



Πανεπιστήμιο
Ιωαννίνων

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΡΑΝΤΑΡ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΡΑΙΩΝ

Καραογλανίδου Κυριακή

Επιβλέπων: Αγγέλης Κωνσταντίνος

Ιωάννινα, Φεβρουάριος, 2026

STUDY OF MONOSTATIC PULSE RADAR WITH UNIFORM ARRAY ANTENNAS

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα,25/02/2026

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Αγγέλης Κωνσταντίνος,

2. Μέλος επιτροπής

Τσορμπατζόγλου Αντρέας,

3. Μέλος επιτροπής

Δουμένης Γρηγόριος,

© Καραογλανίδου, Κυριακή, 2026.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Καραογλανίδου, Κυριακή

Υπογραφή

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου, κ. Αγγέλη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και τις ουσιαστικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη διερεύνηση και ανάλυση συστημάτων ραντάρ ηλεκτρονικής σάρωσης, με έμφαση στη χρήση συστοιχιών κεραιών (phasedarray). Βασικός στόχος της εργασίας είναι η βαθύτερη κατανόηση των αρχών λειτουργίας και των τεχνικών δυνατοτήτων των συστημάτων phasedarray, καθώς και η ανάπτυξη και προσομοίωση ενός μονοστατικού ραντάρ ικανού να εκτελεί σάρωση σε προκαθορισμένη περιοχή επιτήρησης.

Το υπό μελέτη σύστημα βασίζεται σε μια ορθογώνια διάταξη 900 κεραιών/στοιχείων και ενσωματώνει προηγμένες διαδικασίες για την ανίχνευση στόχων, την εκτίμηση της απόστασής τους, καθώς και την υπολογισμό της ταχύτητάς τους, αξιοποιώντας τη μέθοδο Doppler. Η εργασία περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη θεωρητική ανάλυση των βασικών αρχών, τον υπολογισμό κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, παρέχοντας μια συνολική αξιολόγηση της απόδοσης του ραντάρ.

Λέξεις-κλειδιά: Σύστημα ραντάρ, Συστοιχίες κεραιών, Doppler.

Abstract

This thesis focuses on the investigation and analysis of electronic scanning radar systems, with an emphasis on the use of phased arrays. The main objective of this thesis is to gain a deeper understanding of the operating principles and technical capabilities of phased array systems, as well as to develop and simulate a monostatic radar capable of scanning a predetermined surveillance area.

The system under study is based on a rectangular array of 900 antennas/elements and incorporates advanced procedures for target detection, distance estimation, and velocity calculation using the Doppler method. The thesis includes a comprehensive theoretical analysis of the basic principles, the calculation of critical system parameters, and the presentation of the results obtained from simulations, providing an overall assessment of the radar's performance.

Keywords: Radar system, Phased array, Doppler

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ευχαριστίες..... | 6 |
| Περίληψη..... | 7 |
| Abstract | 8 |
| Πίνακας Περιεχομένων..... | 9 |
| Κατάλογος Εικόνων..... | 11 |
| 1. Εισαγωγή | 12 |
| 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο..... | 14 |
| 2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας κεραίας..... | 14 |
| 2.2 Κεραίες φασικής συστοιχίας (Phased Array Antennas) | 16 |
| 2.2.1 Σύνθεση μοτίβου και καταστολή πλευρικών λοβών με Dolph–Chebyshev στάθμιση..... | 23 |
| 2.3 Ραντάρ κυμάτων και αρχές διάδοσης..... | 24 |
| 2.4 Ανίχνευση στόχων με ραντάρ..... | 29 |
| 2.4.1 Προκλήσεις στην ανίχνευση μικρών UAV | 31 |
| 2.4.2 Ρόλος του SNR και του φίλτρου matched..... | 32 |
| 2.4.3 Ανάλυση της εξίσωσης ραντάρ..... | 34 |
| 2.4.4 Διατομή ραντάρ (RCS), συχνότητα και χαρακτηριστικά UAV | 37 |
| 2.5 Φαινόμενο Doppler και εκτίμηση ταχύτητας..... | 38 |
| 2.5.1 Ανίχνευση και Εκτίμηση Εύρους..... | 38 |
| 2.5.2 Εκτίμηση Doppler | 39 |
| 2.6 Συστήματα διαμόρφωσης δέσμης (Beamforming) | 40 |
| 3. Πειραματικό Μέρος..... | 43 |
| 3.1 Εισαγωγή | 43 |
| 3.2 Περιγραφή Αρχικού Κώδικα | 43 |
| 3.3 Τροποποιήσεις στον Κώδικα και Σκοπός..... | 48 |
| 3.4 Παρατηρήσεις από τις Γραφικές Παραστάσεις..... | 48 |
| 3.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων..... | 51 |
| 3.5.1 Επίδραση στην Κατευθυντικότητα και στο Εύρος Δέσμης (Beamwidth)..... | 51 |
| 3.5.2 Επίδραση στο Κέρδος Κεραίας και στην Ισχύ του Σήματος..... | 51 |
| 3.5.3 Επίδραση στην Εκτίμηση Απόστασης και Ταχύτητας | 52 |
| 3.5.4 Συνολική Εκτίμηση..... | 52 |
| 3.6 Συνοπτικά Συμπεράσματα Πειραματικού Μέρους | 52 |
| 4. Συμπεράσματα..... | 54 |
| 4.1 Γενική Ανακεφαλαίωση | 54 |

| | |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2 Συμπεράσματα από την Πειραματική Προσέγγιση | 54 |
| 4.3 Προοπτικές και Μελλοντική Επέκταση | 55 |
| 4.4 Τελικές Σκέψεις..... | 55 |
| Βιβλιογραφία | 56 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1: Παράδειγμα κεραίας συστοιχίας τεσσάρων επί τεσσάρων φάσεων — τα τέσσερα μεμονωμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα διαμορφωτή δέσμης (BFIC), που περιγράφονται με κόκκινο χρώμα, οδηγούν τις κεραίες. | 19 |
| Εικόνα 2: Μια ενιαία κεραία λειτουργεί μόνη της ως στοιχείο παθητικής ακτινοβολίας, ενώ μια σειρά μεμονωμένων κεραίων συνεργάζονται για να παράγουν υψηλότερο κέρδος. | 19 |
| Εικόνα 3: Μεταβάλλοντας την καθυστέρηση σήματος σε κάθε στοιχείο μετατοπίζονται τα μεμονωμένα μέτωπα κύματος που παράγονται, τα οποία κατευθύνουν τη δέσμη. Όλα τα μεμονωμένα μέτωπα κύματος συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ένα ενιαίο μέτωπο κύματος που διαδίδεται..... | 21 |
| Εικόνα 4: Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική AESA επιτρέπει σε κάθε στοιχείο μια μονάδα T / R, μειώνοντας την απόσταση και την απώλεια σήματος μεταξύ της κεραίας και των ηλεκτρονικών, σε αντίθεση με τα PESA..... | 21 |
| Εικόνα 5: Εύρος ραντάρ FMCW με διαμόρφωση πριονωτή (www.radartutorial.eu). | 26 |
| Εικόνα 6: Εμβέλεια ραντάρ FMCW με τριγωνική διαμόρφωση..... | 28 |
| Εικόνα 7: Φίλτρο matched..... | 33 |
| Εικόνα 8: Χάρτης σάρωσης..... | 38 |
| Εικόνα 9: Ανίχνευση κατωφλίου στον χάρτη σάρωσης. | 39 |
| Εικόνα 10: Περιγραφή κώδικα..... | 43 |
| Εικόνα 11: Περιγραφή κώδικα..... | 44 |
| Εικόνα 12: Περιγραφή κώδικα..... | 44 |
| Εικόνα 13: Περιγραφή κώδικα..... | 45 |
| Εικόνα 14: Περιγραφή κώδικα..... | 45 |
| Εικόνα 15: Περιγραφή κώδικα..... | 46 |
| Εικόνα 16: Περιγραφή κώδικα..... | 46 |
| Εικόνα 17: Περιγραφή κώδικα..... | 47 |
| Εικόνα 18: Περιγραφή κώδικα..... | 47 |
| Εικόνα 19: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 24*24 | 49 |
| Εικόνα 20: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 32*32 | 49 |
| Εικόνα 21: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 64*64 | 49 |
| Εικόνα 22: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 128*128 | 50 |
| Εικόνα 23: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 256*256 | 50 |

1. Εισαγωγή

Οι κεραιές αποτελούν βασικά στοιχεία των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας και ραντάρ, καθώς είναι υπεύθυνες για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αντίστροφα. Διατίθενται σε διάφορα σχήματα και τύπους, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η λειτουργία τους βασίζεται στην επιτάχυνση ηλεκτρονίων μέσω ενός ηλεκτρονικού ταλαντωτή που προκαλεί τη δημιουργία εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο με τη σειρά του γεννά ηλεκτρομαγνητικά κύματα, σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell(Charvat, 2014).

Ιστορικά, τα πρώτα ραντάρ βασίζονταν σε συστοιχίες μεμονωμένων ακτινοβολητών, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζονταν από τη γεωμετρική τους διάταξη και τα χαρακτηριστικά διέγερσης (πλάτος και φάση). Με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη μετάβαση σε υψηλότερες συχνότητες, χρησιμοποιήθηκαν πιο συμπαγείς κεραιές, όπως οι παραβολικοί ανακλαστήρες. Στις μέρες μας, οι φασικές συστοιχίες έχουν ανακτήσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας λόγω της δυνατότητας ηλεκτρονικού ελέγχου της διεύθυνσης ακτινοβολίας, μέσω μετατοπιστών φάσης. Αυτό επιτρέπει τον ταχύ και ακριβή έλεγχο της κατεύθυνσης της δέσμης, προσφέροντας ευελιξία και τη δυνατότητα εκτέλεσης πολλαπλών λειτουργιών ταυτόχρονα (Cheston&Frank, 1990).

Τα ραντάρ, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες (ακουστικές, οπτικές), υπερέχουν λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, η ανίχνευση μικρών εμπορικών UAV μέσω ραντάρ παραμένει τεχνικά δύσκολη λόγω του μικρού τους μεγέθους, της χαμηλής ανακλαστικότητας των υλικών τους (όπως πλαστικό), και της πτήσης τους σε μικρό ύψος με αργή ταχύτητα, χαρακτηριστικά που δυσκολεύουν τη διάκρισή τους από τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Η τεχνολογία ραντάρ αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς της σύγχρονης ηλεκτρονικής και της αεροδιαστημικής τεχνολογίας, με εφαρμογές που εκτείνονται από την πολιτική αεροπορία και την άμυνα μέχρι την αυτόνομη πλοήγηση και την ανίχνευση μικρών αντικειμένων σε περίπλοκα περιβάλλοντα. Η συνεχής εξέλιξη των συστημάτων ραντάρ επιβάλλει την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας τους, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, ιδίως όσον αφορά τη σχεδίαση κεραιών, τη διάδοση των ραδιοκυμάτων και την επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων.

Ειδικά στο πεδίο της ανίχνευσης μικρών στόχων, όπως τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), η ανάγκη για υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση καθιστά κρίσιμη τη χρήση τεχνολογιών όπως οι συστοιχίες φασικής διάταξης (phased array antennas) και η προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης (beamforming). Οι σύγχρονες ραδιοσυστοιχίες έχουν επαναφέρει το ενδιαφέρον σε ηλεκτρονικά ελεγχόμενες κεραιές, οι οποίες προσφέρουν σημαντική ευελιξία στη λειτουργία των ραντάρ. Όπως επισημαίνει και ο Skolnik, (Skolnik, 2008), τα σύγχρονα ραντάρ συστοιχίας μπορούν να παρακολουθούν ταυτόχρονα πολλαπλούς στόχους, να καθοδηγούν πυραύλους, να εκτελούν αναζήτηση μεγάλης κλίμακας και να λειτουργούν ακόμη και ως σύστημα επικοινωνίας. Η ηλεκτρονική σάρωση της δέσμης, η ευελιξία στη συχνότητα και η διανομή ισχύος σε πολλαπλά ενισχυτικά στοιχεία επιτρέπουν την προσαρμογή των λειτουργιών του ραντάρ στις επιχειρησιακές απαιτήσεις με υψηλό βαθμό ακρίβειας και ταχύτητας (Skolnik, 2008).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αρχικά η μελέτη βασικών θεωρητικών αρχών που σχετίζονται με τη λειτουργία των ραντάρ και η κατανόηση τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μικρών στόχων, με έμφαση στην αξιοποίηση φασικών συστοιχιών και την ανάλυση της εξίσωσης ραντάρ. Επιπλέον, εξετάζονται ζητήματα όπως η διάδοση κυμάτων, το φαινόμενο Doppler, η σχέση SNR και φίλτρων matched, καθώς και η διατομή ραντάρ (RCS) στόχων όπως τα UAV. Η εργασία περιλαμβάνει και πειραματική προσέγγιση μέσω της οποίας εξετάζεται αν και πώς μεταβάλλονται οι κύριοι και πλευρικοί λοβοί της δέσμης, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη στάθμιση και τη γεωμετρία της συστοιχίας, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ανίχνευσης μικρών UAV σε περιβάλλον ραντάρ.

Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Μετά την εισαγωγή, το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο εξετάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των κεραιών, οι φασικές συστοιχίες, οι τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), η διάδοση ραδιοκυμάτων και οι αρχές λειτουργίας των ραντάρ. Επίσης, αναλύονται οι προκλήσεις στην ανίχνευση UAV και η σημασία του φαινομένου Doppler. Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει το πειραματικό μέρος, στο οποίο αναλύονται δεδομένα που προκύπτουν από τη θεωρητική μελέτη. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία.

2.Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας κεραίας

Η ραδιοανίχνευση και η εμβέλεια (RADAR) αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία, με εφαρμογές που εκτείνονται από τον στρατιωτικό τομέα έως τις πολιτικές και εμπορικές χρήσεις, όπως ο έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας, η μετεωρολογία, η αστρονομία και η επιτήρηση (Budge&German, 2020). Η βασική αρχή λειτουργίας ενός ραντάρ περιλαμβάνει την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω μιας κεραίας, την ανάκλασή τους από στόχους και τη λήψη των ανακλώμενων κυμάτων από τον δέκτη, επιτρέποντας την εκτίμηση της απόστασης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού τους.

Η κεραία αποτελεί κρίσιμο υποσύστημα ενός συστήματος ραντάρ, καθώς είναι υπεύθυνη για τη μετάβαση μεταξύ καθοδηγούμενων κυμάτων και κυμάτων που ακτινοβολούνται στον ελεύθερο χώρο και αντιστρόφως. Συγκεκριμένα, η κεραία μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που καθοδηγούνται από μία γραμμή μεταφοράς σε κύματα που διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο κατά την εκπομπή, και το αντίστροφο κατά τη λήψη (Boccia&Breinbjerg, 2012). Η διαδικασία αυτή πρέπει να υλοποιείται υπό περιορισμούς που σχετίζονται με την αποδοτικότητα, το κέρδος, το εύρος δέσμης, το διάγραμμα ακτινοβολίας και την κατευθυντικότητα της κεραίας.

Γενικά, η σχεδίαση μιας κεραίας εξαρτάται από την εφαρμογή της και τον λειτουργικό ρόλο της. Οι κεραίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με την αποστολή: κεραίες για τηλεμετρία, παρακολούθηση και έλεγχο (TT&C), κεραίες υψηλής χωρητικότητας για επικοινωνίες, και κεραίες για επιστημονικά όργανα ή ειδικές διαστημικές εφαρμογές (Boccia&Breinbjerg, 2012). Στα ραντάρ, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας, ώστε να επιτυγχάνεται στενή και κατευθυνόμενη δέσμη που εστιάζει την εκπεμπόμενη ισχύ στον στόχο και μεγιστοποιεί την πιθανότητα ανίχνευσής του.

Τα ραντάρ κατηγοριοποιούνται κυρίως σε παλμικά και συνεχούς κυματομορφής (CW). Τα παλμικά ραντάρ μεταδίδουν διαδοχικούς παλμούς και μπορούν να χρησιμοποιούν μία κοινή κεραία για εκπομπή και λήψη μέσω διακόπτη T/R, ενώ τα ραντάρ συνεχούς κυματομορφής εκπέμπουν συνεχώς και απαιτούν ξεχωριστές κεραίες για εκπομπή και λήψη.

Ανάλογα με τη σχετική θέση πομπού και δέκτη, τα συστήματα διακρίνονται σε μονοστατικά και διστατικά(Nordinetal., 2016).

Η χρήση προηγμένων κεραιών, όπως οι συστοιχίες κεραιών με δυνατότητα ηλεκτρονικής σάρωσης, επιτρέπει τη γρήγορη και ακριβή δέσμευση στόχων, την προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας ανάλογα με την αποστολή και την υποστήριξη πολλαπλών λειτουργιών ραντάρ ταυτόχρονα. Η διαμόρφωση της φάσης και του πλάτους των επιμέρους στοιχείων μιας τέτοιας συστοιχίας επιτρέπει τη διαμόρφωση του λοβού και τη δυναμική μετατόπισή του, βελτιστοποιώντας την ικανότητα εντοπισμού, παρακολούθησης και ταξινόμησης στόχων, ακόμα και σε περιβάλλοντα με ισχυρή ακαταστασία.

Το ραντάρ αποτελεί έναν ιδιαίτερα χρήσιμο αισθητήρα για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση στόχων σε σύνθετα περιβάλλοντα, όπως τα αστικά, χάρη στην ικανότητά του να λειτουργεί ανεξάρτητα από τις καιρικές και φωτιστικές συνθήκες. Ωστόσο, η ανίχνευση μικρών UAV (UnmannedAerialVehicles) εγείρει ιδιαίτερες προκλήσεις λόγω των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών τους (Patel, 2024).

Οι βασικοί παράγοντες που δυσχεραίνουν την ανίχνευση μικρών drone περιλαμβάνουν:

1. Μικρό μέγεθος: Εξαιτίας της χαμηλής διατομής ραντάρ (Radar Cross Section – RCS), η ανακλώμενη ισχύς του σήματος είναι ιδιαίτερα ασθενής.
2. Πτήση σε χαμηλό υψόμετρο και με χαμηλή ταχύτητα, η οποία δυσκολεύει τον διαχωρισμό από το περιβάλλον θορύβου και τα σταθερά εμπόδια.
3. Κατασκευή από υλικά όπως το πλαστικό, το οποίο έχει διηλεκτρικές ιδιότητες παρόμοιες με του αέρα, μειώνοντας περαιτέρω την ανάκλαση του ραδιοσήματος πίσω στον δέκτη.
4. Ομοιότητα με πτηνά: Τα UAV μπορεί να παρουσιάζουν παρόμοιο RCS και μοτίβα πτήσης με πτηνά, προκαλώντας σύγχυση στους ταξινομητές στόχων.
5. Ισχυρή ακαταστασία (clutter) σε αστικά ή φυσικά περιβάλλοντα, που καθιστά δύσκολη την απομόνωση του στόχου από το περιβάλλον υπόβαθρο.

Για να είναι εφικτή η ανίχνευση, οι στόχοι πρέπει να ανακλούν επαρκή ενέργεια ώστε το σήμα τους να ξεπερνά το επίπεδο θορύβου. Η Σχέση Σήματος προς Θόρυβο (SNR) είναι κρίσιμη για τη διακριτότητα του στόχου και την αξιόπιστη ανίχνευση. Στην περίπτωση UAV, απαιτείται SNR τουλάχιστον 14 dB ώστε να επιτευχθεί ανίχνευση με αποδεκτό ποσοστό ψευδών συναγερωμών(Bouzayeneetal., 2019).

Η μέγιστη απόδοση ανίχνευσης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός αντιστοιχισμένου φίλτρου (matched filter) στον δέκτη. Η θεωρητική τιμή του SNR στην έξοδο του δέκτη περιγράφεται από την κλασική εξίσωση ραντάρ, η οποία λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως η ισχύς εκπομπής, το RCS του στόχου, την απόσταση και τα χαρακτηριστικά του δέκτη (Barton, 1988):

$$\text{SNR} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4 k T B_n}$$

Όπου:

- SNR , αναλογία σήματος προς θόρυβο,
- P_t η ισχύς πομπού ,
- G_t το κέρδος της κεραίας εκπομπής,
- G_r κέρδος της κεραίας λήψης,
- λ μήκος κύματος ραδιοκυμάτων,
- σ διατομή ραντάρ αντικειμένου,
- k η σταθερά του Boltzmann,
- T η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου δέκτη,
- B_n το εύρος ζώνης θορύβου επεξεργασίας,
- r η απόσταση από τον πομπό στον στόχο.

Η εξίσωση αυτή είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των επιδόσεων ενός συστήματος ραντάρ και τη δυνατότητά του να εντοπίζει χαμηλοπροφίλ στόχους όπως τα UAV (Bouzayene et al., 2019).

2.2 Κεραίες φασικής συστοιχίας (Phased Array Antennas)

Οι κεραίες φασικής συστοιχίας αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για σύγχρονες εφαρμογές ραντάρ και επικοινωνιών, επιτρέποντας την ηλεκτρονική διαμόρφωση και κατεύθυνση της δέσμης χωρίς μηχανικά μέρη. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην αρχή της ελεγχόμενης φασικής μετατόπισης και στάθμισης πλάτους στα επιμέρους στοιχεία, οδηγώντας σε υψηλή κατευθυντικότητα, γρήγορη απόκριση και πολλαπλή στόχευση. Χάρη στην πρόοδο στα υλικά και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι συστοιχίες αυτές βρίσκουν πλέον εφαρμογή πέραν του στρατιωτικού τομέα, επεκτεινόμενες σε δίκτυα 5G, αυτοκινητοβιομηχανία και διαστημικές επικοινωνίες.

Πιο συγκεκριμένα, οι κεραίες μπορούν να συζευχθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια συστοιχία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει το κατευθυντικό κέρδος. Η φάση και το πλάτος μπορούν να διαμορφωθούν έτσι ώστε η κατεύθυνση της προκύπτουσας δέσμης να μπορεί να ελεγχθεί. Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος του πλάτους και της φάσης κάθε στοιχείου στη συστοιχία μπορεί να είναι ισοδύναμος με μια μηχανικά περιστρεφόμενη κεραία αλλά χωρίς την ανάγκη κινητών μερών, τα οποία μπορεί να είναι χρήσιμα και σημαντικά στο σχεδιασμό μας. Ανάλογα με τη διαμόρφωση των συστοιχιών, ορίζονται διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Ο πιο συνηθισμένος είναι ο UniformLinearArray (ULA) που έχει ένα πλέγμα στοιχείων κεραίας σε ίση απόσταση κατά μήκος μιας γραμμής. Αυτός ο πίνακας μπορεί επίσης να επεκταθεί σε μια διδιάστατη δομή με ίσο μήκος, η οποία ονομάζεται UniformRectangularArray (URA). Το URA έχει έναν ακόμη βαθμό ελευθερίας που καθιστά δυνατό τον έλεγχο των κατευθύνσεων φ - και θ , σε σύγκριση με το ULA που μπορεί να ελέγξει μόνο την κατεύθυνση θ . Άλλες κοινές διαμορφώσεις χρησιμοποιούν κυκλική/σφαιρική συμμετρία, αλλά αγνοούνται καθώς είναι αναποτελεσματικές στη χρήση του χώρου, ο οποίος στην περίπτωση μας είναι περιορισμένος.

Η ηλεκτρονική διεύθυνση της συστοιχίας επιτυγχάνεται με σωστές μετατοπίσεις φάσης των σημάτων που μεταδίδονται από διαφορετικές κεραίες. Σε ορισμένες κατευθύνσεις οι φάσεις θα προσθέτουν εποικοδομητικά και σε άλλες θα προσθέτουν καταστροφικά. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα του μετασχηματισμού Fourier. μια μετάφραση στο διάστημα αντιστοιχεί σε μια περιστροφή της φάσης στον τομέα συχνότητας. Το διάνυσμα ακτινοβολίας F περιγράφει την πυκνότητα ισχύος του ακτινοβολούμενου μακρινού πεδίου στις διευθύνσεις θ και φ για μια μεμονωμένη κεραία. Το συνολικό διάνυσμα ακτινοβολίας που περιέχει όλες τις συνεισφορές για κάθε κεραία F_{tot} , μπορεί να γραφτεί ως $F_{tot} = A(k)F(k)$, όπου $F(k)$ είναι το διάνυσμα ακτινοβολίας και $A(k)$ είναι ο παράγοντας πίνακα και εκφράζεται ως εξής σε μια γραμμική διάταξη n -μήκους όπου k είναι ο αριθμός κύματος, a_n τα βάρη για το αντίστοιχο στοιχείο και d_n η θέση του στοιχείου (Orfanidis, 2014).

Το πλάτος και η διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων μιας κεραίας καθορίζουν το μοτίβο ακτινοβολίας της. Η σύνθεση αυτού του μοτίβου είναι μαθηματικά ισοδύναμη με τον σχεδιασμό FIR φίλτρων. Σε ομοιόμορφη γραμμική διάταξη με απόσταση $\lambda/2$, η μέγιστη γωνιακή ανάλυση επιτυγχάνεται όταν οι φάσεις είναι ίδιες. Ωστόσο, η ομοιόμορφη στάθμιση οδηγεί σε πλευρικούς λοβούς περίπου -13 dB, γεγονός ανεπιθύμητο σε πολλές εφαρμογές.

Για τη μείωση αυτών των λοβών, χρησιμοποιούνται τεχνικές στάθμισης όπως οι μέθοδοι Dolph–Chebyshev, Taylor και διωνυμικής κατανομής. Η μέθοδος Dolph–Chebyshev προτιμάται, καθώς επιτυγχάνει τον στενότερο δυνατό κύριο λοβό για καθορισμένο επίπεδο πλευρικών λοβών, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας εντός συγκεκριμένου γωνιακού εύρους (Nordin, etal., 2016).

Τα σύγχρονα συστήματα ραντάρ και ασύρματων επικοινωνιών βασίζονται σε κεραίες φασικής συστοιχίας (PhasedArrayAntennas – PAA) για την υλοποίηση κρίσιμων λειτουργιών, όπως η διαμόρφωση και η κατευθυνόμενη σάρωση της δέσμης (beamforming και beamsteering). Η τεχνολογία beamforming προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τις ασύρματες συνδέσεις, όπως:

1. Μείωση των παρεμβολών,
2. Αυξημένη εμβέλεια,
3. Υποστήριξη πολλαπλών ταυτόχρονων υπηρεσιών,
4. Βελτιωμένη ασφάλεια επικοινωνίας.

Παραδοσιακά, οι συστοιχίες φάσης χρησιμοποιούνταν κυρίως σε στρατιωτικά ή πολιτικά ραντάρ. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες εξαρτημάτων, όπως οι μονάδες μετάδοσης/λήψης (T/R modules) ενσωματωμένες σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (chips) και οι ενισχυτές ισχύος βασισμένοι σε GaN (GalliumNitride), έχουν μειώσει σημαντικά το κόστος και τον όγκο των PAA. Αυτό έχει καταστήσει δυνατή τη χρήση τους και σε εμπορικές εφαρμογές, ανοίγοντας τον δρόμο για προηγμένα συστήματα επικοινωνίας και ραντάρ σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, τα δίκτυα 5G και οι δορυφορικές επικοινωνίες (SATCOM).

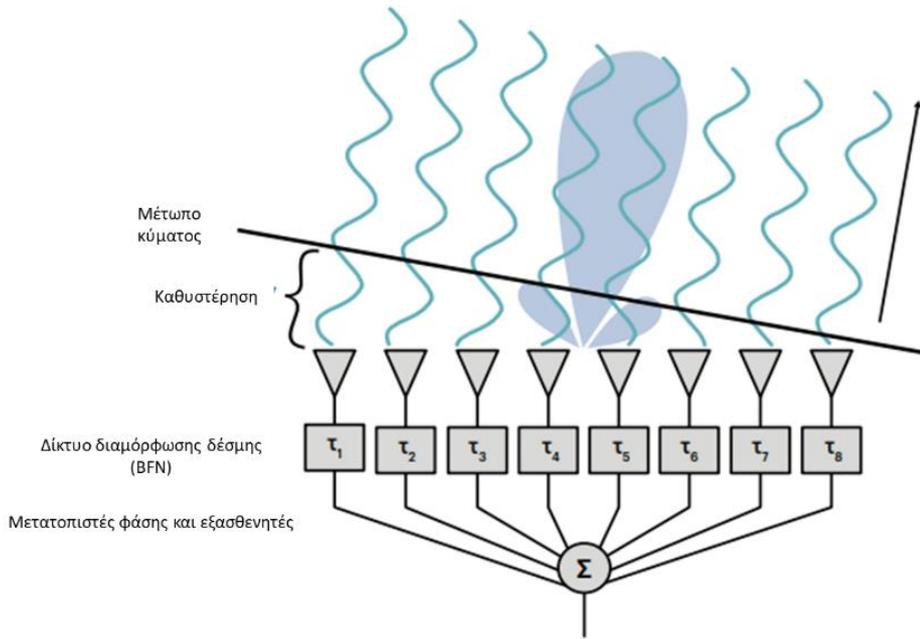
Συγκεκριμένα, στα δίκτυα 5G, η επίτευξη της μαζικής μηχανικής επικοινωνίας (mMTC) και της εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, όπως καθορίζεται από το πρότυπο IMT-2020, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία phasedarray. Παράλληλα, στις διαστημικές εφαρμογές νέας γενιάς (NewSpace), οι ευέλικτες συστοιχίες επιτρέπουν την ταχεία σάρωση και τη συνεχή σύνδεση με δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO), γεγονός που είναι κρίσιμο για σύγχρονα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας(www.keysight.com) (Εικόνα 1).

σχετικής φάσης μεταξύ των στοιχείων επιτρέπει την ηλεκτρονική σάρωση της δέσμης σε συγκεκριμένες γωνίες, ενώ η διαμόρφωση του πλάτους συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας και στη μείωση των πλευρικών λοβών.

Ο όρος "αύξηση φάσης" αναφέρεται στην απαιτούμενη μεταβολή φάσης μεταξύ διαδοχικών στοιχείων ώστε να επιτευχθεί κατεύθυνση της δέσμης σε μια δεδομένη γωνία. Οι σύγχρονες PAA επιτυγχάνουν αυτόν τον έλεγχο ηλεκτρονικά, και για τον λόγο αυτόν αναφέρονται συχνά ως ηλεκτρονικά σαρωμένες συστοιχίες (Electronically Scanned Arrays – ESA). Σε αντίθεση, οι πρώτες υλοποιήσεις φασικών συστοιχιών στα κλασικά συστήματα ραντάρ βασίζονταν σε μηχανική σάρωση μέσω περιστρεφόμενων κατασκευών, οι οποίες περιόριζαν την απόκριση του συστήματος, αυξάνοντας το μέγεθος, το βάρος και την πιθανότητα μηχανικών βλαβών.

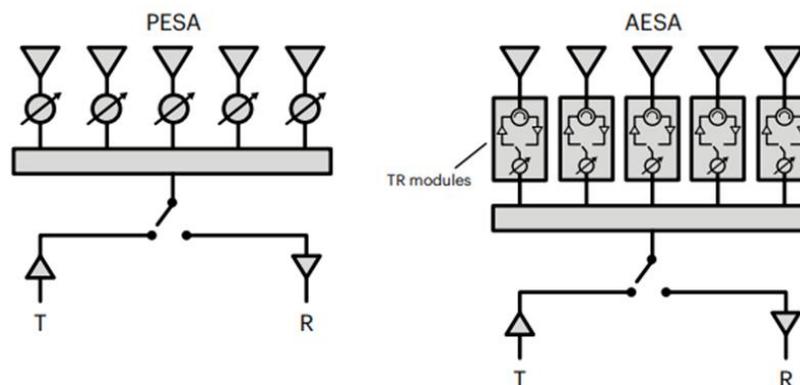
Η μετάβαση από τη μηχανική στην ηλεκτρονική σάρωση επέφερε σημαντικά πλεονεκτήματα: μικρότερο φυσικό αποτύπωμα, μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτερη απόκριση του συστήματος. Η υλοποίηση της φασικής μετατόπισης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές. Η απλούστερη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση γραμμών καθυστέρησης (delaylines), οι οποίες παρεμβάλλονται ανάμεσα στην πηγή (ή στον δέκτη) και τα στοιχεία της συστοιχίας. Κατά την εκπομπή, οι γραμμές καθυστέρησης επιβραδύνουν το σήμα ώστε κάθε στοιχείο να εκπέμπει με την κατάλληλη χρονική μετατόπιση. Κατά τη λήψη, τα σήματα που συλλέγονται καθυστερούνται αντίστοιχα και συνδυάζονται (διαδικασία delay-and-sum), ενισχύοντας τη συνεισφορά από την επιθυμητή κατεύθυνση.

Για την επίτευξη υψηλής γωνιακής ανάλυσης, είναι απαραίτητο να υπάρχουν διακόπτες ελέγχου σε κάθε στοιχείο, ώστε να προσαρμόζεται η καθυστέρηση σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Μεταβάλλοντας την καθυστέρηση σήματος σε κάθε στοιχείο μετατοπίζονται τα μεμονωμένα μέτωπα κύματος που παράγονται, τα οποία κατευθύνουν τη δέσμη. Όλα τα μεμονωμένα μέτωπα κύματος συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ένα ενιαίο μέτωπο κύματος που διαδίδεται

Η κεραία συστοιχίας φάσεων επιτρέπει την ταχεία και ευέλικτη κατεύθυνση της δέσμης μέσω ηλεκτρονικού ελέγχου του πλάτους και της φάσης των στοιχείων της. Αυτό προσφέρει υψηλή ταχύτητα σάρωσης και δυνατότητα ταυτόχρονης επικοινωνίας με πολλούς στόχους ή σταθμούς. Η εξέλιξη της τεχνολογίας περιλαμβάνει δύο βασικούς τύπους: τις παθητικές (PESA) και τις ενεργές (AESA) ηλεκτρονικά σαρωμένες συστοιχίες. Οι AESA χρησιμοποιούν κατανεμημένη αρχιτεκτονική με ενσωματωμένους ενισχυτές και μονάδες T/R ανά στοιχείο, προσφέροντας μεγαλύτερη απόδοση, ισχύ και αξιοπιστία, αλλά και αυξημένη πολυπλοκότητα και κόστος (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική AESA επιτρέπει σε κάθε στοιχείο μια μονάδα T/R, μειώνοντας την απόσταση και την απώλεια σήματος μεταξύ της κεραίας και των ηλεκτρονικών, σε αντίθεση με τα PESA

Οι μονάδες T / R είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση RF της συστοιχίας φάσεων. Το LNA και το PA λειτουργούν ως το αρχικό στάδιο της διαδρομής λήψης και το τελικό στάδιο της διαδρομής μετάδοσης. Ως εκ τούτου, οι μηχανικοί βελτιστοποιούν την ευαισθησία λήψης χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις μετρήσεις θορύβου και απολαβής του LNA. Ομοίως, οι μηχανικοί βελτιστοποιούν τη γραμμικότητα και την απόδοση για τη μετάδοση με βάση τη συμπεριφορά παραμόρφωσης PA. Κατά τη διάρκεια των λειτουργιών λήψης, το LNA καθορίζει τον προϋπολογισμό σύνδεσης συστήματος, τον αριθμό θορύβου και το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα για τη μονάδα T / R. Η εξίσωση 1 δείχνει τον τύπο Friis για τον παράγοντα θορύβου — ο αριθμός θορύβου του πρώτου σταδίου ενίσχυσης, F1, ορίζει τον ελάχιστο αριθμό θορύβου για τον συνολικό δέκτη.

$$F_{\text{Total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_N - 1}{G_1 \cdot G_2 \dots G_{N-1}} \quad (1)$$

Ο τύπος του Friis δείχνει ότι ο συνολικός συντελεστής θορύβου δέκτη (F_{Total}) υπολογίζει τον συντελεστή θορύβου, FN, και κέρδος, GN, κάθε σταδίου - ο συντελεστής θορύβου πρώτου σταδίου, F1, κυριαρχεί στο συνολικό αριθμό θορύβου του δέκτη.

Τα φαινόμενα παραμόρφωσης επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση της διαδρομής του πομπού - ιδιαίτερα τα φαινόμενα μη γραμμικής παραμόρφωσης που συμβάλλει ο ενισχυτής ισχύος. Ο ενισχυτής ισχύος καταλαμβάνει το τελευταίο στάδιο της αλυσίδας RF πριν από την κεραία. Η παραμόρφωση του PA επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Οι συνεισφορές παραμόρφωσης εντός ζώνης προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία, καθώς το φιλτράρισμα αποδεικνύεται αναποτελεσματικό. Ο ενισχυτής ισχύος συμβάλλει επίσης τα μέγιστα στην κατανάλωση ενέργειας.

Η πόλωση καθορίζει εάν ένας ενισχυτής συμπεριφέρεται πιο γραμμικά αλλά λιγότερο αποτελεσματικά - ή αποτελεσματικά αλλά με σημαντική παραμόρφωση. Για να επιτύχουν βέλτιστη απόδοση από τη μονάδα T/R, οι μηχανικοί πρέπει να βελτιστοποιήσουν την απόδοση της PA, διασφαλίζοντας παράλληλα γραμμικότητα που ευθυγραμμίζεται με αυστηρά ρυθμιστικά πρότυπα. Αυτή η αντιστάθμιση μεταξύ γραμμικότητας και αποτελεσματικότητας είναι ζωτικής σημασίας. Η βιομηχανία συστημάτων επικοινωνιών θεωρεί το μέγεθος του διανύσματος σφάλματος (EVM) ως το κριτήριο αναφοράς για την παραμόρφωση εντός ζώνης. Τα πρότυπα διαμόρφωσης, όπως το 802.11ac και το 5G

NewRadio (NR), ορίζουν το ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο EVM. Καθώς αυξάνεται η τυπική αυστηρότητα, αυξάνεται και η ανάγκη για ακριβή καταγραφή και βελτιστοποίηση της παραμόρφωσης διαμόρφωσης PA και του EVM.

Εκτός από τους ενισχυτές, τα παθητικά στοιχεία της μονάδας T/R συμβάλλουν επίσης σημαντικά στη συνολική απόδοση της συστοιχίας φάσεων. Για παράδειγμα, οι μετατοπιστές φάσης και οι εξασθενητές τόσο στη διαδρομή εκπομπής όσο και στη διαδρομή λήψης της μονάδας T / R ελέγχουν το σύστημα διεύθυνσης της δέσμης κεραίας και καθορίζουν τη γωνιακή ακρίβεια της συστοιχίας φάσεων. Οι μονάδες T / R χρειάζονται εκτεταμένες δοκιμές για να ταιριάζουν με τη συστοιχία φάσεων, αλλά ο χαρακτηρισμός τους απαιτεί πολλές διαφορετικές μετρήσεις. Δεδομένου ότι μια ενεργή συστοιχία κεραία περιλαμβάνει χιλιάδες μονάδες T / R, οι μηχανικοί πρέπει να δοκιμάσουν όλες τις παραμέτρους εκπομπής και λήψης γρήγορα και με μία μόνο σύνδεση με τη μονάδα για να κατασκευάσουν οικονομικά αποδοτικές κεραίες συστοιχίας φάσης.

2.2.1 Σύνθεση μοτίβου και καταστολή πλευρικών λοβών με Dolph–Chebyshev στάθμιση

Η διαμόρφωση του μοτίβου ακτινοβολίας σε μια διάταξη phasedarray εξαρτάται άμεσα από το πλάτος και τη φάση που εφαρμόζονται στα επιμέρους στοιχεία. Μέσω της κατάλληλης στάθμισης, είναι δυνατή η ενίσχυση της κατευθυντικότητας, η αύξηση της γωνιακής ανάλυσης και η καταστολή των πλευρικών λοβών. Μαθηματικά, η διαδικασία αυτή είναι ανάλογη με τη σχεδίαση FIR φίλτρων, καθώς το χωρικό μοτίβο αντιστοιχεί στη φασματική απόκριση ενός τέτοιου φίλτρου. Σε μια ομοιόμορφη γραμμική διάταξη (ULA) με διάκενο στοιχείων ίσο με $\lambda/2$ και ίδιες φάσεις, η κύρια δέσμη κατευθύνεται κάθετα στην επιφάνεια της διάταξης (broadside), με γωνιακή ανάλυση:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2A_{eff}}$$

Ωστόσο, η χρήση ομοιόμορφης στάθμισης προκαλεί πλευρικούς λοβούς με στάθμη περίπου -13 dB, ανεξάρτητα από το πλήθος των στοιχείων. Αυτό το φαινόμενο είναι ανάλογο με τη χρήση ορθογωνίου παραθύρου στη σχεδίαση φίλτρων και μπορεί να μετριαστεί με τεχνικές παραθύρωσης.

Μερικές κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης του μοτίβου περιλαμβάνουν:

1. Dolph–Chebyshev στάθμιση
2. Taylor με έναν παράμετρο
3. Διωνυμική κατανομή

Η μέθοδος Dolph–Chebyshev είναι ιδανική όταν απαιτείται ταυτόχρονα στενή κύρια δέσμη και προκαθορισμένο επίπεδο πλευρικών λοβών. Η σύνθεση βασίζεται στα πολυώνυμα Chebyshev:

$$T_m(x) = \cos(m \cdot \arccos(x))$$

Ο παράγοντας στάθμισης (weightingfunction) για το μοτίβο της κεραίας δίνεται από:

$$W(\psi) = T_{N-1}(x), \text{ όπου } x = x_0 \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)$$

Η τιμή x_0 καθορίζεται από την επιθυμητή αναλογία λοβών R_α :

$$X_0 = \cosh\left(\frac{\operatorname{arccosh}(R_\alpha)}{N-1}\right), \text{ όπου } R_\alpha = \frac{W_{main}}{W_{sidelobe}}$$

είναι η αναλογία κύριου λοβού προς πλευρικό λοβό (σε απόλυτη τιμή) και N είναι ο αριθμός των στοιχείων της διάταξης. Η διεύρυνση της κύριας δέσμης λόγω της στάθμισης μπορεί να εκφραστεί μέσω ενός παράγοντα διεύρυνσης b :

$$B = \frac{(6R+12)}{155}, \text{ όπου } R = 20 \log_{10}(R_\alpha)$$

Η κατανόηση και ο σωστός χειρισμός της στάθμισης στα στοιχεία του array επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της γωνιακής ανάλυσης, ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν τις παρεμβολές από ανεπιθύμητες κατευθύνσεις, γεγονός κρίσιμο σε εφαρμογές ραντάρ, τηλεπικοινωνιών και εντοπισμού στόχων (Nordin et al., 2016).

2.3 Ραντάρ κυμάτων και αρχές διάδοσης

Το ραντάρ ContinuousWave (CW) είναι ένας τύπος συστήματος ραντάρ όπου μεταδίδεται συνεχώς ένα σήμα με γνωστή συχνότητα. Διαφέρει από το παλμικό σύστημα ραντάρ χρησιμοποιώντας συνεχές σήμα και ξεχωριστές κεραίες εκπομπής και λήψης. Το

λαμβανόμενο σήμα ηχούς από το αντικείμενο είτε θα έχει την ίδια συχνότητα με το μεταδιδόμενο σήμα είτε θα μετατοπιστεί εάν το αντικείμενο κινείται. Αυτή η αλλαγή στη συχνότητα μεταξύ του λαμβανόμενου και του εκπεμπόμενου σήματος είναι γνωστή ως φαινόμενο Doppler (O'Donnell, 2007). Η λαμβανόμενη συχνότητα f_r σχετίζεται με την εκπεμπόμενη συχνότητα f_t κατά:

$$f_r = \left(\frac{1 + u/c}{1 - u/c} \right) f_t$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και u είναι η ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου (στην κατεύθυνση προς ή από τον πομπό/δέκτη). Στη συνέχεια, η συχνότητα Doppler f_d δίνεται από το:

$$f_d = f_r - f_t = \frac{2u}{(c-u)} f_t$$

Δεδομένου ότι στις περισσότερες εφαρμογές $v \ll c$, είναι δυνατή η απλοποίηση (2.8) σε:

$$f_d = \frac{2u}{(c-u)} f_t$$

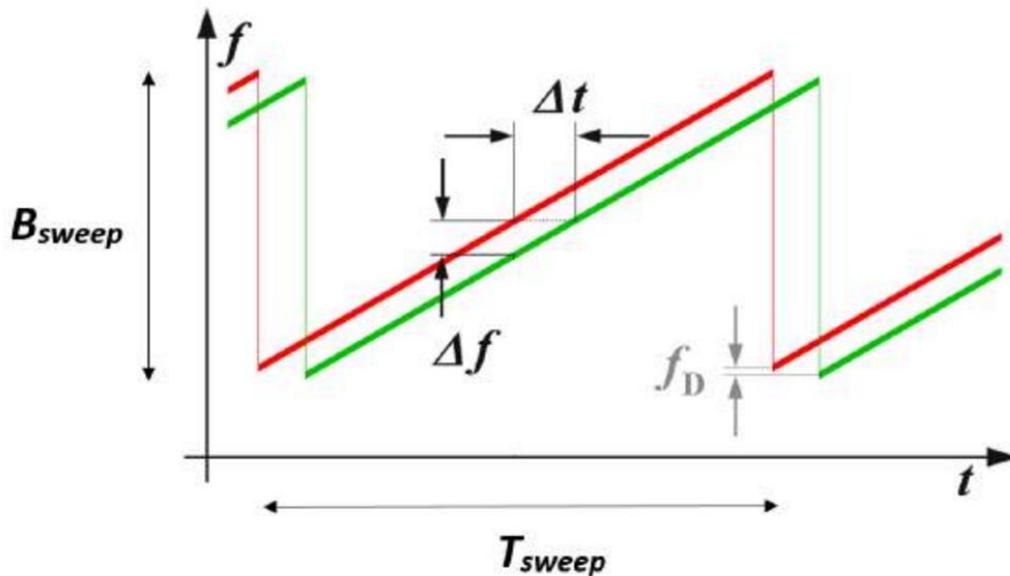
όπου λ είναι το μήκος κύματος του σήματος που εκπέμπεται. Αυτό το είδος ραντάρ που χρησιμοποιεί το φαινόμενο Doppler χωρίς καμία διαμόρφωση (τα λεγόμενα ραντάρ Doppler) μπορεί να ανιχνεύσει μόνο κινούμενα αντικείμενα, καθώς οι σταθεροί στόχοι δεν θα προκαλέσουν καμία μετατόπιση Doppler. Επομένως, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του εύρους προς στόχευση, μόνο την ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου (O'Donnell, 2007).

Το ραντάρ συνεχούς κύματος που διαμορφώνεται με συχνότητα (FMCW) είναι ένα σύστημα ραντάρ όπου ένα μεταδιδόμενο συνεχές σήμα με γνωστή συχνότητα μεταβάλλεται προς τα πάνω και προς τα κάτω σε συχνότητα για μια καθορισμένη χρονική περίοδο από ένα σήμα διαμόρφωσης. Η διαμόρφωση στη συχνότητα θα επιτρέψει μετρήσεις απόστασης μαζί με μετρήσεις ταχύτητας (www.radartutorial.eu). Η διαφορά στη συχνότητα μεταξύ του λαμβανόμενου και του εκπεμπόμενου σήματος θα αυξάνεται με την καθυστέρηση και, επομένως, με την απόσταση. Τα λαμβανόμενα σήματα ηχούς από τον στόχο αναμειγνύονται με το μεταδιδόμενο σήμα, το οποίο μετά την αποδιαμόρφωση θα δώσει την εμβέλεια στον στόχο (www.radartutorial.eu). Η Εικόνα 5 δείχνει ένα μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ραντάρ FMCW. Η διαμόρφωση συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί με πολλά διαφορετικά μοτίβα διαμόρφωσης, όπως:

1. Τριγωνικό κύμα

2. Πριονοδόντιο κύμα
3. Τετράγωνο κύμα
4. Ημιτονικό κύμα

Η βασική αρχή πίσω από το σύστημα ραντάρ FMCW που χρησιμοποιεί μια πριονωτή διαμόρφωση φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Εύρος ραντάρ FMCW με διαμόρφωση πριονωτή (www.radartutorial.eu).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, το λαμβανόμενο σήμα (το πράσινο κύμα) είναι ένα ακριβές αντίγραφο του μεταδιδόμενου σήματος (το κόκκινο κύμα) αλλά μετατοπίζεται χρονικά, δηλ. δεξιά στο σχήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια διαφορά συχνότητας, που ονομάζεται συχνότητα παλμού Δf , μεταξύ των δύο σημάτων που είναι ανάλογη με τη χρονική καθυστέρηση Δt . Η χρονική καθυστέρηση είναι επομένως ένα μέτρο του εύρους προς στόχο. Εάν υπάρχει συχνότητα Doppler f_D , θα μετακινήσει ολόκληρο το λαμβανόμενο σήμα είτε προς τα επάνω (προς το ραντάρ) είτε προς τα κάτω (απομακρυνόμενο από το ραντάρ) σε συχνότητα. Η απόσταση από τον στόχο μπορεί να ληφθεί από τη συχνότητα παλμών. Η κλίση της γραμμικής ράμπας στο σχήμα είναι:

$$\frac{df}{dt} = \frac{B_{sweep}}{T_{sweep}}$$

όπου B_{sweep} είναι το εύρος ζώνης σάρωσης και T_{sweep} είναι ο χρόνος σάρωσης. Εφόσον η συχνότητα παλμού είναι ανάλογη με τη χρονική καθυστέρηση, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{B_{sweep}}{T_{sweep}}$$

Η χρονική καθυστέρηση είναι απλώς $\Delta t = 2R/c$, που δίνει ότι η συχνότητα παλμού είναι:

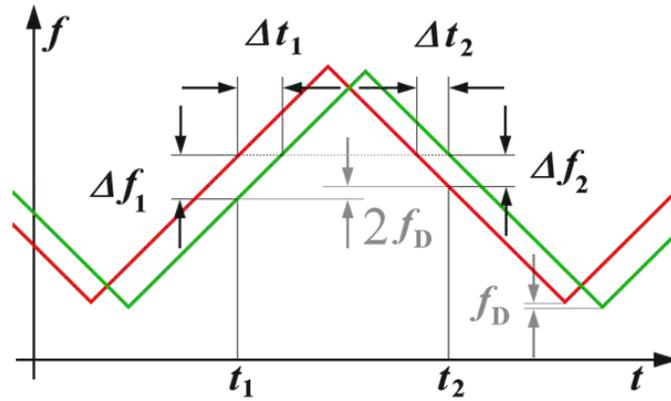
$$\Delta f = \frac{B_{sweep}}{T_{sweep}} \cdot \Delta t = \frac{B_{sweep}}{T_{sweep}} \cdot \frac{2R}{c}$$

και το εύρος προς στόχο λαμβάνεται ως:

$$R = \frac{cT_{sweep}}{2B_{sweep}} \cdot \Delta f$$

Η χρήση μιας διαμόρφωσης πριονιού δεν δίνει στον δέκτη τρόπο διαχωρισμού μεταξύ της διαφοράς συχνότητας και της συχνότητας Doppler. Επομένως, η συχνότητα Doppler θα εμφανιστεί ως σφάλμα μέτρησης στον υπολογισμό της απόστασης. Σε πολλές εφαρμογές αυτό το σφάλμα είναι αμελητέο. Για την επίλυση της συχνότητας Doppler, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοτίβο διαμόρφωσης με δύο κλίσεις συχνότητας. Η διαμόρφωση τριγωνικού κύματος είναι συνήθως μια δημοφιλής επιλογή. Η λειτουργία αυτής της διαμόρφωσης φαίνεται στην Εικόνα 6. Αυτό το μοτίβο διαμόρφωσης δίνει τη δυνατότητα μέτρησης της απόστασης τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην καθοδική άκρη της κλίσης.

Το ραντάρ θα μετρήσει τη συχνότητα Doppler f_D επιπλέον της διαφοράς συχνότητας. Η διαφορά συχνότητας θα παρέχει τις πληροφορίες απόστασης, ενώ η συχνότητα Doppler θα παρέχει τις πληροφορίες ταχύτητας. Εάν δεν υπήρχε συχνότητα Doppler, η διαφορά συχνότητας κατά την ανερχόμενη ακμή Δf_1 θα ήταν ίση με τη διαφορά συχνότητας κατά τη διάρκεια της φθίνουσας ακμής Δf_2 . Το ραντάρ θα μετρήσει είτε το άθροισμα είτε τη διαφορά αυτών των δύο συχνοτήτων. ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης και την κατεύθυνση της γραμμικής διαμόρφωσης. Στις Εικόνα 5 και Εικόνα 6, το λαμβανόμενο σήμα ηχούς μετατοπίζεται προς τα κάτω σε συχνότητα λόγω μετατόπισης Doppler.



Εικόνα 6: Εμβέλεια ραντάρ FMCW με τριγωνική διαμόρφωση.

Το σχέδιο τριγωνικής διαμόρφωσης καθιστά δυνατό τον ακριβέστερο προσδιορισμό της απόστασης, παρά τη μετατόπιση που προκαλείται από τη συχνότητα Doppler. Η συχνότητα παλμού δίνεται από τον αριθμητικό μέσο όρο των δύο διαφορών συχνότητας στα άκρα του τριγωνικού σχεδίου (Scheer&Holm, 2010).

$$\Delta f = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2}$$

και από την εικόνα 5 είναι εύκολο να δούμε ότι η συχνότητα Doppler είναι:

$$f_D = \frac{|\Delta f_1 - \Delta f_2|}{2}$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, το εύρος προκύπτει ως:

$$R = \frac{c T_{sweep}}{4 B_{sweep}} \cdot (\Delta f_1 + \Delta f_2)$$

και η ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$u = \frac{c}{2f_0} f_D = \frac{c}{4f_0} |\Delta f_1 - \Delta f_2| \quad (2)$$

όπου f_0 είναι η κεντρική συχνότητα, δηλ. η συχνότητα που βρίσκεται στο κέντρο του σαρωμένου εύρους ζώνης B_{sweep} .

Μια άλλη προσέγγιση χρησιμοποιώντας μόνο το πριονωτό σήμα είναι η μέθοδος των ταχέων «chirps». Αν οι «chirps» εκπέμπονται αρκετά γρήγορα, η συχνότητα Doppler θα εμφανίζεται ως μία χαμηλή συχνότητα επάνω σε κάθε συχνότητα απόστασης, όπως περιγράφεται. Επειδή η συχνότητα Doppler είναι συνήθως πολύ μικρότερη από τη συχνότητα

της ανακλώμενης ακτινοβολίας, κατά την εκτέλεση του μετασχηματισμού Fourier, παραμένει στο ίδιο διαμέρισμα συχνότητας (frequencybin). Αυτό μπορεί να μεταφραστεί άμεσα σε ταχύτητα με βάση την Εξίσωση (2) (Nordinetal., 2016).

2.4 Ανίχνευση στόχων με ραντάρ

Η ταχεία διάδοση της τεχνολογίας μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAS) έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της παρουσίας τους σε πληθώρα εφαρμογών. Τα σύγχρονα UAS είναι πλέον μικρότερα, οικονομικότερα και τεχνολογικά πιο προηγμένα, με δυνατότητες που περιλαμβάνουν οπτικά και υπέρυθρα συστήματα, ασύρματες επικοινωνίες, πλοήγηση ακριβείας και βελτιστοποιημένη ενεργειακή απόδοση. Η αξιοποίησή τους εκτείνεται από εμπορικές και γεωργικές χρήσεις έως επιχειρήσεις πρώτης ανάγκης και μεταφορές.

Με την ευρεία διαθεσιμότητα των UAS και τη μείωση του κόστους, αυξάνονται και οι χρήσεις από ερασιτέχνες και ημι-επαγγελματίες. Παρά τις θετικές εφαρμογές, υπάρχει αυξανόμενη ανησυχία για τη χρήση τους σε παράνομες ή επιβλαβείς δραστηριότητες, όπως λαθρεμπόριο, επιτήρηση, τρομοκρατικές επιθέσεις ή μεταφορά επικίνδυνων υλικών. Η σύγκρουση των UAS με τον εναέριο χώρο πολιτικής αεροπορίας ενέχει επιπρόσθετους κινδύνους για τη δημόσια ασφάλεια, ενώ προβλήματα όπως η παραβίαση της ιδιωτικότητας, η πνευματική ιδιοκτησία και η σκόπιμη παρεμβολή σε κρίσιμες υποδομές επιτείνουν την ανησυχία. Το 2016, αναφέρθηκαν πάνω από 1.500 περιστατικά θεάσεων UAS στις ΗΠΑ, σύμφωνα με αναφορές της FAA.

Τα UAS ταξινομούνται ανάλογα με το βάρος, την επιχειρησιακή εμβέλεια και το υψόμετρο. Ο στρατός των ΗΠΑ τα κατηγοριοποιεί σε πέντε ομάδες: οι Ομάδες 1–3 περιλαμβάνουν τα μικρότερα, χαμηλής ταχύτητας drones, ενώ οι Ομάδες 4 και 5 έχουν χαρακτηριστικά συγκρίσιμα με επανδρωμένα αεροσκάφη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι Ομάδες 1 και 2, λόγω της χαμηλής τους ανιχνευσιμότητας. Τα drones της Ομάδας 1 ζυγίζουν κάτω από 9 κιλά και είναι φορητά, ενώ της Ομάδας 2 κυμαίνονται μεταξύ 9–25 κιλών και απαιτούν πιο σύνθετα μέσα εκτόξευσης. Η Βιομηχανική Συμβουλευτική Ομάδα του NATO (NIAG) προτείνει επιπλέον υποκατηγοριοποίηση της Κλάσης I σε: Μικρά (<2 κιλά), Μίνι (2–20 κιλά) και Μικρά (<150 κιλά)(Poitevin, Pelletier&Lamontagne, 2017).

Η ανίχνευση UAS με χρήση ραντάρ βασίζεται στην ικανότητά τους να ανακλούν το εκπεμπόμενο σήμα αρκετά ώστε να υπερβαίνει το επίπεδο θορύβου του συστήματος. Ο βασικός παράγοντας που καθορίζει την ανιχνευσιμότητα είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), ο οποίος πρέπει να είναι επαρκής ώστε να διακρίνεται ο στόχος από τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Για στόχους τύπου Swerling 1, όπως τα UAS, απαιτείται SNR άνω των 15 dB ώστε να εξασφαλιστεί αξιόπιστη ανίχνευση με χαμηλό ποσοστό ψευδών συναγεργμών. Ο λόγος SNR για ένα λαμβανόμενο σήμα δίνεται από την κλασική εξίσωση ραντάρ (Barton, 1988):

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi^3) r^4 k T B_n}, \text{ όπου:}$$

- SNR ο λόγος σήματος προς θόρυβο,
- P_t , η ισχύς πομπού,
- G_t το κέρδος της κεραίας εκπομπής,
- G_r το κέρδος της κεραίας λήψης,
- λ το μήκος κύματος ραδιοκύματος,
- σ η διατομή ραντάρ ενός αντικειμένου,
- k η σταθερά Boltzmann,
- T η θερμοκρασία ισοδύναμου θορύβου δέκτη,
- B_n το εύρος ζώνης θορύβου επεξεργασίας και
- r η απόσταση από τον πομπό μέχρι τον στόχο.

Η εξίσωση δείχνει ότι το SNR μειώνεται με την τέταρτη δύναμη της απόστασης, οδηγώντας σε μείωση κατά περίπου 12 dB κάθε φορά που διπλασιάζεται η εμβέλεια. Η αύξηση της ισχύος εκπομπής μπορεί να βελτιώσει το SNR, ωστόσο πρακτικά περιορίζεται λόγω των απαιτήσεων σάρωσης ευρείας περιοχής και της ανάγκης ταχείας επανάληψης μέτρησης. Επιπλέον, η ανακλαστικότητα του στόχου εξαρτάται από το μέγεθος, το υλικό κατασκευής, τη γεωμετρία και τη γωνία πρόσπτωσης του σήματος.

Η διατομή ραντάρ (Radar Cross Section – RCS) αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός αντικειμένου να αντανακλά ενέργεια ραντάρ προς τον δέκτη. Τα μικρά UAS συχνά έχουν εξαιρετικά χαμηλό RCS, έως και -20 dBm², γεγονός που δυσχεραίνει σημαντικά την ανίχνευσή τους και αυξάνει την πιθανότητα να χαθούν μέσα στον θόρυβο ή την "ακαταστασία" του περιβάλλοντος.

2.4.1 Προκλήσεις στην ανίχνευση μικρών UAV

Ένα από τα πιο διαδεδομένα μικρά UAV Κλάσης I είναι το DJI Phantom, το οποίο διαθέτει βάρος μόλις 1280 g, διαστάσεις μικρότερες από 350 mm και δυνατότητα πτήσης με ταχύτητα έως και 16 m/s. Το περιορισμένο αποτύπωμά του σε οπτικό, θερμικό, ραντάρ και ακουστικό επίπεδο δημιουργεί σημαντικές δυσκολίες στους αισθητήρες για ανίχνευση σε μεγάλες αποστάσεις. Πέραν του μικρού μεγέθους, μια ακόμη πρόκληση είναι η εγγύτητα με την οποία μπορούν να εμφανιστούν τέτοιες απειλές, μειώνοντας τον διαθέσιμο χρόνο απόκρισης.

Η ικανότητα των UAV να επιχειρούν σε ευρύ φάσμα υψομέτρων, σε συνδυασμό με τις γρήγορες μεταβολές καθ' ύψος (άνοδος/κάθοδος), επιβάλλει στους αισθητήρες να διαθέτουν εκτεταμένη κάλυψη καθ' ύψος. Εάν συνυπολογιστεί και η απαίτηση για μικρό χρόνο αντίδρασης, καθίσταται αναγκαίος ο ταχύς επανέλεγχος μιας μεγάλης στερεογωνιακής περιοχής ώστε να διασφαλίζεται η προστασία κρίσιμων υποδομών. Η αυξημένη απαίτηση γωνίας ανύψωσης συνεπάγεται ότι απαιτούνται αισθητήρες με δυνατότητα προσδιορισμού του υψομέτρου για τον αποτελεσματικό εγκλωβισμό της απειλής μέσω οπτικών μέσων ή άλλων ενεργητικών μηχανισμών.

Τα UAV μπορούν να επιχειρούν σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ή ακόμη και να αιωρούνται, κάτι που περιορίζει την αποτελεσματικότητα των ραντάρ, καθώς δυσκολεύει την ανίχνευση κάτω από την ελάχιστη ταχύτητα ανίχνευσης (MinimumDetectableVelocity - MDV). Παράλληλα, η υψηλή ικανότητα επιτάχυνσης απαιτεί trackers με ευρύτερο εύρος ζώνης, γεγονός που μειώνει την ευαισθησία τους. Ακόμη και όταν εντοπιστούν, τα UAV συχνά συγχέονται με πτηνά, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διακριτική ταυτοποίησή τους — ιδίως όταν έχουν σχεδιαστεί για να μιμούνται πτηνά χαρακτηριστικά.

Όλες αυτές οι τεχνικές προκλήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν χωρίς να εκτοξευθεί το κόστος του συστήματος, κάτι που είναι κρίσιμο για την ευρεία εφαρμογή τέτοιων λύσεων. Οι βασικές απαιτήσεις από τους αισθητήρες ενός αποτελεσματικού συστήματος κατά UAV συνοψίζονται στα εξής:

1. Ικανότητα ανίχνευσης εξαιρετικά μικρών υπογραφών
2. Δυνατότητα εκτίμησης υψομέτρου στόχου
3. Κάλυψη μεγάλου όγκου εναέριου χώρου
4. Υψηλός ρυθμός ανανέωσης

5. Ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και ψευδείς ανιχνεύσεις
6. Βιωτό κόστος συστήματος

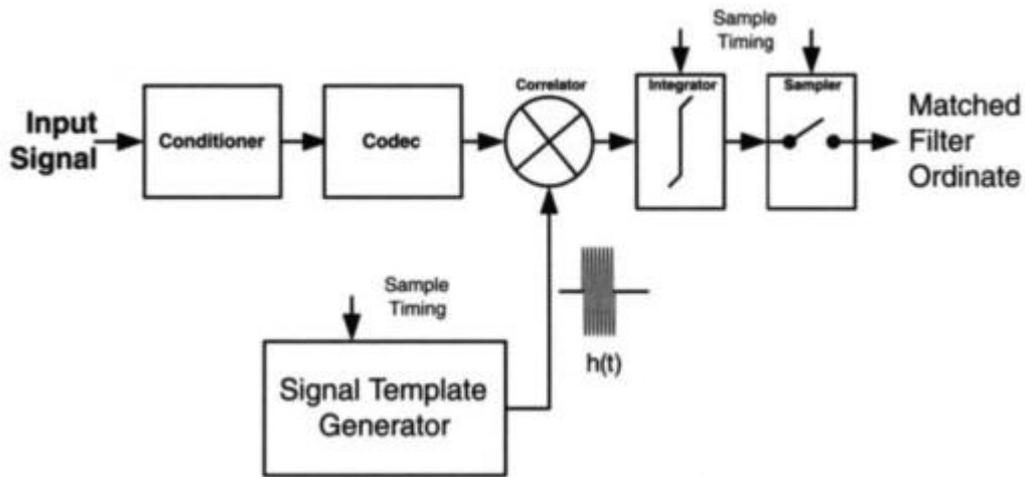
Η μικρή διατομή ραντάρ και η υψηλή ευελιξία ορισμένων UAV συνιστούν σημαντικές προκλήσεις για τους σχεδιαστές λύσεων ασφαλείας. Πλέον υπάρχει ευρεία συναίνεση ότι η αποτελεσματική αντιμετώπιση τέτοιων απειλών απαιτεί πολυαισθητηριακές προσεγγίσεις, στις οποίες το ραντάρ αποτελεί βασικό και αναντικατάστατο στοιχείο (Poitevin, Pelletier&Lamontagne, 2017).

2.4.2 Ρόλος του SNR και του φίλτρου matched

Το αντιστοιχισμένο φίλτρο είναι ένα βέλτιστο φίλτρο που μεγιστοποιεί τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) για να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα σφάλματος σε ένα λαμβανόμενο σήμα. Βασίζεται στη συνέλιξη του λαμβανόμενου σήματος με ένα ανεστραμμένο και μετατοπισμένο αντίγραφο. Πιο ειδικά το matched filter είναι ένα ειδικό φίλτρο που σχεδιάζεται για να αυξάνει όσο το δυνατόν περισσότερο τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) στην έξοδό του, όταν απαιτείται ανίχνευση ενός συγκεκριμένου σήματος. Ο σχεδιαστής εξετάζει το σήμα εισόδου $s(t)$ και την μεταφορική συνάρτηση του φίλτρου $H(f)$ στο πεδίο των συχνοτήτων. Στόχος του είναι να βρει το φίλτρο $H_o(f)$ που μεγιστοποιεί την αναλογία της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου στην έξοδο.

Ο θόρυβος θεωρείται λευκός με γνωστή πυκνότητα ισχύος $N_0/2$. Ο λόγος SNR στην έξοδο εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στο φίλτρο και το σήμα εισόδου. Με τη χρήση της ανισότητας του Schwarz αποδεικνύεται ότι το βέλτιστο φίλτρο είναι το φίλτρο που έχει μεταφορική συνάρτηση ίση με το σύμπλεγμα συζυγές του σήματος εισόδου, χρονικά αναστραμμένο και μετατοπισμένο. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι η απόκριση του matched filter στο χρόνο είναι μια «αντανάκλαση» του σήματος που θέλει να ανιχνεύσει, μετατοπισμένη κατά τη διάρκεια του συμβόλου. Έτσι, το matched filter βοηθά στη βελτίωση της ανίχνευσης του σήματος μέσα στον θόρυβο, χωρίς να απαιτείται αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος (Garg&Wang, 2005).

Το απλό διάγραμμα μπλοκ ενός αντιστοιχισμένου φίλτρου φαίνεται στην Εικόνα 7. Ένα πρότυπο της αναμενόμενης κυματομορφής σήματος συσχετίζεται με το σήμα εισόδου. Η συσχέτιση ενσωματώνεται κατά τη διάρκεια του σήματος, με αποτέλεσμα μια μετρική που υποδεικνύει πόσο κοντά βρίσκεται το σήμα εισόδου στο πρότυπο.



Εικόνα 7: Φίλτρο matched.

Το πρότυπο σήματος $h(t)$ στο αντιστοιχισμένο φίλτρο αποτελεί ένα ιδανικό και μη παραμορφωμένο αντίγραφο του σήματος που το σύστημα επιδιώκει να ανιχνεύσει και να μετρήσει. Αυτό σημαίνει ότι το φίλτρο μπορεί να αποθηκεύει και να αναπαράγει την κυματομορφή για εσωτερική χρήση, μια λειτουργία που συνδέεται με τον έλεγχο διέγερσης και απόκρισης, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα.

Το αντιστοιχισμένο φίλτρο ξεχωρίζει για την ικανότητά του να πραγματοποιεί γραμμική ανίχνευση σήματος με το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα, καθιστώντας το τον βέλτιστο ανιχνευτή σε αυτό το πλαίσιο. Γι' αυτό, σε πρακτικά συστήματα είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται ένα ή περισσότερα τέτοια φίλτρα, ειδικά όταν ανιχνεύονται πολλαπλά πρότυπα σήματος.

Παρόλο που το αντιστοιχισμένο φίλτρο μπορεί να υλοποιηθεί και σε λογισμικό DSP, η ειδική υλοποίηση σε υλικό παραμένει αναγκαία σε πολλές περιπτώσεις πραγματικού χρόνου. Ο λόγος είναι η υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα που απαιτείται για την πραγματοποίηση συνελίξεων μεταξύ της κρουστικής απόκρισης και του σήματος εισόδου, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό προτύπων σήματος.

Επιπλέον, το αντιστοιχισμένο φίλτρο δεν είναι περιορισμένο σε συγκεκριμένα σήματα ή εφαρμογές. Αντίθετα, αποτελεί μια γενική και ευέλικτη μέθοδο γραμμικής ανίχνευσης, όπου το πρότυπο σήματος λειτουργεί ως παράμετρος ή βάση για την ανάλυση. Μέσω της διαδικασίας του εσωτερικού γινομένου, το φίλτρο εκτιμά πόσο από το εισερχόμενο σήμα προβάλλεται στο πρότυπο, επιτυγχάνοντας έτσι ακριβείς μετρήσεις (Nadovich, 2004).

2.4.3 Ανάλυση της εξίσωσης ραντάρ

Ίσως η πιο χρήσιμη περιγραφή των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση ενός ραντάρ είναι η εξίσωση ραντάρ, η οποία εκφράζει την εμβέλεια λειτουργίας του με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Μία από τις μορφές της δίνει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος P_r ως εξής:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e \quad (3)$$

Η δεξιά πλευρά έχει γραφτεί ως το γινόμενο τριών παραγόντων για να αναπαραστήσει τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Ο πρώτος παράγοντας είναι η πυκνότητα ισχύος σε απόσταση R μέτρων από ένα ραντάρ που ακτινοβολεί ισχύ P_t watt από μια κεραία κέρδους G_t . Ο αριθμητής του δεύτερου παράγοντα είναι η διατομή στόχου σ σε τετραγωνικά μέτρα. Ο παρονομαστής αντιπροσωπεύει την απόκλιση στην διαδρομή επιστροφής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με εμβέλεια και είναι ο ίδιος με τον παρονομαστή του πρώτου παράγοντα, ο οποίος αντιπροσωπεύει την απόκλιση στην εξωτερική διαδρομή. Το γινόμενο των δύο πρώτων όρων αντιπροσωπεύει την ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο που επιστρέφεται στο ραντάρ. Η κεραία με ενεργό εμβαδόν ανοίγματος A_e αναχαιτίζει ένα μέρος αυτής της ισχύος σε ποσότητα που δίνεται από το γινόμενο των τριών παραγόντων. Εάν η μέγιστη εμβέλεια ραντάρ ορίζεται ως αυτή που έχει ως αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ισχύς P_r να είναι ίση με το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα δέκτη S_{min} , η εξίσωση ραντάρ μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t A_e}{(4\pi)^2 S_{min}} \quad (4)$$

Όταν η ίδια κεραία χρησιμοποιείται τόσο για μετάδοση όσο και για λήψη, το κέρδος μετάδοσης G_t και το ενεργό άνοιγμα λήψης A_e σχετίζονται με τη σχέση $G_t = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$, όπου λ είναι το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας του ραντάρ. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1.2) προκύπτουν δύο άλλες μορφές της εξίσωσης ραντάρ:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \quad (5\alpha)$$

$$R_{max}^4 = \frac{P_t A_e^2 \sigma}{(4\pi\lambda)^2 S_{min}} \quad (5\beta)$$

Τα παραδείγματα της εξίσωσης ραντάρ που δίνονται παραπάνω είναι χρήσιμα για πρόχειρους υπολογισμούς της απόδοσης της εμβέλειας, αλλά είναι υπερβολικά απλοποιημένα και δεν δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Οι προβλεπόμενες εμβέλειες είναι γενικά υπερβολικά αισιόδοξες. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο βασικοί λόγοι για τους οποίους η απλή μορφή της εξίσωσης ραντάρ δεν προβλέπει με ακρίβεια την εμβέλεια των πραγματικών ραντάρ. Πρώτον, δεν περιλαμβάνει τις διάφορες απώλειες που μπορούν να συμβούν σε ένα ραντάρ. Δεύτερον, η διατομή του στόχου και το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα είναι στατιστικής φύσης. Επομένως, ο προσδιορισμός της εμβέλειας πρέπει να γίνεται με στατιστικούς όρους.

Αν και η εμβέλεια εισάγεται ως τέταρτη δύναμη στην Εξίσωση (5), μπορεί να εμφανιστεί ως κύβος, ως τετράγωνο ή ως πρώτη δύναμη σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, μερικές από τις οποίες περιγράφονται αργότερα σε αυτήν την ενότητα και σε άλλα κεφάλαια. Εκτός από τη χρήση της για την πρόβλεψη εμβέλειας, η εξίσωση ραντάρ αποτελεί μια καλή βάση για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του συστήματος, παρέχοντας έναν οδηγό για τις πιθανές αντισταθμίσεις μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων που εισέρχονται στην απόδοση του ραντάρ. Το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα S_{min} , το οποίο εμφανίζεται στην εξίσωση ραντάρ, είναι μια στατιστική ποσότητα και πρέπει να περιγραφεί με βάση την πιθανότητα ανίχνευσης και την πιθανότητα ψευδούς συναγερμού.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, αρκεί να αναφερθεί ότι για να ανιχνευθεί αξιόπιστα ένα σήμα, πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τον θόρυβο (γενικά κατά 10 έως 20 dB) στο σημείο του δέκτη όπου λαμβάνεται η απόφαση ανίχνευσης. Το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N) που απαιτείται για αξιόπιστη ανίχνευση επί τον θόρυβο του δέκτη. Ο θόρυβος του δέκτη εκφράζεται σε σχέση με τον θερμικό θόρυβο που θα παράγεται από έναν ιδανικό δέκτη. Ο θερμικός θόρυβος ισούται με kTB , όπου k είναι η σταθερά Boltzmann, T είναι η θερμοκρασία και B είναι το εύρος ζώνης του δέκτη. Ο θόρυβος του δέκτη είναι ο θερμικός θόρυβος πολλαπλασιασμένος με τον παράγοντα F_n , την τιμή του θορύβου του δέκτη. Η τιμή του θορύβου του δέκτη μετριέται σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς $T_Q = 290$ K (περίπου σε θερμοκρασία δωματίου) και ο παράγοντας kT_Q γίνεται 4×10^{-21} W/Hz. Το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα στην εξίσωση ραντάρ μπορεί να γραφτεί:

$$S_{min} = kT_Q B F_n \frac{S}{N} \quad (6)$$

Μερικές φορές ο παράγοντας $T_0 F_n$ αντικαθίσταται με TS , τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος. Η παραπάνω εξήγηση για την εξίσωση ραντάρ έγινε με βάση την ισχύ του σήματος. Αν και η ισχύς είναι ένα καλά κατανοητό χαρακτηριστικό της συνήθους κυματομορφής ραντάρ που αποτελείται από έναν ορθογώνιο παλμό, με πιο περίπλοκες κυματομορφές η συνολική ενέργεια σήματος είναι συχνά ένα πιο βολικό μέτρο της ανίχνευσιμότητας της κυματομορφής. Είναι επίσης πιο κατάλληλη για θεωρητικούς λόγους. Ο λόγος της ενέργειας σήματος προς την ενέργεια θορύβου, που συμβολίζεται με E/N_0 , είναι μια πιο θεμελιώδης παράμετρος από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (ισχύ) σε θεωρητικές αναλύσεις που βασίζονται στη στατιστική θεωρία ανίχνευσης. Ανεξάρτητα από το σχήμα της λαμβανόμενης κυματομορφής, εάν ο δέκτης έχει σχεδιαστεί ως προσαρμοσμένο φίλτρο, ο λόγος κορυφής σήματος προς θόρυβο (ισχύ) στην έξοδο του προσαρμοσμένου φίλτρου είναι $2E/N_0$. Για έναν ορθογώνιο παλμό πλάτους τ , η ισχύς του σήματος είναι E/τ και η ισχύς θορύβου είναι $N_0 B$ όπου E = ενέργεια σήματος, N_0 = ενέργεια θορύβου ή ισχύς θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης (υπό την προϋπόθεση ότι ο θόρυβος είναι ομοιόμορφος με τη συχνότητα) και B - εύρος ζώνης δέκτη. Με αυτές τις αντικαταστάσεις, το S_{min} γίνεται:

$$kT_0 F_n \cdot \frac{\left(\frac{E}{N_0}\right)}{\tau}$$

Η αντικατάσταση στην Εξίσωση (4) δίνει:

$$R_{max}^4 = \frac{E_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 k T_0 F_n \left(\frac{E}{N_0}\right)}$$

όπου $E_t = P_t \tau$ είναι η ενέργεια που περιέχεται στη μεταδιδόμενη κυματομορφή. Αν και η Εξίσωση (6) υποθέτει έναν ορθογώνιο παλμό, μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κυματομορφή, υπό την προϋπόθεση ότι το E_t ερμηνεύεται ως η ενέργεια που περιέχεται στη μεταδιδόμενη κυματομορφή και ότι ο δέκτης του σήματος θορύβου F_n έχει σχεδιαστεί ως προσαρμοσμένο φίλτρο. Μερικά από τα δημοσιευμένα αποτελέσματα της θεωρίας ανίχνευσης ραντάρ δίνουν την πιθανότητα ανίχνευσης και την πιθανότητα ψευδούς συναγερμού σε όρους S/N αντί για E/N_0 . Όταν αυτά τα αποτελέσματα υποθέτουν βέλτιστη επεξεργασία (με προσαρμοσμένο φίλτρο), οι απαιτούμενες τιμές του E/N_0 για χρήση στην εξίσωση ραντάρ μπορούν να ληφθούν από τα δημοσιευμένα αποτελέσματα για το S/N ή τον συντελεστή ορατότητας. Η εξίσωση ραντάρ μπορεί να τροποποιηθεί σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή (Skolnik, 1962).

2.4.4 Διατομή ραντάρ (RCS), συχνότητα και χαρακτηριστικά UAV

Η ικανότητα ενός στόχου να αντανακλά ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξαρτάται από παράγοντες όπως το υλικό κατασκευής, οι διαστάσεις, το σχήμα του και η γωνία πρόσπτωσης του κύματος. Η παράμετρος που αποτυπώνει αυτό το χαρακτηριστικό είναι η διατομή ραντάρ (Radar Cross Section – RCS) (Bouzayene et al., 2019).

A. Μέτρηση RCS

Η RCS εκφράζει το πόσο "ορατό" είναι ένα αντικείμενο στο ραντάρ. Η ακριβής εκτίμηση της RCS ενός στόχου είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ραντάρ. Τα drones, λόγω του μικρού μεγέθους και της κυρίως πλαστικής κατασκευής τους, εμφανίζουν εξαιρετικά χαμηλό RCS, γεγονός που δυσχεραίνει την ανίχνευση. Για παράδειγμα, το DJI Phantom 2 παρουσιάζει RCS της τάξης των $0,01 \text{ m}^2$ (-20 dBsm). Η αριθμητική και πειραματική ανάλυση του RCS για UAV στην περιοχή των 10 GHz παρουσιάζεται σε μελέτες και παρέχει πολύτιμα δεδομένα για την ανάπτυξη κατάλληλων ανιχνευτών.

B. Συχνότητα λειτουργίας ραντάρ

Το RCS ενός στόχου τείνει να αυξάνεται με τη συχνότητα, γεγονός που καθιστά τις υψηλές συχνότητες (π.χ. ζώνη X) κατάλληλες για την ανίχνευση μικρών στόχων. Για αξιόπιστη εκτίμηση του RCS, το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος θα πρέπει να είναι μικρότερο από το ήμισυ της χαρακτηριστικής διάστασης του αντικειμένου. Ειδικά όταν εφαρμόζεται ανίχνευση Doppler, η υψηλή συχνότητα ενισχύει και την εκτίμηση ταχύτητας.

Γ. Χαρακτηριστικά UAV (DJI Phantom 2)

Το DJI Phantom 2 αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εμπορικού UAV. Το κύριο σώμα του είναι κατασκευασμένο από πλαστικό, με έλικες από σύνθετα υλικά και ρότορες από ανθρακονήματα και πλαστικό. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιορίζουν σημαντικά την αντανακλάση σήματος ραντάρ. Επιπλέον, το drone αυτό καταγράφει δεδομένα τηλεμετρίας (π.χ. GPS, ταχύτητα, εμβέλεια) σε συχνότητα 10 Hz, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την περαιτέρω επεξεργασία και παρακολούθηση.

Πίνακας1: DJI PHANTOM 2 χαρακτηριστικά

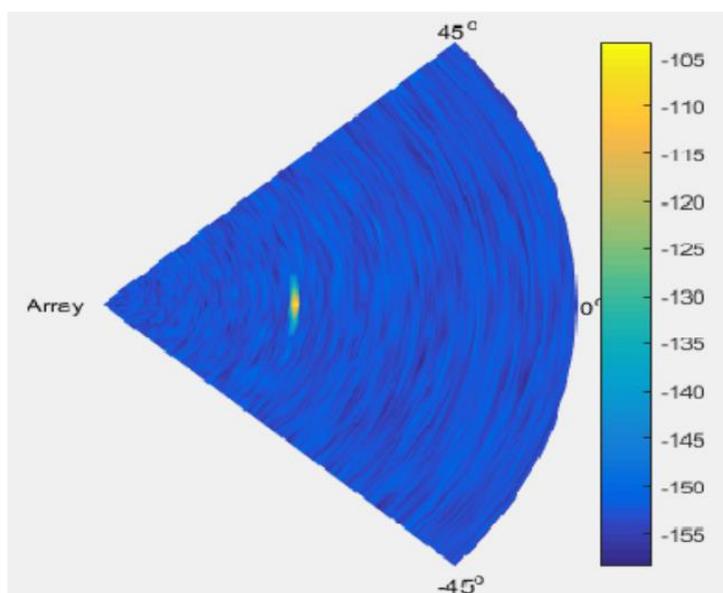
| Χαρακτηριστικά | Τιμή |
|----------------------------------|------------------|
| Βάρος (με προπέλες και μπαταρία) | 1000g |
| Διαγώνιο μήκος | 350 mm |
| Μέγιστη ταχύτητα | 15 m/s (54 km/h) |
| Μέγιστούψος πτήσης | 3000 m |
| Σύστημα εντοπισμού θέσης | GPS |
| Μέγιστοςχρόνος πτήσης | 25 λεπτά |

2.5 Φαινόμενο Doppler και εκτίμηση ταχύτητας

2.5.1 Ανίχνευση και Εκτίμηση Εύρους

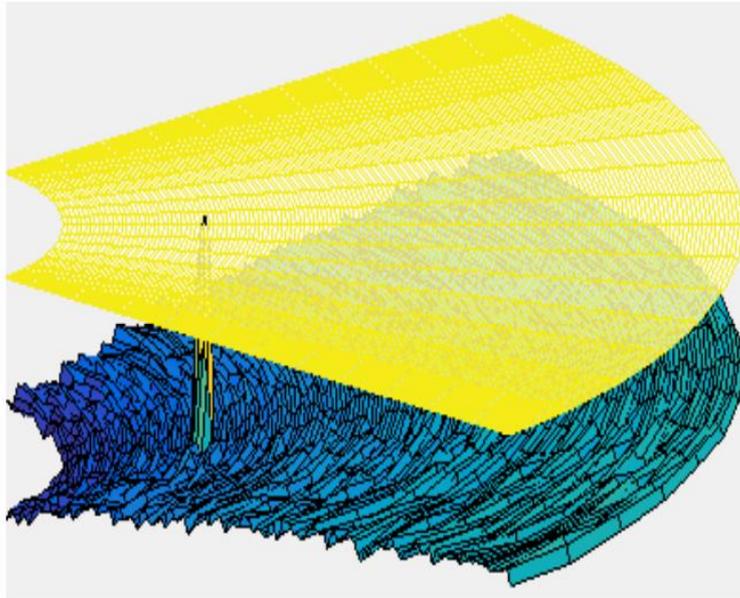
Η ανίχνευση μικρών UAV έχει επιτευχθεί σε αποστάσεις έως και 5 km. Η εικόνα 8, η οποία παρουσιάζει έναν "χάρτη σάρωσης" (scanmap), παρατηρείται σαφώς η παρουσία στόχου με κορυφή ενίσχυσης πάνω από το υπόβαθρο, που αντιστοιχεί σε αντικείμενο με διατομή ραντάρ (RCS) ίση με $0,01 \text{ m}^2$ σε απόσταση άνω των 2000 μέτρων και ακριβώς στις 0° αζιμούθιο, με αξιοσημείωτη ακρίβεια.

Για την κάλυψη του απαραίτητου τομέα παρατήρησης, απαιτείται το ραντάρ να σαρώνει από -45° έως $+45^\circ$ σε γωνία αζιμούθιο. Προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής χρονική ανάλυση και έγκαιρη ανίχνευση, ο χρόνος επανεπίσκεψης (revisit time) σε κάθε γωνιακή θέση πρέπει να είναι μικρότερος από 1 δευτερόλεπτο. Αυτό συνεπάγεται ότι το ραντάρ πρέπει να επανεξετάζει την ίδια κατεύθυνση εντός ενός δευτερολέπτου, διατηρώντας υψηλό ρυθμό σάρωσης.



Εικόνα 8: Χάρτης σάρωσης.

Για τον εντοπισμό των στόχων και την ακριβή εκτίμηση των παραμέτρων τους (όπως εύρος και γωνία), εφαρμόζεται κατωφλίωση (threshold detection) στον χάρτη σάρωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Ανίχνευση κατωφλίου στον χάρτη σάρωσης.

Οι κορυφές που εμφανίζονται πάνω από το όριο ανίχνευσης αντιστοιχούν σε υποψήφιους στόχους. Μέσω της εντοπισμένης θέσης αυτών των κορυφών στον χώρο συχνοτήτων ή χρόνου-καθυστερήσης, είναι δυνατόν να υπολογιστεί το εύρος (range) και η κατεύθυνση (αζιμούθιο) κάθε στόχου με ακρίβεια (Bouzayeneetal., 2019).

Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αξιόπιστη εκτίμηση στόχων ακόμη και με χαμηλό RCS, καθιστώντας την κρίσιμη για την παρακολούθηση μικρών UAV που επιχειρούν σε μεγάλες αποστάσεις και με δυσδιάκριτες υπογραφές (Bouzayeneetal., 2019).

2.5.2 Εκτίμηση Doppler

Για την εκτίμηση της μετατόπισης Doppler ενός στόχου, απαιτείται αρχικά η ανίχνευσή του μέσω της διαδικασίας εντοπισμού εύρους. Δεδομένου ότι η μετατόπιση Doppler κατανέμει την ισχύ του σήματος στα κανάλια I (εντός φάσης) και Q (τετραγωνικής φάσης), η ανίχνευση βασίζεται στην ολική ενέργεια του σήματος και όχι σε μεμονωμένα κανάλια. Μετά τον επιτυχή υπολογισμό του εύρους κάθε στόχου, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση των αντίστοιχων Doppler παραμέτρων.

Η εκτίμηση της Doppler μετατόπισης αποτελεί διαδικασία εκτίμησης φάσματος. Το πρώτο βήμα της επεξεργασίας συνίσταται στη δημιουργία του φάσματος Doppler από το λαμβανόμενο σήμα. Μετά την εφαρμογή του αντιστοιχισμένου φίλτρου (matched filter), το λαμβανόμενο σήμα αναπαρίσταται ως ένας πίνακας, όπου κάθε στήλη αντιστοιχεί σε έναν παλμό. Σε αντίθεση με την εκτίμηση εύρους, η οποία επεξεργάζεται τα δεδομένα κατά μήκος των στηλών, η επεξεργασία Doppler εκτελείται κατά μήκος των γραμμών του πίνακα, δηλαδή στον αργό χρόνο (slowtime).

Εφόσον χρησιμοποιούνται 10 παλμοί, διατίθενται 10 δείγματα για την εκτίμηση της Doppler συχνότητας. Η συχνότητα δειγματοληψίας αυτών των δειγμάτων είναι ίση με τη συχνότητα επανάληψης παλμού (Pulse Repetition Frequency, PRF). Σύμφωνα με τη θεωρία Fourier, η μέγιστη αδιαμφισβήτητη (μονοσήμαντη) μετατόπιση Doppler που μπορεί να ανιχνευθεί ισούται με το ήμισυ της PRF, γεγονός που προσδιορίζει και τη μέγιστη αδιαμφισβήτητη ταχύτητα στόχου την οποία δύναται να εντοπίσει το σύστημα.

Η ανάλυση Doppler, δηλαδή η ικανότητα διάκρισης μεταξύ διαφορετικών ταχυτήτων στόχων, εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των παλμών. Μεγαλύτερος αριθμός παλμών οδηγεί σε υψηλότερη ανάλυση στο φάσμα Doppler. Ωστόσο, ο αριθμός παλμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιορίζεται από την ακτινική ταχύτητα του στόχου, καθώς η επεξεργασία Doppler γίνεται εντός συγκεκριμένου δοχείου εύρους (range bin). Όλοι οι παλμοί πρέπει να συλλεχθούν προτού ο στόχος μετακινηθεί εκτός του συγκεκριμένου δοχείου.

Για την τελική εκτίμηση της Doppler μετατόπισης κάθε στόχου, εντοπίζονται οι κορυφές στο φάσμα Doppler του αντίστοιχου δοχείου εύρους. Η θέση κάθε κορυφής αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη συχνότητα Doppler και, συνεπώς, παρέχει πληροφορία για την ταχύτητα του στόχου (Bouzayene et al., 2019).

2.6 Συστήματα διαμόρφωσης δέσμης (Beamforming)

Μια ομοιόμορφη ορθογώνια διάταξη 900 στοιχείων (URA) με απόσταση (μήκος κύματος/2) χρησιμοποιείται στο ραντάρ μας. Επειδή τα ανακλώμενα σήματα λαμβάνονται από μια συστοιχία, χρησιμοποιούμε έναν διαμορφωτή δέσμης που δείχνει προς την κατεύθυνση του τιμονιού για να λάβουμε το συνδυασμένο σήμα. Στην πραγματικότητα, το Beamforming χρησιμοποιείται σε κεραιές με συστοιχία φάσης για να κατευθύνει μια δέσμη

προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Εάν το σήμα που λαμβάνεται από τα στοιχεία αισθητήρα αποτελείται από σήμα και παρεμβολές (θόρυβος, ακαταστασία, παρεμβολές), τότε το λαμβανόμενο σήμα δεν μπορεί να ερμηνευτεί καθώς δεν μπορεί να διακριθεί με το σήμα παρεμβολής. Ένας συμβατικός διαμορφωτής δέσμης χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος πολλαπλών καναλιών. Το εύρος, η γωνία και οι πληροφορίες Doppler κάθε στόχου εξάγονται από τους ανακλώμενους παλμούς. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω εργασίες, όπως εκτίμηση κατεύθυνσης άφιξης υψηλής ανάλυσης ή παρακολούθηση στόχου (Bouzayeneetal., 2019).

Η ηλεκτρονική σάρωση μέσω beamforming επιτρέπει την ταχεία και ευέλικτη κάλυψη του εναέριου χώρου, ενώ η χρήση περιστρεφόμενης κεραίας προτείνεται ως οικονομική λύση για πλήρη 360° επιτήρηση.

Επιπλέον, οι Hussain&Oh, (2024) αναδεικνύουν πως η διαμόρφωση δέσμης (beamforming) σε συστήματα επικοινωνιών χιλιοστομετρικών κυμάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε με αναλογικά είτε με ψηφιακά μέσα. Η αναλογική διαμόρφωση δέσμης βασίζεται στη χρήση εξοπλισμού όπως ενισχυτές, εξομαλυντές ισχύος (poweradders), προηγμένες κεραίες και μετατοπιστές φάσης (phaseshifters), προκειμένου να κατευθυνθούν οι δέσμες προς συγκεκριμένους στόχους. Η στοχευμένη εκπομπή ενισχύει σημαντικά την ασφάλεια, περιορίζοντας την πρόσβαση από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες και μειώνοντας τον κίνδυνο υποκλοπής. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί πολλαπλές κεραίες για την παραγωγή στενών δεσμών (pencilbeams), προσφέροντας υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας λόγω της μειωμένης πιθανότητας παρεμβολής ή υποκλοπής – όπως επιβεβαιώνεται σε διάφορες έρευνες. Η αξιοποίηση πολλαπλών κεραιών, ιδιαίτερα μέσω των συστημάτων MIMO (Multiple-InputMultiple-Output) — τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που βασίζεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για τη βελτίωση της απόδοσης μετάδοσης — αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο των σύγχρονων δικτύων, όπως το Wi-Fi, το 4G, το 5G και τα μελλοντικά δίκτυα 6G. Η τεχνολογία αυτή συμβάλλει καθοριστικά στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση των παρεμβολών, οδηγώντας σε σημαντική ενίσχυση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

Η τεχνολογία χιλιοστομετρικών κυμάτων διακρίνεται για την υψηλή απόδοση, τους ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και την ενισχυμένη ασφάλεια. Η συμβολή της στην ενεργειακή αποδοτικότητα θεωρείται κρίσιμη για την εξέλιξη των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Παρά τα πλεονεκτήματά της, η τεχνολογία αυτή αντιμετωπίζει

προκλήσεις διάδοσης, οι οποίες αντιμετωπίζονται μέσω της χρήσης μικρότερων κεραιών που εκμεταλλεύονται τις υψηλές φέρουσες συχνότητες, διασφαλίζοντας έτσι αποτελεσματική μετάδοση σήματος. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει τη χωρητικότητα των συστημάτων χιλιοστομετρικών κυμάτων και υποστηρίζει προηγμένες εφαρμογές, όπως τα δίκτυα 5G και 6G. Επιπλέον, τεχνολογίες διαμόρφωσης δέσμης όπως η γραμμική και μη γραμμική προκωδικοποίηση (precoding) προσαρμόζουν δυναμικά τη συνδεσιμότητα στα κινητά συστήματα (Albreem, et al., 2021).

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας πολλαπλών κεραιών βελτιώνει την ιδιωτικότητα, την αποδοτικότητα του φάσματος και την ισχύ του σήματος, όπως υπογραμμίζεται από αρκετούς ερευνητές (Liu et al., 2014). Τα πλεονεκτήματα των στενών δεσμών – όπως η στοχευμένη επικοινωνία και η μείωση παρεμβολών – αναδεικνύουν τη σημασία τους στη βελτίωση της απόδοσης των σύγχρονων ασύρματων δικτύων. Επιπλέον, οι Dahrouj et al. (2010) αναδεικνύουν περαιτέρω τα ενεργειακά οφέλη που προκύπτουν μέσω της συντονισμένης βελτιστοποίησης σταθμών βάσης σε περιβάλλοντα με πολλαπλές κεραιές.

3. Πειραματικό Μέρος

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση και η προσομοίωση του ραντάρ ηλεκτρονικής σάρωσης με χρήση συστοιχίας κεραιών. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με τη χρήση συγκεκριμένου κώδικα MATLAB, όπου τροποποιούνται παράμετροι της συστοιχίας για να εξεταστούν οι επιδράσεις στο αποτέλεσμα. Σκοπός είναι η ανάλυση των διαφορών που προκύπτουν στις γραφικές παραστάσεις των σημάτων ανίχνευσης και στην απόδοση του συστήματος.

3.2 Περιγραφή Αρχικού Κώδικα

Ακολουθεί ολόκληρος ο κώδικας του προβλήματος μας:

```
Electronic Scanning Using a Uniform Rectangular Array
This example simulates a phased array radar that periodically scans a predefined surveillance region. A 900-element rectangular array is used in this monostatic radar. Steps are introduced to derive the radar parameters according to specifications. After synthesizing the received pulses, detection and range estimation are performed. Finally, Doppler estimation is used to obtain the speed of each target.

Radar Definition
First we create a phased array radar. We reuse most of the subsystems built in the example Designing a Basic Monostatic Pulse Radar. Readers are encouraged to explore the details of radar system design through that example. A major difference is that we use a 30-by-30 uniform rectangular array (URA) in place of the original single antenna.

The existing radar design meets the following specifications.

1 pd = 0.9; % Probability of detection
2 pfa = 1e-6; % Probability of false alarm
3 max_range = 5000; % Maximum unambiguous range
4 tgt_rcs = 1; % Required target radar cross section
5 int_pulsenum = 10; % Number of pulses to integrate

Load the radar system and retrieve system parameters.

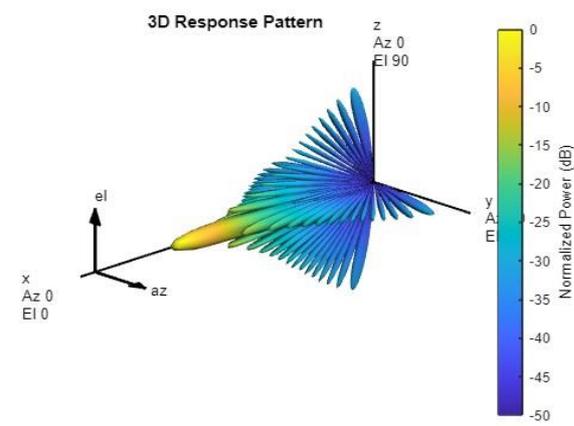
6 load BasicMonostaticRadarExampleData;
7
8 fc = radiator.OperatingFrequency; % Operating frequency (Hz)
9 v = radiator.PropagationSpeed; % Wave propagation speed (m/s)
10 lambda = v/fc; % Wavelength (m)
11 fs = waveform.SampleRate; % Sampling frequency (Hz)
12 prf = waveform.PRF; % Pulse repetition frequency (Hz)

Next, we define a 30-by-30 uniform rectangular array.

13 ura = phased.URA('Element',antenna,...
14 'Size',[30 30],'ElementSpacing',[lambda/2, lambda/2]);
15 % Configure the antenna elements such that they only transmit forward
16 ura.Element.BackBaffled = true;
17
18 % Visualize the response pattern.
19 pattern(ura,fc,'PropagationSpeed',physconst('LightSpeed'),...
```

Εικόνα 10: Περιγραφή κώδικα.

20 `'Type','powerdb');`



21 Associate the array with the radiator and collector.

```
21 radiator.Sensor = ura;
22 collector.Sensor = ura;
23
24 % We need to set the WeightsInputPort property to true to enable it to
25 % accept transmit beamforming weights
26 radiator.WeightsInputPort = true;
```

Now we need to recalculate the transmit power. The original transmit power was calculated based on a single antenna. For a 900-element array, the power required for each element is much less.

```
27 % Calculate the array gain
```

Εικόνα 11: Περιγραφή κώδικα.

```
28 arraygain = phased.ArrayGain('SensorArray',ura,'PropagationSpeed',v);
29 ag = arraygain(fc,[0;0]);
30
31 % Calculate the peak power
32 snr_min = albersheim(pd, pfa, int_pulsenum);
33 peak_power = ((4*pi)^3*noisepow(1/waveform.PulseWidth)*max_range^4*...
34 db2pow(snr_min))/(db2pow(2*(transmitter.Gain+ag))*tgt_rcs*lambda^2)
35
36 peak_power = 0.0065
```

The new peak power is 0.0065 Watts.

```
35 % Set the peak power of the transmitter
36 transmitter.PeakPower = peak_power;
```

We also need to design the scanning schedule of the phased array. To simplify the example, we only search in the azimuth dimension. We require the radar to search from 45 degrees to -45 degrees in azimuth. The revisit time should be less than 1 second, meaning that the radar should revisit the same azimuth angle within 1 second.

```
37 initialAz = 45; endAz = -45;
38 volumnAz = initialAz - endAz;
```

To determine the required number of scans, we need to know the beamwidth of the array response. We use an empirical formula to estimate the 3-dB beamwidth.

$$G = \frac{4\pi}{\theta^2}$$

where G is the array gain and θ is the 3-dB beamwidth.

```
39 % Calculate 3-dB beamwidth
40 theta = radtodeg(sqrt(4*pi/db2pow(ag)))
41
42 theta = 6.7703
```

The 3-dB beamwidth is 6.77 degrees. To allow for some beam overlap in space, we choose the scan step to be 6 degrees.

```
41 scanstep = -6;
```

Εικόνα 12: Περιγραφή κώδικα.

```

42   scangrid = initialAz+scanstep/2:scanstep:endAz;
43   numscans = length(scangrid);
44   pulsenum = int_pulsenum*numscans;
45
46   % Calculate revisit time
47   revisitTime = pulsenum/prf

```

```
revisitTime = 0.0050
```

The resulting revisit time is 0.005 second, well below the prescribed upper limit of 1 second.

Target Definition

We want to simulate the pulse returns from two non-fluctuating targets, both at 0 degrees elevation. The first target is approaching to the radar, while the second target is moving away from the radar.

```

48   tgtpos = [[3532.63; 800; 0],[2020.66; 0; 0]];
49   tgtvel = [[-100; 50; 0],[60; 80; 0]];
50   tgtmotion = phased.Platform('InitialPosition',tgtpos,'Velocity',tgtvel);
51
52   tgtrcs = [1.6 2.2];
53   target = phased.RadarTarget('MeanRCS',tgtrcs,'OperatingFrequency',fc);
54
55   % Calculate the range, angle, and speed of the targets
56   [tgtrng,tgtang] = rangeangle(tgtmotion.InitialPosition,...
57   sensorposition.InitialPosition);
58
59   numtargets = length(target.MeanRCS);

```

Pulse Synthesis

Now that all subsystems are defined, we can proceed to simulate the received signals. The total simulation time corresponds to one pass through the surveillance region. Because the reflected signals are received by an array, we use a beamformer pointing to the steering direction to obtain the combined signal.

```

60   % Create the steering vector for transmit beamforming
61   steeringvec = phased.SteeringVector('SensorArray',ura,...
62   'PropagationSpeed',v);
63
64   % Create the receiving beamformer

```

Εικόνα 13: Περιγραφή κώδικα.

```

65   beamformer = phased.PhaseShiftBeamformer('SensorArray',ura,...
66   'OperatingFrequency',fc,'PropagationSpeed',v,...
67   'DirectionSource','Input port');
68
69   % Define propagation channel for each target
70   channel = phased.FreeSpace(...
71   'SampleRate',fs,...
72   'TwoWayPropagation',true,...
73   'OperatingFrequency',fc);
74
75   fast_time_grid = unigrid(0, 1/fs, 1/prf, '[]');
76
77   % Pre-allocate array for improved processing speed
78   rxpulses = zeros(numel(fast_time_grid),pulsenum);
79
80   for m = 1:pulsenum
81
82       % Update sensor and target positions
83       [sensorpos,sensorvel] = sensorposition(1/prf);
84       [tgtpos,tgtvel] = tgtmotion(1/prf);
85
86       % Calculate the target angles as seen by the sensor
87       [tgtrng,tgtang] = rangeangle(tgtpos,sensorpos);
88
89       % Calculate steering vector for current scan angle
90       scanid = floor((m-1)/int_pulsenum) + 1;
91       sv = steeringvec(fc,scangrid(scanid));
92       w = conj(sv);
93
94       % Form transmit beam for this scan angle and simulate propagation
95       pulse = waveform();
96       [txsig,txstatus] = transmitter(pulse);
97       txsig = radiator(txsig,tgtang,w);
98       txsig = channel(txsig,sensorpos,tgtpos,sensorvel,tgtvel);
99
100      % Reflect pulse off of targets
101      tgtsig = target(txsig);
102
103      % Beamform the target returns received at the sensor
104      rxsig = collector(tgtsig,tgtang);
105      rxsig = receiver(rxsig,~(txstatus>0));

```

Εικόνα 14: Περιγραφή κώδικα.

```

106 rxpulses(:,m) = beamformer(rxsig,[scangrid(scanid);0]);
107 end

```

Matched Filter

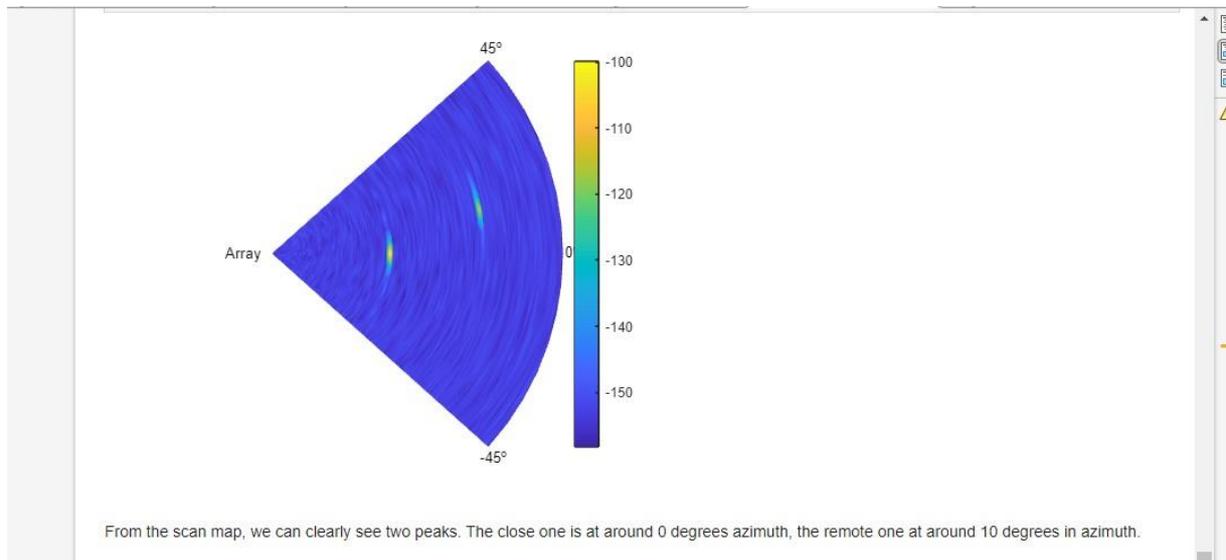
To process the received signal, we first pass it through a matched filter, then integrate all pulses for each scan angle.

```

108 % Matched filtering
109 matchingcoeff = getMatchedFilter(waveform);
110 matchedfilter = phased.MatchedFilter(...
111     'Coefficients',matchingcoeff,...
112     'GainOutputPort',true);
113 [mf_pulses, mfgain] = matchedfilter(rxpulses);
114 mf_pulses = reshape(mf_pulses,[],int_pulsenum,numscans);
115
116 matchingdelay = size(matchingcoeff,1)-1;
117 sz_mfpulses = size(mf_pulses);
118 mf_pulses = [mf_pulses(matchingdelay+1:end) zeros(1,matchingdelay)];
119 mf_pulses = reshape(mf_pulses,sz_mfpulses);
120
121 % Pulse integration
122 int_pulses = pulsint(mf_pulses,'noncoherent');
123 int_pulses = squeeze(int_pulses);
124
125 % Visualize
126 r = v*fast_time_grid/2;
127 X = r'*cosd(scangrid); Y = r'*sind(scangrid);
128 clf;
129 pcolor(X,Y,pow2db(abs(int_pulses).^2));
130 axis equal tight
131 shading interp
132 axis off
133 text(-800,0,'Array');
134 text((max(r)+10)*cosd(initialAz),(max(r)+10)*sind(initialAz),...
135     [num2str(initialAz) '^o']);
136 text((max(r)+10)*cosd(endAz),(max(r)+10)*sind(endAz),...
137     [num2str(endAz) '^o']);
138 text((max(r)+10)*cosd(0),(max(r)+10)*sind(0),[num2str(0) '^o']);
139 colorbar;

```

Εικόνα 15: Περιγραφή κώδικα.



Detection and Range Estimation

To obtain an accurate estimation of the target parameters, we apply threshold detection on the scan map. First we need to compensate for signal power loss due to range by applying time varying gains to the received signal.

```

140 range_gates = v*fast_time_grid/2;
141 tvg = phased.TimeVaryingGain(...
142     'RangeLoss',2*fspl(range_gates,lambda),...
143     'ReferenceLoss',2*fspl(max(range_gates),lambda));
144 tvg_pulses = tvg(mf_pulses);
145
146 % Pulse integration
147 int_pulses = pulsint(tvg_pulses,'noncoherent');
148 int_pulses = squeeze(int_pulses);

```

Εικόνα 16: Περιγραφή κώδικα.

```

149
150 % calculate the detection threshold
151
152 % sample rate is twice the noise bandwidth in the design system C
153 noise_bw = receiver.SampleRate/2;
154 npower = noisepow(noise_bw,...
155     receiver.NoiseFigure,receiver.ReferenceTemperature);
156 threshold = npower * db2pow(npwgnthresh(pfa,int_pulsenum,'noncoherent'));
157 % Increase the threshold by the matched filter processing gain
158 threshold = threshold * db2pow(mfgain);

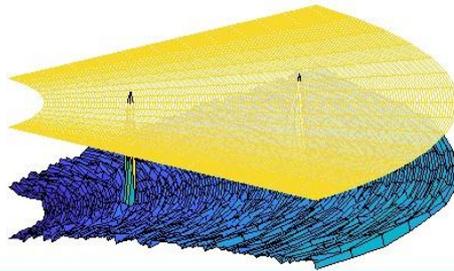
```

We now visualize the detection process. To better represent the data, we only plot range samples beyond 50.

```

159 N = 51;
160 clf;
161 surf(X(N:end,:),Y(N:end,:),...
162     pow2db(abs(int_pulses(N:end,:).^2));
163 hold on;
164 mesh(X(N:end,:),Y(N:end,:),...
165     pow2db(threshold*ones(size(X(N:end,:)))),'FaceAlpha',0.8);
166 view(0,56);
167 axis off

```



Εικόνα 17: Περιγραφή κώδικα.

There are two peaks visible above the detection threshold, corresponding to the two targets we defined earlier. We can find the locations of these peaks and estimate the range and angle of each target.

```

168 [~,peakInd] = findpeaks(int_pulses(:),'MinPeakHeight',sqrt(threshold));
169 [rngInd,angInd] = ind2sub(size(int_pulses),peakInd);
170 est_range = range_gates(rngInd); % Estimated range
171 est_angle = scangrid(angInd); % Estimated direction

```

Doppler Estimation

Next, we want to estimate the Doppler speed of each target. For details on Doppler estimation, refer to the example [Doppler Estimation](#).

```

172 for m = numtargets:-1:1
173     [p, f] = periodogram(mf_pulses(rngInd(m),:,angInd(m)),[],256,prf, ...
174         'power','centered');
175     speed_vec = dop2speed(f,lambda)/2;
176
177     spectrum_data = p/max(p);
178     [~,dop_detect1] = findpeaks(pow2db(spectrum_data),'MinPeakHeight',-5);
179     sp(m) = speed_vec(dop_detect1); % Estimated Doppler speed
180 end

```

Finally, we have estimated all the parameters of both detected targets. Below is a comparison of the estimated and true parameter values.

| ----- Estimated (true) target parameters ----- | | | |
|------------------------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------|
| | Range (m) | Azimuth (deg) | Speed (m/s) |
| Target 1: | 3625.00 (3622.00) | 12.00 (12.76) | 86.01 (86.49) |
| Target 2: | 2025.00 (2020.66) | 0.00 (0.00) | -59.68 (-60.00) |

Εικόνα 18: Περιγραφή κώδικα.

3.3 Τροποποιήσεις στον Κώδικα και Σκοπός

Ο αρχικός κώδικας περιέχει τον ορισμό της συστοιχίας κεραιών μέσω της γραμμής:

```
Size', [30 30], 'ElementSpacing', [lambda/2, lambda/2]
```

όπου το μέγεθος της συστοιχίας είναι 30 x 30 στοιχεία και η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι το μισό του μήκους κύματος ($\lambda/2$) και στις δύο διαστάσεις.

Για να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους της συστοιχίας κεραιών στην απόδοση του ραντάρ, η παράμετρος Size τροποποιήθηκε διαδοχικά στις ακόλουθες τιμές:

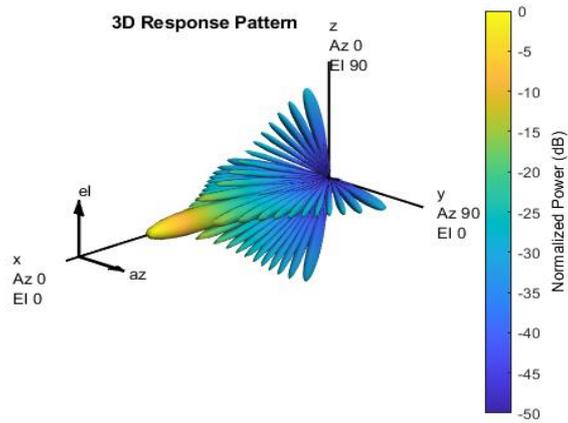
- [24 24]
- [32 32]
- [64 64]
- [128 128]
- [256 256]

Διατηρήθηκε η σταθερή απόσταση στοιχείων ElementSpacing στο [lambda/2, lambda/2].

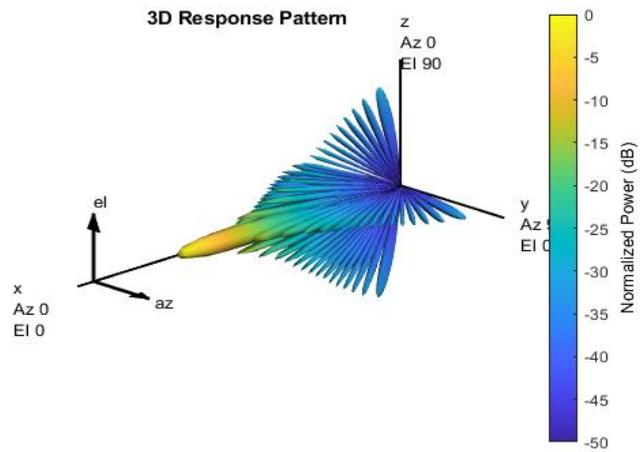
Αυτές οι αλλαγές επιτρέπουν την παρατήρηση των επιπτώσεων στον προσανατολισμό της δέσμης, στο κέρδος της κεραίας, στην ανάλυση και στην ακρίβεια ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων της συστοιχίας αναμένεται να βελτιώσει την κατευθυντικότητα (μικρότερο beamwidth) και το κέρδος, αυξάνοντας έτσι την ικανότητα ανίχνευσης απομακρυσμένων ή μικρών στόχων.

3.4 Παρατηρήσεις από τις Γραφικές Παραστάσεις

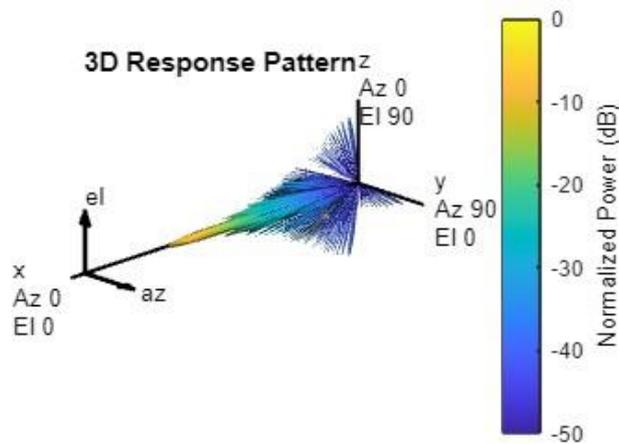
Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης για κάθε διαφορετικό μέγεθος συστοιχίας, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τα βασικά διαγράμματα απόδοσης του συστήματος. Εξετάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν το πρότυπο ακτινοβολίας της κεραίας, την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται από τους στόχους, καθώς και την εκτίμηση της απόστασης και της ταχύτητάς τους. Η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων επέτρεψε την αξιολόγηση της επίδρασης του μεγέθους της συστοιχίας στην κατευθυντικότητα, στην ευαισθησία και στη συνολική ακρίβεια του συστήματος ραντάρ. Παραθέτονται οι γραφικές παραστάσεις:



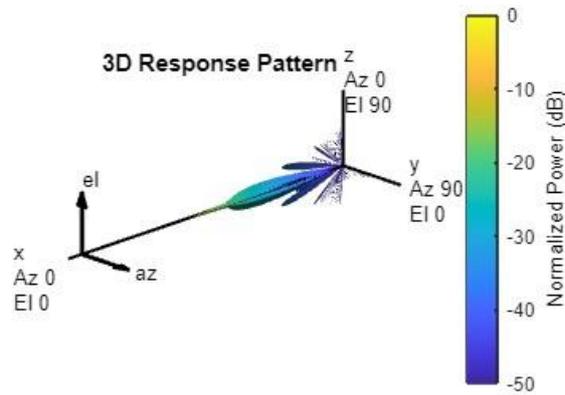
Εικόνα 19: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 24*24



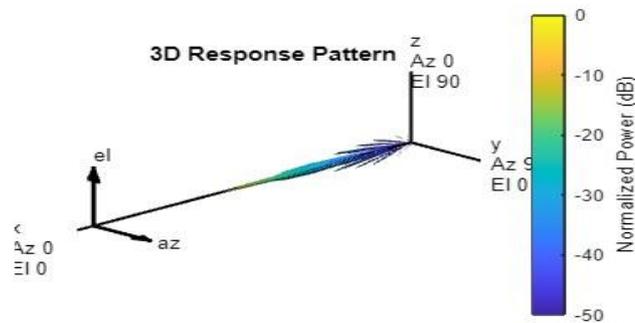
Εικόνα 20: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 32*32



Εικόνα 21: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 64*64



Εικόνα 22: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 128*128



Εικόνα 23: Γραφική παράσταση με μέγεθος συστοιχίας 256*256

Η ανάλυση των διαφορών στις γραφικές παραστάσεις κατέδειξε ότι η αύξηση του μεγέθους της συστοιχίας οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ο κύριος λοβός της δέσμης γίνεται πιο στενός, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και, κατ' επέκταση, αυξημένη ικανότητα εστίασης της εκπεμπόμενης ενέργειας προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Παράλληλα, το συνολικό κέρδος της κεραίας αυξάνεται, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη ανίχνευση στόχων σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η βελτίωση αυτή αντικατοπτρίζεται και στην ακρίβεια των μετρήσεων, καθώς η μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα της συστοιχίας συμβάλλει στην ακριβέστερη εκτίμηση τόσο της απόστασης όσο και της ταχύτητας των στόχων. Παρά τα σημαντικά αυτά πλεονεκτήματα, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων συνοδεύεται από αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος και μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις κατά τη

διαδικασία προσομοίωσης, γεγονός που απαιτεί προσεκτική εξισορρόπηση μεταξύ απόδοσης και υπολογιστικού κόστους.

3.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση εκτελέστηκε για πέντε διαφορετικά μεγέθη συστοιχιών, συγκεκριμένα $[24 \times 24]$, $[32 \times 32]$, $[64 \times 64]$, $[128 \times 128]$ και $[256 \times 256]$, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης του μεγέθους της συστοιχίας στην απόδοση του συστήματος ραντάρ. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων βασίστηκε σε τρία κύρια κριτήρια: το πρότυπο ακτινοβολίας της κεραίας (beam pattern), την ικανότητα ανάλυσης στόχων σε απόσταση και την εκτίμηση της ταχύτητας μέσω της μετατόπισης Doppler.

3.5.1 Επίδραση στην Κατευθυντικότητα και στο Εύρος Δέσμης (Beamwidth)

Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων της συστοιχίας είχε ως άμεσο αποτέλεσμα τη στένωση του κύριου λοβού της δέσμης, γεγονός που οδήγησε σε υψηλότερη κατευθυντικότητα. Στις μικρότερες συστοιχίες, όπως οι $[24 \times 24]$ και $[32 \times 32]$, ο κύριος λοβός παρέμενε σχετικά ευρύς, περιορίζοντας την ακρίβεια εντοπισμού στόχων και αυξάνοντας την πιθανότητα επικάλυψης γειτονικών ανακλάσεων. Με την αύξηση των διαστάσεων της συστοιχίας, ο λοβός γινόταν περισσότερο συγκεντρωμένος, επιτυγχάνοντας αποτελεσματικότερη καταστολή των πλευρικών λοβών (sidelobe suppression) και μειώνοντας τις παρεμβολές από κοντινούς στόχους. Στην περίπτωση της συστοιχίας $[256 \times 256]$, παρατηρήθηκε εξαιρετικά μικρό εύρος δέσμης (beamwidth), γεγονός που μεταφράζεται σε ιδιαίτερα υψηλή χωρική ανάλυση και ακρίβεια στόχευσης.

3.5.2 Επίδραση στο Κέρδος Κεραίας και στην Ισχύ του Σήματος

Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων είχε επίσης σημαντική επίδραση στο συνολικό κέρδος της κεραίας. Όσο περισσότερα στοιχεία συμμετείχαν στη συστοιχία, τόσο μεγαλύτερη ήταν η συγκέντρωση της εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ενέργειας προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα παρουσίασε αυξημένη ικανότητα ανίχνευσης στόχων σε μεγαλύτερες αποστάσεις, με ισχυρότερη επιστρεφόμενη ισχύ σήματος. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μείωση του επιπέδου θορύβου σε σχέση με το σήμα, γεγονός που οδήγησε σε σημαντική βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR).

3.5.3 Επίδραση στην Εκτίμηση Απόστασης και Ταχύτητας

Η ακρίβεια στην εκτίμηση της απόστασης βελτιώθηκε αισθητά, κυρίως λόγω της αυξημένης ευκρίνειας και καθαρότητας του σήματος που προσέγγιζε τον δέκτη στις μεγαλύτερες συστοιχίες. Επιπλέον, η εκτίμηση της ταχύτητας μέσω της ανάλυσης Doppler επωφελήθηκε από τον αυξημένο χρόνο παρατήρησης και την πιο σταθερή απολαβή. Στις μεγαλύτερες διατάξεις, η μετατόπιση Doppler υπολογίστηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ παρατηρήθηκε καθαρότερος διαχωρισμός μεταξύ στατικών και κινούμενων στόχων, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος.

3.5.4 Συνολική Εκτίμηση

Η χρήση μεγαλύτερων συστοιχιών βελτίωσε ουσιαστικά την απόδοση του ραντάρ σε όλους τους τομείς, επιτυγχάνοντας υψηλότερη κατευθυντικότητα, μεγαλύτερο κέρδος και βελτιωμένη διακριτική ικανότητα. Ωστόσο, η αύξηση αυτή συνοδεύτηκε από ορισμένες προκλήσεις. Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, καθώς και μεγαλύτερες απαιτήσεις σε μνήμη και χρόνο προσομοίωσης. Επιπλέον, η πρακτική υλοποίηση συστοιχιών τόσο μεγάλου μεγέθους ενδέχεται να αντιμετωπίσει τεχνολογικούς και οικονομικούς περιορισμούς, οι οποίοι καθιστούν απαραίτητη την εξισορρόπηση μεταξύ απόδοσης και διαθέσιμων πόρων.

3.6 Συνοπτικά Συμπεράσματα Πειραματικού Μέρους

Η πειραματική διαδικασία ανέδειξε καθαρά τον καθοριστικό ρόλο που διαδραματίζει το μέγεθος της συστοιχίας κεραιών στην απόδοση ενός ραντάρ ηλεκτρονικής σάρωσης. Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων οδήγησε σε ενίσχυση της κατευθυντικότητας, αύξηση του κέρδους και βελτίωση της διακριτικής ικανότητας. Οι στενότεροι κύριοι λοβοί επέτρεψαν την αποτελεσματικότερη διάκριση μεταξύ κοντινών στόχων, ενώ η βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο συνέβαλε στη σαφέστερη και ακριβέστερη εκτίμηση της απόστασης και της ταχύτητας των αντικειμένων.

Παράλληλα, η αύξηση του μεγέθους της συστοιχίας επέφερε σημαντική υπολογιστική επιβάρυνση, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις πολύ μεγάλων διατάξεων, όπως η [256×256], αναδεικνύοντας την ανάγκη για βέλτιστη ισορροπία ανάμεσα στην απόδοση και τους απαιτούμενους πόρους.

Συνολικά, το πειραματικό μέρος επιβεβαίωσε τα θεωρητικά συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία και τα πλεονεκτήματα των κεραίων φασικής συστοιχίας (phasedarrayantennas) σε συστήματα ραντάρ. Παράλληλα, ανέδειξε κρίσιμες προκλήσεις που σχετίζονται με την πρακτική τους υλοποίηση, προσφέροντας πολύτιμη γνώση για τη βελτιστοποίηση μελλοντικών σχεδιάσεων.

4. Συμπεράσματα

4.1 Γενική Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη και ανάλυση ενός ραντάρ ηλεκτρονικής σάρωσης βασισμένου σε συστοιχία κεραιών (phasedarrayradar), μέσω αριθμητικής προσομοίωσης. Ο βασικός στόχος ήταν η εις βάθος κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος και η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο διάφορες παράμετροι, και κυρίως το μέγεθος της συστοιχίας, επηρεάζουν την απόδοσή του.

Αρχικά παρουσιάστηκε η απαραίτητη θεωρητική θεμελίωση που αφορά τη λειτουργία των κεραιών, τη διαμόρφωση συστοιχιών και την αρχιτεκτονική ενός μονοστατικού ραντάρ. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένα πλήρες σενάριο προσομοίωσης στο περιβάλλον MATLAB, το οποίο περιελάμβανε διαδικασίες εντοπισμού στόχων, εκτίμησης απόστασης και υπολογισμού ταχύτητας μέσω της μετατόπισης Doppler. Η μεθοδολογία αυτή επέτρεψε τη συστηματική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες και διαστάσεις συστοιχίας, παρέχοντας έτσι μια ολοκληρωμένη εικόνα των δυνατοτήτων και των περιορισμών του.

4.2 Συμπεράσματα από την Πειραματική Προσέγγιση

Η πειραματική ανάλυση ανέδειξε με σαφήνεια τη σημαντική επίδραση του αριθμού των στοιχείων της συστοιχίας στην απόδοση του συστήματος ραντάρ. Η αύξηση των στοιχείων οδήγησε σε υψηλότερη κατευθυντικότητα, αυξημένο κέρδος και βελτιωμένη ακρίβεια εντοπισμού στόχων. Η στενότερη δέσμη που επιτυγχάνεται με τις μεγαλύτερες συστοιχίες επέτρεψε την αποδοτικότερη σάρωση του χώρου, μειώνοντας την πιθανότητα λανθασμένου εντοπισμού, ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένη πυκνότητα στόχων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι οι μεγάλες συστοιχίες βελτιώνουν την ικανότητα ανίχνευσης στόχων με μικρότερη διατομή ραντάρ (Radar Cross Section – RCS) ή σε μεγαλύτερες αποστάσεις, προσφέροντας συνολικά καλύτερη ευαισθησία και εμβέλεια λειτουργίας.

Ωστόσο, η αύξηση του μεγέθους της συστοιχίας συνοδεύεται από αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις και πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και την υλοποίηση. Οι παράγοντες αυτοί επιβάλλουν τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση πραγματικών συστημάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ απόδοσης και διαθέσιμων πόρων.

4.3 Προοπτικές και Μελλοντική Επέκταση

Η παρούσα μελέτη μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των συστοιχιών κεραιών και των ραντάρ ηλεκτρονικής σάρωσης. Μια ενδιαφέρουσα προέκταση της έρευνας θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη μελέτη δυναμικών στόχων σε πραγματικά περιβάλλοντα, με ενσωμάτωση μοντέλων κινητικότητας και μεταβαλλόμενων συνθηκών διάδοσης. Επιπλέον, η χρήση διαφορετικών μορφών εκπομπής παλμών, όπως οι τεχνικές FrequencyModulatedContinuousWave (FMCW) ή spreadpectrum, θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη ανάλυση και ακρίβεια μέτρησης.

Εξίσου ενδιαφέρουσα είναι η προοπτική ενσωμάτωσης τεχνικών μηχανικής μάθησης (machinelearning) για την ταξινόμηση, αναγνώριση ή πρόβλεψη κινήσεων στόχων με βάση τα επιστρεφόμενα σήματα. Τέλος, η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της συστοιχίας, με στόχο τη μείωση των πλευρικών λοβών ή την περαιτέρω αύξηση της κατευθυντικότητας, αποτελεί πεδίο με σημαντικές προοπτικές για μελλοντική μελέτη.

4.4 Τελικές Σκέψεις

Το ραντάρ ηλεκτρονικής σάρωσης που βασίζεται σε συστοιχία κεραιών αποτελεί μία από τις πιο προηγμένες και αποτελεσματικές τεχνολογίες στον τομέα της επιτήρησης, της αεράμυνας, καθώς και των αυτόνομων συστημάτων. Η δυνατότητα ηλεκτρονικής καθοδήγησης της δέσμης χωρίς την ανάγκη μηχανικής κίνησης προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ταχύτητα, αξιοπιστία και ευελιξία λειτουργίας.

Η παρούσα εργασία επιδίωξε να συνδυάσει τη θεωρητική γνώση με την πρακτική εφαρμογή, αναδεικνύοντας τις τεχνολογικές δυνατότητες, τους περιορισμούς και τις προοπτικές των συστημάτων phased array radar. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη μεγάλη δυναμική της τεχνολογίας αυτής και ταυτόχρονα ανέδειξαν την ανάγκη συνεχούς έρευνας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη μείωση της πολυπλοκότητας, με στόχο την ευρύτερη και αποδοτικότερη αξιοποίησή της σε εφαρμογές του μέλλοντος.

Βιβλιογραφία

- [1]Albreem, M. A., Al Habbash, A. H., Abu-Hudrouss, A. M., & Ikki, S. S. (2021). Overview of precoding techniques for massive MIMO. *Ieee Access*, 9, 60764-60801.
- [2]Barton, D. K. (1988). *Modern radar system analysis*. Norwood.
- [3]Boccia, L., & Breinbjerg, O. (2012). *Antenna basics*. *Space Antenna Handbook*, 1-35.
- [4]Bouzayene, I., Mabrouk, K., Gharsallah, A., &Kholodnyak, D. (2019). Scan radar using an uniform rectangular array for drone detection with low rcs. In *2019 IEEE 19th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)* (pp. 1-4). IEEE.
- [5]Budge, M. C., & German, S. R. (2020). *Basic RADAR analysis*. Artech House.
- [6]Charvat, G. L. (2014). *Small and short-range radar systems*. CRC Press.
- [7]Cheston, T. C., & Frank, J. (1990). Phased array radar antennas. *Radar Handbook*, 2(1).
- [8]Christnacher, F., Hengy, S., Laurenzis, M., Matwyschuk, A., Naz, P., Schertzer, S., & Schmitt, G. (2016). Optical and acoustical UAV detection. In *Electro-Optical Remote Sensing X* (Vol. 9988, pp. 83-95). SPIE.
- [9]Garg, V. K., & Wang, Y. C. (2005). Digital communication and communication networks. *The Electrical Engineering Handbook*, 949.
- [10]Hussain, K., & Oh, I. Y. (2024). Joint Radar, Communication, and Integration of Beamforming Technology. *Electronics*, 13(8), 1531.
- [11]Liu, L., Zhang, R., & Chua, K. C. (2014). Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming. *IEEE Transactions on Communications*, 62(12), 4349-4361.
- [12]Nadovich, C. (2004). *Synthetic instruments: concepts and applications*.
- [13]Nordin, K., Shamekhi, S., Lau, B. K., & Gustafsson, M. (2016). *24 GHz Patch Antenna Array Design for RADAR* (Doctoral dissertation, MA thesis. Lund University).
- [14]O'Donnell, R. M. (2007). *Introduction to radar systems*. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, Primavera.
- [15] Orfanidis, S. J. (2014). *Electromagnetic Waves and Antennas*. [Online]. New Jersey: RutgersUniversity.
- [16]Patel, J. S. (2024). *Innovative radar detection & AI classification techniques for small UAVs or drones* (Doctoral dissertation, University of Glasgow).

- [17]Poitevin, P., Pelletier, M., & Lamontagne, P. (2017). Challenges in detecting UAS with radar. In 2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST) (pp. 1-6). IEEE.
- [18]Poitevin, P., Pelletier, M., & Lamontagne, P. (2017). Challenges in detecting UAS with radar. In 2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST) (pp. 1-6). IEEE.
- [19]Ritchie, M., Fioranelli, F., Griffiths, H., & Torvik, B. (2015). Micro-drone RCS analysis. In 2015 IEEE Radar Conference (pp. 452-456). IEEE.
- [20]Scheer, J., & Holm, W. A. (2010). Principles of modern radar.
- [21]Skolnik, M. I. (2008). Radar Handbook (3rd ed.). McGraw-Hill.