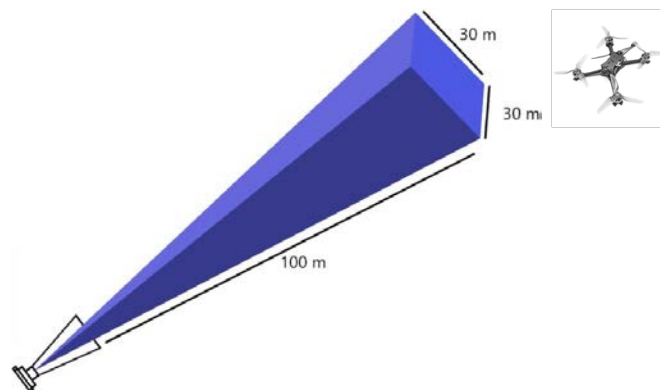
Πίνακας 4.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών χοανοκεραιών

Σχηματικά, το beamwidth των κεραιών του ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 4.4, από όπου με απλούς υπολογισμούς εξάγεται ότι  $b = a \tan \varphi$  ή  $b = 0.149451a$ .



Σχήμα 4.4: Beamwidth κεραιών ραντάρ

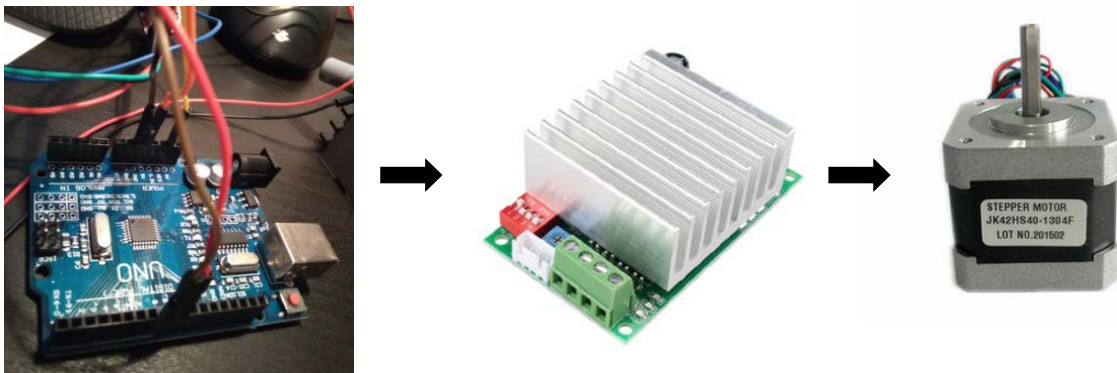
Ενδεικτικά και για μια απόσταση  $a = 100\text{ m}$ , ο όγκος αποκάλυψης ενός στόχου φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Παρατηρείται ότι προσεγγιστικά, σε απόσταση 100 m από το ραντάρ δημιουργείται μια επιφάνεια 30m x 30m στο χώρο, εντός της οποίας κινούμενα αντικείμενα αναμένεται να δώσουν σημαντικές επιστροφές, καθώς βρίσκονται εντός του κυρίου λοβού του ραντάρ.



Σχήμα 4.5: Περιοχή (θεωρητική) αποκάλυψης ραντάρ

Επιπλέον, μετά από τροποποιήσεις στη συνδεσμολογία, η απόκτηση δεδομένων (DAQ – Data Acquisition) από το ραντάρ δε γίνεται πλέον μέσω του jack ήχου, αλλά με ξεχωριστή συσκευή DAQ, ελαχιστοποιώντας τις παραμορφώσεις και το θόρυβο που εισήγαγε η κάρτα ήχου του Η/Υ.

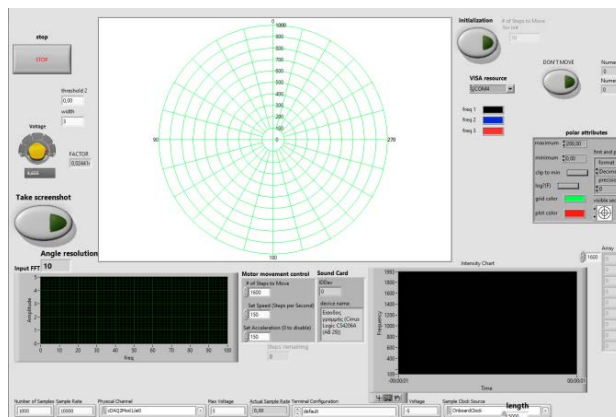
Όσον αφορά τον έλεγχο περιστροφής του ανακλαστήρα, σημειώνεται ότι το βήμα του stepper motor είναι  $1.8^\circ$  (200 βήματα για πλήρη περιστροφή), το οποίο μέσω του driver μπορεί να διαιρεθεί σε 2, 4, 8, 16 ή 32 microsteps για μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τη γωνία εντοπισμού. (Εικόνα 4.17)



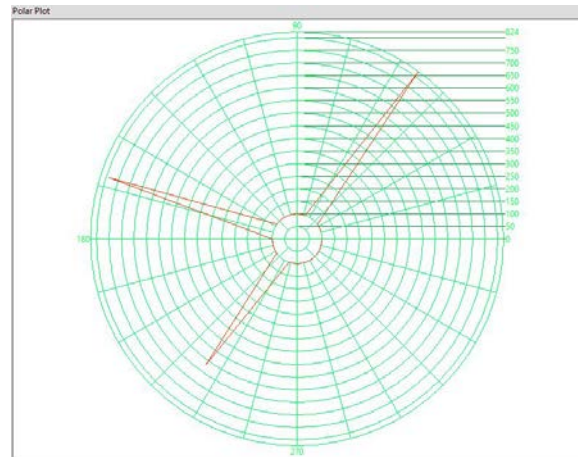
*Εικόνα 4.17: Μηχανισμός Περιστροφής Ανακλαστήρα*

Δοκιμές του συστήματος πραγματοποιήθηκαν σε διάφορους εξωτερικούς χώρους και υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες, για την παρατήρηση διάφορων πτητικών μέσων: ελικόπτερα, μικρά αεροσκάφη και UAS. Η ανάπτυξη των υποσυστημάτων και η διασύνδεσή τους με Η/Υ γίνεται σε λίγα λεπτά ενώ τροφοδοτείται από τυπική παροχή ρεύματος δικτύου (230V, 50 Hz).

Στην Εικόνα 4.18α φαίνεται ένα interface της λειτουργίας περιμετρικής σάρωσης και στην 4.18β το αποτέλεσμα μιας σάρωσης  $360^\circ$ . Στο στιγμιότυπο (β), βλέπουμε τον εντοπισμό 3 στόχων με διαφορετικό πλάτος στις  $\sim 55^\circ$ ,  $\sim 160^\circ$  και  $\sim 230^\circ$ . Το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα διάκρισης ανάμεσα στους στόχους (μέγεθος, είδος) με αποτέλεσμα κινήσεις αντικειμένων εντός του πεδίου αντίληψης που δεν είναι UAS ή πτητικά μέσα (όπως κινήσεις φορητών, αυτοκινήτων) να εμφανίζονται ως ψευδοστόχοι. Η αδυναμία αυτή, αντιμετωπίζεται από τη συνέργεια με τη συστοιχία μικροφώνων που πραγματοποιεί την ταυτοποίηση του στόχου.



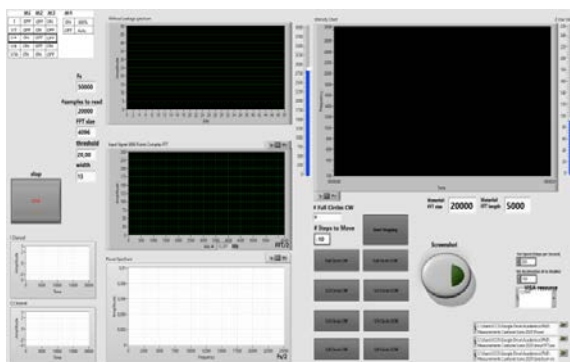
(α)



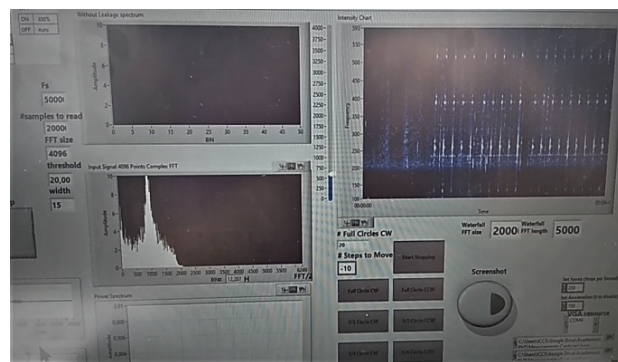
(β)

Εικόνα 4.18: (α) Interface εφαρμογής για ανίχνευση 360° και (β) αποτελέσματα σάρωσης

Μια επιπλέον λειτουργία που δοκιμάστηκε, είναι αυτή της σάρωσης σε τομείς ενδιαφέροντος. Στην Εικόνα 4.19α φαίνεται το interface της λειτουργίας ανίχνευσης σε συγκεκριμένους τομείς και στην 4.19β το αποτέλεσμα μιας σάρωσης σε τομέα 90°. Στην περίπτωση που ορίζουμε το χώρο σάρωσης σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος, ο υπολογισμός της ακριβούς γωνίας του στόχου δεν είναι απαραίτητος και παραλήφθηκε ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα και το υπολογιστικό κόστος.



(α)



(β)

Εικόνα 4.19: (α) Interface εφαρμογής για την ανίχνευση σε τομείς και (β) αποτελέσματα σάρωσης

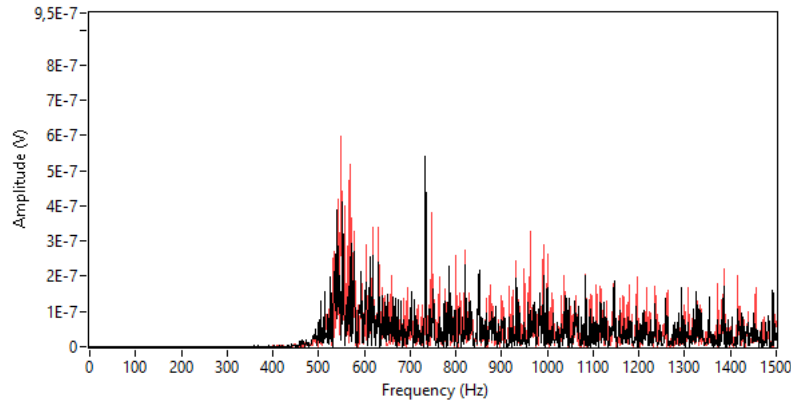
Στην Εικόνα 4.20 φαίνεται η εγκατάσταση του συστήματος για την πραγματοποίηση μετρήσεων και δοκιμών σε ανοιχτό πεδίο.



Εικόνα 4.20: Ανάπτυξη του συστήματος ανίχνευσης-ταυτοποίησης σε ανοιχτό χώρο

Επισημαίνεται ότι πριν την έναρξη των δοκιμών, προηγείται ο μηδενισμός (calibration) της όλης διάταξης ώστε να εξασφαλιστεί η κανονική διασύνδεση μεταξύ των διάφορων υποσυστημάτων και για την απόκτηση μιας εκτίμησης για το επίπεδο θορύβου (noise floor) όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Το ραντάρ τοποθετείται σε μια ανοιχτή, χωρίς εμπόδια περιοχή, με τις κεραιές ανεμπόδιστες να «κοιτούν» προς τα άνω. Η ευαισθησία του συστήματος προσδιορίστηκε στα -100 dBm· το ελάχιστο δυνατό πλάτος σήματος το οποίο ο δέκτης μπορεί να διακρίνει από το επίπεδο θορύβου, το οποίο αποτελεί μια ασφαλή εκτίμηση, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη το αντίστοιχο φάσμα των αποκρίσεων Doppler, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, που αποτυπώνει το λαμβανόμενο φάσμα, στην περίπτωση που δεν υπάρχει πτήση UAS. Για την αποφυγή φασματικής διαρροής (spectral leakage), εφαρμόστηκε παράθυρο Hamming στο λαμβανόμενο σήμα.



*Σχήμα 4.6: Κορυφές FFT στο φάσμα των επιστροφών Doppler, χωρίς παρουσία UAS (στάθμη θορύβου)*

Συνολικά 5.000 σημεία FFT λήφθηκαν υπόψη με ρυθμό δειγματοληψίας 10.000 Hz, ο οποίος (ρυθμός) αποδείχτηκε ικανοποιητικός για την παροχή επαρκούς ευκρίνειας συχνότητας (frequency resolution) για την απαιτούμενη επεξεργασία σήματος του συστήματος.

Προκειμένου να διερευνηθούν και τελικά να προσδιοριστούν οι διάφορες παράμετροι του επιστρεφόμενου σήματος ραντάρ που αναφέρθηκαν (όπως κατάλληλος ρυθμός δειγματοληψίας και πλήθος σημείων FFT), χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά UAS κατά τις δοκιμές. Το είδος και το μέγεθός τους ποικίλει από μεγάλα, custom-made εξακόπτερα όπως στην Εικόνα 4.21α έως μικρό ελικόπτερο όπως το Align T-Rex 550X DOMINATOR που φαίνεται στην Εικόνα 4.21β. Τα συστήματα αυτά ήταν σημαντικά μεγαλύτερα από το DJI Phantom 3 Advanced που, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τις δοκιμές, λόγω της ευρείας διάδοσης στη χρήση του κυρίως από ερασιτέχνες χρήστες.



(α)



(β)

*Εικόνα 4.21: UAS που χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές, (α) εξακόπτερο και (β) μικρό ελικόπτερο*

Στη συνέχεια, το UAS τέθηκε σε αιώρηση σε διαφορετικά ύψη πάνω από τις κεραιές του ραντάρ. Με τις πτέρυγες να περιστρέφονται στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες  $x$  και  $y$  (κάθετα στον άξονα  $z$ ), οι αποκρίσεις Doppler είναι ελάχιστες. Ενδεικτικές τιμές των επιστροφών Doppler από την πτήση του UAS σε διαφορετικά ύψη, παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

Ύψος πτήσης (m)	Πλάτος επιστροφών Doppler (V)
5	0.5
10	$2 \times 10^{-2}$
20	$3 \times 10^{-3}$
50	$10^{-4}$
80	$10^{-5}$
100	$10^{-6}$

*Πίνακας 4.3: Ενδεικτικές τιμές πλάτους των επιστροφών Doppler (κορυφές) από το UAS κατά την αιώρηση*

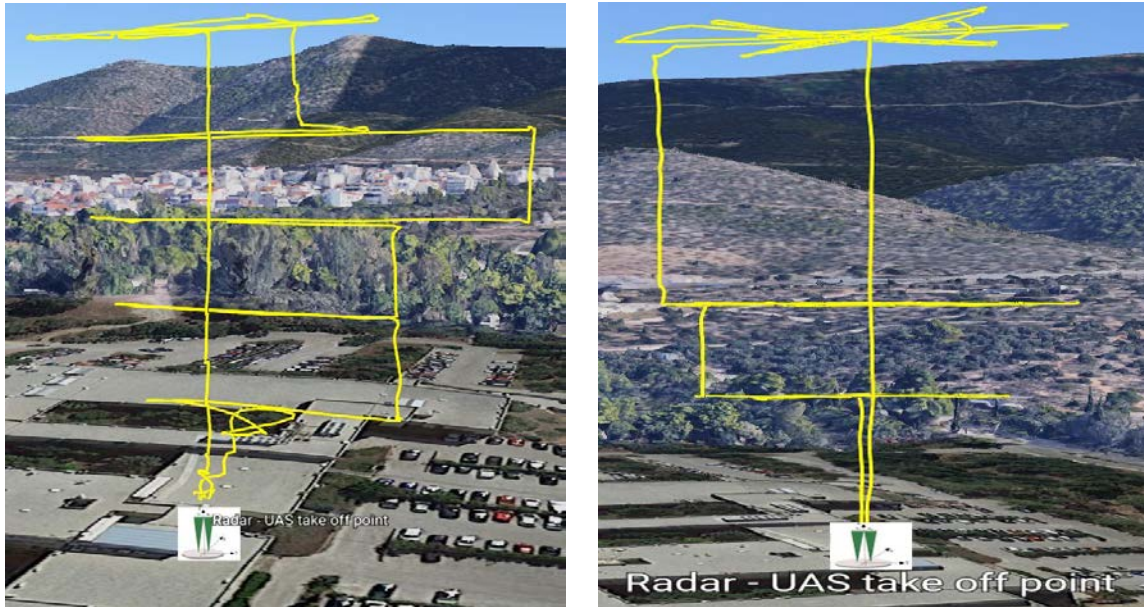
Έχοντας μια εκτίμηση του επιπέδου θορύβου, αυτό μπορεί να αφαιρεθεί από το λαμβανόμενο σήμα, ώστε να προκύψει μια πιο ακριβής απεικόνιση των αποκρίσεων Doppler.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κυρίως σε περιοχές εντός του ΕΜΠ, κοντά στα παλιά κτίρια της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, με δυο τρόπους (modes) λειτουργίας, στατικό και λειτουργίας σάρωσης  $360^\circ$  που παρουσιάζονται παρακάτω.

#### Στατική Λειτουργία

Για να δοκιμαστεί η ικανότητα ανίχνευσης του ραντάρ σε στατική λειτουργία, το UAS οδηγήθηκε σε πτήση πάνω από το ραντάρ ακολουθώντας τα δρομολόγια πτήσης, σε ευθεία γραμμή και σε διάταξη «X» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Η κατακόρυφη απόσταση (ύψος πτήσης, κατά τον άξονα  $z$ , αυξανόταν σε βήματα των 20 m μέχρι το μέγιστο των 100 m, εξαιτίας περιορισμών για την ασφάλεια πτήσεων. Στη συνέχεια, το UAS πραγματοποίησε διελεύσεις πάνω από τον όγκο αποκάλυψης του ραντάρ (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5) και προκειμένου να γίνουν αμερόληπτες (unbiased) μετρήσεις, δεν υπήρχε μέριμνα ώστε το UAS να περνάει ακριβώς πάνω από την κύρια δέσμη του ραντάρ, κάτι που θα εξασφάλιζε ιδανικές συνθήκες. Με

τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται μια περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση για ένα σενάριο πιθανής ανίχνευσης, καθώς δεν υπάρχει η βεβαιότητα ότι το UAS θα πετάξει μέσα από την περιοχή αποκάλυψης.



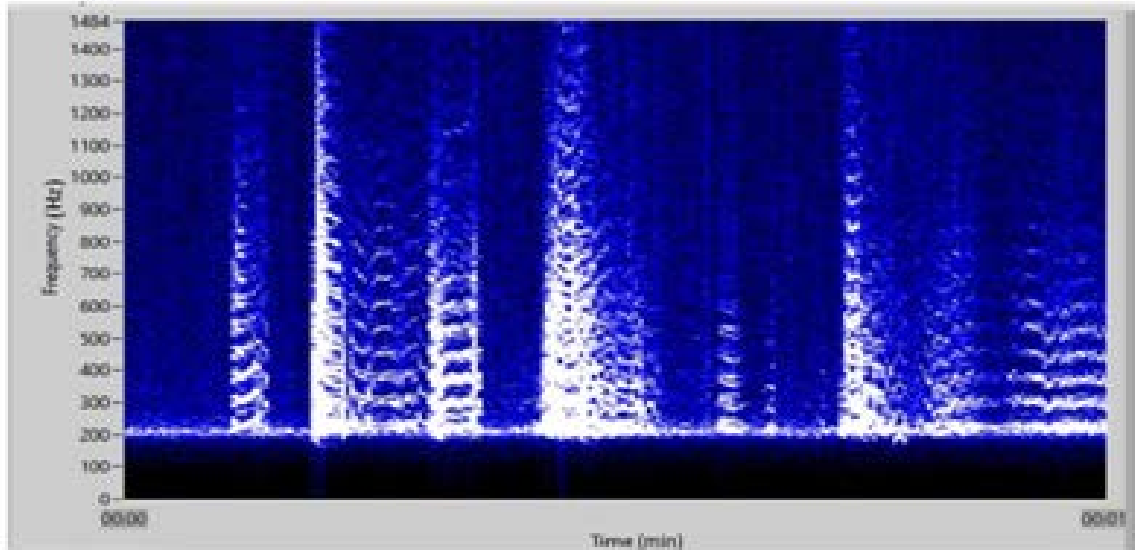
(α)

(β)

Σχήμα 4.7: Τχνη διαδρομής πτήσης του UAS (με το ραντάρ σε στατική λειτουργία) σε (α) ευθείες γραμμές και (β) διαδρομή σε μορφή «X»

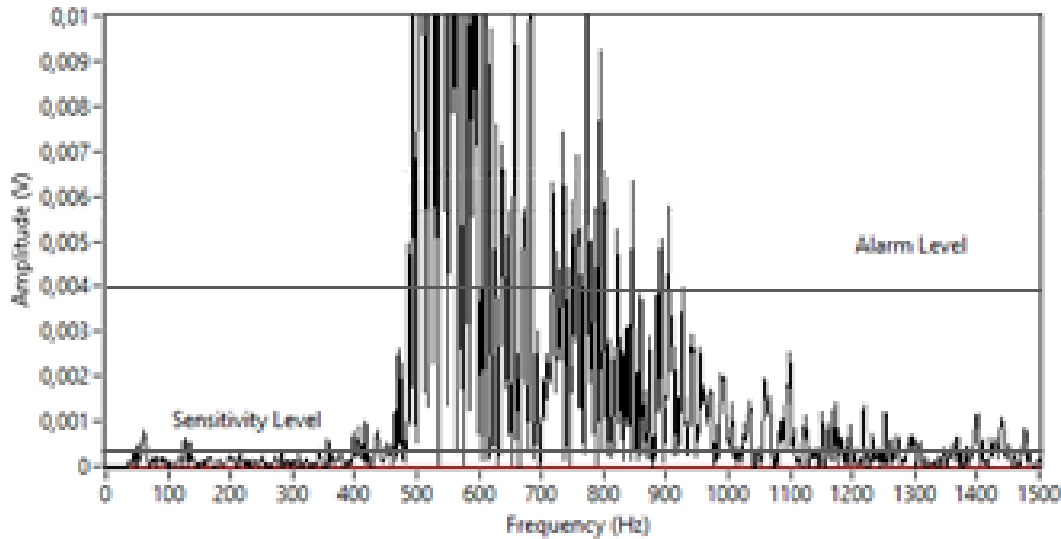
Το φάσμα ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σχεδιάζεται σε διάγραμμα χρόνου-συχνότητας (time-frequency intensity chart) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.22, απεικονίζοντας τις αποκρίσεις κατά τη διαδρομή του UAS. Από την ίδια Εικόνα γίνεται φανερό ότι το κύριο φασματικό περιεχόμενο εντοπίζεται στην περιοχή συχνοτήτων κάτω από τα 1.5 kHz.





Εικόνα 4.22: Φάσμα ισχύος του λαμβανόμενου σήματος στο χρόνο

Ένα στιγμιότυπο από το διάγραμμα πλάτους – συχνότητας δίνεται στην Εικόνα 4.23, όπου φαίνονται οι λαμβανόμενες κορυφές FFT κατά την πτήση του UAS πάνω από το ραντάρ. Στο ίδιο διάγραμμα, οι ενεργοί κέρσορες “Sensitivity Level” και “Alarm Level” εμφανίζονται ως οριζόντιες γραμμές. Η στάθμη τους ορίζεται κατά τη διαδικασία μηδενισμού/βαθμονόμησης και οριοθετούν το ύψος των επιπέδων θορύβου και το κατώφλι ανίχνευσης αντίστοιχα. Ως κατώφλι ανίχνευσης, θεωρούμε το ελάχιστο πλάτος (ύψος) κορυφής πάνω από το οποίο έχουμε ασφαλή ανίχνευση. Από την Εικόνα 4.23 φαίνεται ότι οι επικρατέστερες φασματικές συνιστώσες βρίσκονται κοντά στην περιοχή των 550 Hz. Έτσι, με μια παρατηρούμενη συχνότητα Doppler  $f_d = 550 \text{ Hz}$ , από την εξίσωση (2.25) λύνοντας ως προς  $v$ , η αντίστοιχη ταχύτητα είναι  $v = 3,4 \text{ m/s}$  ή  $v = 12,34 \text{ km/h}$ . Αυτές οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με αυτές που παρατηρούνται από το χειριστήριο του UAS σε πραγματικό χρόνο και είναι εντός των τιμών του Πίνακα 2.2.



Εικόνα 4.23: Λαμβανόμενες κορυφές FFT από την πτήση του UAS πάνω από το ραντάρ

Η διαδρομή του UAS πάνω από το ραντάρ, επαναλήφθηκε 17 φορές, που αντιστοιχούν σε συνολικά 2.5 ώρες πτήσης, με μέσο όρο διάρκειας κάθε ξεχωριστής πτήσης να είναι περίπου 9 λεπτά. Δεν παρατηρήθηκαν ψευδείς ανιχνεύσεις (false alarms), παρά την παρουσία και τις περιστασιακές διελεύσεις πουλιών από την περιοχή, που προκάλεσε ελάχιστη όχληση με τη μορφή clutter.

#### Λειτουργία σάρωσης 360°

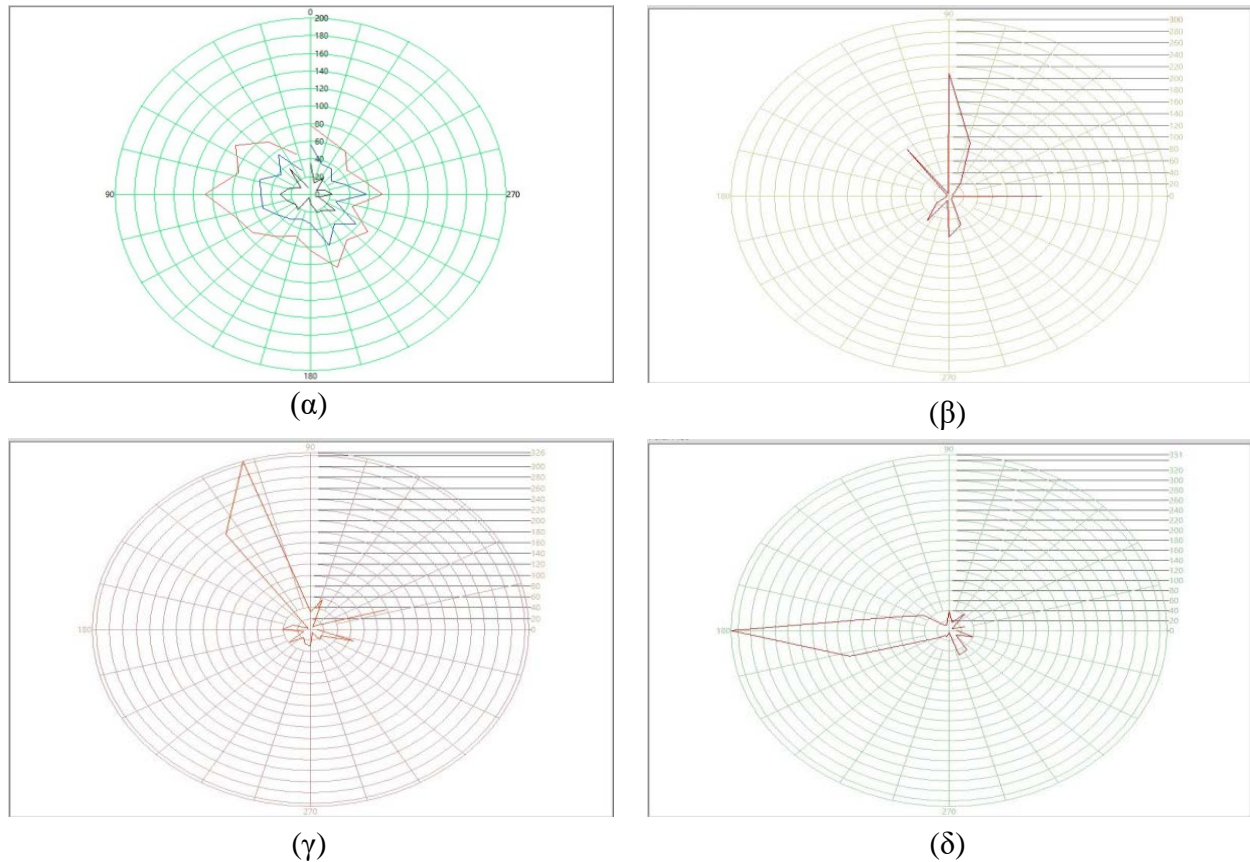
Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, στο ραντάρ τοποθετήθηκε περιστρεφόμενος ανακλαστήρας ελλειψοειδούς μορφής, μέσω του οποίου η δέσμη του στράφηκε κατά 90° καθιστώντας την παράλληλη στο επίπεδο x-y, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.16β. Για την εξασφάλιση της ακρίβειας στον έλεγχο κίνησης του ανακλαστήρα, τοποθετήθηκε αισθητήρας για την αρχικοποίηση των μετρήσεων γωνίας, όπως προαναφέρθηκε και φαίνεται στην 4.21(α) και σημειώθηκε με την ένδειξη «3». Με τον τρόπο αυτό, ήταν εφικτή σε επίπεδο υλικού η επιβεβαίωση της πλήρους περιστροφής του ανακλαστήρα πριν την έναρξη κάθε νέας σάρωσης.



Σχήμα 4.8: Ίχνος πτήσης του UAS κατά τις δοκιμές λειτουργίας σάρωσης 360°

Η διαδικασία δοκιμών για την αποτελεσματικότητα ανίχνευσης σε αυτό το mode λειτουργίας, εμφανίζεται στο Σχήμα 4.8. Συγκεκριμένα, θεωρώντας τη θέση του ραντάρ ως κέντρο, το UAS εκτέλεσε πτήσεις ακολουθώντας την περίμετρο των 3 κύκλων (με διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 4.8) διαμέτρου 100 m, 200 m και 300 m αντίστοιχα. Τα σχετικά σημεία έχουν επισημανθεί με «X» και δείχνουν τα σημεία του ορίζοντα («N» για το βορρά, «S» για το νότο, «E» για την ανατολή και «W» για τη δύση) που αντιστοιχούν στις 0°, 90°, 180° and 270° περιστροφής της δέσμης του ραντάρ. Σε κάθε σημείο «X» για καθένα κύκλο, το UAS σταματούσε την πορεία του και πραγματοποιούσε αιώρηση για 60 δευτερόλεπτα. Η ταχύτητα περιστροφής του ανακλαστήρα είχε οριστεί στα 0.25 Hz, «φωτίζοντας» έτσι το UAS – στόχο 15 φορές κατά τη στάση/αιώρησή του για 60 δευτερόλεπτα.

Η εκτίμηση του προφίλ θορύβου, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη Ενότητα για τη στατική λειτουργία, υπολογίστηκε εκ νέου πριν την πτήση. Το ραντάρ αφέθηκε να εκτελέσει πλήρεις σαρώσεις 360° σε χώρο χωρίς (κινητά) εμπόδια. Το αποτέλεσμα αυτής της σάρωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.9α, όπου φαίνονται σε μορφή πολικού διαγράμματος οι κορυφές FFT που λαμβάνονται από το ραντάρ. Κάθε κλειστή γραμμή αντιπροσωπεύει το πλάτος του FFT για την απόκριση Doppler, σε κάθε μία από τις υψηλότερες συχνότητες που ανιχνεύτηκαν, υπολογισμένες σε βήματα των 5 μοιρών.



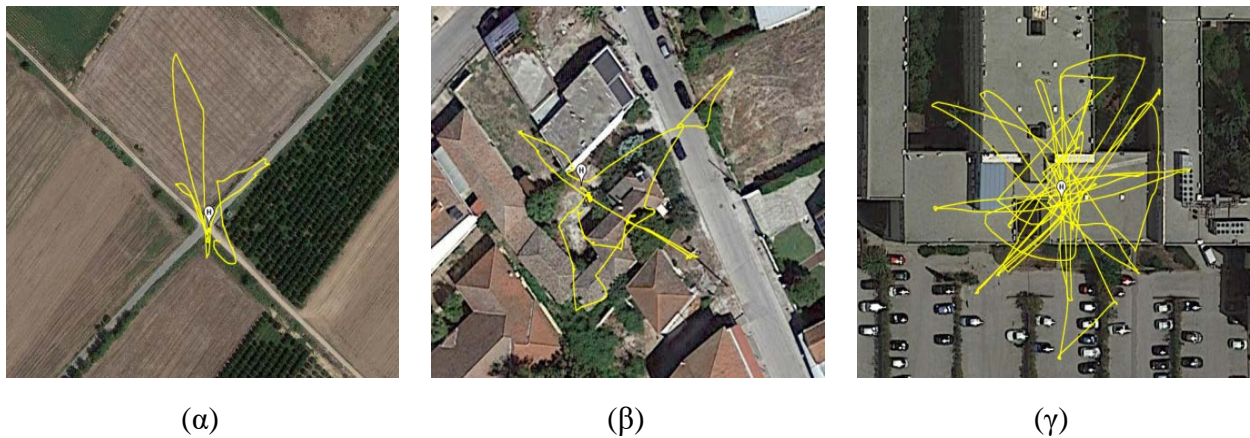
Σχήμα 4.9: Πολικά διαγράμματα των κορυφών FFT που λαμβάνονται από το ραντάρ: (α) κατά τη βαθμονόμηση – λήψη προφίλ θορύβου, (β), (γ), (δ) με το UAS – στόχο αιωρούμενο στα 150 m σε διάφορους προσανατολισμούς

Τα Σχήματα 4.9β, 4.9γ και 4.9δ δείχνουν χαρακτηριστικά παραδείγματα ανίχνευσης UAS κατά την πτήση τους στον «εξωτερικό» κύκλο, σε αιώρηση στα 150 m από το ραντάρ και με κατεύθυνση/προσανατολισμό (β) ανατολικά (90°), (γ) βορειοανατολικά (107°) και (δ) βόρεια (180°). Παρόλο που διακρίνονται ανεπιθύμητες (“spurious”) κορυφές, πιθανόν λόγω clutter, το μέγεθος των επιστροφών ραντάρ από το UAS παραμένει κατά 120 mV (πάνω από 5 dB) μεγαλύτερο από αυτές τις –τυχαίες– κορυφές, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη ανίχνευση. Δεδομένου του χαμηλού RCS του συγκεκριμένου τύπου UAS που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, το προτεινόμενο σύστημα επιτυγχάνει υψηλό βαθμό αξιοπιστίας στην ανίχνευση.

#### Εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης ακουστικού σήματος

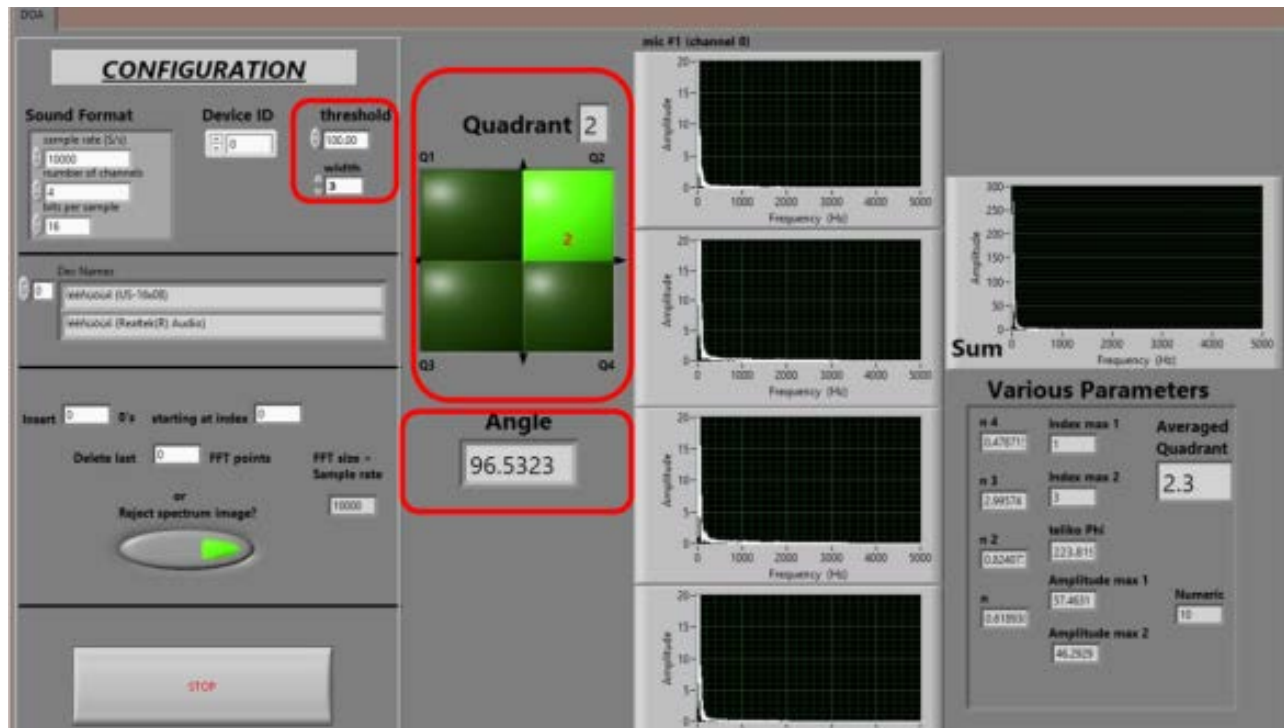
Τα ακουστικά (ηχητικά) κύματα ως μηχανικά κύματα, παρουσιάζουν ιδιαίτερα γρήγορη εξασθένιση καθώς μεταδίδονται μέσα στον ατμοσφαιρικό αέρα. Εκτός από τη διανύμενη

απόσταση, το ποσό ενέργειας (ακουστικό επίπεδο) που λαμβάνεται από ένα μικρόφωνο, εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες που τίθενται από το εκάστοτε περιβάλλον. Για να προσδιοριστεί η μέγιστη απόσταση (range) εντός της οποίας ο αλγόριθμος εκτίμησης DOA μπορεί να παρέχει σταθερές και αληθώς-θετικές ενδείξεις για το τεταρτημόριο από το οποίο προέρχεται το ισχυρότερο ακουστικό σήμα, επιλέχθηκαν οι τοποθεσίες που ανήκουν στους 3 τύπους περιβάλλοντος που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.24: (α) ένα ανοιχτό, ήσυχο αγροτικό περιβάλλον με μεικτή βλάστηση – χωρίς κτήρια ή θόρυβο, (β) ένα επαρχιακό (ημιαστικό) περιβάλλον σε μικρό χωριό, που χαρακτηρίζεται από χαμηλά κτήρια, μέτρια επίπεδα θορύβου και χαμηλή βλάστηση και τέλος (γ) ένα αστικό περιβάλλον με ψηλά κτήρια, σημαντικά επίπεδα θορύβου και απουσία βλάστησης. Σχετικά με την τελευταία κατηγορία, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην ταράτσα κτηρίου και ως εκ τούτου, η επίδραση των φαινομένων αντήχησης/multipath διάδοσης δε μετρήθηκε ούτε ελήφθη ξεχωριστά υπόψη.



*Εικόνα 4.24: Οι τρεις διαφορετικοί τύποι περιβάλλοντος που επιλέχθηκαν για τις δοκιμές του αλγόριθμου DOA: (α) αγροτικό, (β) ημιαστικό και (γ) αστικό*

Στη συνέχεια, το UAS εκτέλεσε πτήσεις σε διαδρομές τυχαίας μορφής στη γύρω περιοχή (τα ίχνη φαίνονται με γραμμές στην Εικόνα 4.24) και η εκτίμηση για τη DOA του σήματος παρακολουθούνταν μέσω του interface της Εικόνας 4.25. Η εκτίμηση τεταρτημορίου επισημαίνεται με πράσινο χρώμα ενώ οι κυριότερες παράμετροι και οι έξοδοι του συστήματος με κόκκινο.

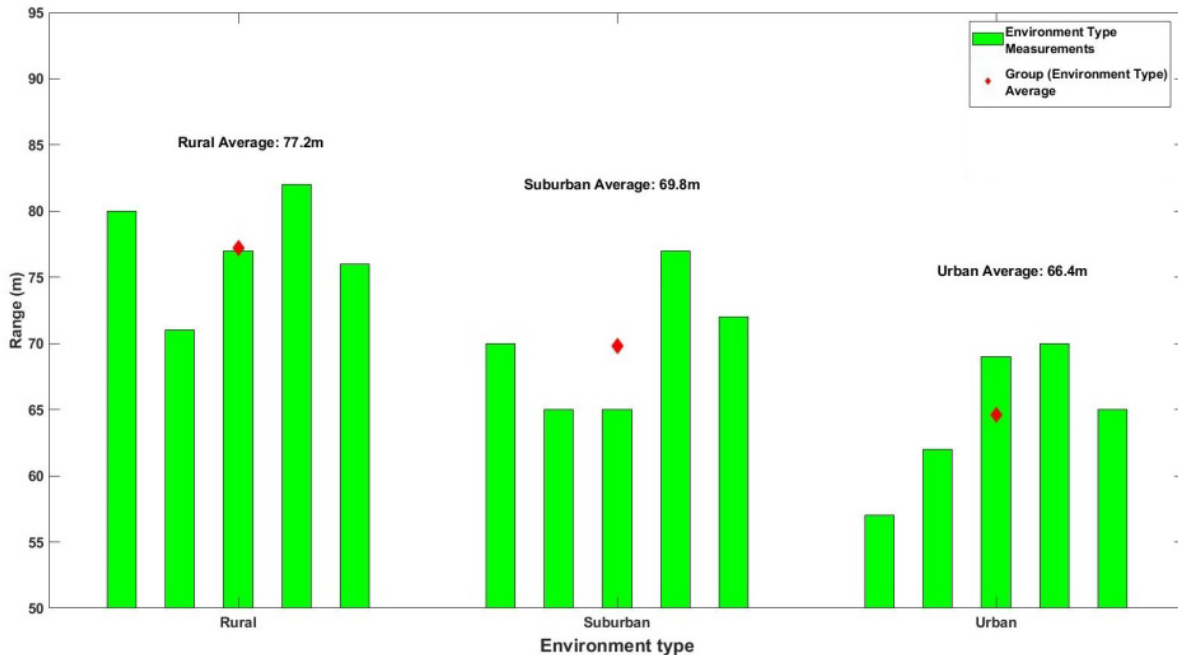


Εικόνα 4.25: Τελικό interface της εφαρμογής για την εκτίμηση DOA

Οι στιγμιαίες κορυφές του σήματος που μπορεί να προκαλούνται από ριπές ανέμου ή/και πηγές θορύβου του περιβάλλοντος, αντιμετωπίστηκαν με την τοποθέτηση αντιανέμιων στα μικρόφωνα ενώ τέθηκε μια παράμετρος κατωφλίου, κάτω από το οποίο όλες οι κορυφές του ηχητικού σήματος δε λαμβάνονται υπόψη κατά τους υπολογισμούς. Με όμοιο τρόπο, το εύρος των κορυφών υπολογισμένο σε σημεία FFT προσδιορίζεται και «στενές» κορυφές απορρίπτονται ως «παρασιτικές». Στην παράμετρο αποδόθηκε η τιμή «3» που καθορίστηκε εμπειρικά, παρατηρώντας τα σχετικά γραφήματα χωρίς την παρουσία UAS. Η ένδειξη για την εκτίμηση τεταρτημορίου και γωνίας, ανανεώνεται κάθε δευτερόλεπτο.

Καθώς το UAS απομακρύνεται από το σημείο απογείωσης, η απόσταση από τη συστοιχία αυξάνει και τα επίπεδα ήχου που λαμβάνονται από κάθε στοιχείο της μειώνονται. Το interface της Εικόνας 4.25 παρακολουθούνταν συνεχώς ώστε να καταγράφεται η ένδειξη τεταρτημορίου. Μέχρι κάποια απόσταση, η ένδειξη της εκτίμησης DOA παραμένει σταθερή και δεν παρατηρείται καμία ψευδώς θετική ένδειξη, υπό τη μορφή ξαφνικής αλλαγής τεταρτημορίου που βρίσκεται σε ασυμφωνία με την πραγματικά παρατηρούμενη πορεία του UAS. Για να υπολογιστεί αυτή η απόσταση, 5 σειρές πτήσεων (runs) εκτελέστηκαν σε κάθε τύπο

περιβάλλοντος, ώστε να υπολογιστεί η μέση μέγιστη απόσταση στην οποία η DOA μπορεί να προσδιοριστεί αναμφίβολα (unambiguously). Το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.10: Μέγιστη απόσταση ανίχνευσης για κάθε τύπο περιβάλλοντος

Όπως είναι διαισθητικά αναμενόμενο, ο ανοιχτός χώρος του αγροτικού περιβάλλοντος επιτρέπει την απρόσκοπτη διάδοση του ήχου, με αποτέλεσμα την ασφαλή εκτίμηση DOA σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αντίθετα μέσα σε αστικό περιβάλλον, η multipath διάδοση που προκαλείται από ψηλά κτήρια και τα υψηλά επίπεδα θορύβου, έχουν αρνητική επίδραση στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τον αριθμό των ψευδών ανιχνεύσεων κοντά στο μηδέν. Σημειωτέον ότι σε κάθε σενάριο, η εκτίμηση της DOA παρουσίασε περιστασιακά απρόσμενες διακυμάνσεις της τάξης των  $\pm 5^\circ$ .

Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας μετρήσεων. Αφού συνυπολογιστούν οι περιορισμοί του χρησιμοποιηθέντος εξοπλισμού και των διαφορετικών σεναρίων που εξετάστηκαν, επαληθεύεται η ικανότητα του συστήματος για εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης ακουστικού σήματος στα 70.53 m.

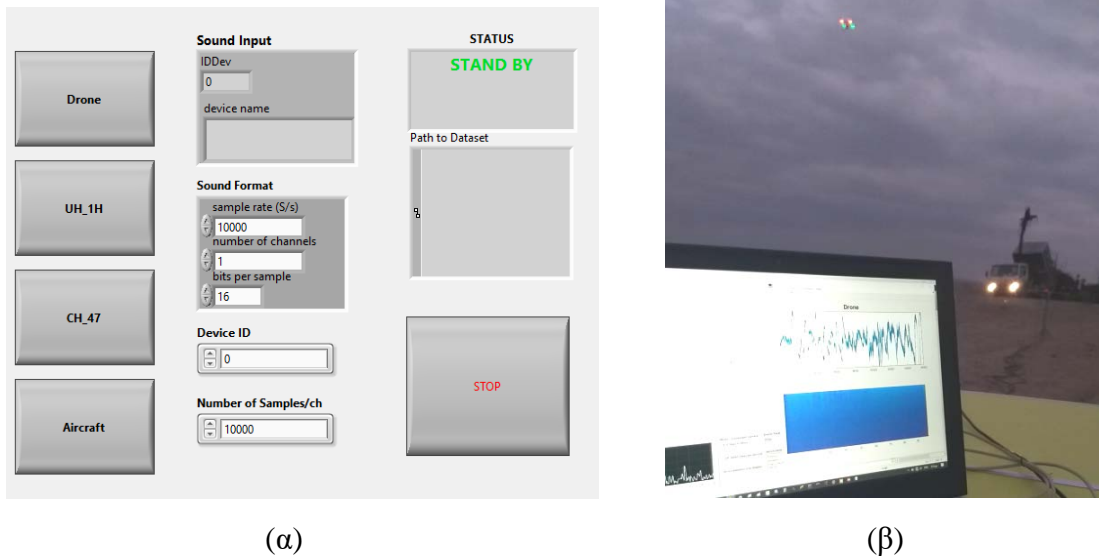
Τύπος Περιβάλλοντος	Μέσος όρος (m)	Γενικός Μέσος Όρος (m)
Αγροτικό	77.2	70.53
Ημιαστικό	69.8	
Αστικό	64.6	

*Πίνακας 4.4: Σύνοψη των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις εκτίμησης DOA σε διάφορα περιβάλλοντα*

#### Ταυτοποίηση UAS μέσω ακουστικού σήματος

Ο σκοπός του συστήματος είναι να αναγνωρίζει πτήσεις UAS και συνεπώς, η ικανότητα διάκρισης εισερχόμενων σημάτων από άλλες εναέριες πηγές ήχου, όπως ελικόπτερα και αεροπλάνα είναι εξαιρετικά σημαντική. Προς αυτή την κατεύθυνση, δείγματα ηχητικών δεδομένων συλλέχθηκαν για την εκπαίδευση του CNN και ομαδοποιήθηκαν στις κατηγορίες που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.3. Παρακολουθώντας τον τοπικό εναέριο χώρο, κάθε φορά που κάποιο εναέριο μέσο πραγματοποιούσε πτήση, ηχογραφούνταν το αντίστοιχο ακουστικό δείγμα (clip). Η δειγματοληψία clips από UAS έγινε κάτω από λιγότερο περιοριστικές συνθήκες, καθώς οι πτήσεις μπορούσαν να διεξάγονται κατ' απαίτηση – σε αντίθεση με τα αεροπλάνα και ελικόπτερα. Επιπλέον, δεν είναι αναγκαία η συλλογή δειγμάτων θορύβου, αφού τα δεδομένα ηχογραφήθηκαν ζωντανά από πραγματικές πτήσεις εναέριων μέσων και αναπόφευκτα περιείχαν θόρυβο στο υπόβαθρο. Στην Εικόνα 4.26 φαίνεται (α) το interface που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή ακουστικών δειγμάτων καθώς και (β) ένα στιγμιότυπο από μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο. Η περιοχή που επελέγη για την ανάπτυξη του συστήματος βρισκόταν σε απόσταση σαφώς μεγαλύτερη των 150 m από το αεροδρόμιο/ελικοδρόμιο.





Εικόνα 4.26: Interface εφαρμογών για (α) τη συλλογή ακουστικών δειγμάτων για την εκπαίδευση του CNN και (β) την ταυτοποίηση «στόχων»

Η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας δυο μεθόδους: (α) μη-δυαδική ταξινόμηση (non-binary classification) όπου ο αλγόριθμος καλείται να «αποφασίσει» εάν ο ήχος του εισερχόμενου σήματος ανήκει σε κάποια από τις δεδομένες κατηγορίες (“Aircraft”, “CH\_47”, “UH\_1H” ή “Drone”) και (β) δυαδική ταξινόμηση (binary classification), στην οποία οι επιλογές κατηγοριοποίησης περιορίζονται μεταξύ “Drone” ή “Other”.

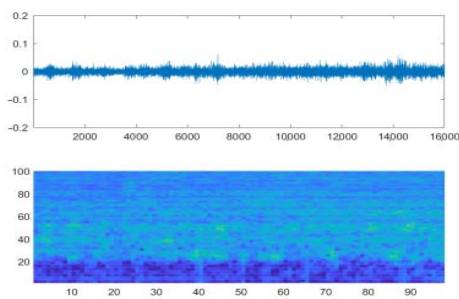
Για καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις, το δίκτυο έπρεπε να εκπαιδευτεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους και χειρισμούς του dataset (Ενότητα 3.3). Κατ’ επέκταση, το σύστημα δοκιμάστηκε σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, με παρατήρηση διαφορετικού πλήθους πτήσεων. Στον Πίνακα 4.5 συνοψίζονται τα στοιχεία για τον αριθμό πτήσεων (“runs”) που παρατηρήθηκαν για κάθε μέθοδο.

	Non-Binary Classification	Binary Classification
	Αριθμός πτήσεων	
Aircraft	16	
CH_47	22	52 (“Other”)
UH_1H	27	
Drone	33	52

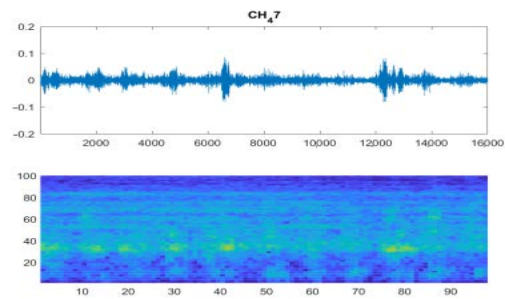
Πίνακας 4.5: Σύνοψη του πλήθους πτήσεων που παρατηρήθηκαν

Κατά τη δυαδική ταξινόμηση, λόγω του περιορισμού διαθεσιμότητας πτήσεων, ο κύριος σκοπός ήταν η μέτρηση της επίδοσης του συστήματος στην ανίχνευση UAS έναντι άλλων εναέριων μέσων και όχι «πηγών θορύβου» γενικώς. Για παράδειγμα, ένα πιθανός έλεγχος θα μπορούσε να αφορά την ετικέτα “Drone” απέναντι στις ετικέτες “Aircraft”/ “UH\_1H”/ “CH\_47” ξεχωριστά, κάτι που θα παρείχε εξαιρετικά μικρό διαθέσιμο σετ δειγμάτων - για παράδειγμα 16 δείγματα πτήσεων “Aircraft” για σύγκριση με πτήσεις “Drone”. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι η μέθοδος ανίχνευσης UAS ως δυαδική ταξινόμηση, δεν αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας ακουστικά δείγματα από άλλες πηγές, οι οποίες δεν ανήκαν στην κατηγορία “Aircraft”, “UH\_1H” ή “CH\_47”.

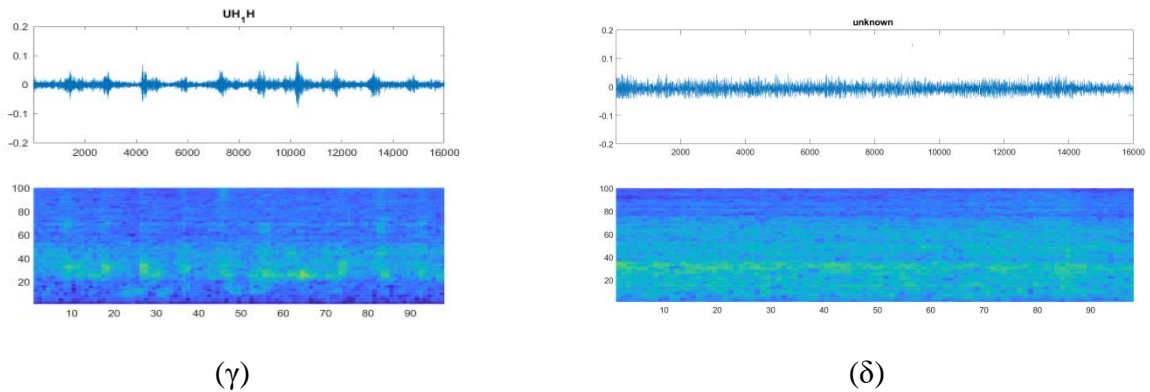
Δύο λίστες συμπληρώθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων: “True Class”, στην οποία καταχωρούνταν ο πραγματικός τύπος του ιπτάμενου μέσου που πετούσε τη δεδομένη στιγμή και “Predicted Class”, στην οποία καταγράφονταν η πρόβλεψη του συστήματος ως προς την κατηγορία (label). Επισημαίνεται ότι, δεν παρήγαγαν όλα τα εισερχόμενα ηχητικά σήματα πρόβλεψη ως προς κάποια ετικέτα: κατάλληλες τιμές κατωφλίων τέθηκαν ως προς την απαιτούμενη τιμή της πιθανότητας πρόβλεψης και τον αριθμό διαδοχικών frames (spectrograms) που προέβλεπαν την ίδια ετικέτα, ώστε να αναφερθεί ταυτοποίηση με βεβαιότητα. Όσο τα παραπάνω κριτήρια δεν ικανοποιούνταν, το σύστημα συνέχιζε να συλλέγει ηχητικά frames, χωρίς να επιστρέφει πρόβλεψη. Στην Εικόνα 4.27 παρουσιάζονται παραδείγματα της παραπάνω διαδικασίας: ένα τυχαίο σήμα ήχου (α) -όχι αμελητέου πλάτους-, δεν παράγει κανένα αποτέλεσμα ταυτοποίησης, ενώ στις κυματομορφές των ήχων από ελικόπτερα (β, γ) οι οποίες δεν είναι εμφανώς διαχωρίσιμες, αποδίδεται η ετικέτα της αντίστοιχης κατηγορίας. Παραδείγματα ταυτοποίησης UAS (“Drone”), φαίνονται στις Εικόνες 3.2 και 4.26β.



(α)



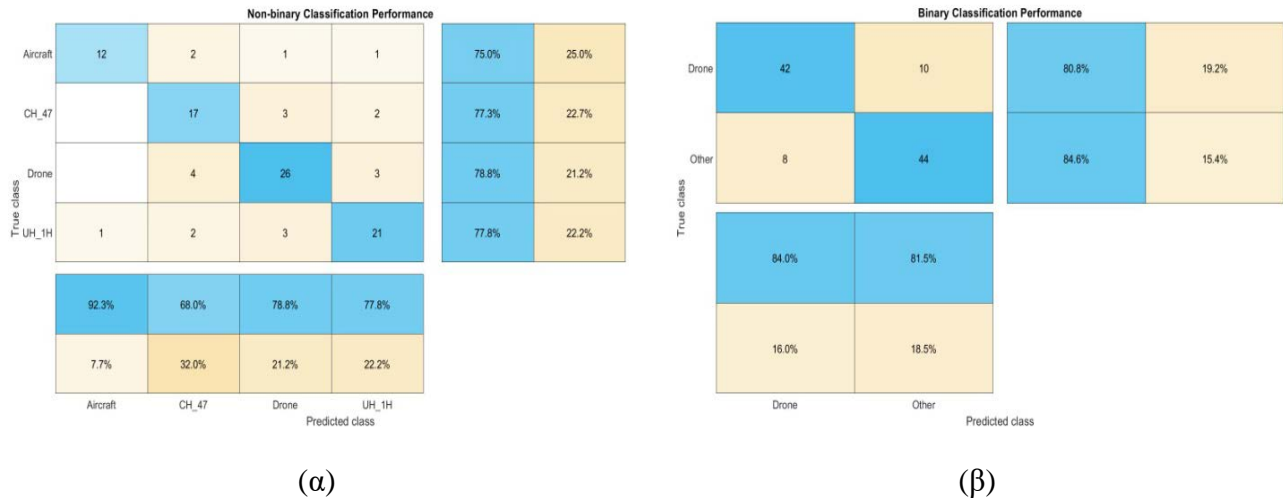
(β)



Εικόνα 4.27: Παραδείγματα κυματομορφών/spectrogram κυλιόμενου παραθύρου για (α) τυχαίο σήμα, (β) πτήση CH-47, (γ) UH-1H και (δ) τυχαίου ήχου σήματος

Μια από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, ήταν η αναφορά ως «άγνωστο» (“unknown”) οποιουδήποτε ήχου δεν ανήκε σε κάποια από τις γνωστές κατηγορίες. Όπως όμως αναφέρθηκε προηγουμένως στην παρούσα Ενότητα, η βασική επιδίωξη ήταν ο έλεγχος της επίδοσης του συστήματος στην ανίχνευση UAS έναντι άλλων εναέριων μέσων και όχι «πηγών θορύβου» γενικώς. Επισημαίνεται ότι, το σύστημα κατάφερε επιτυχώς να διακρίνει τον ήχο του UAS παρουσία άλλων ισχυρών πηγών θορύβου που ανήκαν θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν με την ετικέτα “unknown”, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.26β όπου ταυτοποιείται το UAS παρά τη λειτουργία του φορτηγού-γερανού ακριβώς κάτω από το σημείο πτήσης του.

Στην Εικόνα 4.28 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγχυσης που καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος. Οι λανθασμένες προβλέψεις, που αντιπροσωπεύονται από τα εκτός-διαγωνίου στοιχεία, διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα και προδιαγράφουν μια πιθανή συσχέτιση ανάμεσα στον αριθμό των στροφείων/πτερύγων που διαθέτει κάθε μέσο και την ετικέτα πρόβλεψης. Για παράδειγμα, το CNN είναι πιθανότερο (21.2%) να «μπερδέψει» ένα ελικόπτερο “CH-47” (2 στροφεία των 3 πτερύγων) με ένα τετρακόπτερο “Drone” (4 στροφεία των 2 πτερύγων). Αντίθετα, ένα “UH-1H” (2 στροφεία των 2 πτερύγων) σπανίως (7.7%) ταυτοποιείται εσφαλμένα ως “Aircraft” (3 στροφεία των 4 πτερύγων). Οι ορθά κατηγοριοποιημένες παρατηρήσεις που αντιπροσωπεύονται από τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα, αναδεικνύουν μεγάλο βαθμό βεβαιότητας στην πρόβλεψη για ύπαρξη πτήσης UAS και στα δύο σενάρια/μεθόδους: 78.8% για τη μη-δυναδική και 84% για τη δυναδική ταξινόμηση.



Εικόνα 4.28: Διαγράμματα σύγχυσης για την επίδοση του συστήματος κατά την (α) μη-δυναδική και (β) δυναδική ταξινόμηση

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, πρέπει να τονιστεί, ότι το πλήθος των πτήσεων αεροσκαφών, τα δρομολόγια που ακολούθησαν, ύψος/απόσταση/ταχύτητα πτήσης και παρόμοιες παράμετροι δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν ώστε να ληφθούν υπόψη. Το γεγονός αυτό, υπό άλλη θεώρηση, βοήθησε ώστε τα πειράματα και οι μετρήσεις να είναι πιο ρεαλιστικές, παρόλο είχαν αρνητική επίδραση στη δυνατότητα συλλογής περισσότερων ακουστικών δειγμάτων ώστε να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στις δοκιμές ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο. Η συνολική επίδοση των μεθόδων ταυτοποίησης, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.6.

	Non-Binary Classification	Binary Classification
Overall precision	0.79218	0.82741
Overall recall	0.7721	0.82692
F1 Score	0.78201	0.82717

Πίνακας 4.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων επίδοσης των δυο μεθόδων

## 5.1. *Ενεργητική μέθοδος*

Για την ανίχνευση UAS με χαμηλό RCS χρησιμοποιώντας ενεργητικές μεθόδους, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συστημάτων ραντάρ σε διάφορες συχνότητες. Αφού επαληθεύτηκε η καταλληλότητα της συχνότητας των 24 GHz έναντι των χαμηλότερων στα 875 MHz και 2.45 GHz, η μελέτη επικεντρώθηκε στην εξέλιξη και αναβάθμιση του συγκεκριμένου συστήματος. Εκτιμάται ότι, το μικρότερο μήκος κύματος σε σχέση με τις φυσικές γεωμετρικές διαστάσεις του UAS, αντισταθμίζει την αυξημένη απόσβεση λόγω διάδοσης στον ατμοσφαιρικό αέρα που παρουσιάζουν οι υψηλές συχνότητες.

Περνώντας από στάδια εξέλιξης, το σύστημα ραντάρ τροποποιήθηκε με την αντικατάσταση των χοανοκεραίων του από άλλες μεγαλύτερου κέρδους και την τοποθέτησή του σε στιβαρότερη κατασκευή που επιτρέπει την προσαρμογή περιστροφικού ανακλαστήρα, μέσω του οποίου γίνεται στροφή τη δέσμης του ραντάρ κατά 90°, δίνοντας τη δυνατότητα για εκτέλεση περιμετρικών σαρώσεων 360°. Η αύξηση του κέρδους των κεραιών εκπομπής – λήψης, βελτίωσε όπως αναμένονταν την ικανότητα του συστήματος για την ανίχνευση στόχων μικρού RCS, τόσο κατά τη στατική του λειτουργία, όσο και κατά τη λειτουργία σάρωσης. Η διατήρηση της ισχύος εκπομπής σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκριτικά με παρόμοια συστήματα που απαντώνται στη βιβλιογραφία, περιόρισε τη μέγιστη απόσταση ανίχνευσης σε περίπου 150 m.

Ένα στοιχείο που παρατηρήθηκε κατά τη μελέτη, ήταν η ισχυρή παρουσία DC offset που εισάγεται από τη χρήση ομόδυνου δέκτη για τον υποβιβασμό του σήματος στη βασική ζώνη και το διαχωρισμό του σε I και Q συνιστώσα. Οι επιπτώσεις του κατασκευαστικού αυτού χαρακτηριστικού του ραντάρ, αντιμετωπίστηκε σε μεγάλο βαθμό μέσω κατάλληλης επεξεργασίας σήματος.

Σημαντικό χαρακτηριστικό που επίσης αναδείχθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας, θεωρείται η αποτελεσματική χρήση ραντάρ CW σε ένα πεδίο εφαρμογών όπου η πλειονότητα των ραντάρ είναι pulsed, FMCW ή staring.

Σε ξεχωριστό Παράρτημα, δίνεται σε μορφή πίνακα μια συγκριτική αποτίμηση αναφερόμενων στη βιβλιογραφία υλοποιήσεων παρεμφερών συστημάτων, από την οποία φαίνεται η συμβολή του προτεινόμενου στην παρούσα διατριβή ραντάρ, όσον αφορά στη μείωση του κόστους, πολυπλοκότητας, μεγέθους και απαιτούμενης ισχύος του συστήματος, σε συνδυασμό με τη μέγιστη ικανότητα ανίχνευσης που επιτυγχάνεται.

## 5.2. Παθητική μέθοδος

Στον τομέα των παθητικών μεθόδων ανίχνευσης και ταυτοποίησης, εξετάστηκε η δυνατότητα εκμετάλλευσης του ακουστικού (ηχητικού) σήματος που εκπέμπουν τα UAS και άλλα εναέρια μέσα. Προς αυτή τη κατεύθυνση, σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δυο διαφορετικές διατάξεις συστοιχίας μικροφώνων, ευθύγραμμη και σε διάταξη σταυρού, με διαφορετικές επιδόσεις στην εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης (DOA) του εισερχόμενου ακουστικού σήματος.

Από τη μελέτη της διάταξης ευθύγραμμης συστοιχίας μικροφώνων διαπιστώθηκε ότι, παρά την ορθή κατασκευαστικά λειτουργία της, έθετε περιορισμούς στο πρόβλημα προσδιορισμού της γωνίας άφιξης του ηχητικού σήματος. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια η έρευνα στράφηκε στην εξέταση της δισδιάστατης εκδοχής της υπόψη διάταξης, σε μορφή σταυρού. Μέσω προσομοιώσεων, υπολογίστηκε η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των στοιχείων της συστοιχίας. Επιπλέον, αναπτύχθηκε κατάλληλος αλγόριθμος που εκμεταλλεύεται το πολικό διάγραμμα καρδιοειδούς μορφής του κάθε μικροφώνου και μέσω της σύγκρισης του πλάτους FFT του σήματος ανάμεσα σε ζεύγη μικροφώνων, υπολογίζει την εκτιμώμενη γωνία άφιξης του ισχυρότερου εισερχόμενου σήματος. Η παραπάνω υλοποίηση, δοκιμάστηκε σε διαφορετικής μορφής περιβάλλοντα (αγροτικό, ημιαστικό και αστικό) και αποδείχθηκε, δεδομένων των περιορισμών του hardware που χρησιμοποιήθηκε, ότι καλύπτει τις ανάγκες για προσεγγιστική εκτίμηση της DOA του ακουστικού σήματος, σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 70 m.

Για την ταυτοποίηση του εισερχόμενου ακουστικού σήματος (ή, αλλιώς: την επαλήθευση της πηγής προέλευσής του) με σαφή προσανατολισμό προς το σκοπό ανίχνευσης πτήσεων UAS, αρχικά υλοποιήθηκε και δοκιμάστηκε η μέθοδος συσχέτισης αρμονικών γραμμών (HLA). Η μέθοδος, η οποία έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, απέδωσε τα αναμενόμενα θετικά

αποτελέσματα στην ταυτοποίηση στόχων, επιτρέποντας την εξαγωγή συμπερασμάτων για το είδος του πτητικού μέσου, παρατηρώντας κυλιόμενα intensity (waterfall) charts του ηχητικού φάσματος.

Περισσότερο αποτελεσματική στο πεδίο της ταυτοποίησης, αποδείχθηκε η υλοποίηση του αλγόριθμου μηχανικής μάθησης. Για την εκπαίδευση του πολυεπίπεδου συνελκτικού νευρωνικού δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν spectrograms των ακουστικών δειγμάτων τα οποία συλλέχθηκαν από πραγματικές πτήσεις ελικοπτέρων, αεροσκαφών και UAS. Μετρήθηκαν οι επιδόσεις της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής του δικτύου, τόσο κατά την εκπαίδευσή του (96.97%, validation accuracy) όσο και σε δοκιμές με πραγματικές πτήσεις εναέριων μέσων και UAS, όπου επαληθεύτηκε η αποτελεσματικότητά του σε δύο σενάρια/μεθόδους: 78.8% κατά τη μη-δυναδική και 84% κατά τη δυναδική ταξινόμηση σε πραγματικό χρόνο και σε αποστάσεις άνω των 150 m.

Σχετικά με την χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, επισημαίνεται επιπλέον ότι (α) η αυξημένη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς διευκόλυνε σημαντικά τη γρήγορη και επί τόπου επεξεργασία δεδομένων κατά τις δοκιμές πεδίου, ενώ (β) για τη βελτίωση της ακρίβειας και αποτελεσματικότητας του συστήματος, απαιτείται πολύ μεγάλο πλήθος δειγμάτων για την εκπαίδευση του συνελκτικού νευρωνικού δικτύου του αλγόριθμου.

### ***5.3. Τελικό συμπέρασμα***

Για την αντιστάθμιση των μειονεκτημάτων κάθε μεθόδου, είναι αναγκαία η ταυτόχρονη χρήση πλέον της μιας από αυτές σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Η multi – layered προσέγγιση όπου τα υποσυστήματα λειτουργούν συνδυαστικά, παρείχε σε πρώτο επίπεδο έγκαιρη προειδοποίηση μέσω της ενεργητικής μεθόδου και στη συνέχεια σε δεύτερο επίπεδο, ταυτοποίηση του στόχου. Η γρήγορη απόσβεση των μηχανικών ηχητικών κυμάτων στον αέρα, εξ αρχής οδήγησε την έρευνα στη θεώρηση των παθητικών μεθόδων ανίχνευσης ως μέσο που λειτουργεί επικουρικά προς τις ενεργητικές.

Με τη χρήση συνδυαστικής μεθόδου, εξασφαλίζεται ο απαραίτητος πλεονασμός (redundancy) των συστημάτων, ώστε σε περίπτωση που κάποιο τμήμα του συστήματος καταστεί ανενεργό να υπάρχει εναλλακτική μέθοδος, έστω και διαφορετικού βαθμού αποτελεσματικότητας.

Η επικοινωνία μεταξύ υποσυστημάτων, η αυτόνομη λειτουργία τους και ο απομακρυσμένος έλεγχος, περιορίζουν την ανάγκη για επίβλεψη από κάποιον χειριστή, ο οποίος διατηρεί την εποπτεία και δυνατότητα επέμβασης κατά την κρίση του.

Το προτεινόμενο ενοποιημένο σύστημα βελτιώνει τη συνολική επίδοση ανίχνευσης σε σχέση με τη χρήση μοναδικής μεθόδου, αμβλύνοντας ή/και εξαλείφοντας τα μειονεκτήματα από την εφαρμογή μεμονωμένης μεθόδου. Αποτελεί μια υλοποίηση sensor fusion, που εκμεταλλεύεται και συνδυάζει αποτελεσματικά RF και ηχητικά κύματα για τον εντοπισμό πτήσεων μικρών UAS.

#### ***5.4. Μελλοντική έρευνα***

Για να εκτελέσει όλες τις λειτουργίες του, το ενοποιημένο σύστημα συναποτελείται από διαφορετικές συσκευές, καθεμία από τις οποίες έχει ξεχωριστό τρόπο διασύνδεσης και λειτουργίας, και οι οποίες χειρίζονται σήματα διαφορετικής μορφής: ασθενή σήματα από το ραντάρ μεταφέρονται με αντάπτορες στη συσκευή DAQ (που συνδέεται στον Η/Υ μέσω USB), stepper motor με τον αντίστοιχο driver που ελέγχεται από Arduino (σύνδεση μέσω USB στον Η/Υ), μικρόφωνα με σύνδεση XLR στην κάρτα ήχου (και εκεί σύνδεση επίσης με USB στον Η/Υ). Γίνεται φανερό ότι η δημιουργία ενοποιημένου interface για τον έλεγχο των παραπάνω παραμέτρων αποτελεί αντικείμενο για βελτίωση και μελλοντική έρευνα.

Ομοίως, επειδή σκοπός του συστήματος είναι η παροχή πληροφόρησης για πτήσεις UAS σε κάποιο χώρο ενδιαφέροντος, προοπτική με ενδιαφέρον αποτελεί η αυτόνομη λειτουργία και ο απομακρυσμένος έλεγχός του. Η τροφοδοσία των συσκευών θα μπορούσε να καλυφθεί από στοιχεία συσσωρευτών (π.χ. τύπου αυτοκινήτου) μέσω inverter και ο απομακρυσμένος έλεγχος μέσω ασύρματων ζεύξεων. Στην κατεύθυνση αυτή, η μελέτη για κατασκευή πιο ευέλικτης διάταξης, με πιο εύκολη ανάπτυξη/εγκατάσταση (deployable) θα είχε σημαντικά οφέλη.



Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας ανίχνευσης, εκτός από την αύξηση ισχύος εκπομπής που προτάθηκε νωρίτερα, πιθανός ερευνητικός στόχος είναι η εκμετάλλευση της micro – Doppler υπογραφής κατά την κίνηση ενός UAS. Η σημασία της πληροφορίας που κρύβεται στις μικρές κινήσεις ενός αντικειμένου και εμφανίζεται ως micro – Doppler αποτύπωμα, έχει ήδη σημειωθεί σε ορισμένες εργασίες. Η προσπάθεια αυτή για εξαγωγή ωφέλιμων χαρακτηριστικών φάσματος εξαιτίας μικρών διακυμάνσεων του φάσματος, θα ήταν δυνατό να εξεταστεί ταυτόχρονα με τη χρήση ετερόδυνου δέκτη, αντί του ομόδυνου που διαθέτει το ραντάρ της εργασίας. Με τον περιορισμό των φασματικών διαρροών και του DC offset που εισάγεται λόγω της ομόδυνης λειτουργίας, το baseband σήμα και οι μεταβολές του αναμένεται να μην είναι εμφανείς όσο στην ετερόδυνη.

Τέλος, η προσθήκη επιπλέον αισθητήρων (κάμερα IR, οπτικοί αισθητήρες) επίσης δύναται να συμβάλλει στην μεγαλύτερη αξιοπιστία εντοπισμού και την ευρωστία του συστήματος, προσθέτοντας ένα ακόμη επίπεδο στη multi – layered προσέγγιση της ανίχνευσης.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] ΦΕΚ-B-3152/30.9.2016, Κανονισμός - γενικό πλαίσιο πτήσεων ΣμηΕΑ. 2016.
- [2] “Πληροφοριακό Σύστημα για την Υποστήριξη του Κανονισμού Πτήσεων για τα Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ).” [www.hcaa.gr](http://www.hcaa.gr).
- [3] “Drone Aware - GR (DAGR).” <https://dagr.hcaa.gr/>.
- [4] “Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945).” [Online]. Available: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy\\_Access\\_Rules\\_for\\_Unmanned\\_Aircraft\\_Systems.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy_Access_Rules_for_Unmanned_Aircraft_Systems.pdf).
- [5] “Ευρωπαϊκοί κανόνες και διαδικασίες για τη λειτουργία των Drones στην ΕΕ.” <http://drone.net.gr/2020/03/05>.
- [6] “Federal Aviation Administration.” <https://www.faa.gov/>.
- [7] “B4UFLY Mobile App.” [https://www.faa.gov/uas/recreational\\_fliers/where\\_can\\_i\\_fly/b4ufly/](https://www.faa.gov/uas/recreational_fliers/where_can_i_fly/b4ufly/).
- [8] “FAADroneZone,” [Online]. Available: <https://faadronezone.faa.gov/#/>.
- [9] D. Sathyamoorthy, “A Review of Security Threats of Unmanned Aerial Vehicles and Mitigation Steps,” *J. Def. Secur.*, vol. 6, no. 1, pp. 81–97, 2015.
- [10] A. H. Michel, “Counter-Drone Systems,” *Counter*, no. February, p. 23, 2018.
- [11] A. H. Michel, “COUNTER-DRONE SYSTEMS 2nd Edition,” 2019.
- [12] P. Poitevin, M. Pelletier, and P. Lamontagne, “Challenges in Detecting UAS with Radar,” *Int. Carnahan Conf. Secur. Technol. (ICCST), Madrid*, pp. 1–6, 2017.
- [13] G. C. ; Birch, J. C. ; Griffin, and M. K. Erdman, “UAS Detection Classification and

- Neutralization: Market Survey 2015,” *Sandia Rep.*, p. 74, 2015, doi: 10.2172/1222445.
- [14] S. Brooks and C. Kouhestani, “Counter-Unmanned Aircraft Systems Market Survey.” Department of Home- land Security, Prepared by Sandia National Laboratories, 2019.
- [15] C. Kouhestani, G. Birch, S. Brooks, J. Stubbs, and B. Woo, “A Certification and Evaluation Approach to Counter Unmanned Aerial Systems,” no. May. Sandia National Laboratories, 2017.
- [16] V. G. Borkar, A. Ghosh, R. K. Singh, and N. Chourasia, “Radar Cross-section Measurement Techniques,” *Def. Sci. J.*, vol. 60, no. 2, pp. 204–212, 2010.
- [17] J. Farlik, M. Kratky, J. Casar, and V. Stary, “Multispectral detection of commercial unmanned aerial vehicles,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 7, 2019, doi: 10.3390/s19071517.
- [18] P. Swerling, “Probability of Detection for Fluctuating Targets,” 1954. doi: 10.1017/.004.
- [19] J. Shaeffer, M. Tuley, and E. Knott, “Radar Cross Section,” *1st ed. Raleigh, NC SciTech Pub*, pp. 21–33, 2004, doi: 10.1049/sbra026e.
- [20] J. Benesty, J. Chen, and Y. Huang, *Microphone Array Signal Processing*, vol. 1. 2009.
- [21] J. J. Christensen and J. Hald, “Beamforming - Technical review,” *Bruel Kjaer Technical Review*, vol. 36, no. 1. pp. 22–23, 2011, doi: 10.1007/bf01830693.
- [22] P. Sijtsma and R. W. Stoker, “Determination of absolute contributions of aircraft noise components using fly-over array measurements,” 2004. doi: 10.2514/6.2004-2958.
- [23] J. Hald *et al.*, “High-resolution Fly-over Beamforming Clustering Approaches to Automatic Modal Parameter Estimation,” Bruel & Kjaer, 2012. [Online]. Available: papers3://publication/uuid/B71549B8-F4D7-43FF-A9B2-B6D66D260533.
- [24] W. Shi, G. Arabadjis, B. Bishop, P. Hill, and R. Plasse, “Detecting, Tracking and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence,” 2011. [Online]. Available:

- <http://www.intechopen.com/books/sensor-fusion-foundation-and-applications/detecting-tracking-and-identifying-airborne-threats-with-netted-sensor-fence>.
- [25] S. Chu, S. Narayanan, and C. C. J. Kuo, "Environmental sound recognition with time-frequency audio features," *IEEE Trans. Audio, Speech Lang. Process.*, vol. 17, no. 6, pp. 1142–1158, 2009, doi: 10.1109/TASL.2009.2017438.
- [26] G. Herrera, J. Dechant, E. Green, and E. Klein, "Technology Trends in Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS) and Counter-UAS: A Five Year Outlook," 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.31998.48969.
- [27] D. Mototolea, "A Study on the Methods and Technologies Used for Detection, Localization, and Tracking of LSS UASs," *J. Mil. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 11–16, 2018, doi: 10.32754/jmt.2018.2.02.
- [28] J. S. Patel, F. Fioranelli, and D. Anderson, "Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 12, no. 9, pp. 911–919, 2018, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.0020.
- [29] I. Güvenç, O. Ozdemir, Y. Yapici, H. Mehrpouyan, and D. Matolak, "Detection, localization, and tracking of unauthorized UAS and Jammers," *AIAA/IEEE Digit. Avion. Syst. Conf. - Proc.*, vol. 2017-Septe, 2017, doi: 10.1109/DASC.2017.8102043.
- [30] X. Shi, C. Yang, W. Xie, C. Liang, Z. Shi, and J. Chen, "Anti-Drone System with Multiple Surveillance Technologies : Architecture , Implementation , and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, no. April, pp. 68–74, 2018.
- [31] D. Cormack and D. Clark, "Tracking Small UAVs Using a Bernoulli Filter," *2016 Sens. Signal Process. Defence, SSPD 2016*, 2016, doi: 10.1109/SSPD.2016.7590614.
- [32] M. Pieraccini, M. Fratini, F. Parrini, G. Macaluso, and C. Atzeni, "High-speed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 14, pp. 40–41, 2004, doi: 10.1049/el.

- [33] M. Pieraccini and L. Miccinesi, "CWSF radar for detecting small UAVs," *2017 IEEE Int. Conf. Microwaves, Antennas, Commun. Electron. Syst. COMCAS 2017*, vol. 2017-Novem, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/COMCAS.2017.8244710.
- [34] A. Moses, M. J. Rutherford, and K. P. Valavanis, "Radar-based detection and identification for miniature air vehicles," *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, pp. 933–940, 2011, doi: 10.1109/CCA.2011.6044363.
- [35] V. Vlasak and J. Pidanic, "The analysis of small RCS target detection in primary radar system," *Proc. Elmar - Int. Symp. Electron. Mar.*, vol. 2016-Novem, no. September, pp. 141–145, 2016, doi: 10.1109/ELMAR.2016.7731773.
- [36] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, and A. A. López, "Drone Detection With X-Band Ubiquitous Radar," *19th Int. Radar Symp. IRS 2018, June 20-22, 2018, Bonn, Ger.*, pp. 1–10.
- [37] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, and A. A. López, "Drone Detection and RCS Measurements with Ubiquitous Radar," in *2018 International Conference on Radar, RADAR 2018*, 2018, doi: 10.1109/RADAR.2018.8557320.
- [38] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, and A. A. Lopez, "Remotely Piloted Aircraft Detection with Persistent Radar," in *Proceedings of the 15th European Radar Conference, EuRAD 2018*, 2018, pp. 317–320, doi: 10.23919/EuRAD.2018.8546546.
- [39] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, and A. A. Lopez, "Drone detection and radar-cross-section measurements by RAD-DAR," *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 13, no. 9, pp. 1437–1447, 2019, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5646.
- [40] S. Rzewuski *et al.*, "Drone RCS estimation using simple experimental measurement in the WIFI bands," *MIKON 2018 - 22nd Int. Microw. Radar Conf.*, pp. 695–698, 2018, doi: 10.23919/MIKON.2018.8405329.
- [41] R. Harmanny, J. J. M. De Wit, and G. Prémel Cabic, "Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram," *Eur. Microw. Week 2014*

- "Connecting Futur. EuMW 2014 - Conf. Proceedings; EuRAD 2014 11th Eur. Radar Conf.*, pp. 165–168, 2014, doi: 10.1109/EuRAD.2014.6991233.
- [42] M. Jian, Z. Lu, and V. C. Chen, "Drone detection and tracking based on phase-interferometric Doppler radar," *2018 IEEE Radar Conf. RadarConf 2018*, pp. 1146–1149, 2018, doi: 10.1109/RADAR.2018.8378723.
- [43] R. Nakamura and H. Hadama, "Characteristics of ultra-wideband radar echoes from a drone," *IEICE Commun. Express*, vol. 6, no. 9, pp. 530–534, 2017, doi: <https://doi.org/10.1587/comex.2017XBL0079>.
- [44] M. Rice, F. Fioranelli, H. Griffiths, and B. Torvik, "Micro-Drone RCS Analysis," in *IEEE Radar Conference*, 2015, pp. 452–456.
- [45] M. Ritchie, F. Fioranelli, H. Borrión, and H. Griffiths, "Multistatic micro-Doppler radar feature extraction for classification of unloaded/loaded micro-drones," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 11, no. 1, pp. 116–124, 2017, doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0063.
- [46] M. Guo, Y. Lin, Z. Sun, and Y. Fu, "Research on Monostatic Radar Cross Section Simulation of Small Unmanned Aerial Vehicles," *2018 Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. ICMMT 2018 - Proc.*, no. d, pp. 1–3, 2018, doi: 10.1109/ICMMT.2018.8563643.
- [47] C. Tsai, C.-T. Chiang, and W.-J. Liao, "Radar Cross Section Measurements of Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE Int. Work. Electromagn. Appl. Student Innov. Compet.*, pp. 8–10, 2016.
- [48] J. Schiller, "Detection and bearing angle estimation of low flying aircraft by acoustical means," in *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1982, pp. 1124–1127.
- [49] J. Schiller, "Motion parameter estimation of a fast moving sound source using retardation effect," in *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1984, pp. 1–4.

- [50] F. Dommermuth and J. Schiller, “Estimating the trajectory of an accelerationless aircraft by means of a stationary acoustic sensor,” *Acoust. Soc. Am.*, no. 76, pp. 1114–1122, 1984.
- [51] B. G. Ferguson, “A ground-based narrow-band passive acoustic technique for estimating the altitude and speed of a propeller-driven aircraft,” *Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, no. September 1992, pp. 1403–1407, 1992.
- [52] T. Pham and B. M. Sadler, “Aeroacoustic wideband array processing for detection and tracking of ground vehicles,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, no. 5, p. 2969, 1995.
- [53] T. Pham and B. M. Sadler, “Adaptive Wideband Aeroacoustic Array Processing,” *8th IEEE SP Work. Stat. Signal Array Process.*, pp. 295–298, 1996.
- [54] T. Pham and L. Sim, “Acoustic Detection and Tracking of Small , Low-Flying Threat Aircraft,” *23rd Army Sci. Conferece*, pp. 5–6, 2002.
- [55] H. Hurd and T. Pham, “Target Association Using Harmonic Frequency Tracks.” pp. 860–864, 2002.
- [56] T. Pham and L. Sim, “Acoustic Data Collection of Tactical Unmanned Air Vehicles ( TUAVs ),” 2002.
- [57] T. Pham and N. Srour, “TTCP AG-6: acoustic detection and tracking of UAVs,” in *Unattended/Unmanned Ground, Ocean, and Air Sensor Technologies and Applications VI*, 2004, vol. 5417, pp. 24–30, doi: 10.1117/12.548194.
- [58] N. B. Thammakhoune and S. W. Lang, “Long Range Acoustic Classification,” 1999.
- [59] B. G. Ferguson and K. W. Lo, “Turboprop and rotary-wing aircraft flight parameter estimation using both narrow-band and broadband passive acoustic signal-processing methods,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, no. 2000, pp. 1763–1771, 2000, doi: 10.1121/1.1286150.
- [60] K. W. Lo and B. G. Ferguson, “Broadband Passive Acoustic Technique for Target Motion

- Parameter Estimation,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 163–175, 2000.
- [61] K. W. Lo and B. G. Ferguson, “Tactical unmanned aerial vehicle localization using ground-based acoustic sensors,” *Proc. 2004 Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process. Conf. ISSNIP '04*, pp. 475–480, 2004.
- [62] K. Massey and R. Gaeta, “Noise measurements of tactical UAVs,” *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf.*, no. 3911, pp. 1–16, 2010, doi: 10.2514/6.2010-3911.
- [63] E. E. Case, A. M. Zelnio, and B. D. Rigling, “Low-cost acoustic array for small UAV detection and tracking,” in *National Aerospace and Electronics Conference, Proceedings of the IEEE*, 2008, pp. 110–113, doi: 10.1109/NAECON.2008.4806528.
- [64] M. Benyamin and G. H. Goldman, “Acoustic detection and tracking of a Class I UAS with a small tetrahedral microphone array,” *Army Res. Lab. Tech. Rep.*, vol. ARL-TR-708, no. September, pp. 1–26, 2014, [Online]. Available: <http://www.arl.army.mil/arlreports/2014/ARL-TR-7086.pdf>.
- [65] J. Tong, Y. H. Hu, M. Bao, and W. Xie, “Target tracking using acoustic signatures of light-weight aircraft propeller noise,” *2013 IEEE China Summit Int. Conf. Signal Inf. Process. ChinaSIP 2013 - Proc.*, vol. 2, no. 3, pp. 20–24, 2013, doi: 10.1109/ChinaSIP.2013.6625289.
- [66] J. Mezei, V. Flaska, and A. Molnár, “Drone Sound Detection,” in *16th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, 2015, pp. 333–338.
- [67] S. R. Ganti and Y. Kim, “Implementation of Detection and Tracking Mechanism For Small UAS,” in *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) June 7-10, 2016. Arlington, VA USA*, 2016, pp. 1254–1260.
- [68] M. Miesikowska, “Analysis of Signal of X4 Unmanned Aerial Vehicle,” *J. KONES Powertrain Transp.*, vol. 23, no. 4, pp. 1–6, 2016, doi: 10.5604/12314005.1.



- [69] M. Miesikowska, “Discriminant analysis of signal of X4 unmanned aerial vehicle,” *2017 IEEE 4th Int. Conf. Actual Probl. Unmanned Aer. Veh. Dev. APUAVD 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 227–229, 2018, doi: 10.1109/APUAVD.2017.8308816.
- [70] M. Miesikowska, “Analysis of signal of X8 unmanned aerial vehicle,” *Signal Process. - Algorithms, Archit. Arrange. Appl. Conf. Proceedings, SPA*, vol. 2017-Sept, pp. 69–72, 2017, doi: 10.23919/SPA.2017.8166840.
- [71] M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, and I. Guvenc, “Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques,” in *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2019, vol. 2019-March, doi: 10.1109/AERO.2019.8741970.
- [72] M. F. Al-Sa’d, A. Al-Ali, A. Mohamed, T. Khattab, and A. Erbad, “RF-based drone detection and identification using deep learning approaches: An initiative towards a large open source drone database,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 100, pp. 86–97, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.05.007.
- [73] C. Aker and S. Kalkan, “Using Deep Networks for Drone Detection,” *IEEE AVSS 2017*, no. August, 2017.
- [74] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 779–788, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [75] J. Redmon and A. Farhadi, “YOLO9000: Better, faster, stronger,” *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 6517–6525, 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.690.
- [76] C. Wang, T. Wang, E. Wang, E. Sun, and Z. Luo, “Flying small target detection for anti-UAV based on a gaussian mixture model in a compressive sensing domain,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 9, 2019, doi: 10.3390/s19092168.
- [77] J. Vilimek and L. Burita, “Ways for Copter Drone Acoustic Detection,” in *2017*

- International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2017, pp. 349–353.
- [78] G. Ciaburro, G. Iannace, and A. Trematerra, “Research for the Presence of Unmanned Aerial Vehicle inside Closed Environments with Acoustic Measurements,” *Build. 2020*, vol. 10, no. 96, pp. 1–10, 2020.
- [79] O. Jokisch and D. Fischer, “Drone Sounds and Environmental Signals - A first review,” in *In Proceedings of the ESSV Conference (Studentexte zur Sprachkommunikation), Dresden, Germany, 6–8, 2019*, pp. 212–220, doi: 10.1007/978-1-4614-1599-2\_8.
- [80] F. Christnacher *et al.*, “Optical and acoustical UAV detection,” *Electro-Optical Remote Sens. X*, vol. 9988, no. 0, p. 99880B, 2016, doi: 10.1117/12.2240752.
- [81] T. Martelli, F. Murgia, F. Colone, C. Bongioanni, and P. Lombardo, “Detection and 3D localization of ultralight aircrafts and drones with a WiFi-based passive radar,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2017, no. CP728, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1049/cp.2017.0423.
- [82] G. Fang, J. Yi, X. Wan, Y. Liu, and H. Ke, “Experimental Research of Multistatic Passive Radar with a Single Antenna for Drone Detection,” *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 33542–33551, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2844556.
- [83] A. Sedunov, A. Sutin, N. Sedunov, H. Salloum, A. Yakubovskiy, and D. Masters, “Passive acoustic system for tracking low-flying aircraft,” *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 10, no. 9, pp. 1561–1568, 2016, doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0159.
- [84] A. Sedunov, H. Salloum, A. Sutin, and N. Sedunov, “UAV Passive Acoustic Detection,” *2018 IEEE Int. Symp. Technol. Homel. Secur. HST 2018*, pp. 3–8, 2018, doi: 10.1109/THS.2018.8574129.
- [85] A. Sedunov, D. Haddad, H. Salloum, A. Sutin, N. Sedunov, and A. Yakubovskiy, “Stevens Drone Detection Acoustic System and Experiments in Acoustics UAV Tracking,” *IEEE Int. Symp. Technol. Homel. Secur.*, 2019.
- [86] J. Martinez-Carranza and C. Rascon, “A review on auditory perception for unmanned

- aerial vehicles,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 24, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/s20247276.
- [87] P. Nguyen, M. Ravindranathan, A. Nguyen, R. Han, and T. Vu, “Investigating Cost-effective RF-based Detection of Drones,” in *Proceedings of the 2nd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.*, 2016, pp. 17–22.
- [88] A. Huizing, M. Heiligers, B. Dekker, J. J. M. De Wit, L. Cifola, and R. Harmanny, “Deep Learning for Classification of Mini-UAVs Using Micro-Doppler Spectrograms in Cognitive Radar,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 34, no. 11, pp. 46–56, 2019, doi: 10.1109/MAES.2019.2933972.
- [89] V. C. Chen, F. Li, S. S. Ho, and H. Wechsler, “Micro-doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 2–21, 2006, doi: 10.1109/TAES.2006.1603402.
- [90] P. Andraši, T. Radišić, M. Muštra, and J. Ivošević, “Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera,” in *International Conference on Air Transport – INAIR 2017*, 2017, vol. 28, pp. 183–190, doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.184.
- [91] J. Drozdowicz *et al.*, “35 GHz FMCW drone detection system,” *Proc. Int. Radar Symp.*, vol. 2016-June, pp. 2–5, 2016, doi: 10.1109/IRS.2016.7497351.
- [92] J. Ochodnický, M. Babjak, J. Kurty, and R. Max, “Drone Detection by Ku-Band Battlefield Radar,” in *International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2017, no. 3, pp. 613–616.
- [93] D. H. Shin, D. H. Jung, D. C. Kim, J. W. Ham, and S. O. Park, “A Distributed FMCW Radar System Based on Fiber-Optic Links for Small Drone Detection,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 2, pp. 340–347, 2017, doi: 10.1109/TIM.2016.2626038.
- [94] J. Michael, Z. Lu, and V. C. Chen, “Experimental Study on Radar Micro-Doppler Signatures of Unmanned Aerial Vehicles,” in *IEEE Radar Conference*, 2017, no. I, pp.

- 854–857, doi: 10.1109/radar.2017.7944322.
- [95] M. Caris, W. Johannes, S. Sieger, V. Port, and S. Stanko, “Detection of small UAS with W-band radar,” *18th Int. Radar Symp. IRS*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.23919/IRS.2017.8008143.
- [96] M. Caris, S. Stanko, W. Johannes, S. Sieger, and N. Pohl, “Detection and tracking of micro aerial vehicles with millimeter wave radar,” *Eur. Microw. Week 2016 “Microwaves Everywhere”, EuMW 2016 - Conf. Proceedings; 46th Eur. Microw. Conf. EuMC 2016*, pp. 1553–1555, 2016, doi: 10.1109/EuMC.2016.7824653.
- [97] S. Samaras, V. Magoulianitis, A. Dimou, D. Zarpalas, and P. Daras, “UAV Classification with Deep Learning Using Surveillance Radar Data,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 11754 LNCS, pp. 744–753, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-34995-0\_68.
- [98] N. Regev, I. Yoffe, and D. Wulich, “Classification of single and multi propelled miniature drones using multilayer perceptron artificial neural network,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2017, no. CP728, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1049/cp.2017.0378.
- [99] J. Zhao, X. Fu, Z. Yang, and F. Xu, “UAV detection and identification in the internet of things,” *2019 15th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2019*, pp. 1499–1503, 2019, doi: 10.1109/IWCMC.2019.8766519.
- [100] S. Harman, “Analysis of the radar return of micro-UAVs in flight,” *2017 IEEE Radar Conf. RadarConf 2017*, pp. 1159–1164, 2017, doi: 10.1109/RADAR.2017.7944379.
- [101] S. Harman, “Characteristics of the Radar signature of multi-rotor UAVs,” *2016 13th Eur. Radar Conf. EuRAD 2016*, pp. 93–96, 2016.
- [102] S. Harman, “A comparison of staring radars with scanning radars for UAV detection: Introducing the Alarm<sup>TM</sup> staring radar,” *2015 Eur. Radar Conf. EuRAD 2015 - Proc.*, pp. 185–188, 2015, doi: 10.1109/EuRAD.2015.7346268.

- [103] B. K. Kim, H. S. Kang, and S. O. Park, "Drone classification using convolutional neural networks with merged doppler images," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 14, no. 1, pp. 38–42, 2017, doi: 10.1109/LGRS.2016.2624820.
- [104] S. K. Boddhu, M. McCartney, O. Ceccopieri, and R. L. Williams, "A collaborative smartphone sensing platform for detecting and tracking hostile drones," *Ground/Air Multisens. Interoperability, Integr. Netw. Persistent ISR IV*, vol. 8742, p. 874211, 2013, doi: 10.1117/12.2014530.
- [105] A. Kyritsis, R. Makri, and N. Uzunoglu, "Detection of Low RCS Unmanned Air Systems Using K-band Continuous Wave Doppler Radar," *Hindawi J. Electr. Comput. Eng. (under Rev)*, 2022.
- [106] MATLAB (2018) version 9.5.0.944444 (R2018b), "Speech Command Recognition Using Deep Learning." Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, 2018, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018b/audio/examples/Speech-Command-Recognition-Using-Deep-Learning.html>.
- [107] A. Kyritsis, R. Makri, and N. Uzunoglu, "Small UAS Online Audio DOA Estimation and Real-Time Identification Using Machine Learning," *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8659, 2022, doi: 10.3390/s22228659.
- [108] S. A. Harman and A. L. Hume, "Applications of staring surveillance radars," *IEEE Natl. Radar Conf. - Proc.*, vol. 2015-June, no. June, pp. 270–273, 2015, doi: 10.1109/RADAR.2015.7131008.
- [109] M. Jian, Z. Lu, and V. C. Chen, "Experimental study on radar micro-Doppler signatures of unmanned aerial vehicles," *2017 IEEE Radar Conf. RadarConf 2017*, no. I, pp. 0854–0857, 2017, doi: 10.1109/RADAR.2017.7944322.
- [110] W. Zhang and G. Li, "Detection of multiple micro-drones via cadence velocity diagram analysis," *Electron. Lett.*, vol. 54, no. 7, pp. 441–443, 2018, doi: 10.1049/el.2017.4317.
- [111] S. Rahman and D. A. Robertson, "Radar micro-Doppler signatures of drones and birds at



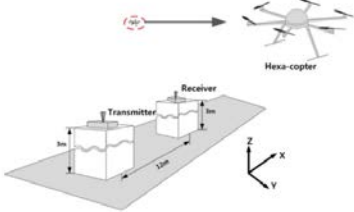
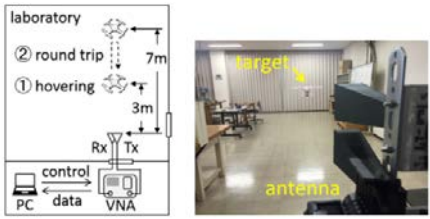
K-band and W-band,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-35880-9.

[112] Κ. Π. Καψάλης Χ., «*Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις*». Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2008.


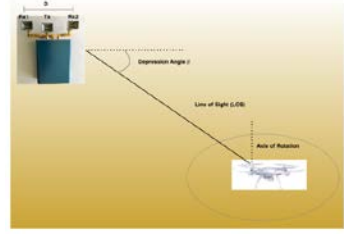

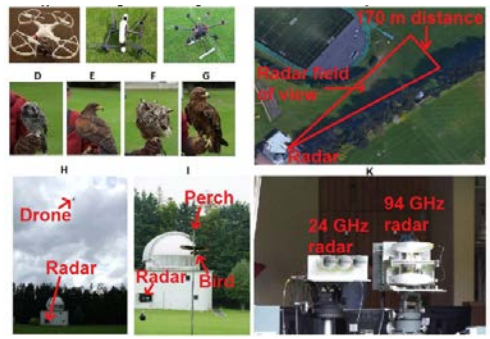
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας σύγκρισης προτεινόμενου συστήματος με άλλες υλοποιήσεις ενεργητικής ανίχνευσης UAS που απαντώνται στη βιβλιογραφία.

#	Αναφορά Βιβλιογραφίας	RADAR	Συχνότητα λειτουργίας	Ισχύς εξόδου	Απόσταση ανίχνευσης	Επιπλέον πληροφορίες
1	[41]	“A low power CW-radar”	X-band	N/A	N/A (Not Available)	UASs που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία 
2	[102]	FMCW Staring radar	G/C - band (4-6 GHz)	100 W	N/A	Alarm™ Staring Radar 
	[108]				800 m (for quadcopter)	
3	[101]	FMCW	X-band	N/A	N/A	UAV detecting radar της QinetiQ 

#	Αναφορά Βιβλιογραφίας	RADAR	Συχνότητα λειτουργίας	Ισχύς εξόδου	Απόσταση ανίχνευσης	Επιπλέον πληροφορίες
4	[91]	FMCW coherent radar	35 GHz	20 mW  2 W	30-90 m	UASs που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία  
5	[12]	Ranger R6SS-U-3D	X-band	85 W	1 km για 0.01 m <sup>2</sup> RCS (micro-UAV)  1.8 km για 0.1 m <sup>2</sup> RCS (mini-UAV)  5.5 km για  10 m <sup>2</sup> RCS (μεγάλο UAV, όχημα)	To Flir Ranger R6SS-U-3D Radar  
6	[93]	Fiber-optic links based distributed FMCW	K-band	26.5 dBm	500 m	Περιγραφή του setup δοκιμών  
7	[43]	UWB Pulsed	24 GHz	Κέρδος κεραίας  25 dBi	3-7 m	Δοκιμές σε εσωτερικό (εργαστηριακό) χώρο  



#	Αναφορά Βιβλιογραφίας	RADAR	Συχνότητα λειτουργίας	Ισχύς εξόδου	Απόσταση ανίχνευσης	Επιπλέον πληροφορίες
8	[92]	Short range pulse battlefield radar	Ku-band	250 W	1 έως 2 km	UASs που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία 
9	[109]	CW dual-receiving-channel radar	K-band (24.125 GHz)	16 dBm	N/A	«The experimental scenario was static in the sense that the drone was hovering at a very short distance away from the radar.» (Reported in Rahman, S., and D.A. Robertson 2018) 
10	[110]	Single channel CW radar system	K-band (25 GHz)	N/A	N/A	UASs που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία 
11	[111]	FMCW radar evaluation board from Analog Devices	K-band (24 GHz)	+25 dBm 24.5 dBi κέρδος κεραίας	Μετρήσεις σε αποστάσεις 85m - 700m (κατ' εκτίμηση)	Η εργασία αποσκοπούσε στη μελέτη υπογραφών micro-Doppler πουλιών Vs drones 
		T-220 (coherent FMCW radar)	W-band (94 GHz)	+18 dBm 40.5 dBi κέρδος κεραίας	Μετρήσεις σε αποστάσεις 85 - 120m - 380m (κατ' εκτίμηση)	
		NIRAD (FMCW radar)		+20 dBm 42.5 dBi κέρδος κεραίας		