



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Παθητικά Ραντάρ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Γουργιώτη Κ. Δήμητρας

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Παθητικά Ραντάρ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Γουργιώτη Κ. Δήμητρας

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 09 Μαρτίου 2021.

(Υπογραφή)

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....
Παναγιώτης Κοττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2021

(Υπογραφή)

.....
Γουργιώτη Κ. Δήμητρα

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

Copyright © Γουργιώτη Κ. Δήμητρα, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η χρήση της τεχνολογίας stealth στη σχεδίαση στρατιωτικών αεροσκαφών είναι ευρέως διαδεδομένη στις μέρες μας, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στα στρατιωτικά ζητήματα. Η έρευνα τεχνολογιών που θα βοηθήσουν στην αντιμετώπιση απειλών stealth έχει τραβήξει επίσης σημαντική προσοχή. Τα παθητικά ραντάρ ως τεχνολογία anti-stealth, εκμεταλλεύονται τις ήδη υπάρχουσες εκπομπές στο περιβάλλον, όπως ραδιοφώνου FM, τηλεόρασης και κινητής τηλεφωνίας, με σκοπό την ανίχνευση ηχούς που θα καταδείξει πιθανή παρουσία ενός ιπτάμενου στόχου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των συστημάτων παθητικών ραντάρ και των χαρακτηριστικών τους καθώς και τρόπων υλοποίησής τους. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 1 παρέχεται μια γενική εισαγωγή στη διπλωματική εργασία, και παρουσιάζονται βασικοί ορισμοί, η ιστορία των παθητικών ραντάρ, η ανάγκη ανάπτυξής τους καθώς και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται κατηγοριοποίηση των ραντάρ και στη συνέχεια παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες, όπως η ακτινοβολία υποβάθρου και η ραδιοδιατομή. Στο Κεφάλαιο 3, η εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση διαμόρφωσης του διστατικού ραντάρ, τον ορισμό της διστατικής γεωμετρίας ενώ περιγράφονται τεχνικές εντοπισμού στόχου και η ανάλυση Εύρους - Doppler. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η λειτουργία των παθητικών ραντάρ, η συνάρτηση αβεβαιότητας, η εξίσωση διστατικού ραντάρ καθώς και οι έννοιες του θορύβου και του σηματοθορυβικού λόγου. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται ένα πειραματικό μοντέλο παθητικού ραντάρ, η υλοποίησή του και η απόδοση του συστήματος. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας μαζί με μελλοντικές προεκτάσεις για μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά

Ραντάρ, Παθητικά Ραντάρ, Ακτινοβολία Υποβάθρου, Ραδιοτομή, Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία, Τεχνολογία stealth, Διστατικό ραντάρ, Ανάλυση Εύρους – Doppler, Συνάρτηση Αβεβαιότητας, Σηματοθορυβικός Λόγος

Abstract

The use of stealth technology in the design of military aircraft is widespread nowadays, playing a crucial role in military affairs. The research on technologies that would help counter stealth threats has also drawn considerable attention. Passive radar systems, as an anti-stealth technology, exploit emissions that already exist in the environment, such as FM radio, TV and cellular telephony signals, trying to detect echoes which would indicate the potential presence of a flying target.

The purpose of this work is the presentation of passive radar systems and their characteristics and ways of implementation. Specifically:

Chapter 1 provides a general introduction and presents basic definitions, the history of passive radars, the need for their development as well as their advantages and disadvantages. Chapter 2 categorizes radars and then introduces concepts such as illuminators of opportunity and radar cross section. In Chapter 3, the work focuses on the configuration analysis of the bistatic radar, the definition of the bistatic geometry while describing target detection techniques and the Range - Doppler analysis. Chapter 4 presents the operation of passive radars, the ambiguity function, the bistatic radar equation as well as the concepts of noise and signal-to-noise ratio. Chapter 5 analyzes an experimental passive radar model, its implementation and system performance. Finally, in Chapter 6, the conclusions of the dissertation are presented together with future extensions for study.

KeyWords

Radar, Passive Radar, Illuminators of Opportunity, Radar Cross Section, Electromagnetic Radiation, Stealth Technology, Bistatic Radar, Range - Doppler Analysis, Ambiguity Function, Signal-to-Noise Ratio

Ευχαριστίες

Στη μητέρα μου και στην αδελφή μου για τη στήριξη και την έμπρακτη βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα	9
Πίνακας συμβόλων-ακρωνυμίων-συντομογραφιών.....	9
Εισαγωγή.....	11
1.1 Ορισμοί.....	13
1.2 Ιστορία των Παθητικών Ραντάρ.....	15
1.3 Ανάγκη Ανάπτυξης παθητικών Ραντάρ.....	20
1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Παθητικών Ραντάρ.....	20
2. Εισαγωγικές Έννοιες.....	22
2.1 Κατηγοριοποίηση Ραντάρ.....	22
2.2 Ακτινοβολία Υποβάθρου.....	23
2.3 Ιδιότητες Διαμόρφωσης.....	24
2.4 Ραδιοδιατομή Στόχου (Radar Cross Section – RCS).....	29
2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ραδιοτομή.....	30
2.4.2 Τεχνικές Μείωσης Ραδιοτομής.....	32
2.5 Παρασιτικές Επιστροφές – Clutter.....	34
3. Το Διστατικό Ραντάρ.....	36
3.1 Διαμόρφωση Διστατικού Ραντάρ.....	36
3.2 Διστατική Γεωμετρία.....	38
3.3 Τεχνικές Εντοπισμού Στόχου.....	40
3.4 Ανάλυση Εύρους – Doppler.....	45
4. Λειτουργία των Παθητικών Ραντάρ.....	49
4.1 Απλό Μοντέλο.....	49
4.2 Συνάρτηση Αβεβαιότητας.....	51
4.3 Εξίσωση Διστατικού Ραντάρ.....	53
4.4 Σηματοθορυβικός Λόγος - Θόρυβος.....	56
4.4.1 Κώδικας σε Matlab για εξαγωγή διαγραμμάτων πιθανότητας ανίχνευσης.....	60
4.4.2 Οβάλ του Cassini	61
5. Ανάλυση Πειραματικού Μοντέλου Παθητικού Ραντάρ.....	63
5.1 Εισαγωγή.....	63
5.2 Περιγραφή - Αναμενόμενη εκτέλεση του συστήματος.....	63
5.3 Ανάλυση Συστήματος.....	68
5.3.1 Συλλογή Δεδομένων	69
5.3.2 Ανίχνευση στόχου με ετεροσυσχέτιση.....	70
5.3.3 Περιγραφή αλγορίθμου επεξεργασίας	70
5.4 Υλοποίηση Συστήματος.....	72
5.4.1 Αλγόριθμος ανίχνευσης CFAR.....	72
5.4.2 Εκτίμηση Κατεύθυνσης άφιξης.....	73
5.4.3 Συσχέτιση Στόχου	73
5.4.4 Εκτίμηση κατάστασης στόχου - Επαλήθευση της απόδοσης του συστήματος.....	75
6. Συμπεράσματα.....	79
Βιβλιογραφία.....	81

Πίνακας συμβόλων-ακρωνυμίων-συντομογραφιών

AD	Analog-Digital
AoA	Angle of Arrival
ARD	Amplitude – Range – Doppler
CIC	Cascaded Integrator Comb
CPU	Central Processing Unit
CFAR	Constant False Alarm Rate
DAB	Digital Audio Broadcasting
DOA	Direction of Arrival
DVB-S/ DVB-SH	Digital Video Broadcasting Satellite / Handheld
DVB-T	Digital Video Broadcasting -Terrestrial
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
ELS	Emitter Locating Systems
ERP	Equivalent Radiated Power
ESM	Electronic Support Measures
FFT	Fast Fourier Transforms
FIR	Finite Impulse Response
FM	Frequency Modulation
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
GSM	Global System for Mobile Communication
HiperLAN	High Performance Radio LAN
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IO	Illuminators of opportunity
LAN	Local and Metropolitan Area Network
LPF	Low Pass Filter
LTE	Long Term Evolution
MFN	Multiple Frequency Network
NATO	North Atlantic Treaty Organization
OFDM	Orthogonal Frequency Division Modulation
PBR	Passive Bistatic Radar
PCL	Passive Coherent Location
PCR	Passive Coherent Radar
RCS	Radar Cross Section
RF	Radiofrequency
SCR	Signal to Clutter Ratio
SNF	Single Frequency Network
TDOA	Time Difference Of Arrival
TV	Television
TWT	Traveling Wave Tube
UCL	University College London
UHF	Ultra-High Frequency

UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHF	Very High Frequency
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	World Wide Interoperability for Microwave access
A/Δ	Αεροδρόμιο
H/M	Ηλεκτρομαγνητική

Εισαγωγή

Τα συστήματα παθητικού ραντάρ, των οποίων η έννοια περιλαμβάνει τον εντοπισμό στόχων χωρίς τη χρήση ελεγχόμενων εκπομπών, συζητήθηκε, δοκιμάστηκε, επανεφευρέθηκε και ωρίμασε τα τελευταία ογδόντα χρόνια.

Τα συμβατικά συστήματα ραντάρ περιλαμβάνουν πομπό και δέκτη οι οποίοι συνήθως μοιράζονται τη μία και μοναδική κεραία του ραντάρ για μετάδοση και λήψη. Η σύνδεση πομπού και δέκτη με την κεραία αυτή γίνεται μέσω του διπλέκτη (Duplexer), ενός μικροκυματικού διακόπτη ο οποίος καθιστά τις λειτουργίες εκπομπής και λήψης ανεξάρτητες. [7, σελ 16]. Στα συμβατικά ραντάρ λοιπόν εκπέμπονται παλμικά σήματα τα οποία στη συνέχεια ανακλώνται από τους στόχους. Στη συνέχεια οι ανακλάσεις αυτές λαμβάνονται και επεξεργάζονται, δίνοντας πληροφορίες για τη θέση του στόχου.

Αντίθετα σε ένα παθητικό σύστημα ραντάρ, δεν υπάρχει αποκλειστικός πομπός, αλλά ο δέκτης χρησιμοποιεί σήματα από άλλους πομπούς – πηγές στο περιβάλλον του για την ανίχνευση του στόχου, μετρώντας τη χρονική διαφορά άφιξης μεταξύ του σήματος που φτάνει κατευθείαν από τον πομπό και του σήματος που φτάνει μέσω της ανάκλασης από το στόχο (ηχούς).

Αυτό επιτρέπει τον καθορισμό του διστατικού εύρους (bistatic range) του στόχου. Επιπλέον ένα τυπικό παθητικό ραντάρ θα μετρήσει τη μετατόπιση Doppler (bistatic Doppler Shift) της ηχούς και την κατεύθυνση άφιξής της, δίνοντας τη δυνατότητα υπολογισμού της θέσης και της ταχύτητας του στόχου.

Τα πλεονεκτήματά των παθητικών ραντάρ, όπως η μυστική λειτουργία του και η εξοικονόμηση κόστους ενός πομπού είναι προφανή. Στρατιωτικά και πολιτικά ενδιαφέροντα, σε συνδυασμό με την πρόοδο τεχνολογικών εξελίξεων, έχουν προσφάτως ενισχύσει την έρευνα στα παθητικά ραντάρ και παθητικά συστήματα ραντάρ πλησιάζουν επί του παρόντος την αγορά.

Τα συστήματα παθητικών ραντάρ έχουν λάβει σημαντικό ενδιαφέρον στις στρατιωτικές και ακαδημαϊκές κοινότητες. Από το τέλος του Β' ΠΠ, το ενδιαφέρον για τα παθητικά ραντάρ ανακυκλωνόταν περιοδικά κάθε 15-20 χρόνια. Η πιο επιτυχημένη διστατική εφαρμογή ραντάρ έως τα μέσα της δεκαετίας του '40 ήταν οι semiactive homing missiles.

Το ενδιαφέρον για αυτά τα συστήματα, βρίσκεται επί του παρόντος σε διαρκή κορύφωση, κυρίως λόγω της ραγδαίας αναδύομενης τεχνολογίας, που έχει ωριμάσει αρκετά στη στρατιωτική κοινότητα, ώστε να δει το PCL (Passive Coherent Location) ως πιθανό αισθητήρα παρακολούθησης.

Από στρατιωτικής πλευράς, τα ελκυστικά στοιχεία των παθητικών ραντάρ είναι η συγκάλυψη τους και το γεγονός ότι οι περισσότεροι ευκαιριακοί πομποί, λειτουργούν στις κατώτερες ζώνες συχνοτήτων (Very High Frequency - VHF και Ultra-High Frequency-UHF), γεγονός που παρέχει κάποιου είδους ικανότητας anti-stealth ανίχνευσης.

Η ανάπτυξη του δέκτη, όντας εντελώς παθητικός, δεν απαιτεί κατανομή συχνότητας και έτσι επιτρέπει τη λειτουργία σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου η Ηλεκτρομαγνητική - Η/Μ ρύπανση αποτελεί πρόβλημα. Το συχνά αναφερόμενο επιχείρημα ότι τα συστήματα παθητικών ραντάρ είναι φθηνότερα από τα ενεργητικά, δεν έχει ακόμη αποδειχθεί, ωστόσο σίγουρα χρειάζονται λιγότερη συντήρηση.

Το παθητικό ραντάρ αποτελείται από ένα ή περισσότερους ευκαιριακούς πομπούς-πηγές(ακτινοβολία υποβάθρου) και από ένα δίκτυο ενός ή περισσότερων δεκτών που θα κάνουν ανεξάρτητες μετρήσεις, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την ακρίβεια εντοπισμού. Από τη στιγμή που οι μεταδιδόμενες κυματομορφές τέτοιων ευκαιριακών πομπών, συνήθως δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για σκοπούς ραντάρ, η δομή και η επεξεργασία στο δέκτη πρέπει να είναι ειδικά προσαρμοσμένες για την εκμετάλλευση τέτοιων κυματομορφών .

Η πανκατευθυντική παρακολούθηση συχνά απαιτεί πολυκάναλες κεραίες συστοιχίας, κυκλικής γεωμετρίας που να καλύπτουν ένα σχετικά μεγάλο εύρος. Κανάλια δέκτη στην περιοχή UHF και κάτω επιτρέπουν την ψηφιοποίηση των λαμβανόμενων σημάτων και η επεξεργασία γίνεται στην ψηφιακή περιοχή. Αυτό επιτρέπει στον αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα [Analog-Digital (AD) Converter] να είναι το αποφασιστικό στοιχείο. Ισχυρές κεντρικές Μονάδες Επεξεργασίας (Central Processing Units - CPUs) ακόμη και Μονάδες Επεξεργασίας Γραφικών (Graphics Processing Units - GPUs) είναι διαθέσιμες σήμερα για την υποστήριξη της απαιτούμενης επεξεργασίας ραντάρ (πχ cross - correlation, beamforming, άμεση καταστολή σήματος και άμεση ανακατασκευή σήματος στην περίπτωση ψηφιακών κυματομορφών).

Τέτοιες προηγμένες προσεγγίσεις επεξεργασίας σήματος έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία και σε συνέδρια με αυξανόμενο ρυθμό τα τελευταία χρόνια και δείχνουν ότι η βασική κινητήριος δύναμη για περισσότερη έρευνα και ανάπτυξη, ήταν εφαρμογές στρατιωτικής επιτήρησης αέρος. Ωστόσο, εξειδικευμένες εφαρμογές απευθύνονται επίσης και στον πολιτικό κόσμο, εκμεταλλευόμενες τις ήδη διαθέσιμες εκπομπές. [6]

1.1 Ορισμοί

Έως σήμερα δεν υπάρχει ένας γενικά αποδεκτός όρος των παθητικών συστημάτων ραντάρ, ούτε ένα ενοποιημένο όνομα για τέτοια συστήματα. Κάποιοι δημοσιευμένοι ορισμοί και η ερμηνεία τους είναι οι παρακάτω:

Passive Coherent Location - PCL, Passive Coherent Radar – PCR, Passive Bistatic Radar -PBR, passive radar, multistatic radar, parasitic radar, commensal radar, symbiotic radar και hitchhiking radar είναι όλα κοινά ονόματα συστημάτων παθητικών ραντάρ που εκμεταλλεύονται συνεργάσιμους ή μη συνεργάσιμους πομπούς ή ευκαιριακούς πομπούς.

Μια πρόσφατη αναθεώρηση των διαφόρων ονομάτων κατέληξε στο συμβιβασμό PBR . Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι το όνομα PCL χρησιμοποιείται ακόμη για ολόκληρα συστήματα όπως το Silent Sentry της Lockheed Martin το Thales' Home Alertret 100 και το Hensoldt. [6]

Ο όρος παθητικό ραντάρ χρησιμοποιείται λανθασμένα κάποιες φορές για να περιγράψει κάποιους παθητικούς αισθητήρες οι οποίοι ανιχνεύουν και εντοπίζουν στόχους από ενδεχόμενες εκπομπές ραδιοσυχνότητας (Radiofrequency -RF) των ίδιων των στόχων, όπως εκπομπές ασυρμάτων, τακτικών δικτύων δεδομένων, ραδιοναυτιλίας κ.λ.π.

Όμως τα συστήματα αυτά δεν εκμεταλλεύονται την ανακλώμενη ενέργεια και περιγράφονται με περισσότερη ακρίβεια ως συστήματα ELS (Emitter Locating Systems) και εμπίπτουν στην κατηγορία των ηλεκτρονικών μέσων υποστήριξης ESM (Electronic Support Measures). [9, Introduction]

Το 1990 ο Willis όρισε ως διστατικό ραντάρ εκείνο που απασχολεί δύο πλευρές, πομπό και δέκτη οι οποίοι βρίσκονται σε ξεχωριστές θέσεις με σημαντική απόσταση μεταξύ τους, μία δήλωση που ποτέ δεν ξεκαθάρισε αν και ανέφερε δύο διευκρινιστικά παραδείγματα: Πρώτον, ένα ραντάρ το οποίο χρησιμοποιεί διαφορετικές κεραίες για μετάδοση και λήψη στο ίδιο σημείο πρέπει να θεωρείται μονοστατικό και δεύτερον, Πομπός και Δέκτης ενός ραντάρ μπορούν να βρίσκονται σε απόσταση 100km και περισσότερο και ακόμη το ραντάρ να θεωρείται ως μονοστατικό, εφόσον η θέση στόχου βρίσκεται χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά. [6]

Ο Willis στο βιβλίο του Bistatic Radar [8] χρησιμοποιεί τον ορισμό του Ινστιτούτου IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers: Διστατικό ραντάρ ορίζεται το ραντάρ που χρησιμοποιεί κεραίες για μετάδοση και λήψη, οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις. Επισημαίνει δε, ότι δεν διευκρινίζεται με ποια απόσταση μπορούν τα κανάλια

εκπομπής και λήψης να διαχωρίζονται. Προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση αυτού του διαχωρισμού έγιναν από τους Skolnik και Blake.

Ο Willis σημειώνει ότι ο Skolnik το 1990 όρισε το διαχωρισμό ως «σημαντική απόσταση» ενώ νωρίτερα είχε θεωρήσει τη σημαντική απόσταση ως «συγκρίσιμη» με απόσταση στόχου. Ο Willis ισχυρίζεται επίσης ότι ο Skolnik στο ίδιο έγγραφο όρισε το διαχωρισμό έτσι ώστε «το σήμα ηχούς να μην ταξιδεύει επί της ίδιας συνολικής διαδρομής με το μεταδιδόμενο σήμα».

Ο Blake ορίζει δύο προϋποθέσεις για το διαχωρισμό πομπού και δέκτη απαιτώντας, είτε «οι κατευθύνσεις πομπού και δέκτη από το στόχο να διαφέρουν κατά γωνία συγκρίσιμη με ή μεγαλύτερη από το εύρος δέσμης και των δύο» ή «οι αποστάσεις από το δέκτη προς τον πομπό [R_T] και προς τον δέκτη [R_R] να διαφέρουν κατά ποσότητα που αποτελεί σημαντικό κλάσμα και των δύο αποστάσεων».

Αυτοί οι ορισμοί εφαρμόζονται σε όλες τις διστατικές διαμορφώσεις, αλλά δεν παρέχουν μία μετρήσιμη ποσότητα εξ' αιτίας των όρων «συγκρίσιμος» και «σημαντικό κλάσμα». [6]

1.2 Ιστορία των Παθητικών Ραντάρ

Η ιστορία παθητικών ραντάρ με σκοπό τον εντοπισμό αεροσκαφών χρονολογείται στο 1935, όταν οι Sir Robert Watson Watt και Arnold Wikings πραγματοποίησαν το πείραμα στο Daventry , στο Ηνωμένο Βασίλειο, ανιχνεύοντας ένα βομβαρδιστικό τύπου Handley Page Heyford, σε απόσταση περίπου 8 χιλιομέτρων, χρησιμοποιώντας τις εκπομπές ενός σταθμού βραχέων κυμάτων του BBC που βρισκόταν 6 μίλια μακριά. Το Heyford πετούσε σε μια διαδρομή μεταξύ Weedon και του σταθμού BBC στο Daventry. [9, History]. Παρακάτω μπορούμε να δούμε ένα σκίτσο από το πείραμα στο Daventry. [6]



Εικόνα 1: Το πείραμα στο Daventry [29]

Τα πρώτα ραντάρ ήταν όλα διστατικά καθώς η τεχνολογία που επιτρέπει την εναλλαγή λειτουργίας της κεραίας από πομπό σε δέκτη δεν είχε ακόμη αναπτυχθεί. Για αυτό το λόγο πολλές χώρες χρησιμοποιούσαν διστατικά συστήματα στα δίκτυα αεράμυνάς τους στις αρχές του 1930, όπως το βρετανικό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης “Chain Home”, το οποίο αναπτύχθηκε χάρη στην επιτυχία του πειράματος Daventry.

Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, αναπτύχθηκε από Γερμανούς το παθητικό διστατικό σύστημα “Klein Heidelberg Parasit”, ένα παρασιτικό σύστημα που εκμεταλλευόταν τα ραντάρ του βρετανικού Chain Home ως μη συνεργαζόμενους πομπούς για τον εντοπισμό αεροσκαφών στο νοτιότερο τμήμα της Βόρειας Θάλασσας.

Αυτά ήταν και τα πρώτα επιχειρησιακά παθητικά ραντάρ. Η αντίστασή τους έναντι στους βρετανικούς παρεμβολείς ήταν το κύριο πλεονέκτημα των παθητικών δεκτών του Klein Heidelberg Parasit σε σύγκριση με τα γερμανικά ενεργητικά ραντάρ Freya, Mammut, Wasserman και Wurzburg. Μετά τις αρχικές δοκιμές, τέσσερις δέκτες Klein Heidelberg τέθηκαν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 1944.

Το 1936 η ανάπτυξη του συγχρονιστή (duplexer) άφησε χώρο στο να αναπτυχθούν τα μονοστατικά ραντάρ έναντι των διστατικών. Τα μονοστατικά ήταν πιο εύκολο να υλοποιηθούν καθώς ελαχιστοποιούσαν τη γεωμετρική πολυπλοκότητα εξαιτίας των διαφορετικών θέσεων πομπού και δέκτη.

Στις αρχές του 1950 τα διστατικά συστήματα επανεξετάστηκαν όταν ανακαλύφθηκαν κάποιες ενδιαφέρουσες ιδιότητες της σκεδαζόμενης ενέργειας ραντάρ. Στην ουσία ο όρος διστατικός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Siegel το 1955 στην αναφορά του στην οποία περιέγραφε αυτές τις ιδιότητες.

Ένα από τα μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα συστήματα παθητικών ραντάρ ήταν το βρετανικό RX12874, γνωστό με το προσωνύμιο Winkle, το οποίο αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960, ως απάντηση στην εισαγωγή του carcinotron, ενός παρασιτικού ραντάρ τόσο ισχυρού που φαινόταν ότι μπορούσε να καθιστά τα ραντάρ μεγάλου εύρους άχρηστα. Το Winkle, εντοπίζοντας τη θέση του παρασιτικού ραντάρ, επέτρεπε στα άλλα ραντάρ του δικτύου Linesman / Mediator να μειώνουν την ευαισθησία των δεκτών του όταν κοιτούσαν προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση και ως εκ τούτου να λαμβάνουν λιγότερα παράσιτα.

Το 1980, η ανάπτυξη της φθηνής υπολογιστικής ισχύος και της ψηφιακής τεχνολογίας στους δέκτες, οδήγησε στην αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος στην τεχνολογία των παθητικών ραντάρ. Για πρώτη φορά οι σχεδιαστές μπόρεσαν να εφαρμόσουν τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων, ώστε να εκμεταλλευτούν μία ποικιλία σημάτων εκπομπής και να εφαρμόσουν τεχνικές συσχέτισης (cross - correlation) ώστε να επιτύχουν επαρκές κέρδος επεξεργασίας σήματος για να εντοπίσουν στόχους και να εκτιμήσουν το εύρος (bistatic range) και τη μετατόπιση Doppler.

Στις αρχές του 1990, υπήρξε επιπλέον αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος στα παθητικά ραντάρ, λόγω της προσβασιμότητας σε φθηνούς μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό με υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας και δυναμικό εύρος ανάλυσης της

μετατοπισμένης ηχούς Doppler των οπτικοακουστικών φερόντων των σημάτων αναλογικής τηλεόρασης. [9, History].

Η ερευνητική ομάδα άμυνας του NATO (North Atlantic Treaty Organization), παρουσίασε μια μελέτη για τα παθητικά ραντάρ και ραντάρ θορύβου, η οποία ολοκληρώθηκε με ένα συμπόσιο. Επιπλέον της αρχής (pulse chasing), η οποία εφαρμόζεται για την εκμετάλλευση σημάτων μη συνεργαζόμενων παλμικών ραντάρ, ανακαλύφθηκαν πομποί μετάδοσης, ως πιθανές πηγές PCR. Το νέο κίνητρο για τα παθητικά ραντάρ, επιπλέον της κάλυψης που παρέχουν, ήταν η εγγενής antistealth ικανότητα του συστήματος. Δεδομένου ότι ο πρωταρχικός στόχος της τεχνολογίας stealth, ήταν η μείωση της ενεργού διατομής (Radar Cross Section - RCS), σχετικά με τα μονοστατικά ραντάρ, στις λειτουργικές συχνότητες ραντάρ εύρους 1-2 GHz – 8-12 GHz (L-X Band), η διστατική ή πολυστατική γεωμετρία των παθητικών ραντάρ και η κυρίαρχη ακτινοβολία VHF-UHF των πομπών τους, αντισταθμίζουν την τεχνολογία stealth επιτυχώς.

Μελέτες PCL, διεξήχθησαν στο πανεπιστημιακό κολέγιο του Λονδίνου (University College London - UCL), όπου οι Griffiths και Long διερεύνησαν τη χρήση εκπομπών αναλογικής τηλεόρασης (Television - TV) από το Crystal Palace για τον εντοπισμό στόχων αεροσκαφών. Επιπλέον, ο Howland χρησιμοποίησε ξανά το αναλογικό τηλεοπτικό φέρον, από τον πομπό του Crystal Palace, για τον εντοπισμό και παρακολούθηση αερομεταφορών σε εμβέλεια έως 260 χλμ. Αυτές οι μελέτες κατέδειξαν τη σκοπιμότητα της αρχής της τεχνολογίας PCL.

Την ίδια στιγμή, ο Thales στη Γαλλία απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μέθοδο που εκμεταλλεύεται τη φασματική μετατόπιση φέροντος της αναλογικής τηλεόρασης και των παλμών γραμμικού συγχρονισμού της ηχούς κινούμενου στόχου έναντι του άμεσου σήματος για την ανίχνευση παθητικού εύρους στόχου.

Ως μια επιπλέον πηγή ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμη σχεδόν σε όλα τα μέρη του κόσμου, πολλά σχέδια συστήματος PCR εκμεταλλεύτηκαν Ραδιο-σήματα διαμόρφωσης συχνότητας (FM). Σε πολλά έθνη υπήρξαν διαβαθμισμένα προγράμματα, αλλά η πρώτη ανακοίνωση εμπορικού συστήματος ήταν από την Lockheed Martin Mission Systems το 1998, με την προώθηση του συστήματος Silent Sentry, το οποίο εκμεταλλευόταν μεταδότες ραδιοφώνου FM και αναλογικής τηλεόρασης. [6]



Εικόνα 2: Silent Sentry, Lockheed Martin [28]

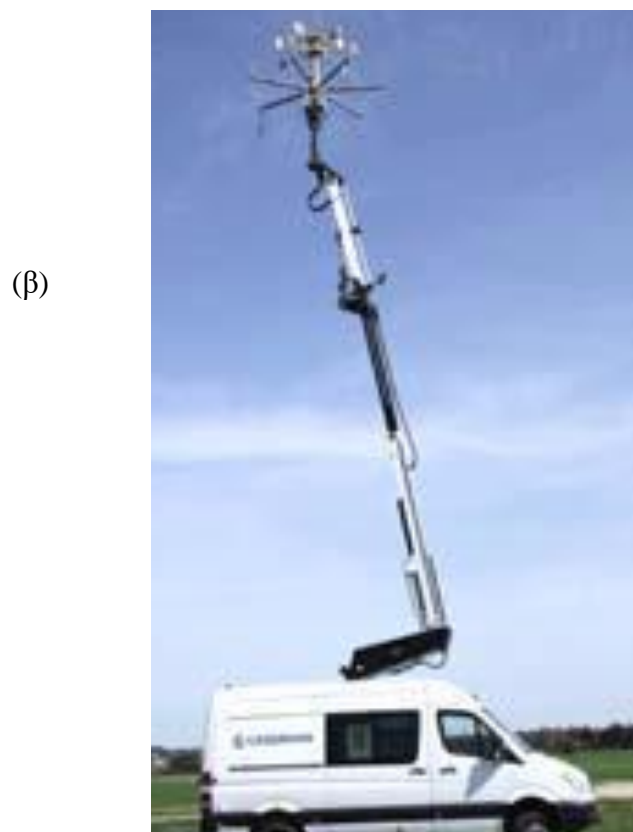
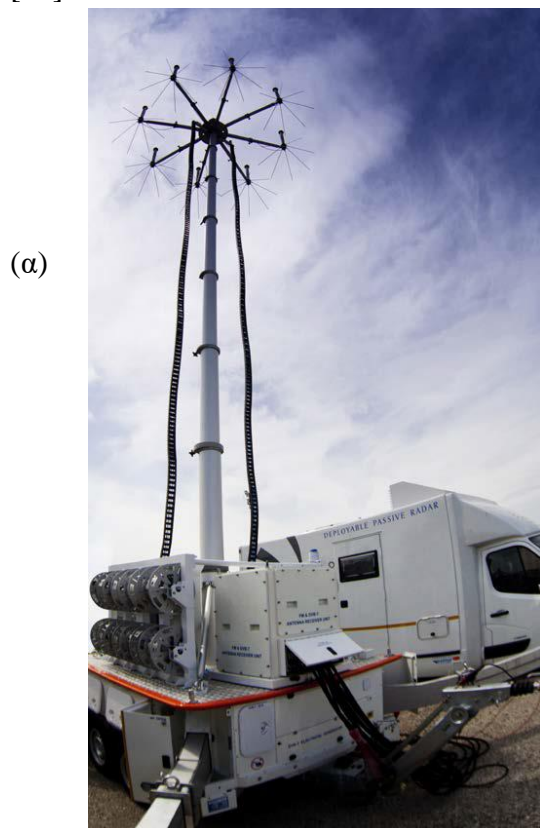
Σημαντικός αριθμός άλλων εμπορικών οργανισμών ανακοίνωσε την ανάπτυξη συστημάτων παθητικών ραντάρ, όπως το CELLDAR από την BAE Systems, το οποίο εκμεταλλεύεται εκπομπές κινητής τηλεφωνίας για παρακολούθηση στόχων, το Homeland Alerter της Thales Air Systems, που χρησιμοποιεί σήματα FM και τηλεόρασης με εμβέλεια από 100 – 200 km και το Ground Alerter της ίδιας, ένα ραντάρ αντιπυροβολικού με δυνατότητα εντοπισμού βλημάτων όλμου σε ακτίνα 10 km. [10,15]



Εικόνα 3: Homeland Alerter της Thales [15]

Η πρώτη δεκαετία του 20^{ου} αιώνα έφερε μια ανοδική πορεία στην ανάπτυξη των παθητικών ραντάρ με την εμφάνιση λογισμικού, όπως επεξεργαστές υψηλών ταχυτήτων και δέκτες υψηλού δυναμικού εύρους. Αυτό συνέπεσε με τη συρρίκνωση των προϋπολογισμών έρευνας και άμυνας. Παρόλα αυτά η ανάγκη για αυξημένη επιτήρηση ήταν ακόμη ουσιώδης. Η χαμηλού κόστους φύση των παθητικών ραντάρ προσέλκυσε την προσοχή πολλών πανεπιστημιακών εργαστηρίων και άλλων οργανισμών με περιορισμένο προϋπολογισμό και αυτό γιατί τα παθητικά ραντάρ απαιτούν περισσότερη υπολογιστική δύναμη και αλγοριθμική επιτήδευση παρά εξαρτήματα και υλικά (hardware).

Έτσι μπορούμε να αναφέρουμε κάποια αξιοσημείωτα παραδείγματα ανάπτυξης παθητικών ραντάρ, όπως το ιταλικό AULOS Passive Covert Location Radar της Leonardo [13] και το αντίστοιχο γερμανικό της Cassidian του ομίλου EADS, που εκμεταλλεύονται εκπομπές ραδιοφωνίας (FM, DAB - Digital Audio Broadcasting) και τηλεόρασης (DVB-T-Digital Video Broadcasting - Terrestrial) με εμβέλεια 360 km. [15] Τέλος αξίζει να αναφέρουμε και το ελληνικό HEMPAS (Hellenic Multitarget Passive System) με δυνατότητα αποκάλυψης ιπτάμενων στόχων (Αεροσκαφών Stealth και ελικοπτέρων σε απόσταση 400km από τη στιγμή απογείωσης), μια προσπάθεια όμως που δεν προχώρησε. [10]



Εικόνα 4: (α) AULOS Passive Covert Location Radar [13]

(β) Cassidian του ομίλου EADS [15]

1.3 Ανάγκη Ανάπτυξης παθητικών Ραντάρ

Βρισκόμενοι σε μια εποχή που απαιτεί ενισχυμένη επιτήρηση, ειδικά σε στρατιωτικές εφαρμογές, η τεχνολογία των παθητικών ραντάρ προσφέρει σημαντικά οφέλη, όπως η ποικιλία στη συχνότητα και προκλήσεις όσον αφορά τα ηλεκτρονικά αντίμετρα.

Ισχυρίζεται ότι τα συστήματα παθητικών ραντάρ είναι δύσκολο να εντοπιστούν, καθώς δεν εκπέμπουν κάποιο είδος ακτινοβολίας αλλά ανιχνεύουν μεταβολές στην υπάρχουσα ηλεκτρομαγνητική δραστηριότητα που προκαλεί κάποιος κινούμενος στόχος σε μια περιοχή.

Επίσης υποστηρίζεται ότι εντοπίζουν ευκολότερα στόχους χαμηλής παρατηρησιμότητας (Low Observable ή Stealth), των οποίων το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι σκεδάζουν την ακτινοβολία που δέχονται όταν φωτίζονται από ένα συμβατικό ραντάρ σε διάφορες κατευθύνσεις και όχι πίσω στο ραντάρ.

Αντίθετα, η πολυστατική φύση των παθητικών ραντάρ με την επίτευξη της κατάλληλης γεωμετρίας επιτρέπει την ανίχνευση του στόχου. Επιπροσθέτως, τα παθητικά ραντάρ εκμεταλλεύονται σχετικά χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα μήκη κύματος να είναι συγκρίσιμα με τμήματα του στόχου εμφανίζοντας φαινόμενα συντονισμού και ενεργοποιώντας τρόπους σκέδασης που αυξάνουν το ίχνος ραντάρ του στόχου [1].

Επίσης, στις χαμηλές συχνότητες στις οποίες λειτουργούν τα παθητικά ραντάρ, οι επιστρώσεις με υλικά απορρόφησης ακτινοβολίας, που μπορεί να διαθέτει ένα αεροσκάφος, γίνονται λιγότερο αποτελεσματικές και ως εκ τούτου η απόκρυψη του στόχου δυσκολότερη.

1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Παθητικών Ραντάρ

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των παθητικών ραντάρ.

Τα πλεονεκτήματα ενός παθητικού ραντάρ σε σύγκριση με ένα συμβατικό (ενεργητικό, μονοστατικό, στις συνήθεις συχνότητες ραντάρ) συνοψίζονται στα εξής:

- 1) Παρέχει συγκεκαλυμμένη ανίχνευση – παρακολούθηση.
- 2) Παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα αποκάλυψης στόχων Stealth, καθότι βασίζεται σε εκπομπές χαμηλών συχνοτήτων (σε σχέση με τα συνήθη ραντάρ αεράμυνας), ενώ είναι πολυστατικό. Επισημαίνεται ότι τα αεροσκάφη Stealth έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την απόκρυψή τους από συμβατικά μονοστατικά ραντάρ, κυρίως ραντάρ Α/Φ, τα οποία λειτουργούν στη ζώνη X-Band (8–12GHz).

3) Απαιτεί σημαντικά χαμηλότερο κόστος προμήθειας και λειτουργίας, καθότι δεν υπάρχει πομπός, ο οποίος παρουσιάζει μεγάλη κατανάλωση ισχύος, ενώ βασίζεται συνήθως σε μία μικροκυματική λυχνία οδεύοντος κύματος (TWT –Traveling Wave Tube), με υψηλό κόστος αντικατάστασης.

4) Είναι πολύ δύσκολο να δεχθεί παρεμβολές.

5) Δεν κινδυνεύει από όπλα εναντίον ραντάρ (Anti-Radiation Missile). Επίσης, δεδομένου ότι δεν έχει πομπό, ο οποίος παράγει θερμότητα λόγω των στοιχείων ισχύος (είτε λυχνίας, είτε τρανζίστορ), θα έχει και χαμηλό θερμικό ίχνος, καθιστώντας δύσκολη τη στοχοποίησή του και με ηλεκτρο-οπτικά μέσα.

6) Παρέχει τη δυνατότητα τοποθέτησης χωρίς περιορισμούς και χωρίς καμία αδειοδότηση για τη λειτουργία του (πολύ σημαντικό σε κορεσμένες περιοχές, όπως σε πολιτικά Α/Δ, όπου υπάρχουν πολλές και διαφορετικές εκπομπές).

Μειονεκτήματα – Περιορισμοί:

1) Παρουσιάζει αυξημένη αλγοριθμική πολυπλοκότητα και απαιτεί μεγάλη επεξεργαστική ισχύ.

2) Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από τη γεωμετρία του χώρου και των υφιστάμενων εκπομπών.

3) Απαιτείται επίλυση προβλημάτων συγχρονισμού μεταξύ των δεκτών.

4) Παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία μέτρησης του ύψους του στόχου.

5) Εξαρτάται από τον μη συνεργαζόμενο πομπό.

6) Το σημαντικότερο, προσφέρει περιορισμένο ύψος επόπτευσης, καθότι δεν υπάρχει επαρκής ακτινοβολία σε μεγάλα ύψη. [14]

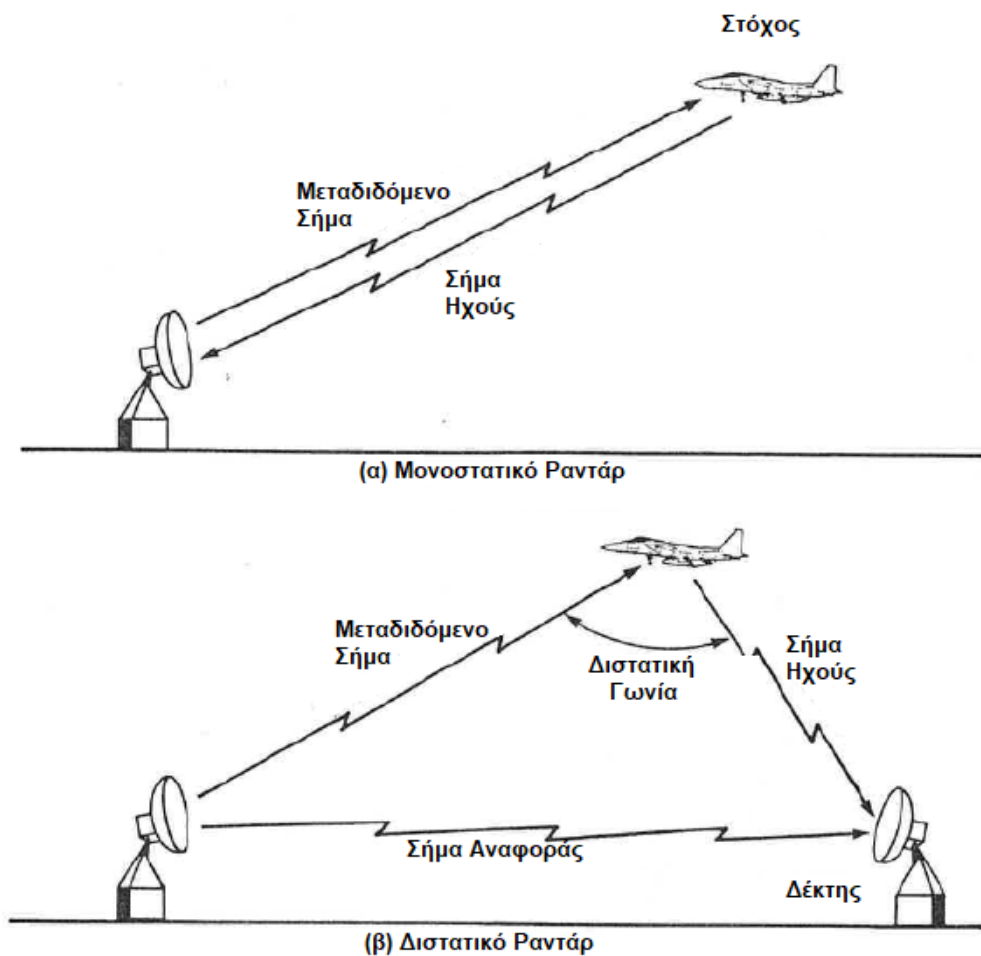
2. Εισαγωγικές Έννοιες

2.1 Κατηγοριοποίηση Ραντάρ

Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των ραντάρ είναι με βάση τη γεωγραφική τοποθέτηση των κεραιών που διαθέτουν και αξιοποιούν. Έτσι έχουμε τα:

Μονοστατικά Ραντάρ (monostatic radars), που διαθέτουν μόνο μία κεραία, η οποία αποτελεί πομπό και δέκτη, απομονώνοντας με τη βοήθεια ειδικού μικροκυματικού διακόπτη (Duplexer), τον δέκτη κατά τη στιγμή της εκπομπής και τον πομπό για τον υπόλοιπο χρόνο.

Πολυστατικά Ραντάρ (multistatic radars), τα οποία διαθέτουν περισσότερες από μια κεραιές εκπομπής και λήψης σε διαφορετικές θέσεις. Υποκατηγορία των πολυστατικών είναι τα διστατικά (bistatic) ραντάρ, που χρησιμοποιούν κεραιές εκπομπής και λήψης σε απομακρυσμένες θέσεις.



Εικόνα 5: (α) Μονοστατικό Ραντάρ με μία κεραία εκπομπής – λήψης

(β) Διστατικό Ραντάρ με κεραιές εκπομπής και λήψης σε απομακρυσμένες θέσεις

Άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης είναι βάσει εκπομπής ή μη ακτινοβολίας, οπότε έχουμε τα:

Ενεργητικά Ραντάρ, που διαθέτουν κεραίες εκπομπής σημάτων με σκοπό τη διάδοση και ενδεχόμενη ανάκλασή τους από τους πιθανούς στόχους, ενώ μπορούν να είναι είτε μονοστατικά (η συνήθης περίπτωση) είτε πολυστατικά.

Παθητικά ραντάρ, τα οποία διαθέτουν μόνο κεραία/ες λήψης, ενώ εκμεταλλεύονται την ακτινοβολία που υπάρχει ήδη στο περιβάλλον προερχόμενη από μη συνεργαζόμενους πομπούς (ακτινοβολία υποβάθρου). Τέτοιες πηγές αποτελούν για παράδειγμα οι εκπομπές τηλεόρασης, ραδιοφωνίας ή κινητής τηλεφωνίας. Όπως αναφέρθηκε, τα παθητικά ραντάρ είναι εκ φύσεως πολυστατικά, καθότι οι κεραίες εκπομπής βρίσκονται σε διαφορετική θέση από τις κεραίες λήψης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε στις έννοιες, χαρακτηριστικά και τρόπο λειτουργίας που αφορούν στα παθητικά διστατικά ραντάρ.

2.2 Ακτινοβολία Υποβάθρου

Τα διστατικά ραντάρ μπορούν να λειτουργήσουν είτε με αποκλειστικούς - αφοσιωμένους πομπούς που έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για εκμετάλλευσή τους από τα διστατικά ραντάρ είτε από ευκαιριακούς πομπούς (Illuminators of opportunity - IO), που έχουν σχεδιαστεί για άλλους σκοπούς αλλά μπορούν να αξιοποιηθούν από τα διστατικά παθητικά ραντάρ. Οι ευκαιριακοί πομποί μπορούν να χαρακτηριστούν ως συνεργάσιμοι ή μη (κυρίως όταν αναφερόμαστε σε στρατιωτικές εφαρμογές των παθητικών ραντάρ και όχι τόσο σε εμπορικές ή επιστημονικές) ανάλογα με το αν είναι φιλικό ή ουδέτερο – εχθρικό.

Υπάρχουν πολλά πιθανά κριτήρια ταξινόμησης για τους πομπούς, όπως η διαμόρφωση σήματος ή ο σκοπός μετάδοσης. Παρόλα αυτά ο διαχωρισμός τους σε επίγειους και διαστημικούς, δείχνει ποια είναι η σημερινή τους χρήση και ποια η πιθανή επιθυμητή χρήση τους για το μέλλον.

Τα παθητικά ραντάρ μπορούν να εκμεταλλευτούν μια από τις παρακάτω πηγές ακτινοβολίας (πομπούς) την οποία στο εξής θα καλούμε **ακτινοβολία υποβάθρου**: [6,9]

Επίγειοι ευκαιριακοί πομποί:

- α) Σήματα Μετάδοσης Ήχου (AM – FM Radio – Digital Audio Broadcast (DAB)
- β) Σήματα Μετάδοσης Video (Αναλογική Τηλεόραση, Ψηφιακή Τηλεόραση (DVB - T)
- γ) Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας (Global System for Mobile Communication (GSM) – Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) – Long Term Evolution (LTE)

δ) Τοπικά και Μητροπολιτικά Δίκτυα - Local and Metropolitan Area Networks - LANS (IEEE 802.11 – access points for Wireless Fidelity (WiFi), IEEE 802.16 -World Wide Interoperability for Microwave access (WiMAX), High Performance Radio LAN (HiperLAN)

ε) Άλλα ραντάρ, όπως για παράδειγμα ραντάρ που χρησιμοποιούνται για έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας.

Διαστημικοί ευκαιριακοί πομποί:

α) Σήματα Δορυφορικής Μετάδοσης Ήχου – Video (Digital Video Broadcasting Satellite / Handheld(DVB-S/ DVB-SH)

β) Δίκτυα για Τηλεπικοινωνία όπως τα Globalstar, Iridium και Orbcomm.

γ) Δίκτυα Πλοήγησης όπως τα Global Positioning System (GPS), Global Navigation Satellite System (GNSS) και το μελλοντικό GALLILEO

δ) Υπάρχοντες Μεταδότες Ραντάρ, όπως ραντάρ παρακολούθησης της γης ή για εφαρμογές τηλεπισκόπησης.

Ανάμεσα σε αυτές τις διαφορετικές δυνατότητες ένας καλός ευκαιριακός πομπός για συστήματα παθητικών ραντάρ, πρέπει να παρέχει αξιόπιστο και συνεχώς μεταδιδόμενο σήμα, σημαντικής ισχύος Equivalent Isotropically Radiated Power – EIRP, ευρείας περιοχής κάλυψης. Για τον τελευταίο αυτόν λόγο άλλα ραντάρ συνήθως αποκλείονται από αυτή την ανάλυση.

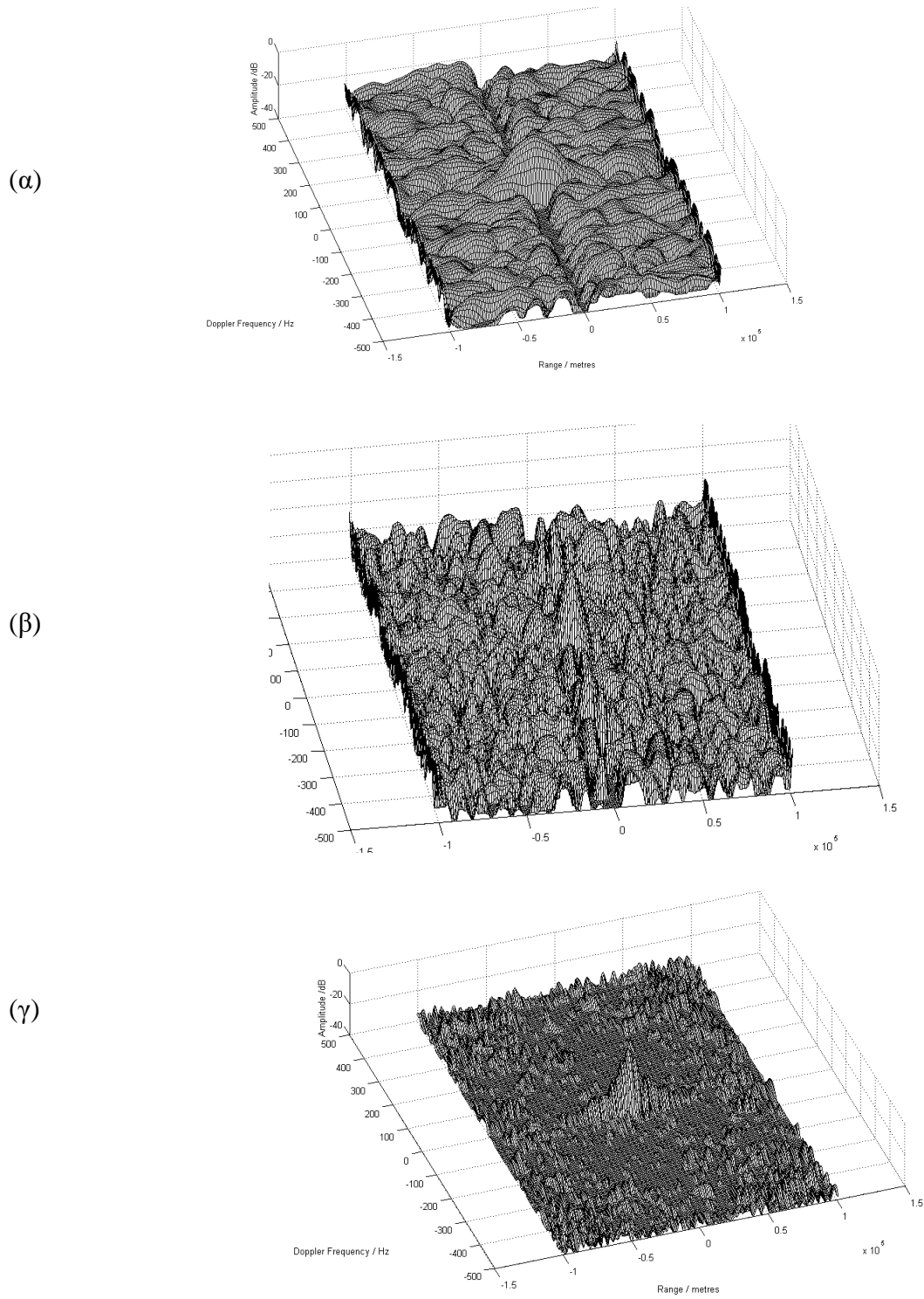
Γενικά, τα δορυφορικά σήματα, έχει βρεθεί ότι είναι ανεπαρκή για χρήση στα παθητικά ραντάρ είτε λόγω χαμηλής ισχύος, είτε επειδή οι τροχιές των δορυφόρων εκπέμπουν σπάνια ακτινοβολία.

2.3 Ιδιότητες Διαμόρφωσης

Όπως συνοπτικά συζητήθηκε προηγουμένως, τα χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα. Γι' αυτό το λόγο οι ψηφιακές μεταδόσεις είναι πιο ευνοϊκές από τις αναλογικές.

Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι το ραδιόφωνο FM. Δεδομένης της ευρείας διαθεσιμότητάς του και της λογικής ισχύος μετάδοσής του, το ραδιόφωνο FM έχει αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό για σκοπούς PCL τα πρώτα χρόνια του 21^{ου} αιώνα. Παρόλα αυτά η διαμόρφωση του ραδιοφώνου FM είναι αναλογική πράγμα που σημαίνει ότι το πραγματικό στιγμιαίο εύρος ζώνης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιεχόμενο του προγράμματος που μεταδίδεται. Συγκεκριμένα η ροκ μουσική φαίνεται να είναι πιο

επωφελής λόγω του συγκριτικά μεγάλου σταθερού εύρους ζώνης, ενώ προφορικές μεταδόσεις όπως οι ειδήσεις είναι λιγότερο ευνοϊκές, όπως μπορούμε να δούμε παρακάτω.



Εικόνα 6: Κυματομορφές Παθητικών Ραντάρ[12] (α) BBC Radio 4 (news) 93,5 MHz
(β) Jazz FM (fast tempo) 102,2 MHz
(γ) DAB 222,4 MHz

Απαιτείται λοιπόν προσεκτική επιλογή του πομπού που θα χρησιμοποιηθεί για να υπάρξει βέλτιστη απόδοση.

Για το λόγο αυτό η εκμετάλλευση του ραδιοφώνου FM άρχισε να μειώνεται ραγδαία , καθώς άλλες υπηρεσίες ψηφιακής εκπομπής τέθηκαν σε λειτουργία, όπως η DAB και η DVB-T, δηλαδή το επίγειο ψηφιακό ραδιόφωνο και τηλεόραση αντίστοιχα. Οι παραπάνω υπηρεσίες χρησιμοποιούν σχήμα διαμόρφωσης ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Modulation - OFDM), χαρακτηριστικά σταθερού σήματος και συγκεκριμένα σταθερό εύρος ζώνης και προβλέψιμα χαρακτηριστικά πλευρικών λοβών (Εύρους -Doppler).

Παρόλα αυτά τα σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης παρουσιάζουν και μειονεκτήματα που σχετίζονται κυρίως με τις περιοδικότητες στη δομή του σήματος. Αυτές οι περιοδικότητες στο μεταδιδόμενο σήμα εισάγονται για διάφορους σκοπούς (πχ για σκοπούς συγχρονισμού) αλλά εισάγουν επίσης αντικείμενα στη διαδικασία επεξεργασίας των παθητικών ραντάρ που οδηγούν σε πιθανούς λανθασμένους συναγερμούς αν δεν αντισταθμιστούν καταλλήλως.

Wi-Fi, WiMAX και το λιγότερο δημοφιλές HiperLAN είναι επίσης ψηφιακοί μεταδότες που βασίζονται στη διαμόρφωση OFDM. Η διαθεσιμότητά τους είναι οριακή (WiMAX, HiperLAN) ή μειώνεται σε πολύ μικρά εύρη (Wi-Fi). Παρόλα αυτά η δυνατότητα εκμετάλλευσης σημάτων Wi-Fi για επιτήρηση μικρής εμβέλειας έχει αποδειχθεί.

Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπως το GSM προσφέρουν ευρεία κάλυψη και είναι πολύ καλοί υποψήφιοι ευκαιριακοί πομποί για PCL. Το DAB είναι επίσης καλός υποψήφιος αλλά η εκμετάλλευσή του εξαρτάται σημαντικά από τη διαθεσιμότητα των ψηφιακών ραδιοφωνικών εκπομπών. Στην πραγματικότητα μόνο μερικές χώρες στην Ευρώπη προσφέρουν αυτές τις υπηρεσίες.

Από την άλλη πλευρά μόνο το DVB-T επί του παρόντος αντιπροσωπεύει τον περισσότερο χρησιμοποιούμενο ευκαιριακό πομπό για PCL. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το DVB-T είναι διαθέσιμο στις περισσότερες χώρες, χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM, έχει επαρκές εύρος για τις περισσότερες εφαρμογές ραντάρ PCL και επαρκείς τιμές EIRP.

Μια ανεπιθύμητη ιδιότητα του DAB και του DVB-T είναι ότι συνήθως λειτουργούν σε δίκτυο SFN (Single Frequency Network). Σε ένα δίκτυο SFN, όλοι οι πομποί που ανήκουν στο δίκτυο αυτό, μεταδίδουν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα στις ίδιες συχνότητες. Από πλευράς PCL αυτό σημαίνει ότι πολλαπλά αντίγραφα του σήματος αναφοράς θα συλλεχθούν στο δέκτη (δηλ. από πολλαπλές διαδρομές) και ότι ένας στόχος ίσως δημιουργήσει πολλαπλά σήματα ηχούς στο δέκτη (ένα για κάθε κοντινό πομπό). Κατά συνέπεια ο γεωγραφικός

εντοπισμός του στόχου γίνεται πολύπλοκος καθώς θα υπάρχουν διαφορούμενες σχέσεις μεταξύ των σημάτων ηχούς και των πομπών που τις δημιουργούν.

Ακόμα και υπό την παρουσία αυτών των μειονεκτημάτων, τα πειραματικά και λειτουργικά συστήματα PCL βασισμένα σε DVB-T έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε μια συγκριτική σύνοψη μεταξύ ραδιοφώνου FM DAB και DVB-T. [16]

	FM	DAB	DVB-T
Frequency band (MHz)	88-108	174-240	470-862
Network	MFN	SFN	SFN
Individual channel B/W	150 kHz (max.)	1.536 MHz	7.612 MHz
Typical ERP (kW)	2-250	0.5-10	1-100
Power density (Φ) at target in example scenarios	ERP = 100 kW; target at 50 km: $\Phi = -55$ dBW/m ²	ERP = 5 kW; target at 30 km: $\Phi = -64$ dBW/m ²	ERP = 50 kW; target at 50 km: $\Phi = -58$ dBW/m ²
Range-cell width (ΔR) and its dependencies	1-3 km depending on instantaneous B/W, bistatic angle	approx. 100 m depending on bistatic angle	approx. 20 m depending on bistatic angle
Typical integration times (s)	1	0.5	0.5

Εικόνα 7: Σύγκριση ραδιοφώνου FM, DAB και DVB-T

Όσον αφορά τους δορυφορικούς ευκαιριακούς πομπούς, τα συστήματα GNSS ξεκάθαρα προσφέρουν ευρεία κάλυψη, όμως η ισχύς ERP συνήθως δεν είναι αρκετή για εφαρμογή σε συστήματα PCL και τα λαμβανόμενα σήματα είναι έντονα εξασθενημένα λόγω των μεγάλων γραμμών βάσης μεταξύ πομπού και δέκτη. Παρόλα αυτά πειράματα PCL με χρήση συστήματος GNSS ως ευκαιριακό πομπό έχουν διεξαχθεί με επιτυχία τα τελευταία χρόνια.

Εξαίρεση αποτελούν οι δορυφόροι DVB-SH. Πρόθεση για το κοντινό μέλλον είναι αυτοί οι δορυφόροι να παρέχουν υπηρεσίες ψηφιακής μετάδοσης υψηλής ποιότητας σε φορητές συσκευές όπως smartphones και tablets. Σε αυτή την περίπτωση δεδομένων των αδύναμων χαρακτηριστικών των κεραιών λήψης των φορητών αυτών συσκευών προβλέπονται υψηλές τιμές ισχύος EIRP που καταστούν αυτούς τους πομπούς (μαζί με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά σημάτων OFDM) ελκυστικούς ευκαιριακούς πομπούς σημάτων PCL. Η πραγματική εμπορική επιτυχία αυτών των υπηρεσιών πιθανώς να οδηγήσει στη διαθεσιμότητά στο εγγύς μέλλον.

Δίκτυα MFN και SFN

Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή των αδειών μετάδοσης, η λειτουργία ενός δικτύου εκεί όπου η αναλογία μεταξύ φάσματος και εύρους ζώνης βελτιστοποιείται είναι σημαντική. Με βάση τις ιδιότητες διαμόρφωσης OFDM, εισήχθη το δίκτυο SFN σαν τρόπος βελτιστοποίησης φάσματος και εύρους ζώνης για μεταδόσεις DVB-T. Η τοπολογία SFN διαφέρει από την MFN, στην οποία όλοι οι πομποί μεταδίδουν σε διαφορετικές συχνότητες.

Σε ένα δίκτυο SFN όλοι οι πομποί μεταδίδουν στην ίδια συχνότητα καθιστώντας εφικτή τη βελτιστοποίηση φάσματος και εύρους. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο MFN μια υπηρεσία κοινής χρήσης φωτίζεται με τρεις διαφορετικές συχνότητες εκπομπής καταναλώνοντας εύρος ζώνης 24 MHz, ενώ σε μια προσέγγιση δικτύου SFN με βελτιστοποίηση εύρους καταλαμβάνονται μόνο 8 MHz. Ένα δίκτυο SFN απαιτεί όλοι οι πομποί να μεταδίδουν συνεκτικά το ίδιο σήμα στον ίδιο χρόνο. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται στη μετάδοση ταλαντωτές GPS. [6]

Πριν προχωρήσουμε είναι σημαντικό να αναλύσουμε κάποιες έννοιες που θα μας φανούν χρήσιμες και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάλυση της λειτουργίας των παθητικών ραντάρ.

2.4 Ραδιοδιατομή Στόχου (Radar Cross Section – RCS)

Όταν προσπίπτει Ηλεκτρομαγνητική - Η/Μ ακτινοβολία σε ένα σώμα επάγονται σε αυτό σήματα ηλεκτρικής πόλωσης αν είναι διηλεκτρικό ή αγωγιμότητας αν είναι ηλεκτρικά αγώγιμα.

Για τα ηλεκτρικά αγώγιμα σήματα παρατηρείται σκέδαση της προσπίπτουσας Η/Μ ενέργειας, δηλαδή ακτινοβολία προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Η Η/Μ ακτινοβολία που επιστρέφει από το στόχο πίσω στην πηγή εκπομπής αποτελεί το χρήσιμο εκείνο τμήμα της σκεδαζόμενης ενέργειας, που εκμεταλλευόμαστε για τη λειτουργία των ραντάρ.

Η ραδιοδιατομή ή ενεργή ραδιοτομή ραντάρ RCS αντιπροσωπεύει το μέτρο της ανακλαστικής ικανότητας ενός στόχου – σώματος στην προσπίπτουσα σε αυτό Η/Μ ακτινοβολία.

Αποτελεί το εμβαδόν μιας φανταστικής επιφάνειας, πάνω στην οποία όταν προσπέσει η Η/Μ ισχύς του ραντάρ και στη συνέχεια αυτή σκεδαστεί ιστροπικά, τότε στην κεραία του δέκτη θα επιστρέψει πυκνότητα ισχύος ίση με αυτή που προκαλεί και ο πραγματικός στόχος.

Επομένως η ραδιοτομή εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας (m^2) και ορίζεται ως 4π επί το λόγο της ισχύος ανά μονάδα στερεάς γωνίας (Watts/sterad) που ανακλάται από το στόχο με κατεύθυνση προς την κεραία λήψης του ραντάρ, προς την επιφανειακή πυκνότητα ισχύος (Watts/ m^2) του προσπίπτοντος επί του στόχου σήματος. [7, σελ 94]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2}$$

όπου:

σ : Η ραδιοτομή RCS (m^2) στόχου

R : Η απόσταση Radar – Στόχου

E_r : Η ένταση του ανακλώμενου από το στόχο Ηλεκτρικού Πεδίου

E_i : Η ένταση του προσπίπτοντος ηλεκτρικού Πεδίου στο στόχο

Η ραδιοτομή στόχου είναι στην ουσία ένα μέτρο για το πόσο ανιχνεύσιμος είναι ένας στόχος από ένα ραντάρ. Στόχος με μεγαλύτερη ραδιοτομή δείχνει ότι είναι ευκολότερα ανιχνεύσιμος.

Η ισχύς του πομπού και η απόσταση αυτού, ενώ είναι σημαντικοί παράγοντες για τον εντοπισμό στόχου, δεν επηρεάζουν τον υπολογισμό της ραδιοτομής, καθώς αυτή αποτελεί αποκλειστικά στοιχείο της ανακλαστικότητας του στόχου.

Η ραδιοτομή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση Αεροσκαφών σε μεγάλη ποικιλία εύρους. Για παράδειγμα, ένα Αεροσκάφος stealth (χαμηλής παρατηρησιμότητας) έχει τεχνικά – σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που του δίνουν χαμηλή ραδιοτομή (όπως απορροφητική βαφή, επίπεδες επιφάνειες, επιφάνειες με γωνίες τέτοιες ώστε να ανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία του ραντάρ προς άλλες κατευθύνσεις και όχι πίσω προς την πηγή) σε αντίθεση με ένα επιβατικό αεροπλάνο, το οποίο έχει υψηλή ραδιοτομή (γυμνό μέταλλο, στρογγυλεμένες επιφάνειες που εξασφαλίζουν ότι μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα ανακλαστεί πίσω στην πηγή, κεραιές κλπ).

Η ραδιοτομή αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για την ανάπτυξη της τεχνολογίας stealth των ραντάρ, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που αφορούν Αεροσκάφη και βαλλιστικούς πυραύλους.

Τα δεδομένα ραδιοτομής για τα σύγχρονα στρατιωτικά αεροσκάφη αποτελούν διαβαθμισμένες πληροφορίες.

2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ραδιοτομή

Μέγεθος

Κατά κανόνα όσο μεγαλύτερος είναι ο στόχος, τόσο πιο ισχυρή είναι η αντανάκλαση προς το ραντάρ και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη και η ραδιοτομή. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει και το μέγεθος του στόχου σχετικά με το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου από το ραντάρ σήματος.

Υλικό

Υλικά όπως το μέταλλο έχουν ισχυρή ανακλαστικότητα προς τα ραντάρ και έχουν την τάση να παράγουν ισχυρά σήματα. Το ξύλο, το ύφασμα, το πλαστικό και ο υαλοβάμβακας είναι λιγότερο ανακλαστικά ή ακόμη και αόρατα από τα ραντάρ. Ακόμη και ένα λεπτό στρώμα μετάλλου μπορεί να κάνει ένα αντικείμενο να έχει ισχυρή ανακλαστικότητα.

Υλικά που απορροφούν την ακτινοβολία (Radiation Absorbent Material – RAM)

Τα υλικά RAM είναι ειδικά σχεδιασμένα ώστε να απορροφούν την ακτινοβολία όσο πιο αποτελεσματικά μπορούν και από όσο το δυνατόν περισσότερες κατευθύνσεις. Χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία stealth για τη συγκάλυψη από την ανίχνευση ραντάρ. Η απορροφητικότητα ενός υλικού σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ραντάρ εξαρτάται από τη σύνθεσή του. Μια κοινή παρεξήγηση είναι ότι τα υλικά RAM κάνουν ένα αεροσκάφος αόρατο στα ραντάρ. Μπορούν φυσικά να μειώσουν σημαντικά τη ραδιοτομή στόχου σε συγκεκριμένες συχνότητες, αλλά δε συντελούν στο να το κάνουν αόρατο σε όλες. Κανένα υλικό RAM δεν είναι κατάλληλο για απορρόφηση ακτινοβολίας σε όλες τις συχνότητες, αλλά συγκεκριμένες συνθέσεις έχουν καλύτερη απορροφητικότητα σε ορισμένες συχνότητες από ότι άλλες. Σε αεροσκάφη όπως το SR-71 Blackbird , χρησιμοποιήθηκε ειδική βαφή iron ball paint, αποτελούμενη από μικρές μπάλες μεταλλικής επίστρωσης. Η ακτινοβολία ραντάρ που δέχονται τα αεροσκάφη αυτά δεν ανακλάται αλλά μετατρέπεται σε θερμότητα.

Σχήμα – Κατευθυντικότητα – Προσανατολισμός

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ραδιοτομή είναι η **γωνία πρόσπτωσης** (incident angle), δηλαδή η γωνία με την οποία η δέσμη ραντάρ χτυπά ένα συγκεκριμένο σημείο του στόχου, που εξαρτάται από το σχήμα και τον προσανατολισμό του στόχου προς την κατεύθυνση ραντάρ. Επίσης η **γωνία ανάκλασης**, δηλαδή η γωνία με την οποία η ανακλώμενη δέσμη αφήνει το στόχο και που εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, και τέλος η **πόλωση** της εκπεμπόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας σχετικά με τον προσανατολισμό του στόχου.

Για παράδειγμα, σε Αεροσκάφη με επιφάνειες επίπεδες και πολύ γωνιακές, η ακτινοβολία ραντάρ θα προσπέσει με μεγάλη γωνία που θα αναπηδήσει στη συνέχεια με μια παρομοίως μεγάλη γωνία ανάκλασης. Απότομες και αιχμηρές άκρες, αποτρέπουν τις στρογγυλεμένες επιφάνειες, οι οποίες έχουν συχνά κάποιο τμήμα της επιφάνειάς τους στραμμένο κανονικά προς τη πηγή ραντάρ, με αποτέλεσμα προσπίπτουσα ακτινοβολία με κανονική γωνία από το ραντάρ να ανακλαστεί επίσης με κανονική γωνία, πράγμα που θα δημιουργήσει ένα ισχυρά ανακλώμενο σήμα.

Επίπεδες Επιφάνειες

Ο υπολογισμός του RCS με αριθμητικές μεθόδους, εκτελείται μόνο στην περίπτωση απλών γεωμετρικών σχημάτων (όπως π.χ. η σφαίρα), ενώ για τα πιο σύνθετα σχήματα

απαιτείται προσέγγιση μέσω αριθμητικών μεθόδων σε υπολογιστή ή απευθείας πειραματικές μετρήσεις μέσω εκπομπών ραντάρ. Υπάρχουν προσεγγιστικοί κώδικες υπολογισμού (software) του RCS πραγματικών στόχων, οι οποίοι συνδυάζουν γεωμετρική προσέγγιση και φυσική οπτική.

Το μέγεθος της εικόνας του στόχου που μετράται από τη ραδιοτομή εκφράζεται σε τετραγωνικά μέτρα και δεν αντιστοιχεί στην πραγματική του γεωμετρία. Τα σύγχρονα αεροσκάφη stealth έχουν RCS συγκρινόμενο με ένα πουλί ή ένα μεγάλο έντομο, αν και αυτό ποικίλει και εξαρτάται σημαντικά από το Αεροσκάφος και το ραντάρ.[19]

Παρακάτω μπορούμε να δούμε συμβολικά τη ραδιοτομή κάποιων αντικειμένων:

Αντικείμενο	Ραδιοτομή (m^2)
Άνθρωπος	1
Πουλί	0,01
Έντομο	0,00001
Stealth Τελευταίας Τεχνολογίας	0,000001
Μικρό Μαχητικό Α/Φ	2-3
Μεγάλο Μαχητικό Α/Φ	5-6
Cargo Α/Φ	100

2.4.2 Τεχνικές Μείωσης Ραδιοτομής

Η μείωση της ραδιοτομής είναι πολύ σημαντική στην τεχνολογία stealth για Αεροσκάφη, πυραύλους, πλοία και άλλα στρατιωτικά οχήματα αφού έτσι ελαττώνεται η πιθανότητα εντοπισμού από εχθρικά ραντάρ. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές μείωσης της ραδιοτομής[25]:

α) **Τροποποίηση της γεωμετρίας** Με την τροποποίηση της γεωμετρίας, το σχήμα των ανακλώμενων επιφανειών του στόχου σχεδιάζεται έτσι ώστε να αντανakλά ενέργεια μακριά από την πηγή. Αυτό που θέλουμε να επιτευχθεί είναι η δημιουργία ενός «κώνου-σιωπής» (cone of silence) σχετικά με την κατεύθυνση κίνησης του στόχου. Η μέθοδος αυτή καταπολεμάται με τη χρήση παθητικών (πολυστατικών) ραντάρ.

β) **Χρήση απορροφητικών υλικών και βαφής.** Απορροφούν μέρος της προσπίπτουσας Η/Μ ακτινοβολίας και τη μετατρέπουν σε θερμότητα (μειονέκτημα εδώ αποτελεί το αυξημένο βάρος του Α/Φ)

γ) **Ανακατεύθυνση της ανακλώμενης ενέργειας χωρίς τροποποίηση γεωμετρίας** Αυτή η τεχνική είναι σχετικά νέα σε σύγκριση με άλλες τεχνικές κυρίως μετά την εφεύρεση των

μετα-επιφανειών (metasurfaces). Ο πρωταρχικός στόχος της μεταβολής της γεωμετρίας είναι να ανακατευθύνει τα ανακλώμενα κύματα μακριά από την πηγή. Ωστόσο, αυτό ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο την απόδοση από άποψη αεροδυναμικής. Μια εφικτή λύση, η οποία έχει διερευνηθεί εκτενώς τον τελευταίο καιρό, είναι να χρησιμοποιηθούν μετα-επιφάνειες που μπορούν να ανακατευθύνουν τα διάσπαρτα κύματα χωρίς να μεταβάλλουν τη γεωμετρία του στόχου.

δ) **Ενεργή Ακύρωση (Active Cancellation)** Με την ενεργή ακύρωση, ο στόχος παράγει σήμα ραντάρ ίσο σε ένταση αλλά αντίθετο σε φάση με την προβλεπόμενη ανάκλαση ενός σήματος ραντάρ. Αυτό δημιουργεί καταστροφικές παρεμβολές μεταξύ των ανακλώμενων και παραγόμενων σημάτων, με αποτέλεσμα μειωμένο RCS. Για να ενσωματωθούν τεχνικές ενεργούς ακύρωσης, πρέπει να είναι γνωστά τα ακριβή χαρακτηριστικά της κυματομορφής και της γωνίας άφιξης του ακτινοβολούμενου σήματος ραντάρ, καθώς καθορίζουν τη φύση της παραγόμενης ενέργειας που απαιτείται για την ακύρωση. Εκτός από τα συστήματα ραντάρ απλής ή χαμηλής συχνότητας, η εφαρμογή τεχνικών ενεργούς ακύρωσης είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω των πολύπλοκων απαιτήσεων επεξεργασίας και της δυσκολίας πρόβλεψης της ακριβούς φύσης του ανακλώμενου σήματος ραντάρ.

ε) **Plasma-based RCS reduction** είναι μια προτεινόμενη διαδικασία για τη χρήση ιονισμένου αερίου (πλάσμα) για τη μείωση του RCS ενός αεροσκάφους. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ιονισμένου αερίου έχουν μελετηθεί εκτενώς για πολλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της απόκρυψης αεροσκαφών από ραντάρ ως τεχνολογίας stealth. Διάφορες μέθοδοι μπορεί εύλογα να είναι σε θέση να σχηματίσουν ένα στρώμα ή νέφος πλάσματος γύρω από ένα όχημα για εκτροπή ή απορρόφηση ραντάρ, από απλούστερες ηλεκτροστατικές ή ραδιοσυχνότητες (RF) έως πιο πολύπλοκες εκκενώσεις λέιζερ. Θεωρητικά είναι δυνατό να μειωθεί το RCS με αυτόν τον τρόπο, αλλά στην πράξη μπορεί να είναι πολύ δύσκολο.

2.4 Παρασιτικές Επιστροφές – Clutter

Το μεταδιδόμενο σήμα φωτίζει όχι μόνο το στόχο, αλλά και το περιβάλλον γύρω από αυτό. Σε μια αστική περιοχή για παράδειγμα, ένα μονοστατικό ραντάρ θα λάβει επιστροφές από ανεπιθύμητες πηγές, όπως το έδαφος, κατακρημνίσεις, πουλιά κτλ.

Αυτές οι ανεπιθύμητες παρασιτικές επιστροφές στα συστήματα ραντάρ ονομάζονται **clutter**, μπορούν να είναι κάθε μορφής ανεπιθύμητες ηχώ, προερχόμενες από διάφορους σκεδαστές (διασκορπιστές) της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, πχ ξηρά, θάλασσα, νέφη, σμήνη πουλιών κλπ.

Γενικά, το clutter το οποίο επιδρά αρνητικά στην ανίχνευση των επιθυμητών στόχων, διακρίνεται σε επιφανειακό (surface clutter) και χωρικό (volume clutter).

Το **επιφανειακό** περιλαμβάνει επιστροφές από την ξηρά και τη θάλασσα, ενώ το χωρικό περιλαμβάνει επιστροφές κυρίως από τη βροχή και τα νέφη.

Για τη μέτρηση του clutter επιφανείας χρησιμοποιείται ο συντελεστής:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_c}{A_c}$$

όπου, σ_c είναι η ραδιοτομή RCS της σκεδάζουσας επιφανείας με γεωμετρικό εμβαδόν A_c , (ισοδύναμη ανακλαστική επιφάνεια).

Ο συντελεστής σ_0 εξαρτάται σημαντικά από την τραχύτητα και τον τύπο του εδάφους, την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας, καθώς επίσης και τη γωνία πρόσπτωσης και τη συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Αντίστοιχα για τη μέτρηση του **χωρικού clutter** χρησιμοποιείται ο συντελεστής :

$$n = \frac{\sigma_c}{V_c}$$

όπου, σ_c είναι η ραδιοτομή RCS του σκεδάζοντος τμήματος στο χώρο, με γεωμετρικό όγκο V_c (ισοδύναμη ανακλαστική επιφάνεια). [7, σελ 349]

Στην περίπτωση βροχής, ο συντελεστής σ_0 εξαρτάται σημαντικά από το ρυθμό βροχόπτωσης τη συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Το clutter μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ρυθμίζοντας τη μετάδοση και τη λήψη, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι κατά τη μετάδοση φωτίζεται μόνο η περιοχή ενδιαφέροντος και κατά τη λήψη η κεραία να μην έχει ευαισθησία σε κατευθύνσεις εκτός ενδιαφέροντος.

Η ισχύς του επιφανειακού clutter μπορεί να συγκριθεί με την ισχύ επιστροφής από το στόχο και να εξεταστεί υπολογίζοντας το λόγο ισχύος σήματος προς clutter (signal – to – clutter ratio - SCR).

3. Το Διστατικό Ραντάρ

3.1 Διαμόρφωση Διστατικού Ραντάρ

Συγκριτικά με το μονοστατικό ραντάρ, το διστατικό έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και γι' αυτό είναι πιο δύσκολο να υλοποιηθεί εξ' αιτίας της γεωμετρίας του.

Στην περίπτωση του μονοστατικού ραντάρ, ο εντοπισμός στόχου περιλαμβάνει το φωτισμό του στόχου από τον πομπό και τον εντοπισμό και επεξεργασία της ηχούς από το δέκτη. Με απλά λόγια, το παραδοσιακό ραντάρ λειτουργεί εκπέμποντας καθορισμένα σήματα τα οποία στη συνέχεια ανακλώνται από τους στόχους. Κατόπιν αυτές οι ανακλάσεις λαμβάνονται και επεξεργάζονται.

Σε αυτή την περίπτωση συμβατικού ραντάρ, ο χρόνος μετάδοσης του παλμού και η μεταδιδόμενη κυματομορφή είναι γνωστές με ακρίβεια. Αυτό επιτρέπει τον εύκολο εντοπισμό του εύρους του στόχου και τη χρήση ενός προσαρμοσμένου φίλτρου για την επίτευξη του βέλτιστου σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη.

Κατά τη λειτουργία προσαρμοσμένου φίλτρου στέλνεται ένα γνωστό σήμα και το ανακλώμενο σήμα σχετίζεται με το γνωστό αυτό σήμα. Αυτή η διαδικασία χρησιμεύει στον εντοπισμό κοινών στοιχείων μεταξύ γνωστού και ανακλώμενου σήματος. Γι' αυτό το λόγο ο δέκτης πρέπει να γνωρίζει τη μεταδιδόμενη κυματομορφή αλλά και τη φάση αυτής για να επιτευχθεί συνεκτική λειτουργία στο δέκτη.

Σε αντίθεση, ένα παθητικό ραντάρ δεν έχει απευθείας αυτή την πληροφορία (χρόνος μετάδοσης - κυματομορφή παλμού) και γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα αποκλειστικό κανάλι στο δέκτη, γνωστό ως κανάλι αναφοράς, για να ελέγχει κάθε πομπό που εκμεταλλεύεται και να δειγματοληπτει κάθε μεταδιδόμενη κυματομορφή.

Έτσι, το διασταθές ραντάρ χρησιμοποιεί μια διαφορετική διεργασία για να εντοπίσει το στόχο, μετρώντας :

i) Το συνολικό χρόνο μετάδοσης του σήματος από τον πομπό στο στόχο και από εκεί στο δέκτη, ώστε να εξαχθεί μια εκτίμηση συνολικού εύρους R_T+R_R , όπου:

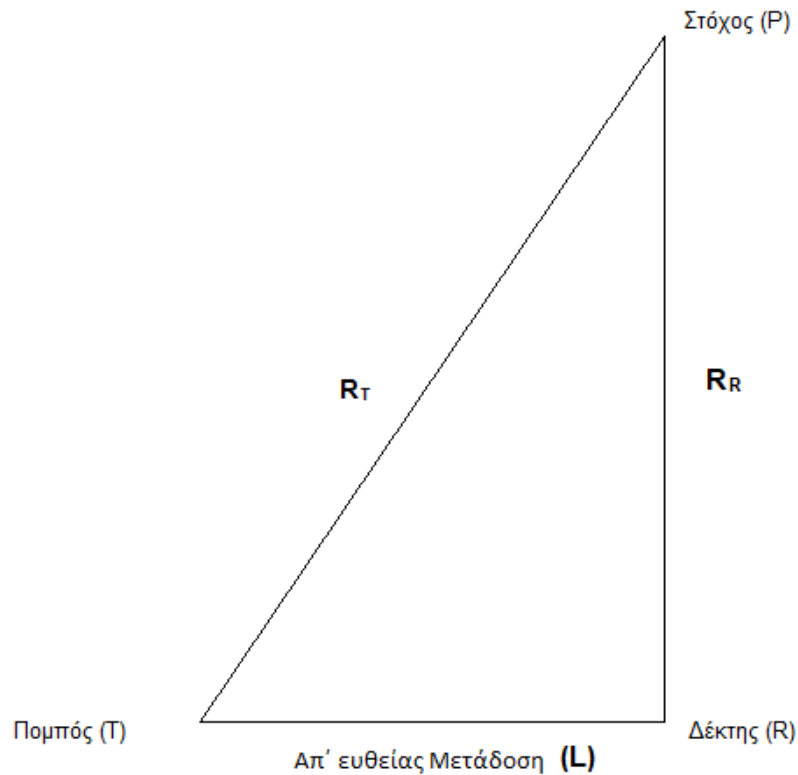
R_T : είναι το εύρος πομπού προς το στόχο και

R_R : είναι το εύρος στόχου προς το δέκτη

ii) Την κατεύθυνση άφιξης τους στόχου (Direction Of Arrival - DOA)

iii) Την απόσταση πομπού – δέκτη ή γραμμή βάση (baseline) L.

Στο μονοστατικό ραντάρ τα δύο αυτά μεγέθη ισούνται ($R_T=R_R$), όμως στο διστατικό διαφέρουν στις περισσότερες περιπτώσεις. Για τον υπολογισμό των αποστάσεων R_T και R_R απαιτείται η επίλυση του διστατικού τριγώνου, δηλαδή του τριγώνου πομπός – στόχος – δέκτης.



Εικόνα 8: Διστατικό Τρίγωνο

Για την επίλυση χρειάζεται μια εκτίμηση της θέσης του πομπού σε σχέση με το δέκτη .

Όλα τα διστατικά ραντάρ έχουν τρία διακριτικά χαρακτηριστικά, την ανάγκη για σύνδεση δεδομένων μεταξύ πομπού και δέκτη, τη γεωμετρία, που καθορίζεται από το διστατικό τρίγωνο, και τις στρατηγικές που σχεδιάζονται από το διστατικό ραντάρ είτε για να μειώσουν τις ανεπιθύμητες συνέπειες της γεωμετρίας είτε περιστασιακά για να επωφεληθούν από τα χρήσιμα αποτελέσματα αυτής.

3.2 Διστατική Γεωμετρία

Καθώς τα παθητικά ραντάρ είναι εκ φύσεως διστατικά ή ακόμη και πολυστατικά, μια ανάλυση των βασικών εννοιών του διστατικού ραντάρ θα βοηθήσει στην κατανόηση των διαδικασιών των παθητικών ραντάρ. Η διστατική εξίσωση ραντάρ, που θα αναλύσουμε στη συνέχεια, βασίζεται στη διστατική γεωμετρία με διαφορετικές θέσεις πομπού - δέκτη και θα οδηγήσει στη ανάλυση εύρους -Doppler.

Διστατική γεωμετρία καλείται η σχετική θέση και κίνηση του πομπού, στόχου και δέκτη. Εδώ θα χρησιμοποιήσουμε μια διανυσματική προσέγγιση για τις θέσεις πομπού, στόχου και δέκτη όπου δέκτης και στόχος θα βρίσκονται σε κίνηση ενώ ο πομπός θα είναι στατικός και μη συνεργάσιμος.

Θεωρούμε ότι ο δέκτης βρίσκεται σε θέση:

$$\mathbf{R} = [x_R, y_R, z_R]^T \quad (3.2.1)$$

Όπου \mathbf{x}_R , \mathbf{y}_R , \mathbf{z}_R οι καρτεσιανές συντεταγμένες θέσης του δέκτη. Ομοίως το κέντρο της κεραίας του πομπού βρίσκεται σε θέση:

$$\mathbf{T} = [x_T, y_T, z_T]^T \quad (3.2.2)$$

και ο στόχος σε θέση: $\mathbf{P} = [x, y, z]^T \quad (3.2.3)$

Ο δέκτης έχει ταχύτητα $\mathbf{v}_R = [v_x^R, v_y^R, v_z^R]^T \quad (3.2.4)$

και ο στόχος $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]^T \quad (3.2.5)$

Ορίζουμε ως γραμμή βάσης (baseline) το διάνυσμα από τον πομπό ως το δέκτη μήκους \mathbf{L} , όπως παρακάτω:

$$\mathbf{L} = |\mathbf{T} - \mathbf{R}| = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2 + (z_T - z_R)^2} \quad (3.2.6)$$

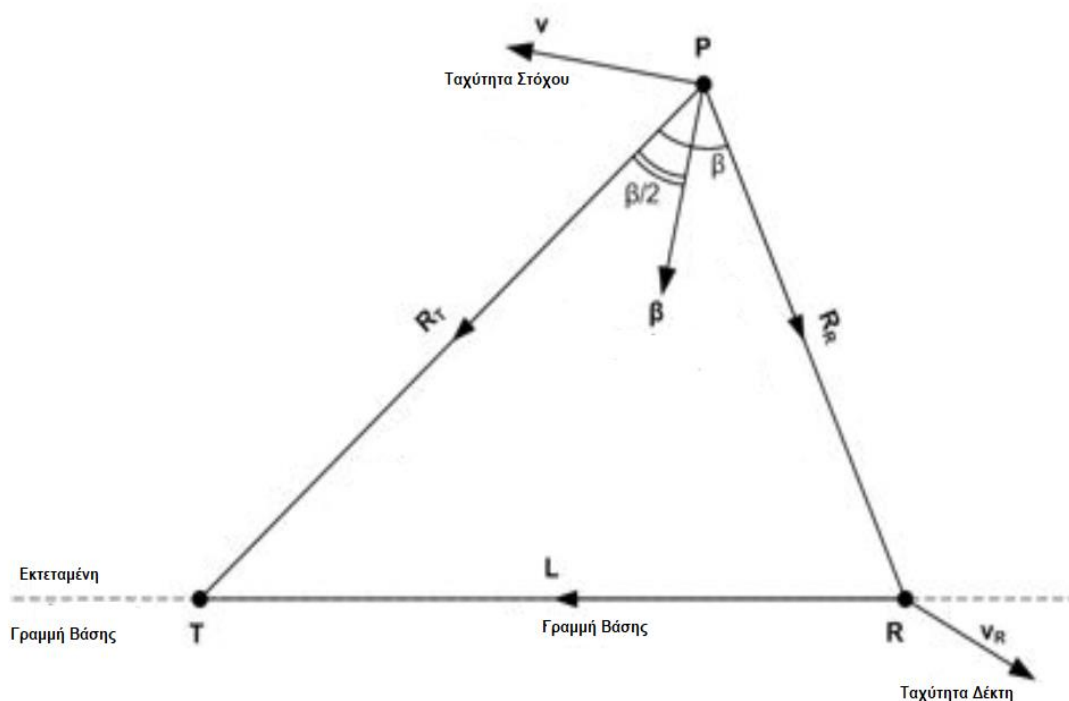
Αντίστοιχα ορίζουμε τα εύρη – αποστάσεις **στόχου – πομπού** (R_T) και **στόχου – δέκτη** (R_R) αντίστοιχα ως εξής :

$$R_T = |T - P| = \sqrt{(x_T - x)^2 + (y_T - y)^2 + (z_T - z)^2} \quad (3.2.7)$$

$$R_R = |R - P| = \sqrt{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2 + (z_R - z)^2} \quad (3.2.8)$$

Η **διαστατική γωνία β** είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων στόχου – πομπού και στόχου - δέκτη και ποικίλει από 180° , όταν ο στόχος βρίσκεται πάνω στη γραμμή βάσης, έως 0° όταν ο στόχος βρίσκεται πάνω στην εκτεταμένη γραμμή βάσης ή ψευδομονοστατική περιοχή [17].

$$\beta = \cos^{-1} \frac{R_T * R_R}{R_R * R_T} \quad (3.2.9)$$

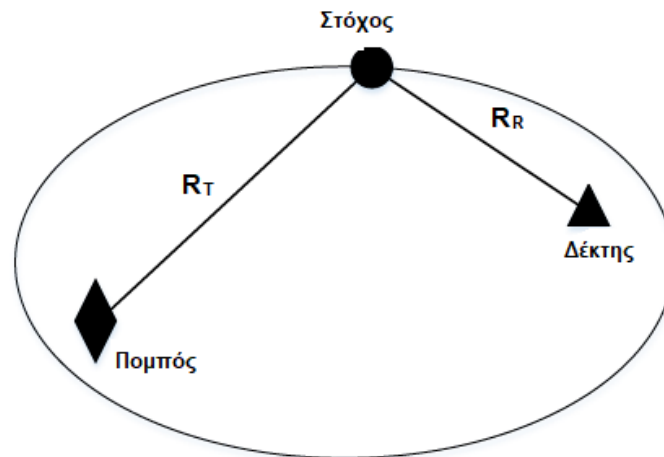


Εικόνα 9: Διστατική Γεωμετρία και Διανύσματα

3.3 Τεχνικές Εντοπισμού Στόχου

Η συσχέτιση (cross correlation) του σήματος αναφοράς με το σήμα επιστροφής από το στόχο, επιτρέπουν την εκτίμηση μέτρησης του διστατικού εύρους (bistatic range) R_B του στόχου. Το **διστατικό εύρος** είναι το άθροισμα εύρους στόχου – πομπού R_T συν το εύρος στόχου - δέκτη R_R

$$R_B = R_T + R_R \quad (3.3.1)$$

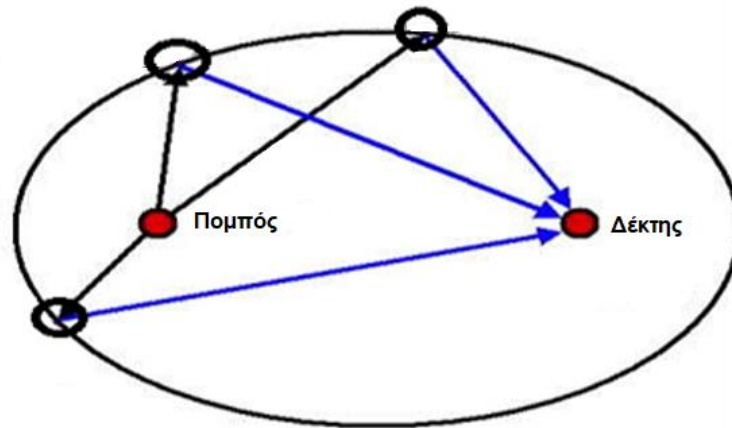


Εικόνα 10: Διστατικό Εύρος - Bistatic Range

Μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό στόχων στα διστατικά και πολυστατικά ραντάρ είναι η Διαφορά Χρόνου Άφιξης (**Time Difference Of Arrival - TDOA**) των δυο σημάτων (σήματος αναφοράς και ηχούς από το στόχο).

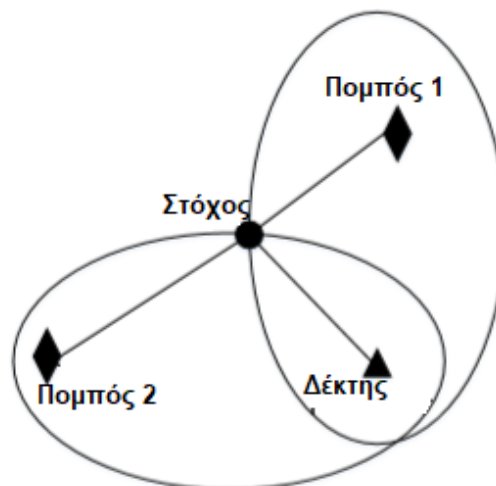
Ο δέκτης του παθητικού ραντάρ μετρά την TDOA του σήματος αναφοράς και της ηχούς. Η μέτρησης του διστατικού εύρους προκύπτει από μέτρηση TDOA, λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα διάδοσης των Η/Μ κυμάτων. Η συσχέτιση (cross-correlation) μεταξύ σήματος αναφοράς και της ανακλώμενης ηχούς, οδηγεί στη δισδιάστατη μήτρα εύρους-Doppler. Αυτό σημαίνει ότι διαφορετικά πιθανά αντίγραφα διαμόρφωσης Doppler του σήματος αναφοράς συσχετίζονται (cross-correlated) με τα σήματα ηχούς. Ως αποτέλεσμα ένα σύστημα παθητικού ραντάρ μπορεί επίσης να εκτιμήσει τη διστατική συχνότητα Doppler.

Δυστυχώς η Διαφορά Χρόνου Άφιξης – TDOA δεν έχει ως αποτέλεσμα μόνο μία θέση, αλλά λύση της όπως είναι γνωστό αποτελούν όλα τα σημεία μιας **έλλειψης** με εστίες τον πομπό και το δέκτη και τα οποία έχουν όλα την ίδια TDOA.



Εικόνα 11: Όλα τα σημεία της έλλειψης έχουν ίδια TDOA

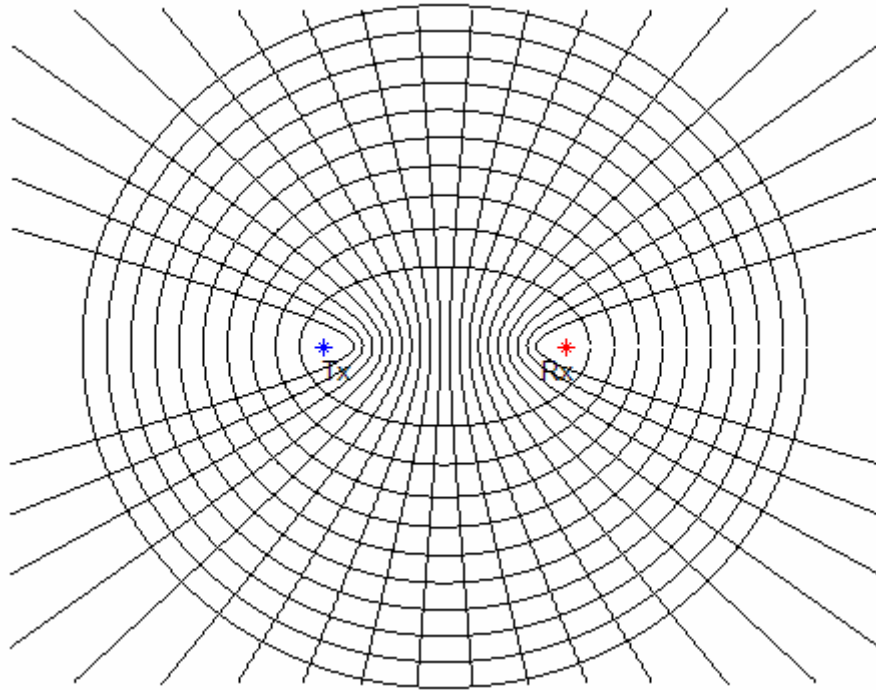
Για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του στόχου, μπορούν να γίνουν ταυτόχρονες μετρήσεις **αθροισμάτων αποστάσεων** από πολλαπλά ζεύγη πομπού δέκτη (τουλάχιστον δύο), τα οποία στη συνέχεια θα σχεδιαστούν ως ελλείψεις, με εστίες κάθε έλλειψης τα αντίστοιχα ζεύγη πομπού – δέκτη. Τα σημεία τομής των ελλείψεων θα δώσουν τελικά και την ακριβή θέση στόχου. Παρακάτω μπορούμε να δούμε πώς δύο ανεξάρτητες μετρήσεις με έναν δέκτη που εκμεταλλεύεται δύο διαφορετικούς πομπούς μας δίνουν την ακριβή θέση στόχου, μέσω της τομής των αντίστοιχων ελλείψεων: [11]



Εικόνα 12: Διασταύρωση καμπυλών

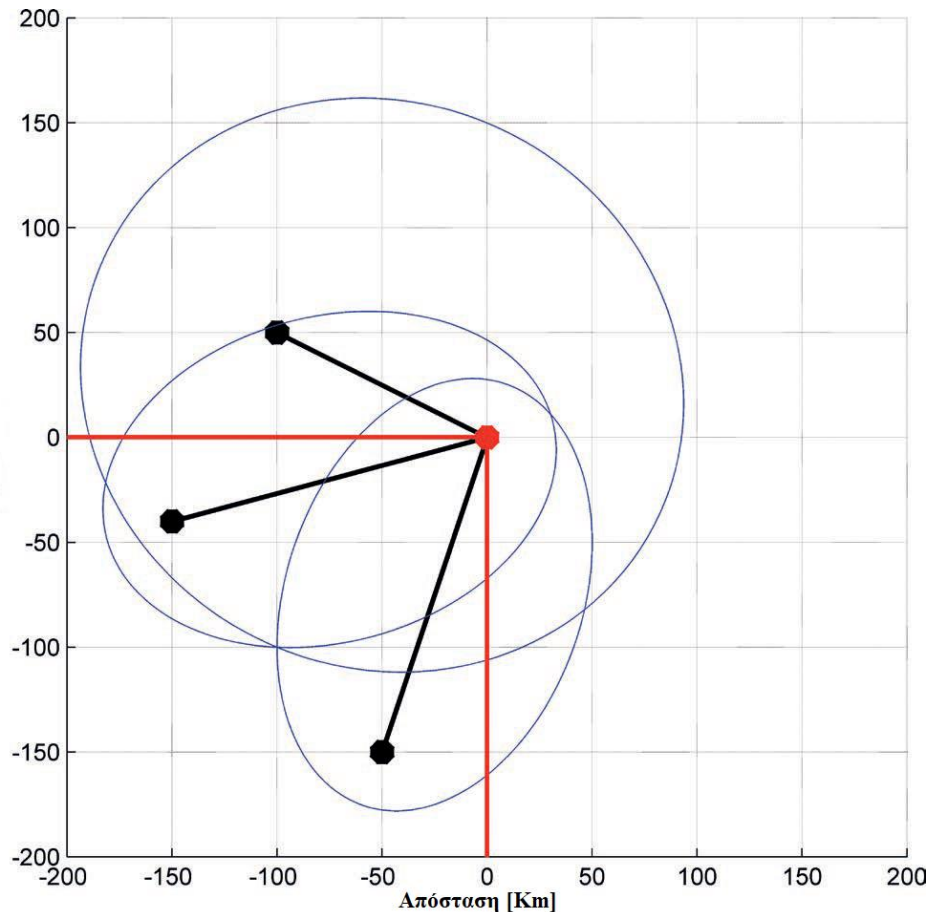
Η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης στόχου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εύρος ζώνης του χρησιμοποιούμενου σήματος και από το εύρος δέσμης της κεραίας λήψης και συχνά θεωρείται ως κριτήριο για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας των συστημάτων παθητικών ραντάρ για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Αντίστοιχα λειτουργεί και η τεχνική **multilateration** , κατά την οποία μετρώνται επίσης αποστάσεις για να εντοπιστεί ο στόχος. Εδώ χρησιμοποιείται ένας πομπός και πολλαπλοί δέκτες (τουλάχιστον δύο) και οι διαφορές των αποστάσεων πομπού – στόχου και στόχου - δέκτη μας δίνουν υπερβολές με εστίες κάθε **υπερβολής**, όπως και πριν, τα αντίστοιχα ζεύγη πομπού – δέκτη. Η θέση του στόχου καθορίζεται από το σημείο τομής των υπερβολών.



Εικόνα 13: Ελλείψεις και Υπερβολές σταθερών αθροισμάτων – διαφορών απόστασης αντίστοιχα, με εστίες τις θέσεις πομπού και δέκτη

Παρακάτω μπορούμε να δούμε την απεικόνιση ενός πολυστατικού συστήματος ραντάρ. Τρεις πομποί και ένας δέκτης, όλοι με ομοιοκατευθυντικές κεραιές, υποτίθεται ότι βλέπουν ταυτόχρονα το στόχο. Για κάθε ζεύγος πομπού – δέκτη έχει σχεδιαστεί το σταθερό εύρος στόχου. Είναι φανερό ότι ο στόχος βρίσκεται στην τομή των τριών ελλείψεων. Οι υπόλοιπες τομές, οι οποίες δεν αντιστοιχούν σε πραγματικούς στόχους, ονομάζονται φαντάσματα (ghosts) και ως τέτοια θα αναγνωρίζονται στην επεξεργασία σήματος.



Εικόνα 14: Πολυστατικό ραντάρ τριών πομπών (μαύρες κουκίδες) και ενός δέκτη (κόκκινη κουκίδα) Ύπαρξη στόχου στη θέση [-100km,-100km]

Μπορούν εύκολα να εντοπιστούν στην παραπάνω εικόνα καθώς πρόκειται για μία υπεραπλουστευμένη περίπτωση. Στην πραγματική ζωή ο αριθμός των πομπών μπορεί να είναι πάνω από τρεις, οι ελλείψεις είναι στην πραγματικότητα ελλειψοειδή και ο αριθμός των στόχων είναι συνήθως μεγαλύτερος του ενός. Ένα παράδειγμα πραγματικού συστήματος μας δίνει ο Hawlad, ο οποίος μας δίνει μια γενική έκφραση του μέγιστου αριθμού «φαντασμάτων» που δημιουργούνται από T στόχους και M ζεύγη πομπού-δέκτη.

$$f(M, T) = (2T^2 - T)(M^2 - M)/2 \quad (3.3.2)$$

Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει το μέγιστο αριθμό τομών (ή φαντασμάτων) ως συνάρτηση Μ ζευγών πομπού – δέκτη και Τ στόχων. Βλέπουμε μια ραγδαία αύξηση αυτών καθώς προστίθενται νέοι πομποί ή/και στόχοι.

<i>M \ T</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	6	15	28	45	66	91	120	153	190
3	3	18	45	84	135	198	273	360	459	570
4	6	36	90	168	270	396	546	720	918	1,140
5	10	60	150	280	450	660	910	1,200	1,530	1,900
6	15	90	225	420	675	990	1,365	1,800	2,295	2,850
7	21	126	315	588	945	1,386	1,911	2,520	3,213	3,990
8	28	168	420	784	1,260	1,848	2,548	3,360	4,284	5,320

Πίνακας 1: Μέγιστος αριθμός ‘φαντασμάτων’ που δημιουργούνται από Τ στόχους και Μ ζεύγη πομπού-δέκτη

Για οκτώ ζεύγη πομπού – δέκτη ($M=8$) και έναν στόχο ($T=1$) έχουμε

$$f(8, 1) = 28$$

Αντίστοιχα για πέντε και δέκα στόχους ($T=5$ και $T=10$) έχουμε

$$f(8, 5) = 1260 \quad \text{και} \quad f(8, 10) = 5320 \quad \text{αντίστοιχα.}$$

Για να μειώσουμε τον αριθμό των φαντασμάτων μια ένδειξη της κατεύθυνσης θα ήταν πολύ αποτελεσματική. Αν ο δέκτης είναι σε θέση να καθορίσει σε ποιο τεταρτημόριο βρίσκεται ο στόχος, τότε ο μέγιστος αριθμός «φαντασμάτων» μειώνεται δραστικά. Αυτός ο χωρικός διαχωρισμός θα μειώσει επίσης τον αριθμό των στόχων οι οποίοι δημιουργούν ελλείψεις σταθερού εύρους και κατ’ επέκταση τον αριθμό των «φαντασμάτων».

Το παραπάνω επεξηγείται μέσω του παραδείγματος των δύο κόκκινων γραμμών στην εικόνα 14, όπου ο αριθμός των υποψηφίων μειώνεται από τους τέσσερις στους δύο. Αυτή η εκτίμηση επιτυγχάνεται φυσιολογικά από την ακτινοβολία της κεραίας λήψης (beamforming) [6]

3.4 Ανάλυση Εύρους – Doppler

Η ανάλυση ενός ραντάρ χωρίζεται σε επεξεργασία εύρους και Doppler.

Συμβατικά η **ανάλυση εύρους** παλμικού μονοστατικού ραντάρ ΔR_M ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο στόχων, η οποία ακόμη επιτρέπει στο ραντάρ να διακρίνει τις αντίστοιχες επιστροφές και εκφράζεται μέσω της γνωστής εξίσωσης:

$$\Delta R_M = \frac{c * \tau}{2} \quad (3.4.1)$$

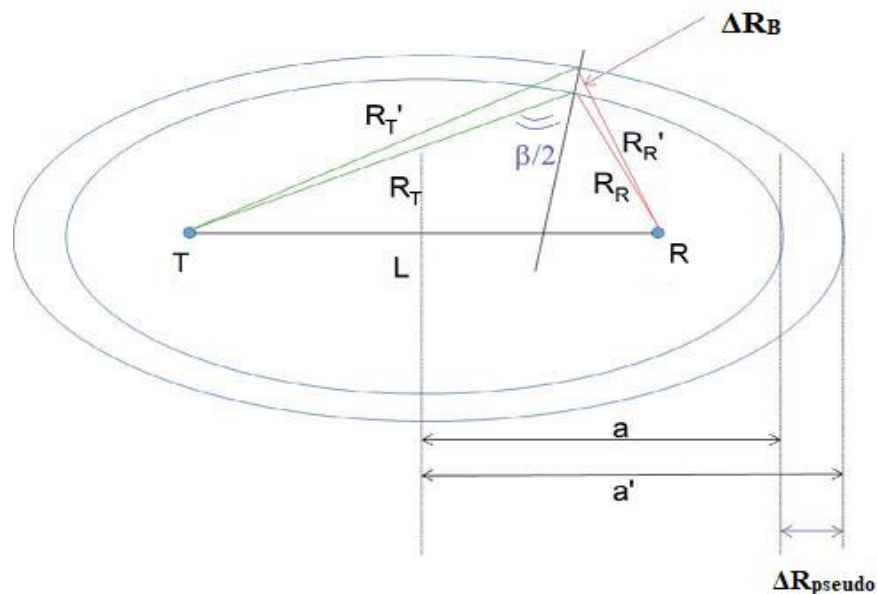
όπου c η ταχύτητα του φωτός και τ η χρονική διάρκεια του παλμού (αν εφαρμόζεται τεχνική συμπίεσης παλμού $\tau=1/B$, όπου B το επεξεργασμένο εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος).

Με άλλα λόγια στην περίπτωση μονοστατικού ραντάρ ΔR_M ορίζεται η διαφορά δύο ομόκεντρων κύκλων των οποίων η διαφορά ακτινών είναι $c/2B$.

Στην περίπτωση του διστατικού ραντάρ είναι δυνατή η επέκταση του παραπάνω σκεπτικού. Για το σκοπό αυτό ορίζουμε μια ψευδομονοστατική ανάλυση εύρους ΔR_{pseudo} μεταξύ δύο ομοκεντρικών ελλείψεων σταθερού αθροίσματος απόστασης (iso-range ellipses), οι οποίες έχουν κεντρικό ημιάξονα a και a' , όπου:

$$\Delta R_{pseudo} = a - a' = \frac{c}{2B} \quad (3.4.2)$$

Οι δύο προαναφερθείσες ομοκεντρικές ελλείψεις φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 15: Bistatic Range Resolution

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι η ανάλυση διστατικού εύρους ΔR_B εξαρτάται όχι μόνο από την ψευδομονοστατική ανάλυση εύρους ΔR_{pseudo} αλλά και από τη θέση μέσα στην έλλειψη. [6]

Τελικά η ανάλυση διστατικού εύρους ΔR_B μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\Delta R_B = \frac{c * \tau}{2 \cos(\beta/2)} = \frac{c}{2B \cos(\beta/2)} = \frac{\Delta R_M}{\cos(\beta/2)} \quad (3.4.3)$$

Όπου φαίνεται ότι η καλύτερη περίπτωση είναι όταν $\beta=0$ και η ανάλυση διστατικού εύρους γίνεται αυτή του μονοστατικού συστήματος. Η γραμμή για $\beta=0$ είναι μια επέκταση της γραμμής βάσης και ορίζεται ως ψευδομονοστατική περιοχή. Καθώς η διστατική γωνία πλησιάζει τις 180° η ΔR_B τείνει στο άπειρο.

Η διστατική μετατόπιση Doppler f_B ορίζεται ως ο λόγος του διστατικού εύρους ΔR_B προς το χρόνο, κανονικοποιημένο από το μήκος κύματος του φέροντος λ , είναι δηλαδή ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του διστατικού εύρους: [8]

$$f_B = \frac{1}{\lambda} * \frac{dR_B}{dt} = \frac{1}{\lambda} * \left[\frac{dR_T}{dt} + \frac{dR_R}{dt} \right] \quad (3.4.4)$$

Για **κινούμενο δέκτη και στόχο** η μετατόπιση Doppler εξαρτάται από τις ταχύτητές τους. Ο ρυθμός μεταβολής στο μονοπάτι στόχου – πομπού οφείλεται αποκλειστικά στην κίνηση του στόχου και ποσοκοποιείται ως η προβολή του διανύσματος ταχύτητας στόχου πάνω στο διάνυσμα απόστασης στόχου πομπού.

$$\frac{dR_T}{dt} = \frac{v * R_T}{R_T} \quad (3.4.5)$$

Ο ρυθμός μεταβολής στο μονοπάτι στόχου – δέκτη οφείλεται στην κίνηση και των δύο (στόχου και δέκτη)

$$\frac{dR_R}{dt} = \frac{R_R * (v - v_R)}{R_R} \quad (3.4.6)$$

Οπότε η διστατική μετατόπιση Doppler του στόχου είναι:

$$f_B = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{v * R_T}{R_T} + \frac{(v - v_R) * R_R}{R_R} \right] \quad (3.4.7)$$

Η επεξεργασία συσχέτισης προσαρμοσμένου φίλτρου δίνει τη σχετική διστατική μετατόπιση Doppler f'_B η οποία είναι η διστατική μετατόπιση Doppler του σήματος στόχου σχετικά με τη μετατόπιση Doppler του σήματος αναφοράς.

$$f'_B = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{v * R_T}{R_T} + \frac{(v - v_R) * R_R}{R_R} - \frac{v_R * L}{L} \right] \quad (3.4.8)$$

Η ανάλυση διστατικού Doppler Δf_B εξαρτάται από το **συναφή χρόνο ολοκλήρωσης τ** και είναι:

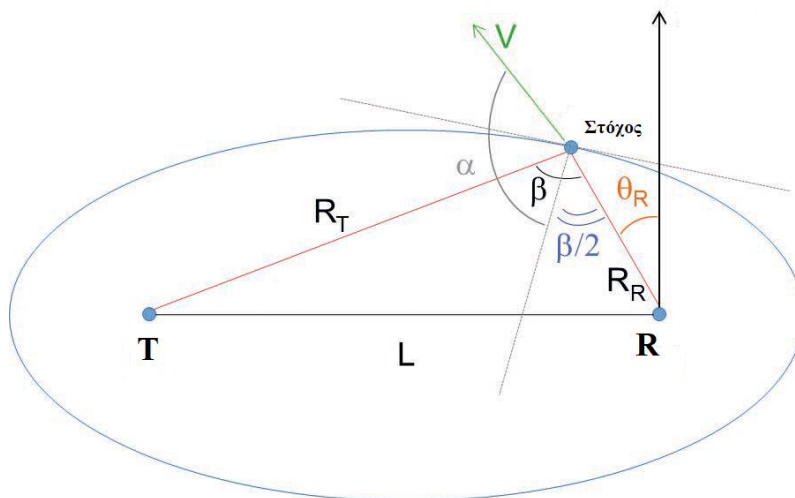
$$\Delta f_B = \frac{1}{\tau_{int}} \quad (3.4.9)$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο συναφής χρόνος ολοκλήρωσης, τόσο υψηλότερη η ανάλυση Doppler.[17]

Στην περίπτωση στατικού δέκτη και πομπού (συνήθη περίπτωση ραντάρ PCL) μετατόπιση Doppler εξαρτάται μόνο από την κίνηση του στόχου. Στη συγκεκριμένη αυτή περίπτωση η **διστατική μετατόπιση Doppler f_B** από μπορεί να εκφραστεί ως:

$$f_B = \frac{V}{\lambda} \left[\cos \left(a - \frac{\beta}{2} \right) + \cos \left(a + \frac{\beta}{2} \right) \right] = \frac{2V}{\lambda} \cos a * \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (3.4.10)$$

Όπου V είναι ο συντελεστής του διανύσματος ταχύτητας στόχου a η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα ταχύτητας V με τη διστατική γωνία $\beta/2$, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 16: Διστατική Γεωμετρία σε δισδιάστατο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι στόχος ο οποίος κινείται κατά μήκος της γραμμής βάσης μεταξύ πομπού και δέκτη θα έχει μηδενική διστατική μετατόπιση doppler, καθώς οι δύο όροι της εξίσωσης (3.4.4) θα αλληλοεξουδετερώνονται.

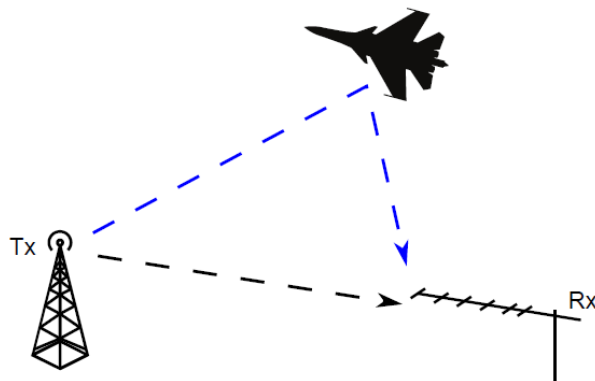
Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της εκτεταμένης γραμμής βάσης (πχ όταν $\beta=0$) η διστατική μετατόπιση doppler παίρνει τη μορφή της μονοστατικής περίπτωσης.[6]

4. Λειτουργία των Παθητικών Ραντάρ

4.1 Απλό Μοντέλο

Για να κατανοήσουμε την αρχή λειτουργίας των Παθητικών Ραντάρ, θα παρουσιάσουμε αρχικά ένα απλό παθητικό ραντάρ που εκμεταλλεύεται ακτινοβολία από μία πηγή εκπομπής T_x .

Τα σήματα που εκπέμπονται από την πηγή εκπομπής T_x , μπορούν να φτάσουν στην κεραία λήψης του παθητικού ραντάρ, από διάφορα μονοπάτια, συμπεριλαμβανομένης και της απ' ευθείας οδού. Για την παρουσίαση του απλού μοντέλου μας αρκούν δύο μονοπάτια από τα οποία θα φτάνουν και δύο σήματα στο δέκτη του ραντάρ αντίστοιχα. Το ένα θα είναι το σήμα που φτάνει κατευθείαν από την πηγή ακτινοβολίας T_x προς την κεραία λήψης του ραντάρ (απευθείας οδός) και το δεύτερο θα είναι το σήμα που εκπέμπεται από την πηγή, ανακλάται στη συνέχεια από το στόχο και κατόπιν φτάνει στην κεραία λήψης. [5]



Εικόνα 17: Το σήμα από τον πομπό T_x φτάνει στην κεραία του ραντάρ από δύο διαδρομές

Το απευθείας σήμα θα καλούμε στο εξής **σήμα αναφοράς**, αφού χρησιμοποιείται ως αναφορά με την οποία θα συσχετιστεί το ανακλώμενο σήμα (έμμεσο) ή αλλιώς σήμα ηχούς. Η συσχέτιση αυτή μετρά το βαθμό συνάφειας ανάμεσα στις δύο μεταβλητές μας (στα δύο σήματα).

Υποθέτουμε ότι το ραντάρ μας διαθέτει δύο κεραίες, εκ των οποίων η μία είναι στραμμένη προς την πηγή ακτινοβολίας T_x , ενώ η άλλη είναι στραμμένη προς μία περιοχή όπου είναι πιθανό να εμφανιστεί κάποιος στόχος. Η πρώτη κεραία λαμβάνει ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται ήδη στον χώρο ανεξάρτητα από το σύστημα ραντάρ και προορίζεται για αδιάφορες/μη συνεργαζόμενες εφαρμογές όπως, π.χ., σήμα ραδιοφώνου FM. Η κεραία αυτή

είναι τοποθετημένη σε τέτοιο σημείο, ώστε να λαμβάνει την ακτινοβολία άμεσα από την κεραία εκπομπής της. Το σήμα που λαμβάνει η κεραία αυτή είναι το σήμα αναφοράς μας και γι' αυτό η πρώτη κεραία θα αναφέρεται ως **κεραία αναφοράς**, ενώ η δεύτερη ως **κεραία στόχου**.

Ο ρόλος της κεραίας στόχου είναι η λήψη σημάτων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας που παρακολουθεί η κεραία αναφοράς με τον στόχο. Δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μόνο μία κεραία στόχου, αντιθέτως η χρήση περισσότερων προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στο σύστημα. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση και επεξεργασία των λήψεων όλων των κεραίων με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών για τον πιθανό στόχο.

Ορίζουμε ως $\mathbf{s}(t)$ το σήμα αναφοράς μας, το οποίο φτάνει στην κεραία του ραντάρ μετά από χρόνο t_a , και έστω ότι το σήμα ηχούς φτάνει μετά από χρόνο t_r .

Ορίζουμε τη **χρονική απόκλιση** – καθυστέρηση των δύο σημάτων από τα διαφορετικά μονοπάτια ως:

$$\boldsymbol{\tau} = t_r - t_d \quad (4.1.1)$$

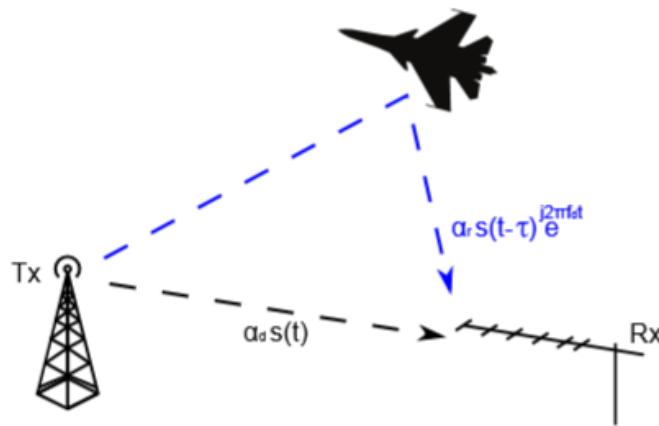
Τα δύο σήματα καθώς ταξιδεύουν θα υποστούν επιπλέον απώλειες διάδοσης (απόσβεση). Έστω \mathbf{a}_d η απόσβεση του σήματος αναφοράς και \mathbf{a}_r η απόσβεση της ηχούς (λόγω των φαινομένων διάδοσης και απωλειών).

Το σήμα που ανακλάται από έναν κινούμενο στόχο, θα υποστεί επίσης το φαινόμενο της μετατόπισης Doppler που εξαρτάται από την ταχύτητα και τη γεωμετρική θέση του στόχου. Έτσι, ορίζουμε με \mathbf{f}_d τη μετατόπιση συχνότητας Doppler της ηχούς σε σχέση με το σήμα αναφοράς λόγω της ταχύτητας του στόχου.

Έτσι, το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από δύο συνιστώσες και βάσει αυτών, το **λαμβανόμενο σήμα** $\mathbf{r}(t)$ μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{a}_d * \mathbf{s}(t) + \mathbf{a}_r * \mathbf{s}(t - \boldsymbol{\tau}) * e^{j2\pi f_d t} \quad (4.1.2)$$

Με άλλα λόγια, το λαμβανόμενο σήμα συντίθεται από δύο σήματα, το σήμα αναφοράς και ένα αντίγραφο αυτού που έχει υποστεί χρονική καθυστέρηση και μετατόπιση Doppler.



Εικόνα 18: Το σήμα που φτάνει στο ραντάρ αποτελείται από δύο συνιστώσες

Η ανίχνευση του στόχου έτσι, πραγματοποιείται ψάχνοντας την **καθυστέρηση τ** και τη μετατόπιση συχνότητας Doppler **f_d** της ηχούς σε σχέση με το σήμα αναφοράς στο τελικό λαμβανόμενο σήμα. Πρακτικά αυτό μπορεί να γίνει με τη συνάρτηση συσχέτισης.

Η σύγκριση γίνεται συνήθως με τη συνάρτηση συσχέτισης (cross – correlation) μεταξύ σήματος αναφοράς και του σήματος ηχούς που επιστρέφει από το στόχο. [5]

4.2 Συνάρτηση Αβεβαιότητας

Τα χαρακτηριστικά των σημάτων ραντάρ μελετώνται γενικά μέσω της **συνάρτησης αβεβαιότητας**, η οποία αποτελεί μια δισδιάστατη συνάρτησης συσχέτισης, που μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$x(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s^*(t - \tau)e^{j2\pi f_d t} dt \quad (4.2.1)$$

όπου **$s(t)$** είναι το σήμα και **τ** , **f_d** η καθυστέρηση και η μετατόπιση συχνότητας Doppler αντίστοιχα.

Η συνάρτηση αβεβαιότητας για **$f_d = 0$** είναι η συνάρτηση **αυτοσυσχέτισης** του σήματος, δηλαδή η συσχέτιση με τον εαυτό του.

$$x(\tau, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s^*(t - \tau) dt \quad (4.2.2)$$

Υπολογίζοντας τη συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του **λαμβανόμενου σήματος**, παίρνουμε τις κορυφές συσχέτισης με **μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο**, όπου το λαμβανόμενο σήμα είναι πανομοιότυπο με τη χρονικά καθυστερημένη εκδοχή του όσο το δυνατόν πιο κοντά. Προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ενίσχυση στη συνάρτηση συσχέτισης, το σήμα αναφοράς πρέπει να διορθωθεί με την ίδια συχνότητα Doppler f_d .

Δεδομένου ότι η ακριβής ταχύτητα και κατ' επέκταση η συχνότητα Doppler του στόχου δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων στην πλευρά του δέκτη, το σήμα αναφοράς πρέπει να μετατοπιστεί με όλες τις πιθανές συχνότητες Doppler. Κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης, το πρώτο βήμα είναι να δημιουργήσουμε τις μετατοπισμένες κατά συχνότητα Doppler εκδοχές του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη και στη συνέχεια να υπολογίσουμε τις συναρτήσεις συσχέτισης (cross correlation) μεταξύ αυτών των βοηθητικών σημάτων και του αρχικού λαμβανόμενου σήματος.

Από τον αριθμό των υπολογιζόμενων συναρτήσεων συσχέτισης μπορούμε να συνθέσουμε μια δισδιάστατη συνάρτηση, της οποίας τα μέγιστα δείχνουν εκείνες τις συχνότητες Doppler και τις χρονικές τιμές, όπου το λαμβανόμενο σήμα, το οποίο περιέχει το ανακλώμενο σήμα, ταιριάζει με το σήμα που μεταδίδεται από την πηγή εκπομπής μας.

Στη συνέχεια, η ανίχνευση του στόχου μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό της ακόλουθης δισδιάστατης **συνάρτησης συσχέτισης του λαμβανόμενου σήματος**:

$$y(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(t)r^*(t - \tau)e^{j2\pi f_d t} dt \quad (4.2.3)$$

Σήμερα όλοι οι δέκτες ραντάρ χρησιμοποιούν προσαρμοσμένα φίλτρα, τα οποία εκμεταλλεύονται τη γνώση της μορφής των σημάτων που αναμένονται για λήψη, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν αποδοτικότερους εντοπισμούς.

Η συνάρτηση μεταφοράς των προσαρμοσμένων φίλτρων (matched filters) τους επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της σηματοθορυβικής σχέσης του σήματος εξόδου (λόγου τιμής κορυφής σήματος προς μέση τιμή θορύβου). Βασική όμως προϋπόθεση είναι, η γνώση της μορφής του επιστρεφόμενου σήματος στο δέκτη. Η έξοδος του φίλτρου, αποτελεί τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του επιστρεφόμενου σήματος.

Υπό αυτή την έννοια, ο υπολογισμός της συσχέτισης (cross correlation) δρα σαν το σήμα να είχε διέλθει μέσω ενός προσαρμοσμένου φίλτρου. Βάσει αυτής της αρχής, η συνάρτηση συσχέτισης καθυστέρησης-Doppler αντιπροσωπεύει μια έξοδο τράπεζας προσαρμοσμένου

φίλτρου, όπου η τράπεζα αποτελείται από το σήμα αναφοράς και τα αντίγραφα του μετατοπισμένα κατά συχνότητα Doppler.

4.3 Εξίσωση Διστατικού Ραντάρ

Το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία όλων των συστημάτων ραντάρ, είναι η ισχύς που φτάνει στο δέκτη από τον πομπό μετά τη σκέδαση από το στόχο.

Όπως και για τα μονοστατικά ραντάρ, η εξίσωση ραντάρ μας δίνει το πιθανό εύρος λειτουργίας ενός παθητικού διστατικού ραντάρ.

Η εξίσωση του διστατικού ραντάρ καθορίζει τη βάση για την ανάλυση ανίχνευσης ενός συστήματος παθητικού ραντάρ. Συγκεκριμένα επιτρέπει τον υπολογισμό του αναμενόμενου σηματοθορυβικού (SNR) λόγου ως συνάρτηση της θέσης στόχου και του RCS, καθώς επίσης και των χαρακτηριστικών πομπού και δέκτη (όπως διαγράμματα μεταδιδόμενης ισχύος και κεραίας).

Επιτρέπει επίσης την εκτίμηση του μέγιστου εύρους ανίχνευσης του συστήματος ραντάρ μόλις καθοριστούν οι επιθυμητές πιθανότητες ανίχνευσης και λανθασμένου συναγερμού μαζί με τα μοντέλα διακύμανσης στόχου.

Για μοντέλα PCL που εκμεταλλεύονται πομπούς δικτύου SNF, το σήμα ηχούς στόχου συναγωνίζεται πάντα με ένα ισχυρό σήμα αναφοράς.

Σχετικά με το θερμικό θόρυβο, το σήμα ηχούς από το στόχο αυξάνεται από το κέρδος επεξεργασίας που προκύπτει από τη διαδικασία συσχέτισης, G_{corr} . Έτσι σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά όταν οι πομποί είναι κοντά στο δέκτη, ο περιοριστικός παράγοντας δεν είναι ο θερμικός θόρυβος αλλά πολύ περισσότερο οι πλευρικοί λοβοί συσχέτισης του πιο κοντινού ή του πιο ισχυρού πομπού στο δίκτυο.

Για να καθορίσουμε την ικανότητα εύρους ανίχνευσης και έτσι τη διστατική ή πολυστατική κάλυψη ενός δέκτη ραντάρ PCL, το επίπεδο ισχύος των σημάτων αναφοράς στην περιοχή του δέκτη πρέπει να είναι γνωστή.

Σε αυτό το στάδιο η ακριβής φύση του μεταδιδόμενου σήματος δεν είναι σημαντική, και ο πομπός μοντελοποιείται σαν σημειακή πηγή με γνωστή **ενεργή εκπεμπόμενη ισχύ - ERP (Effective Radiated Power)** στην κατεύθυνση του στόχου, που μεταδίδει κυματομορφή λευκού θορύβου με δεδομένη κεντρική συχνότητα και εύρος.

Η ποσότητα ενδιαφέροντος είναι η ισχύς στο δέκτη, για δεδομένη γεωμετρία στόχου – πομπού.

Έστω ότι ο πομπός μας, δηλαδή η κεραία της ακτινοβολίας υποβάθρου που εκμεταλλευόμαστε, εκπέμπει σήμα ισχύος κορυφής P_t και μεταδίδει σήμα εύρους B με μήκος κύματος λ . Θεωρούμε επίσης την κεραία εκπομπής ισοτροπική ισοκατευθυντική κέρδους G_t . Έστω ότι ο στόχος βρίσκεται σε απόσταση R_1 από τον πομπό και έχει ραδιοτομή RCS, σ .

Η εκπεμπόμενη επιφανειακή πυκνότητα ισχύος είναι:

$$PD (W/m^2) = \frac{P_t}{4\pi R_1^2} \quad (4.3.1)$$

Η σχέση αυτή εκφράζει τη σφαιρική διάδοση κυμάτων, δηλαδή την περίπτωση κατά την οποία η πυκνότητα ισχύος $PD (W/m^2)$ μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης διάδοσης.

Η επιφανειακή πυκνότητα ισχύος του καταφθάνοντος σήματος πάνω στο στόχο, λόγω της ακτινοβολίας του πομπού θα είναι :

$$PD_1 (W/m^2) = PD * G_t \quad (4.3.2)$$

που λόγω της (4.3.1) γίνεται $PD_1 (W/m^2) = \frac{P_t * G_t}{4\pi R_1^2}$ (4.3.3)

Το γινόμενο $P_t * G_t$ είναι γνωστό και ως ενεργός εκπεμπόμενη ισχύς - ERP.

Από τον ορισμό της ραδιοτομής - RCS ενός στόχου, η ένταση ακτινοβολίας (γωνιακή πυκνότητα ισχύος), δηλαδή η ισχύς του σήματος ανά μονάδα στερεάς γωνίας (W/sterad) η οποία ελευθερώνεται από τη σκέδαση και κατευθύνεται προς το ραντάρ θα είναι:[7, σελ 69]

$$\frac{PD_1 * \sigma}{4\pi} = \frac{P_t * G_t * \sigma}{(4\pi) * (4\pi R_1^2)} (W/sterad) \quad (4.3.4)$$

$$\frac{PD_1 * \sigma}{4\pi} = \frac{P_t * G_t * \sigma}{(4\pi R_1)^2} (W/sterad) \quad (4.3.5)$$

Η επιφανειακή πυκνότητα ισχύος $PD_2 (W/m^2)$ του ανακλώμενου σήματος που επιστρέφει στην κεραία του ραντάρ, καθώς το ένα στερεάκτινιο (sterad) αντιστοιχεί σε επιφάνεια σφαίρας ίση με R_2^2 (όπου R_2 είναι η απόσταση του στόχου από το δέκτη), θα ισούται με :

$$PD_2 (W/m^2) = \frac{PD_1 * \sigma}{4\pi R_2^2} \quad (4.3.6)$$

που λόγω της (4.3.5) γίνεται $PD_2 (W/m^2) = \frac{P_t * G_t * \sigma}{(4\pi R_1 R_2)^2}$ (4.3.7)

Από τη μεριά του δέκτη, η ενεργός επιφάνεια της κεραίας λήψης κέρδους G_r και μήκους κύματος λ , δίνεται από τη σχέση:

$$A_e = \frac{\lambda^2 * G_r}{4\pi} \quad (4.3.8)$$

Οπότε η ισχύς που φτάνει στο δέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = PD_2 * A_e \quad (4.3.9)$$

Η οποία συνεπάγεται λόγω των (4.3.7) και (4.3.8) στην:

$$P_r = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} \quad (4.3.10)$$

Καθώς πομπός και δέκτης συγκλίνουν, η γραμμή βάσης μειώνεται και $R_1 = R_2$ και η παραπάνω εξίσωση γίνεται η εξίσωση του μονοστατικού ραντάρ, όπως αναμενόταν.

Όσον αφορά τη μη ιδανική μετάδοση σε πραγματικό περιβάλλον, μπορούμε να συμπεριλάβουμε στον αριθμητή, έναν παράγοντα μετάδοσης F_n για τα φυσικά αποτελέσματα, όπως η κυρτότητα της γης, παρεμβολές από άλλα μονοπάτια, σκέδαση του εδάφους (scattering and diffraction) και άλλους φυσικούς περιβαλλοντολογικούς παράγοντες.

4.4 Σηματοθορυβικός Λόγος - Θόρυβος

Η ικανότητα ενός δέκτη ραντάρ να ανιχνεύσει ένα ασθενές σήμα ηχούς, περιορίζεται σημαντικά από το θόρυβο ο οποίος καταλαμβάνει το ίδιο φάσμα συχνοτήτων με το σήμα.

Ο σηματοθορυβικός λόγος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τα συστήματα ραντάρ, καθώς καθορίζει την αξιοπιστία πολλών λειτουργιών. Για παράδειγμα, για περιορισμένη ανίχνευση θορύβου και συγκεκριμένη πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού (false alarm) P_{FA} , η πιθανότητα ανίχνευσης P_D αυξάνεται με την αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που περιορίζει την ευαισθησία του δέκτη είναι ο θόρυβος, ο οποίος οφείλεται σε ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που παρεμβαίνει στην ικανότητα του δέκτη να ανιχνεύσει το επιθυμητό σήμα. Μπορεί να δημιουργείται στον ίδιο το δέκτη ή να εισέρχεται μέσω της κεραίας λήψης μαζί με το επιθυμητό σήμα. Ακόμη και αν το ραντάρ λειτουργούσε σε περιβάλλον χωρίς εξωτερικές πηγές θορύβου και ο δέκτης ήταν τόσο τέλειος ώστε να μην παράγει θόρυβο, θα υπήρχε πάλι αναπόφευκτα ο θόρυβος λόγω θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων αγωγής στα ωμικά τμήματα των βαθμίδων εισόδου του δέκτη. Αυτός ονομάζεται θερμικός θόρυβος και η ισχύς του είναι ανάλογη προς τη θερμοκρασία των ωμικών στοιχείων των κυκλωμάτων και το εύρος ζώνης B του δέκτη.

Για θερμικό θόρυβο ισχύος στο δέκτη:

$$P_N = k * T_0 * B * F \quad (4.4.1)$$

(όπου k η σταθερά Boltzmann 1.380×10^{-23} Joule/K), $T_0 = 290$ K η θερμοκρασία αναφοράς, B το εύρος θερμικού θορύβου στο δέκτη και F ο παράγοντας θορύβου στο δέκτη) και για ισχύ ηχούς στόχου όπως υπολογίστηκε στη σχέση (4.3.10), παίρνουμε το σηματοθορυβικό λόγο, ο οποίος είναι ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος προς την ισχύ θορύβου:

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} \quad (4.4.2)$$

$$SNR = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2 * \sigma * F_n}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2 * k * T_0 * B * F * L_s} \quad (4.4.3)$$

Όπου έχουν συμπεριληφθεί ο παράγοντας διάδοσης F_n και ο όρος απωλειών L_s που αντιπροσωπεύουν τις απώλειες στο σύστημα λήψης ($L_s \leq 1$).

Γενικότερα ένα σύστημα παθητικού ραντάρ πρέπει να ανιχνεύσει μικρές επιστροφές από το στόχο υπό την παρουσία πολύ ισχυρών, συνεχόμενων παρεμβολών. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με ένα συμβατικό ραντάρ, το οποίο «ακούει» την ηχώ κατά τη διάρκεια περιόδων σιωπής ανάμεσα σε κάθε μετάδοση παλμού. Συνεπώς είναι βασικό ο δέκτης να έχει διαμόρφωση χαμηλού θορύβου, υψηλού δυναμικού εύρους και υψηλής γραμμικότητας.

Για να αυξήσουμε την πιθανότητα ανίχνευσης είναι απαραίτητο να μεγιστοποιήσουμε το σηματοθορυβικό λόγο της επιστροφής από το στόχο.

Το ασθενέστερο σήμα που μπορεί να ανιχνεύσει ο δέκτης καλείται **ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα** S_{min} και καθορίζει την ευαισθησία ενός δέκτη, καθώς είναι το ελάχιστο σήμα που απαιτείται για να παραχθεί στην έξοδο ένα καθορισμένο σήμα με καθορισμένο λόγο σήματος προς θόρυβο.

Το **ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα** μπορεί να οριστεί ως:

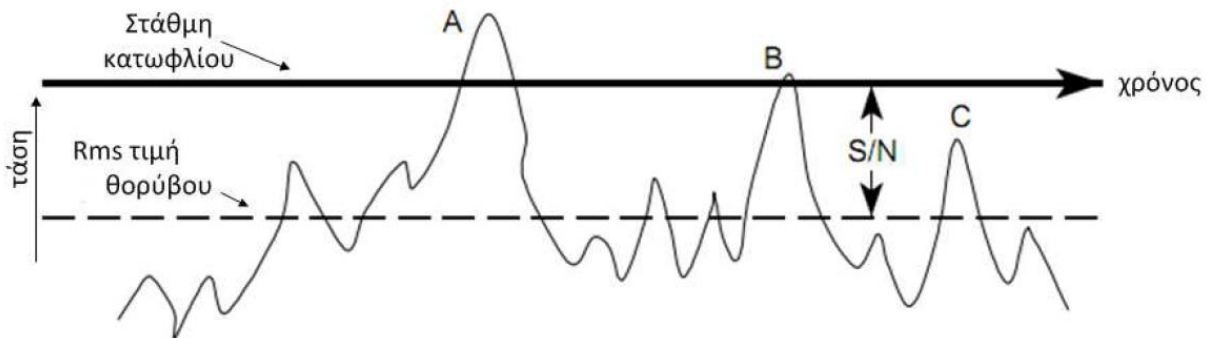
$$S_{min} = SNR_{min} * P_N \quad (4.4.4)$$

Ο προσδιορισμός του ελάχιστου ανιχνεύσιμου σήματος είναι μερικές φορές δύσκολος λόγω της στατιστικής του φύσης και γιατί το κριτήριο απόφασης ως προς την ύπαρξη ή όχι στόχου μπορεί να μην είναι πολύ καλά ορισμένο. Η ανίχνευση στηρίζεται στην εγκαθίδρυση μιας **στάθμης κατωφλίου** στην έξοδο του δέκτη. Αν η έξοδος του δέκτη ξεπερνά το κατώφλι τότε θεωρείται ότι υπάρχει σήμα. Αυτό ονομάζεται ανίχνευση κατωφλίου.

Αυτό γίνεται θέτοντας τη στάθμη κατωφλίου αρκετά υψηλή ώστε να μην υπερβαίνεται όταν υπάρχει μόνο θόρυβος, αλλά μόνο παρουσία κάποιου ισχυρού σήματος. Στην περίπτωση που το σήμα ηχούς (από κάποιο στόχο) είναι ασθενές, για να αναγνωρισθεί, θα πρέπει η στάθμη κατωφλίου να χαμηλώσει τόσο ώστε οι αιχμές του θορύβου να μην την ξεπερνούν. Διαφορετικά, θα λαμβάνεται λανθασμένη ένδειξη παρουσίας στόχου,

Στην εικόνα 19 φαίνεται μια τυπική περιβάλλουσα της εξόδου ενός δέκτη ραντάρ. Η διακύμανση του σήματος που παρατηρείται οφείλεται στην τυχαία φύση του θορύβου. Αν παρουσιασθεί ένα μέγιστο, μεγαλύτερο από τις γειτονικές αιχμές θορύβου, όπως αυτό στο σημείο Α, θα μπορούσε να αναγνωρισθεί με βάση το πλάτος του. Αυτό γίνεται θέτοντας τη στάθμη κατωφλίου αρκετά υψηλή ώστε να μην υπερβαίνεται όταν υπάρχει μόνο θόρυβος, αλλά μόνο παρουσία κάποιου ισχυρού σήματος. Στην περίπτωση που το σήμα ηχούς (από κάποιο στόχο) είναι ασθενές, για να αναγνωρισθεί, θα πρέπει η στάθμη κατωφλίου να

χαμηλώσει τόσο ώστε οι αιχμές του θορύβου να μην την ξεπερνούν. Διαφορετικά, θα λαμβάνεται λανθασμένη ένδειξη παρουσίας στόχου, [1, σελ. 32].



Εικόνα 19: Περιβάλλουσα εξόδου δέκτη συναρτήσει του χρόνου. Τα σημεία A,B και C αντιπροσωπεύουν αθροίσματα σήματος και θορύβου. Τα σημεία A και B ανιχνεύονται ενώ το C χάνεται

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η έξοδος του δέκτη είναι τέτοια που στα σημεία A και B ανιχνεύεται ορθά η ύπαρξη στόχου. Στο σημείο C όμως, παρόλο που το πλάτος του “καθαρού” από θόρυβο σήματος είναι ίσο με αυτό στο B, η επαλληλία του σήματος και του θορύβου είναι τέτοια ώστε ο θόρυβος αφαιρείται από το σήμα ενώ στο B προστίθεται. Έτσι, η παρουσία θορύβου μερικές φορές βοηθάει στην ανίχνευση ασθενών σημάτων (σημείο B) και μερικές φορές προκαλεί την απώλειά τους (σημείο C). Ασθενή σήματα, όπως αυτό στο σημείο C, μπορούν να ανιχνευθούν αν η στάθμη κατωφλίου γίνει χαμηλότερη. Αυτό όμως αυξάνει την πιθανότητα κάποιες αιχμές του θορύβου να ξεπεράσουν το κατώφλι και να δώσουν λάθος ένδειξη παρουσίας στόχου, γεγονός που ονομάζεται “λανθασμένος συναγερμός”. Η πιθανότητα εμφάνισης στόχου ενώ δεν είναι υπαρκτός λόγω σημάτων με πλάτος που ξεπερνάει το κατώφλι ονομάζεται πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού, P_{FA}

Αν η στάθμη κατωφλίου τεθεί πολύ χαμηλά, έχουμε λανθασμένη ένδειξη στόχου, ενώ αν τεθεί πολύ υψηλά έχουμε απώλεια στόχων. Η τελική επιλογή της στάθμης κατωφλίου προκύπτει από ένα συμβιβασμό μεταξύ του πόσο σημαντικό είναι να γίνει σφάλμα[1, σελ. 32]:

- i. από αποτυχία αναγνώρισης σήματος (π.χ. πιθανότητα αστοχίας) και
- ii. από λανθασμένη ένδειξη ύπαρξης σήματος (πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού).

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω, η πιθανότητα να ανιχνευτεί ένα σήμα εξαρτάται από τη στάθμη κατωφλίου, και από το λόγο σήματος προς μέσο θόρυβο. Επομένως, ορίζεται η πιθανότητα ανίχνευσης, P_D , ως η πιθανότητα το επιθυμητό σήμα επιστροφής από κάποιο στόχο (ηχώ) να ξεπεράσει το προκαθορισμένο κατώφλι. Ο ελάχιστος αποδεκτός λόγος σήματος προς θόρυβο εξαρτάται από την προσδοκώμενη χρήση του δέκτη. Για παράδειγμα, ένας δέκτης που πρέπει να ανιχνεύσει έναν απλό παλμό ραντάρ χρειάζεται πιθανότατα μεγαλύτερο ελάχιστο S/N από ένα δέκτη που ολοκληρώνει ένα μεγάλο αριθμό παλμών ραντάρ (αυξάνοντας τη συνολική ενέργεια του σήματος), για την ίδια πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού [3].

Η εύρεση της επιθυμητής πιθανότητας ανίχνευσης μπορεί να γίνει μέσω διάφορων κατανομών (όπως η Gaussian, η Rayleigh και η Rice) ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται. Συγκεκριμένα, οι παράγοντες που καθορίζουν το επιθυμητό μοντέλο (κατανομή) μπορεί να είναι το περιβάλλον ανίχνευσης (θόρυβος, clutter) και οι διακυμάνσεις του σήματος ηχούς. Οι διακυμάνσεις του σήματος ηχούς (fluctuations) είναι μεταβολές στο πλάτος του που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και το μέγεθος του στόχου, αλλά και από τη γωνία πρόσπτωσης του εκπεμπόμενου σήματος πάνω στο στόχο, [2, σελ. 199].

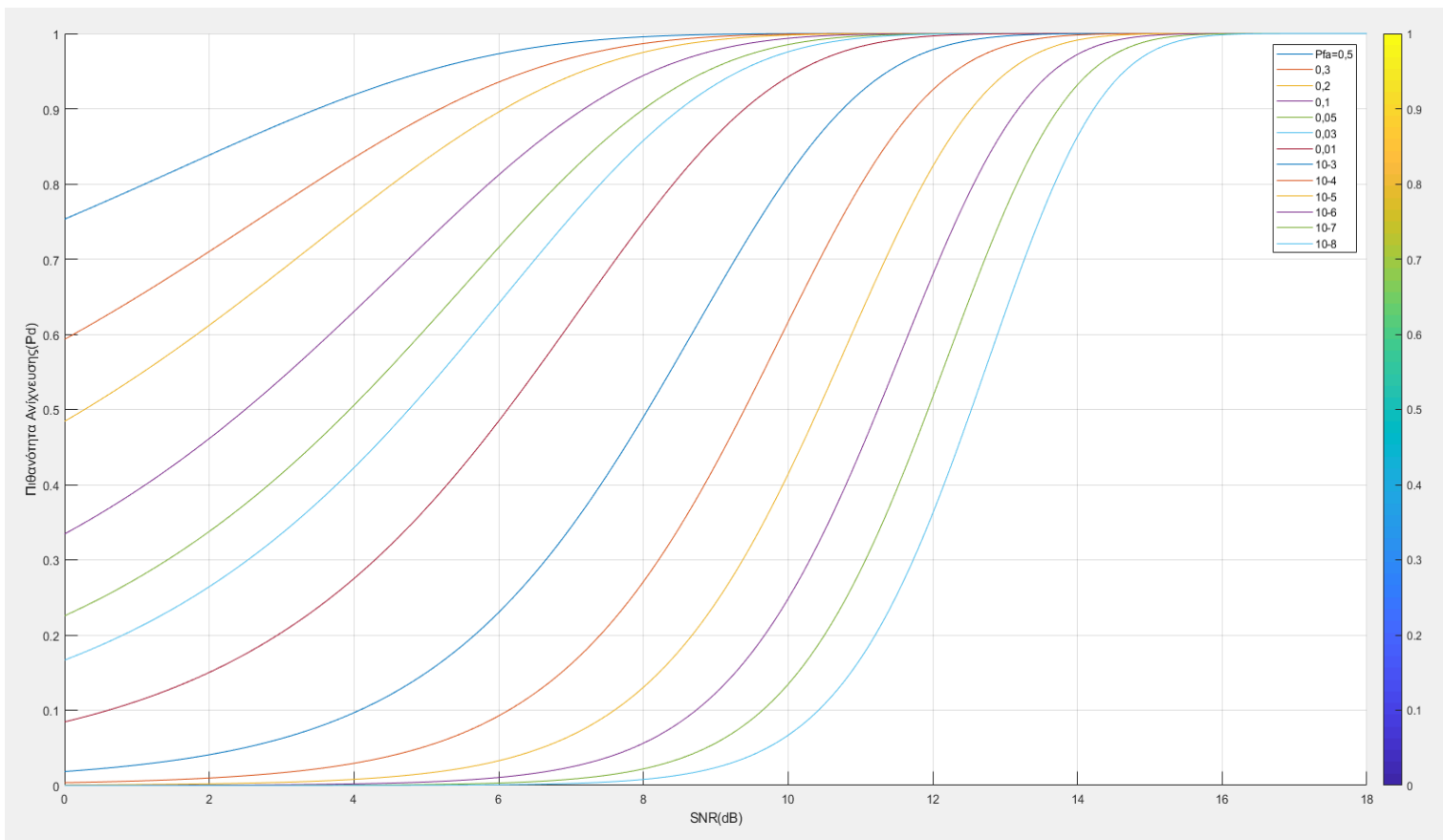
Ένα παράδειγμα είναι η περίπτωση διστατικού ραντάρ με χρήση πομπών FM, όπου το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις ενός στόχου. Σε αυτήν την περίπτωση το επιστρεφόμενο σήμα, λόγω του συγκρίσιμου μήκους κύματος με το μέγεθος του στόχου, παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στο πλάτος του. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο Rice. Ο υπολογισμός της πιθανότητας ανίχνευσης του δισταθούς ραντάρ εξαρτάται από το λόγο S/N (ή SNR) και από την πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού και δίνεται από τον τύπο, [2, σελ. 199]:

$$P_D = Q[\sqrt{2SNR}, \sqrt{2 * \ln\left(\frac{1}{P_{FA}}\right)}] \quad (4.4.5)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση δημιουργήσαμε κώδικα σε MATLAB για διάφορες πιθανότητες λανθασμένου συναγερμού $P_{fa} = [0.5 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.05 \ 0.03 \ 0.01 \ 10^{-3} \ 10^{-4} \ 10^{-5} \ 10^{-6} \ 10^{-7} \ 10^{-8}]$ και για SNR από 0 έως 18 dB για να εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την πιθανότητα ανίχνευσης P_D .

4.4.1 Κώδικας σε Matlab για εξαγωγή διαγραμμάτων πιθανότητας ανίχνευσης

```
% Διάγραμμα Πιθανότητας Ανίχνευσης
SNRdB=0:0.1:18;% Ορισμός Σηματοθρομβικού Λόγου SNR
Pfa=[0.5 0.3 0.2 0.1 0.05 0.03 0.01 10^-3 10^-4 10^-5 10^-6 10^-7 10^-8];% Ορισμός
Πιθανότητας Λανθασμένου Συναγερμού
for i=1:13
Pd=marcumq((2*10.^(SNRdB/10)).^0.5,sqrt(2*log(1/Pfa(i))));% Ορισμός Πιθανότητας
Ανίχνευσης
grid on
hold on
xlabel('SNR(dB)')
ylabel('Πιθανότητα Ανίχνευσης(Pd)')
title('Σηματοθρομβικός Λόγος Συναρτήσει Πιθανότητας Ανίχνευσης Pd και Πιθανότητας
Λανθασμένου Συναγερμού Pfa')
plot(SNRdB,Pd)
end
```



Εικόνα 20: Σηματοθρομβικός Λόγος SNR συναρτήσει της Πιθανότητας Ανίχνευσης P_D και της Πιθανότητας Λανθασμένου Συναγερμού P_{FA} .

Σύμφωνα με την εικόνα αν επιλέξουμε μια πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού $P_{FA} = 10^{-3}$, τότε για πιθανότητα ανίχνευσης $P_D = 0.9999$, ο απαιτούμενος λόγος σήματος προς θόρυβο θα είναι $SNR = 14.2$ dB.

4.4.2 Οβάλ του Cassini

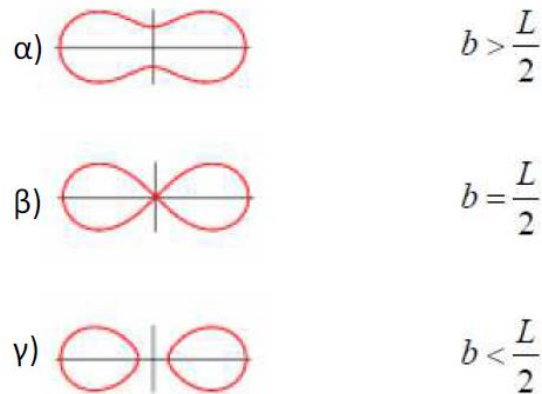
Ένα οβάλ του Cassini είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων των οποίων το γινόμενο των αποστάσεων από δύο σταθερά σημεία (εστίες) είναι σταθερό. Τα οβάλ του Cassini ορίζονται ως εξής [18]:

$$R_T * R_R = b^2 \quad (4.4.6)$$

όπου b είναι μια σταθερά.

Οι εστίες των οβάλ αποτελούν τις θέσεις πομπού και δέκτη και βρίσκονται στις θέσεις $(-L/2, 0)$ και $(0, L/2)$, όπου L είναι η μεταξύ τους απόσταση (γραμμή βάσης).

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε τρεις περιπτώσεις οβάλ του Cassini:

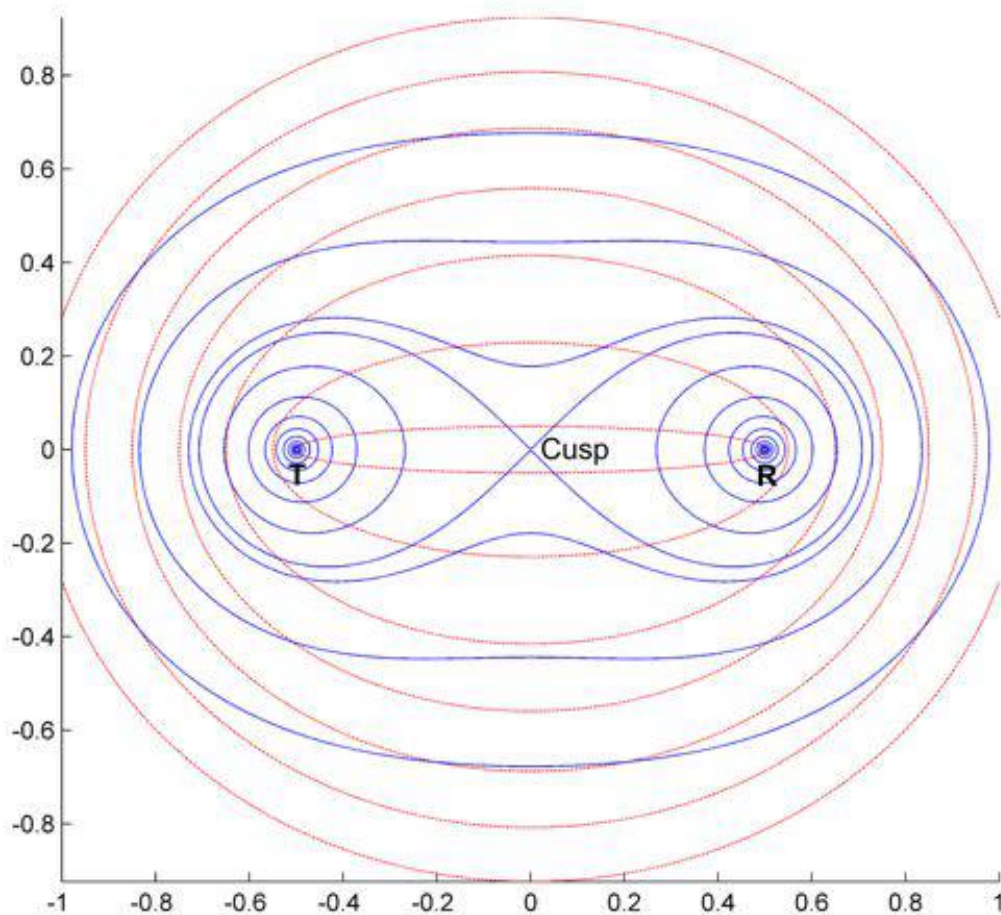


Εικόνα 21: Οι τρεις περιπτώσεις Οβάλ του Cassini[18]:

Στην πρώτη, ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι τόσο μικρός ώστε η σταθερά b να είναι μεγαλύτερη από το μισό της γραμμής βάσης. Το οβάλ που δημιουργείται αποτελεί ένα ενιαίο περίγραμμα.

Στη δεύτερη, ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι τέτοιος ώστε η σταθερά b να είναι ίση με το μισό της γραμμής βάσης. Το σημείο της γραμμής βάσης που συμβαίνει αυτό ονομάζεται “*cusp*” και η καμπύλη “*lemniscate*” και τότε το οβάλ του Cassini αποτελεί ένα περίγραμμα με σχήμα το σύμβολο του απείρου (∞).

Στην τρίτη, ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι μεγάλος οπότε η σταθερά b είναι μικρότερη του μισού της γραμμής βάσης. Τότε το ενιαίο περίγραμμα καταρρέει σε δύο μικρότερα οβάλ, συμμετρικά ως προς τον κεντρικό άξονα.



Εικόνα 22: Οβάλ του Cassini [17, σελ 20]

Στην παραπάνω εικόνα τα Οβάλ του Cassini διακρίνονται με μπλε απόχρωση και περιγράφουν περιγράμματα σταθερού SNR για μια συγκεκριμένη γεωμετρία πομπού και δέκτη, ενώ με κόκκινη απόχρωση διακρίνουμε τα περιγράμματα σταθερού εύρους (ελλείψεις). Τα Οβάλ του Cassini δεν είναι συγγραμικά με τα περιγράμματα σταθερού εύρους αλλά επικαλύπτονται από αυτά για ένα σύστημα διστατικού ραντάρ.

Είναι λοιπόν φανερό ότι δύο στόχοι (ας υποθέσουμε ότι είναι ίσοι) με διαφορετικά προφίλ εύρους μπορούν να οδηγήσουν στο ίδιο SNR και το αντίστροφο, δύο ίδιοι στόχοι στην ίδια έλλειψη μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικό SNR στο ραντάρ. [6]

5. Ανάλυση Πειραματικού Μοντέλου Παθητικού Ραντάρ

5.1 Εισαγωγή

Βασιζόμενοι στο πειραματικό μοντέλο του Howland, του Maksimiuk και του Reitsma, [4] θα περιγράψουμε ένα πειραματικό σύστημα ραντάρ που αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό στόχου λαμβάνοντας και επεξεργάζοντας ηχώ από ένα ραδιοφωνικό σταθμό FM (μη συνεργαζόμενος πομπός).

Από τους διαθέσιμους ευκαιριακούς πομπούς οι πομποί μετάδοσης αντιπροσωπεύουν μερικούς από τους πιο ελκυστικούς πομπούς για σκοπούς επιτήρησης εξαιτίας της υψηλής ισχύος και της τέλει κάλυψής τους.

Για να πετύχουμε το απαραίτητο κέρδος για τον εντοπισμό αδύναμων ηχώ στόχων σε ένα υπόβαθρο θορύβου και παρεμβολών είναι απαραίτητο αν επιτύχουμε ένα ισοδύναμο με τη βέλτιστη επεξεργασία προσαρμοσμένου φίλτρου που χρησιμοποιείται στα συμβατικά συστήματα ραντάρ.

Το πέρασμα μιας ηχούς διαμέσου ενός προσαρμοσμένου φίλτρου είναι ισοδύναμη με τη συσχέτιση μιας ηχούς με το καθυστερημένο αντίγραφο του μεταδιδόμενου σήματος, και είναι αυτή η προσέγγιση που πρέπει να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας στο παθητικό διστατικό σύστημα ραντάρ. Καθώς το μεταδιδόμενο σήμα δεν είναι απ' ευθείας διαθέσιμο στο δέκτη, απαιτείται ένας αποκλειστικός δέκτης ο οποίος θα λάβει το μεταδιδόμενο σήμα.

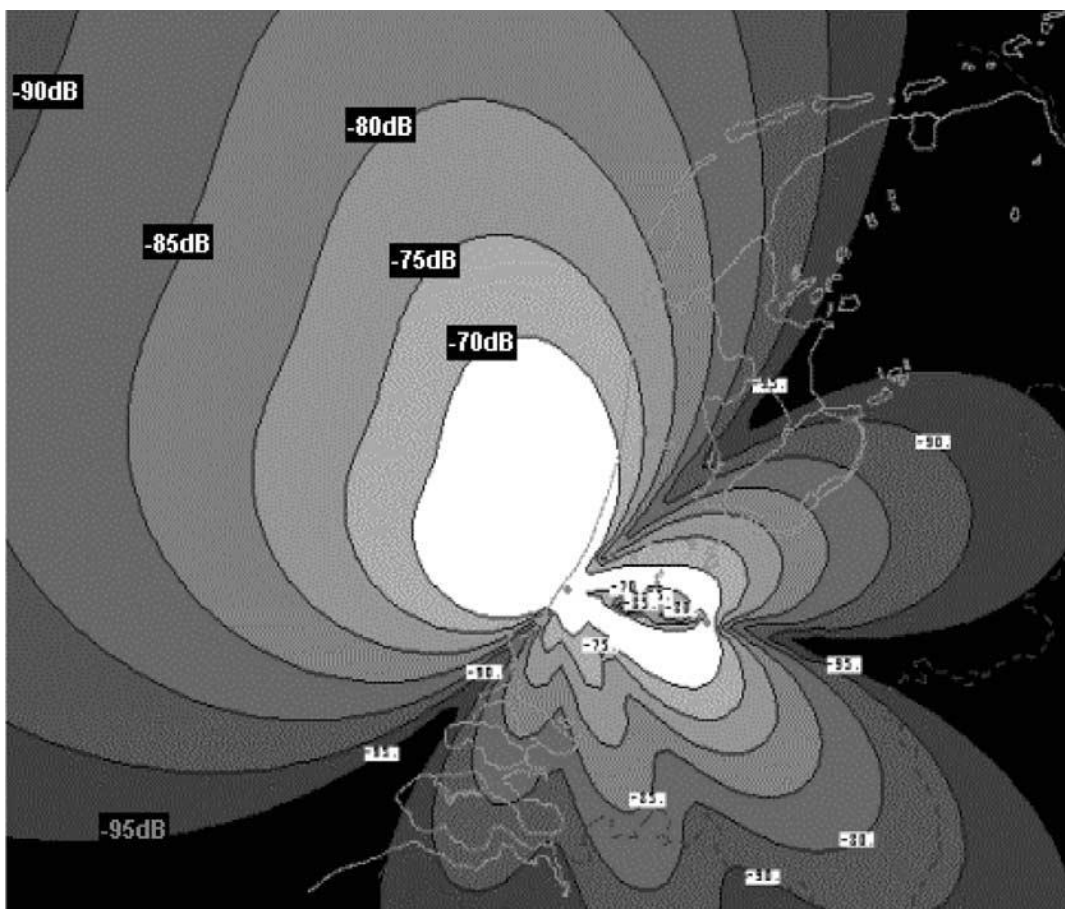
Ο μεγαλύτερος περιορισμός στην εκτέλεση του συστήματος είναι η παρεμβολή που λαμβάνεται από τον πομπό που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του στόχου. Αυτό το ανεπιθύμητο απ' ευθείας σήμα, συσχετίζεται τέλεια με το σήμα αναφοράς (reference signal) και παράγει πλευρικούς λοβούς (Εύρους και Doppler) οι οποίοι είναι αρκετά μεγαλύτεροι από την ηχώ την οποία αναζητούμε. Για τον εντοπισμό σημάτων όσο πιο κοντά στο στόχο γίνεται είναι απαραίτητο να αφαιρέσουμε αυτό το σήμα από το δέκτη.

5.2 Περιγραφή - Αναμενόμενη εκτέλεση του συστήματος

Στο σύστημά μας εκμεταλλευόμαστε έναν κάθετα πολωμένο ραδιοφωνικό πομπό FM, ο οποίος βρίσκεται 50 Km πίσω από το δέκτη. Ο πομπός έχει ισοδύναμη ακτινοβολούμενη ισχύ εκπομπής Equivalent Radiated Power - ERP = 50 KW και λειτουργεί στη συχνότητα των 96,8 MHz .Ο πομπός βρίσκεται σε ύψος 375m και παρέχει τέλεια, μεγάλου εύρους και χαμηλού επιπέδου ακτινοβολία.

Ο δέκτης βρίσκεται περίπου 20m από το επίπεδο του εδάφους. Υποθέτουμε ότι ο στόχος έχει ενεργό διατομή $RCS = 10 \text{ m}^2$ και κέρδος επεξεργασίας ετεροσυσχέτισης 47 dB

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο περιοριστικός παράγοντας στην απόδοση ενός παθητικού διστατικού συστήματος (PBR) είναι η παρεμβολή του απευθείας σήματος από τον πομπό. Αυτή η παρεμβολή είναι έως 90 dB μεγαλύτερη από την ηχώ που αναμένουμε να δούμε από ένα στόχο 10 m^2 σε ένα εύρος 50 Km και αυτό αντικατοπτρίζει την ανάγκη για καλή καταστολή της παρεμβολής. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε το λόγο ισχύος προς παρεμβολή, αφού λάβαμε υπόψη την καταστολή της κεραίας, αλλά πριν την επεξεργασία συσχέτισης και το προσαρμοστικό φιλτράρισμα.



Εικόνα 23: Αναμενόμενος λόγος σήματος προς παρεμβολή [4, σελ 108]

Για τον υπολογισμό των οβάλ κάλυψης, δημιουργήσαμε έναν κώδικα σε MATLAB που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Τα οβάλ, που εξάγονται από τον κώδικα, έχουν ως κέντρο το μέσον της γραμμής βάσης L . Συνεπώς οι εστίες βρίσκονται στις θέσεις $(-L/2, 0)$ και $(0, L/2)$, του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα, όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο.

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο υπολογίζεται από τη σχέση (4.4.3) λαμβάνοντας υπόψη το κέρδος επεξεργασίας 47 dB .

Το κέρδος επεξεργασίας που εκφράζεται από τη σχέση, [20, σελ. 323]:

$$\mathbf{G}_p = \mathbf{T} * \mathbf{B} \quad (5.1)$$

όπου \mathbf{G}_p είναι το κέρδος επεξεργασίας ή συμφασικής ολοκλήρωσης και \mathbf{T} , \mathbf{B} , είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης και το εύρος ζώνης των σημάτων, αντίστοιχα. Η συμφασική ολοκλήρωση προϋποθέτει ότι τα σήματα ηχούς είναι συμφασικά, πράγμα που εξαρτάται από την επιτάχυνση του στόχου. Με το κέρδος ολοκλήρωσης, αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο της επεξεργασίας κατά τον παράγοντα \mathbf{G}_p οπότε: [20, σελ. 323]:

$$\mathbf{SNR} = \mathbf{G}_p * \mathbf{SNR}_{in} \quad (5.2)$$

από τη σχέση (5.2) και την (4.4.3), αυτή μετατρέπεται στη σχέση:

$$\mathbf{SNR} = \mathbf{G}_p * \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2 * k * T_0 * B * F} \quad (5.3)$$

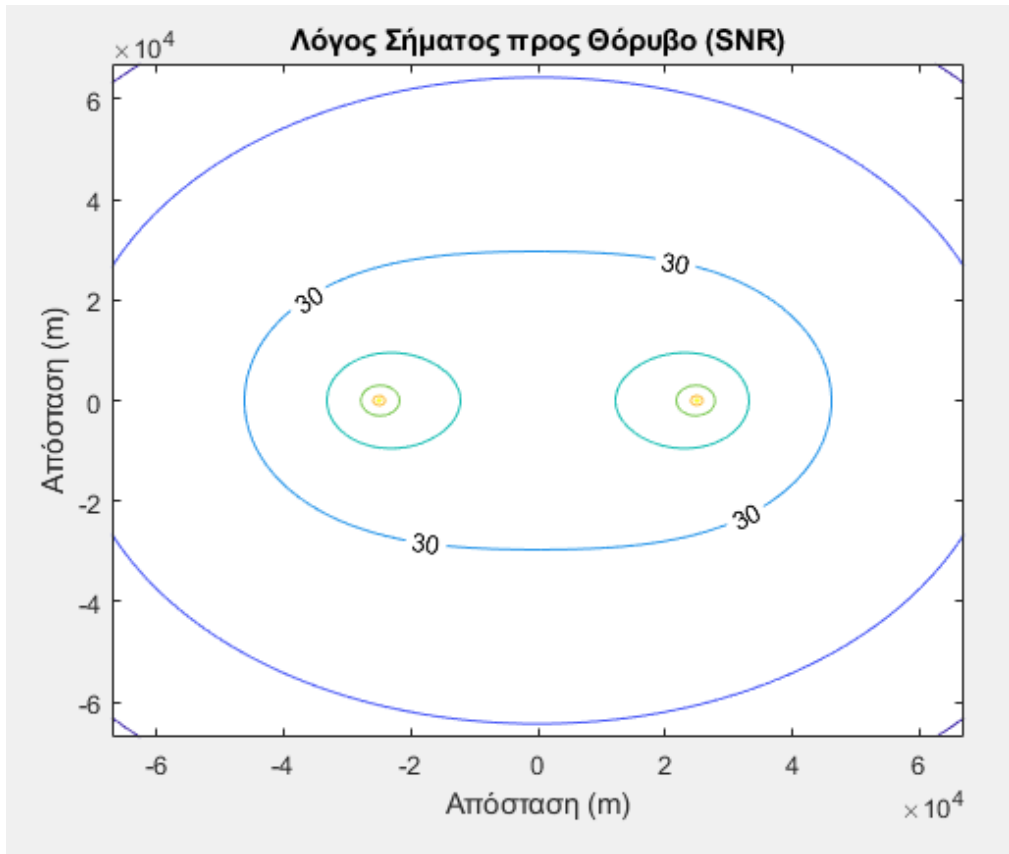
Επίσης, ο λόγος σήματος ηχούς (\mathbf{P}_r) προς παρεμβολή (\mathbf{P}_i) στις αντίστοιχες αποστάσεις θα βρίσκεται από τη σχέση:

$$\mathbf{SIR} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{G_t * G_r * \sigma * L^2}{G_{rt} * 4\pi R_1^2 R_2^2} \quad (5.4)$$

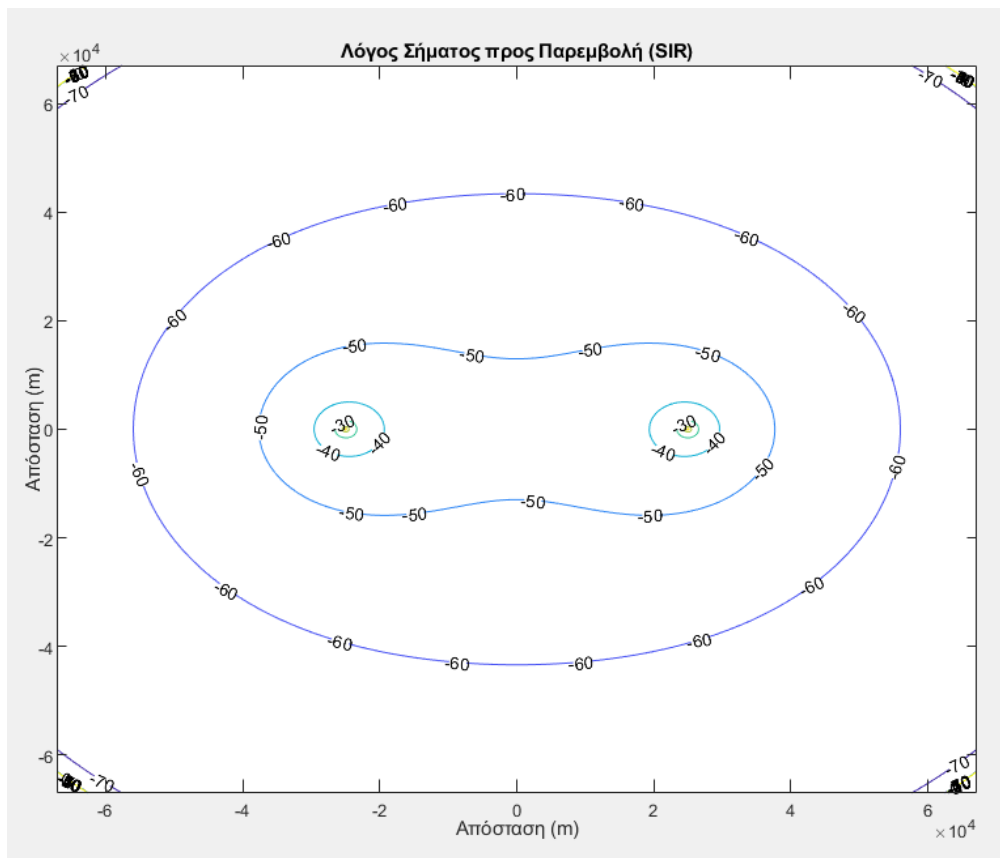
Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις είναι γνωστές από τις προηγούμενες παραγράφους. Αυτό που προστίθεται είναι το \mathbf{G}_p που είναι το κέρδος επεξεργασίας, το \mathbf{G}_{rt} είναι το κέρδος της κεραίας παρακολούθησης στην κατεύθυνση του πομπού που εκμεταλλευόμαστε και \mathbf{L} είναι η απόσταση πομπού-δέκτη (γραμμή βάσης). Από τη σχέση (5.4) γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι χρειάζεται να γίνει επιλογή μιας κεραίας παρακολούθησης η οποία να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο κέρδος προς την κατεύθυνση του πομπού. Αν ο πομπός βρίσκεται πίσω από την κεραία ακριβώς τότε η κεραία παρακολούθησης είναι απαραίτητο να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο λόγο front-to-back.

Κώδικας σε Matlab για εξαγωγή Οβάλ του Cassini

```
Pt=50000; %Ισοδύναμη Ισχύς Εκπομπής
Gr=10^0.8; %Κέρδος Λήψης προς Στόχο
Gr2=10^(-2.7);%Κέρδος Λήψης προς Πομπό
Gt=1; %Κέρδος Κεραίας πομπού
c=3e8; %Ταχύτητα του φωτός
f=95.1*10^6; %Συχνότητα Φέροντος
lamda=c/f; %Μήκος κύματος
k=1.38*10^(-23); % Σταθερά Boltzmann
B=110000; %Εύρος
RCS=10; %Ραδιοτομή Στόχου σε m^2
FdB=15; %Παράγοντας Θορύβου σε dB
F=10^(FdB/10); %Παράγοντας Θορύβου
Gpdb=47; %Κέρδος επεξεργασίας σε dB
Gp=10^(Gpdb/10); %Κέρδος επεξεργασίας
T0=290; %Θερμοκρασία Θορύβου
LossesdB=14; %Απώλειες σε dB
Losses=10^(-LossesdB/10); %Απώλειες
K=(Pt*Gt*Gr*Losses*(lamda^2)*RCS*Gp)/((4*pi)^3*k*T0*B*F);
L=50000; %Απόσταση Πομπού - Δέκτη
[X,Y] = meshgrid(-67000:100:67000,-67000:100:67000);
snr=K./((X.^2+Y.^2).^2-(L^2/2)*(X.^2-Y.^2)+((L^4)/16)); %Σηματοθορυβικός Λόγος
snrdb=10*log10(snr); %Σηματοθορυβικός Λόγος σε dB
snrdb1=snrdb.*(snrdb>=15); %Ανίχνευση στόχου για SNR μεγαλύτερο των 15dB
figure(1)
[C,h] = contour(X,Y,snrdb1);
set(h,'ShowText','on','TextStep',get(h,'LevelStep')*3)
sir1=RCS*Gr*L^2./(Gr2*(4*pi*((X.^2+Y.^2).^2-((L^2)/2)*(X.^2-Y.^2)+((L^4)/16))));
sdr=10*log10(sir1); %Λόγος Σήματος προς παρεμβολή σε dB
sir1=sdr.*(snrdb>=15); %Ανίχνευση στόχου για SNR μεγαλύτερο των 15dB
figure(2)
[C1,h1] = contour(X,Y,sir1);
set(h1,'ShowText','on','TextStep',get(h1,'LevelStep')*1)
```



Εικόνα 24: Θεωρητική κάλυψη του συστήματος με οβάλ του Cassini,

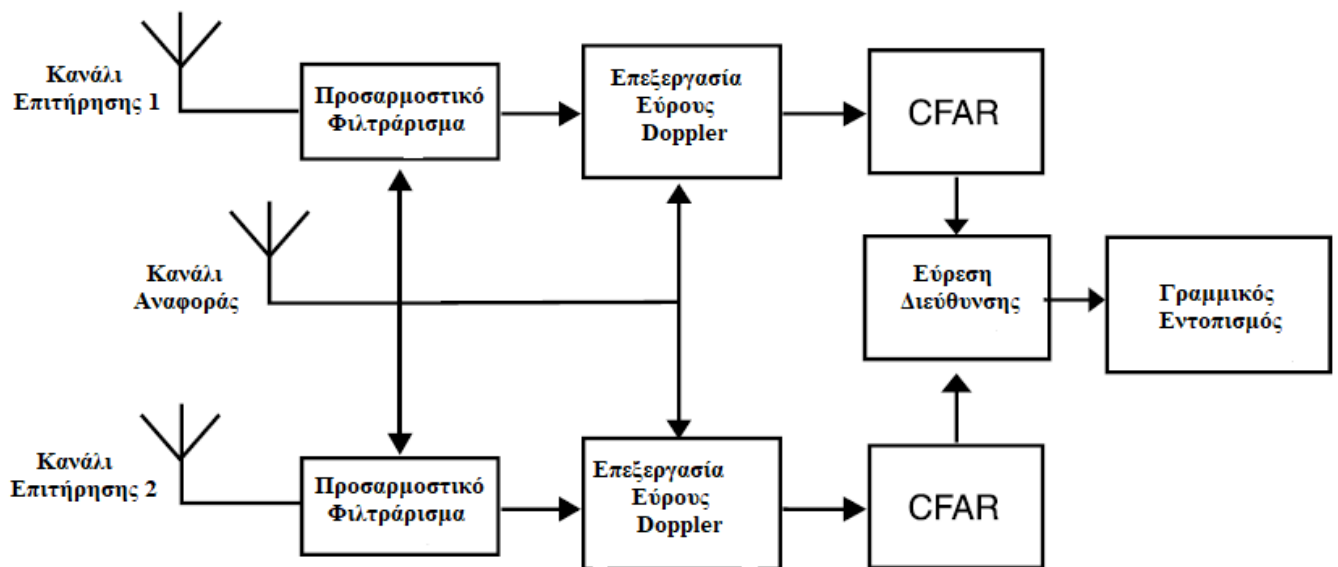


Εικόνα 25: Λόγος του σήματος ηχούς προς παρεμβολή

Στην εικόνα 24 παρουσιάζεται η θεωρητική κάλυψη του συστήματος με οβάλ του Cassini, τα οποία δείχνουν σε δισδιάστατη γεωμετρία τις πιθανές θέσεις στόχων με λόγο σήματος προς θόρυβο μεγαλύτερο από 15 dB. Η τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο 15 dB, χρησιμοποιείται ως λογικό όριο για την επίτευξη ανίχνευσης στόχων. Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται ο λόγος του σήματος ηχούς προς την παρεμβολή από την πηγή εκπομπής με οβάλ του Cassini, όπου οι πιθανές θέσεις στόχων έχουν επιστροφές λόγου σήματος προς θόρυβο μικρότερο από 15 dB.

5.3 Ανάλυση Συστήματος

Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε ένα block διάγραμμα του αλγορίθμου επεξεργασίας.



Εικόνα 26: Block διάγραμμα Επεξεργασίας σήματος[4, σελ 109]

Το σήμα λαμβάνεται από ένα ψηφιακό σύστημα λήψης που περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία κανάλια. Ένα κανάλι αναφοράς και δύο κανάλια επιτήρησης για εύρεση κατεύθυνσης. Ένα προσαρμοσμένο φίλτρο εφαρμόζεται στα δύο κανάλια επιτήρησης για την απόρριψη του ανεπιθύμητα μεταδιδόμενου σήματος και κατόπιν τα ψηφιακά δεδομένα από τα τρία κανάλια τροφοδοτούνται στον επεξεργαστή απόστασης- Doppler, που εξάγει δύο επιφάνειες της συνάρτησης αβεβαιότητας μία για κάθε κανάλι επιτήρησης.

Ύστερα εφαρμόζεται ένα συμβατικό σχήμα ανίχνευσης σταθερού ρυθμού λανθασμένου συναγερμού (CFAR) στις δύο επιφάνειες της συνάρτησης αβεβαιότητας για τον καθορισμό

της απόστασης και της μετατόπισης Doppler κάθε στόχου. Η μιγαδική τιμή του σήματος ηχούς ενός στόχου που λαμβάνεται από κάθε κανάλι επιτήρησης, τροφοδοτείται ύστερα στον επεξεργαστή εύρεσης της διεύθυνσής (DOA). Με δύο κανάλια επιτήρησης, το σύστημα εύρεσης διεύθυνσης χρησιμοποιεί συμβολομετρία φάσης για την εκτίμηση της διεύθυνσης του στόχου. Σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας στο σύστημα έχει καθοριστεί η διστατική απόσταση, η διεύθυνση και η μετατόπιση Doppler ενός αριθμού στόχων.

Για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων είναι απαραίτητο να συσχετίσουμε τα δεδομένα με ξεχωριστούς στόχους με τη χρήση συμβατικού εντοπιστή φίλτρου Kalman, στον γραμμικό εντοπιστή (Plot to target association).

Τέλος, τα δεδομένα που έχουν συσχετιστεί με κάθε στόχο ξεχωριστά, επεξεργάζονται από έναν μη γραμμικό εντοπιστή ώστε να καθοριστεί η θέση και η ταχύτητα του στόχου.

5.3.1 Συλλογή Δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων γίνεται από τρεις κεραίες, ένα κανάλι αναφοράς και δύο κανάλια παρακολούθησης για την εύρεση της γωνίας άφιξης του σήματος. Οι κεραίες είναι συνδεδεμένες σε ψηφιακούς δέκτες Cubic Communications VXI-3570A, όπου το σήμα δειγματοληπτείται ορθογωνικά σε ένα εύρος 110 KHz στο ψηφιακό μέρος του δέκτη. Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο μέσω τοπικού δικτύου LAN στη μονάδα επεξεργασίας. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η καταστολή του ανεπιθύμητου απευθείας σήματος από τα κανάλια παρακολούθησης.

Η επεξεργασία ετεροσυσχέτισης ανάμεσα στο σήμα αναφοράς και στα κανάλια παρακολούθησης έχει ως αποτέλεσμα κάθε ανεπιθύμητο σήμα αναφοράς στα κανάλια παρακολούθησης να περιορίζεται στις ψηφίδες (bins) μηδενικής απόστασης και μετατόπισης Doppler (απουσία κίνησης μεταξύ πομπού και δέκτη). Παρόλα αυτά, το σήμα αναφοράς συσχετίζεται με την εξασθενημένη μορφή του, δημιουργώντας σημαντικούς πλευρικούς λοβούς σε διστατική απόσταση και συχνότητα Doppler στη συνάρτηση αβεβαιότητας.

Στην καλύτερη περίπτωση, με χρόνο ολοκλήρωσης 1 δευτερολέπτου και 50 kHz ισοδύναμο εύρος ζώνης, αυτοί θα είναι 47 dB κάτω από το κύριο μέγιστο της αυτοσυσχέτισης. Ωστόσο, δεδομένου ότι το απευθείας σήμα μπορεί να είναι έως και 80-90 dB ισχυρότερο από τις επιστροφές ηχούς, αυτό σημαίνει ότι οι πλευρικοί λοβοί παραμένουν 30-40 Db μεγαλύτεροι από τις επιστροφές που αναμένουμε να ληφθούν. Επίσης,

αναμένονται επιστροφές σημάτων σκεδαζομένων από ακίνητους σκεδαστές στο έδαφος (clutter).

Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό το άμεσο σήμα και το clutter να αφαιρούνται από τα κανάλια επιτήρησης πριν τη διαδικασία ετεροσυσχέτισης. Έτσι, χρησιμοποιείται ένα φίλτρο προσαρμοστικής καταστολής θορύβου με στόχο την εκτίμηση του επιθυμητού σήματος (σήμα ηχούς χωρίς παρεμβολές).

5.3.2 Ανίχνευση στόχου με ετεροσυσχέτιση

Έχοντας φιλτράρει προσαρμοστικά το απευθείας σήμα είναι απαραίτητη η αναζήτηση των μετατοπισμένων κατά Doppler και καθυστερημένων χρονικά επιστροφών ηχούς από τους στόχους. Αυτό το βήμα επεξεργασίας εξυπηρετεί δύο διαφορετικούς σκοπούς στο σύστημα ραντάρ:

- να λειτουργεί ως προσαρμοσμένο φίλτρο για το σύστημα ραντάρ και να παρέχει το απαραίτητο κέρδος επεξεργασίας σήματος ώστε να επιτρέπεται η ανίχνευση της ηχούς των στόχων
- να εκτιμάει τη διστατική απόσταση και τη μετατόπιση Doppler του στόχου.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια διακριτικότητα απόστασης (με έναν πομπό) περίπου 2-3 km (εξαρτώμενη από τη στιγμιαία διαμόρφωση του σήματος, που εξαρτάται από το περιεχόμενο του προγράμματος της ραδιοφωνικής μετάδοσης). Η διακριτικότητα Doppler είναι αντίστροφη του χρόνου συμφασικής ολοκλήρωσης, δηλαδή τυπικά 1 Hz, που αντιστοιχεί σε μια διακριτικότητα ταχύτητας γύρω στα 1.5 m/s. Όταν γίνεται η υλοποίηση του δέκτη του ραντάρ, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει ένα υποσύνολο αποστάσεων και μετατοπίσεων προς εξέταση.

Πρακτικά, ο χρόνος συμφασικής ολοκλήρωσης περιορίζεται από τη μετακίνηση των στόχων έξω από το κελιά Doppler, και μερικές φορές από τα κελιά της απόστασης, που μας ενδιαφέρει. Ένας χρόνος ολοκλήρωσης γύρω στο 1 δευτερόλεπτο είναι βέλτιστος για τις περισσότερες περιπτώσεις πολιτικής εναέριας κυκλοφορίας και παρέχει ένα υπολογιστικό κέρδος περίπου 47dB.

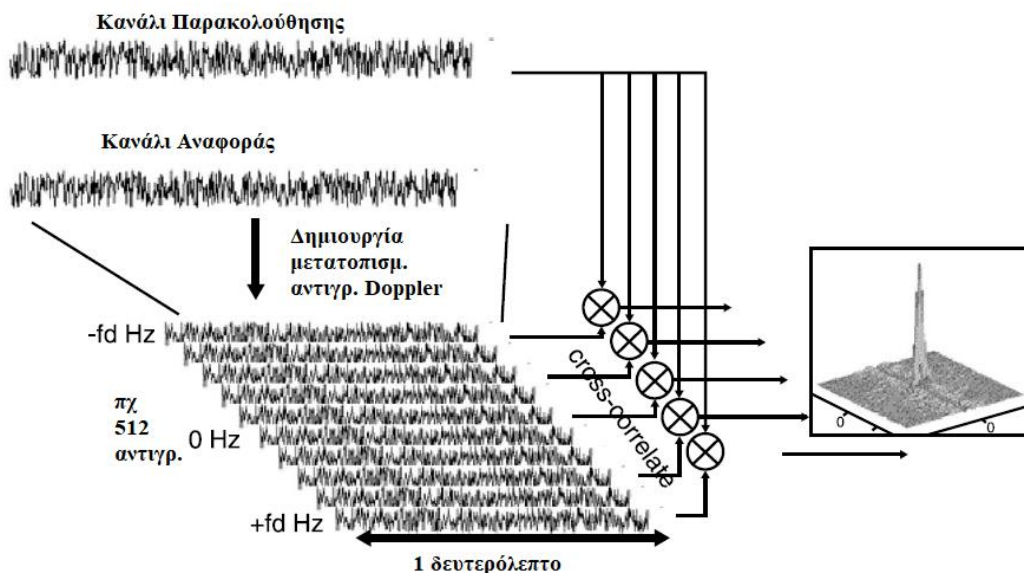
5.3.3 Περιγραφή αλγορίθμου επεξεργασίας

Η γενική ιδέα της εκτίμησης απόστασης Doppler φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 27). Ο αλγόριθμος λειτουργεί με ένα δείγμα δεδομένων ενός δευτερολέπτου και δημιουργεί μετατοπισμένα κατά Doppler αντίγραφα του σήματος αναφοράς. Ακολούθως, ο αλγόριθμος

λειτουργεί ως μια τράπεζα φίλτρων, κάθε ένα προσαρμοσμένο σε διαφορετική ταχύτητα στόχου. Η επεξεργασία στην εικόνα 27 είναι ανάλογη με τον υπολογισμό της συνάρτησης αβεβαιότητας και μπορεί να γραφτεί σε διακριτό χρόνο ως [4, σελ 111]:

$$|\Psi(\tau, \nu)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{e}(n) \mathbf{d}^*(n - \tau) e^{j2\pi\nu n/N} \right| \quad (5.5)$$

όπου το Ψ δηλώνει την επιφάνεια στο διάγραμμα πλάτους-απόστασης-Doppler (Amplitude – Range – Doppler -ARD) που επιζητούμε να υπολογίσουμε, το $\mathbf{e}(n)$ δηλώνει το φιλτραρισμένο σήμα ηχούς και $\mathbf{d}(n)$ παριστάνει το σήμα αναφοράς. Η μεταβλητή τ δηλώνει το χρόνο καθυστέρησης που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη διστατική διαφορά χρόνου άφιξης (TDOA) και η ν δηλώνει την εξεταζόμενη μετατόπιση Doppler. Το σήμα αναφοράς $\mathbf{d}(n)$ μπορεί να σταθμιστεί χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση βαρύτητας πριν τον υπολογισμό της επιφάνειας ARD της συνάρτησης αβεβαιότητας ούτως ώστε να μειωθούν οι πλευρικοί λοβοί στα κελιά της απόστασης και της μετατόπισης Doppler, με κόστος ενός πιο διευρυμένου κύριου μεγίστου και μιας μικρής απώλειας στο κέρδος επεξεργασίας.



Εικόνα 27: Block διάγραμμα Επεξεργασίας σήματος[4, σελ 111]

Ο πιο προφανής τρόπος για την υλοποίηση αυτής της διαδικασίας θα ήταν ο υπολογισμός του διακριτού μετασχηματισμού Fourier του $\mathbf{e}(n) \mathbf{d}^*(n - \tau)$ για κάθε απόσταση ενδιαφέροντος.

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας ARD για κάθε απόσταση ενδιαφέροντος θα πρέπει να, [4, σελ. 111]:

- σχηματίσουμε την ανάστροφη εικόνα των στοιχείων του $\mathbf{d}(\mathbf{n})$ και να δημιουργήσουμε το συζυγή του για την εύρεση του απαιτούμενου χρόνου καθυστέρησης, $\mathbf{d}^*(\mathbf{n} - \boldsymbol{\tau})$
- πολλαπλασιάζουμε το ανεστραμμένο σήμα $\mathbf{d}(\mathbf{n})$ με το $\mathbf{e}(\mathbf{n})$
- υπολογίσουμε τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transforms – FFT) του γινομένου $\mathbf{e}(\mathbf{n})\mathbf{d}^*(\mathbf{n} - \boldsymbol{\tau})$
- απορρίπτουμε τα δεδομένα μετατοπίσεων Doppler που δε μας ενδιαφέρουν

Πρέπει να σημειώσουμε πως αυτός ο αλγόριθμος επιτρέπει τον υπολογισμό ενός περιορισμένου αριθμού αποστάσεων, αλλά όλων των πιθανών μετατοπίσεων Doppler (περιορισμένο μόνο από το ρυθμό δειγματοληψίας).

5.4 Υλοποίηση Συστήματος

Το κύριο μειονέκτημα των προσεγγίσεων που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους είναι το υπερβολικά μεγάλο φορτίο επεξεργασίας λόγω των υπολογισμών γρήγορων μετασχηματισμών Fourier (FFT) για ισχυρά σήματα εισόδου. Αυτό μπορεί να επιλυθεί με την εφαρμογή μιας τεχνικής αποδεκατισμού (decimation) που επιτρέπει απόρριψη δεδομένων σε συχνότητες Doppler όπου είναι γνωστή η ανυπαρξία στόχων, πριν από τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier.

Αυτός ο τροποποιημένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί κάποια επιπλέον βήματα επεξεργασίας για τον αποδεκατισμό του σήματος. Παρόλα τα επιπλέον βήματα όμως, το υπολογιστικό κόστος μειώνεται σχεδόν χωρίς καθόλου απώλεια στο κέρδος επεξεργασίας σήματος.

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στον βασικό αλγόριθμο και σε αυτήν την μετατροπή είναι η παρουσία δύο πρόσθετων συναρτήσεων στη διαδικασία επεξεργασίας, δηλαδή ενός φίλτρου CIC (cascaded integrator-comb) και ενός χαμηλοπερατού FIR (Finite Impulse Response) φίλτρου (LPF). Το φίλτρο CIC αποτελεί μια πολύ αποδοτική υλοποίηση ενός φίλτρου αποδεκατισμού και περιγράφεται στις [21] και [22].

5.4.1 Αλγόριθμος ανίχνευσης CFAR

Έχοντας δημιουργήσει μια επιφάνεια ARD, είναι στη συνέχεια απαραίτητο να ανιχνεύσουμε αυτόματα τις ψηφίδες (bins) απόστασης και μετατόπισης Doppler στους

οποίους βρίσκονται έγκυροι στόχοι. Αυτό υλοποιείται με τη χρήση ενός αλγορίθμου συνεχούς ρυθμού λανθασμένου συναγερμού (Constant False Alarm Rate - CFAR).

Προκειμένου να διατηρηθεί μια σταθερή πιθανότητα λανθασμένου συναγερμού, το κατώφλι ανίχνευσης αλλάζει σύμφωνα με μια εκτίμηση της μεταβλητής θορύβου. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε ολόκληρη την επιφάνεια ARD, πρώτα στον τομέα εύρους και μετά στο Doppler. Οι βέλτιστες παράμετροι βρέθηκαν εμπειρικά να είναι:

- αριθμός κελιών για μέσο όρο $M = 10$
- $M/2$ κελιά σε κάθε πλευρά του υπό δοκιμή κυττάρου
- επίπεδο κατωφλίου $K_0 = 3$ dB

5.4.2 Εκτίμηση Κατεύθυνσης άφιξης

Για το αρχικό μας σύστημα εφαρμόζουμε μια απλή διαδικασία εκτίμησης γωνίας. Η γωνία άφιξης μιας ηχούς στόχου, Φ , σχετίζεται με τη διαφορά φάσης του λαμβανόμενου σήματος στις δύο κεραίες παρακολούθησης, Θ , από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\Theta) \quad (5.6)$$

όπου d είναι μια απόσταση μεταξύ των διπόλων, και λ είναι το μήκος κύματος. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τυχόν γωνιακές αμφισημίες οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε απόσταση μισού μήκους κύματος. Αυτό δίνει μια ασάφεια 180° , στόχοι μπροστά και πίσω από την κεραία δεν μπορούν να διακριθούν αλλά στην πράξη αυτό είναι αποδεκτό λόγω του λογικού λόγου εμπρός προς τα πίσω (front to back ratio) του μοτίβου κέρδους κεραίας, που σημαίνει ότι στόχοι πίσω από την κεραία σπάνια ανιχνεύονται. Η φάση κάθε ηχούς στην επιφάνεια ARD υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το όρισμα της σύνθετη τιμή τους. Οποιαδήποτε αναντιστοιχία φάσης μεταξύ των δύο καναλιών αφαιρείται στο λογισμικό χρησιμοποιώντας έναν απλό συντελεστή βαθμονόμησης.

5.4.3 Συσχέτιση Στόχου

Αν και πολλά συμβατικά ραντάρ επιτήρησης αέρα παράγουν ακατέργαστα δεδομένα ανίχνευσης για εντοπισμό από ένα εξωτερικό σύστημα, είναι καλύτερα για ένα παθητικό ραντάρ να εντοπίζει εσωτερικά ανιχνεύσεις αεροσκαφών από κάθε πομπό. Αυτή η ανίχνευση εκτελείται στο πεδίο εύρους –Doppler.

Χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό ιχνηλάτη, το σύστημα μπορεί στη συνέχεια να προωθήσει τα σχετικά δεδομένα για:

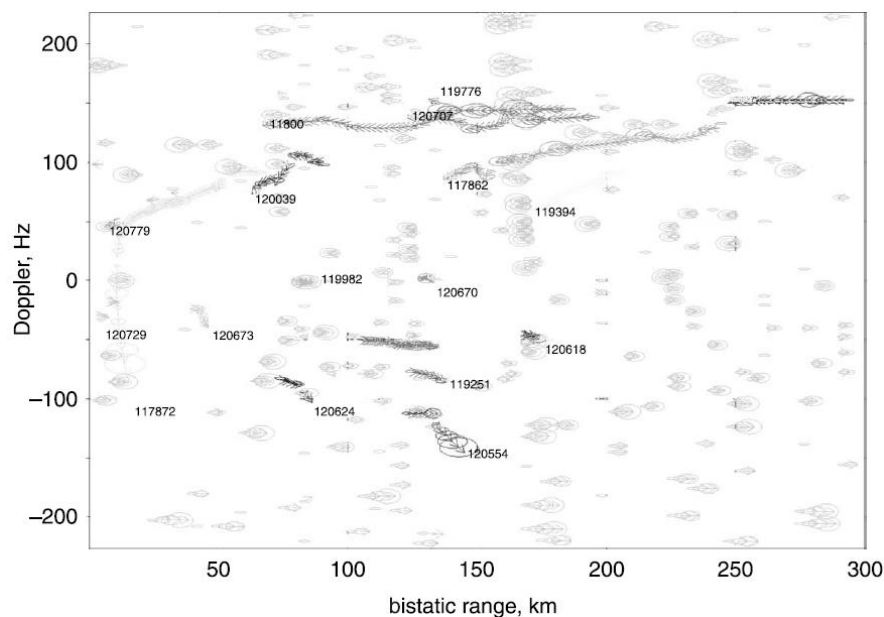
- συσχέτιση των επιστροφών από διαφορετικούς πομπούς του ίδιου στόχου (σε ένα πολυστατικό σύστημα)

- εκτίμηση κατάστασης στόχου

Στο πειραματικό μας σύστημα χρησιμοποιούμε το βασικό φίλτρο Kalman, το οποίο εκμεταλλεύεται τις μετρήσεις εύρους – Doppler που εξάγονται από τον αλγόριθμο. Στη συνέχεια εκτελείται συσχέτιση δεδομένων και η έναρξη, επιβεβαίωση και ακύρωση εντοπισμών λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τη λογική "m out of n". Μεταξύ όλων των τεχνικών, η προσέγγιση του Global Nearest Neighbor μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση συσχέτισης δεδομένων, η οποία επιχειρεί να βρει και να διαδώσει τη μοναδική περισσότερο πιθανή υπόθεση συσχέτισης δεδομένων σε κάθε σάρωση.

Κάθε μη συσχετισμένη ανίχνευση ξεκινά έναν δοκιμαστικό εντοπισμό. Εάν στις επακόλουθες σαρώσεις ο δοκιμαστικός εντοπισμός σχετίζεται με μια ανίχνευση, που πέφτει στην πύλη του, ο δοκιμαστικός εντοπισμός προωθείται σε επιβεβαιωμένο εντοπισμό. Διαφορετικά, διαγράφεται. Ένας επιβεβαιωμένος εντοπισμός διαγράφεται εάν δεν αναβαθμιστεί από ανιχνεύσεις πάνω από έναν συγκεκριμένο αριθμό διαστημάτων επεξεργασίας ή ορισμένου χρονικού διαστήματος.

Η θέση του στόχου και η εκτίμηση της ταχύτητας αρχικοποιούνται από τις ληφθείσες ανιχνεύσεις [6]. Από τη διαδικασία εντοπισμού της πειραματικής μας διαδικασίας τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 28: Παράδειγμα Ιχών Στόχων[4, σελ 113]

Στην παραπάνω απεικόνιση, εμφανίζεται μια έλλειψη σφάλματος σε κάθε εκτίμηση ίχνους (εντοπισμού), μαζί με ένα βέλος που δείχνει την πρόβλεψή του. Τα αρχικά ίχνη εμφανίζονται με ανοιχτό γκρι χρώμα, ενώ τα επιβεβαιωμένα είναι πιο σκουρόχρωμα. Η πλειονότητα των αρχικών ίχνων οφείλονται σε λανθασμένους συναγερμούς και δεν προάγονται ποτέ σε επιβεβαιωμένα.

5.4.4 Εκτίμηση κατάστασης στόχου - Επαλήθευση της απόδοσης του συστήματος

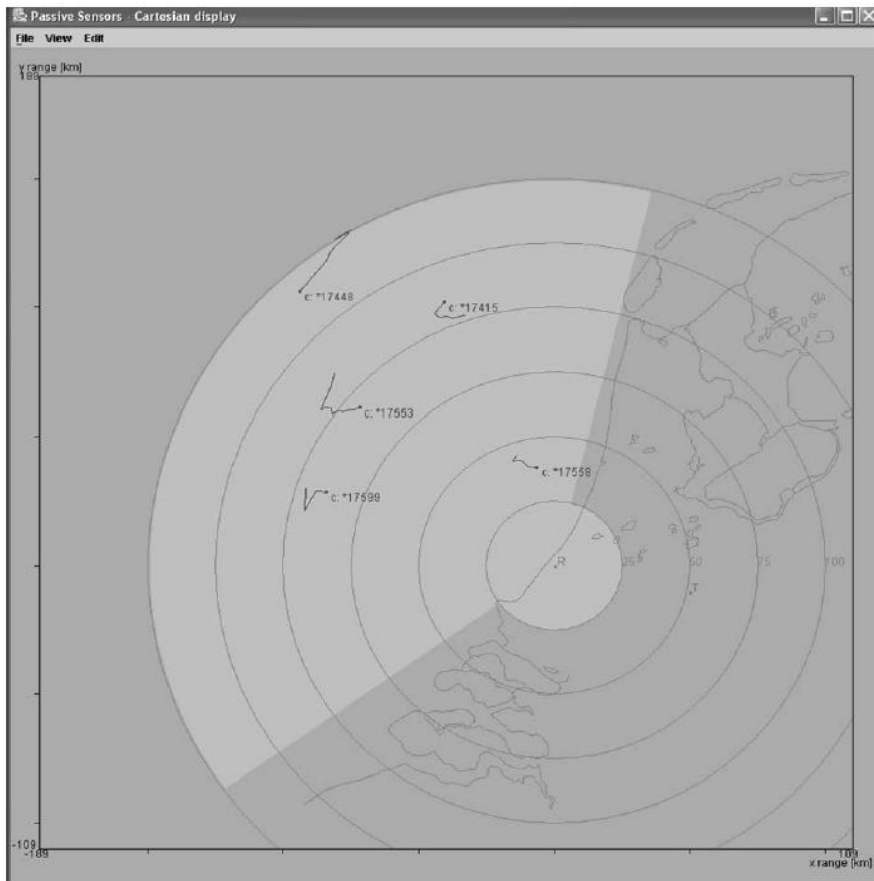
Χρησιμοποιούμε απλό τριγωνομετρικό μετασχηματισμό από διστατικό εύρος σε τοπικό καρτεσιανό σχήμα συντεταγμένων για την προβολή του στόχου σε γεωγραφικό χάρτη (Εικόνα 29).

Για να επαληθεύσουμε την απόδοση ανίχνευσης του συστήματος χρησιμοποιούμε μία ζωντανή ροή δεδομένων ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Διαβάζουμε αυτά τα δεδομένα μέσω ενός προγράμματος προβολής, φιλτράρουμε τα δεδομένα γεωγραφικά για να καλύψουμε μόνο την περιοχή στην οποία το σύστημά μας ανιχνεύει στόχους και στη συνέχεια τα εμφανίζουμε σε χάρτη (Εικόνα 30).

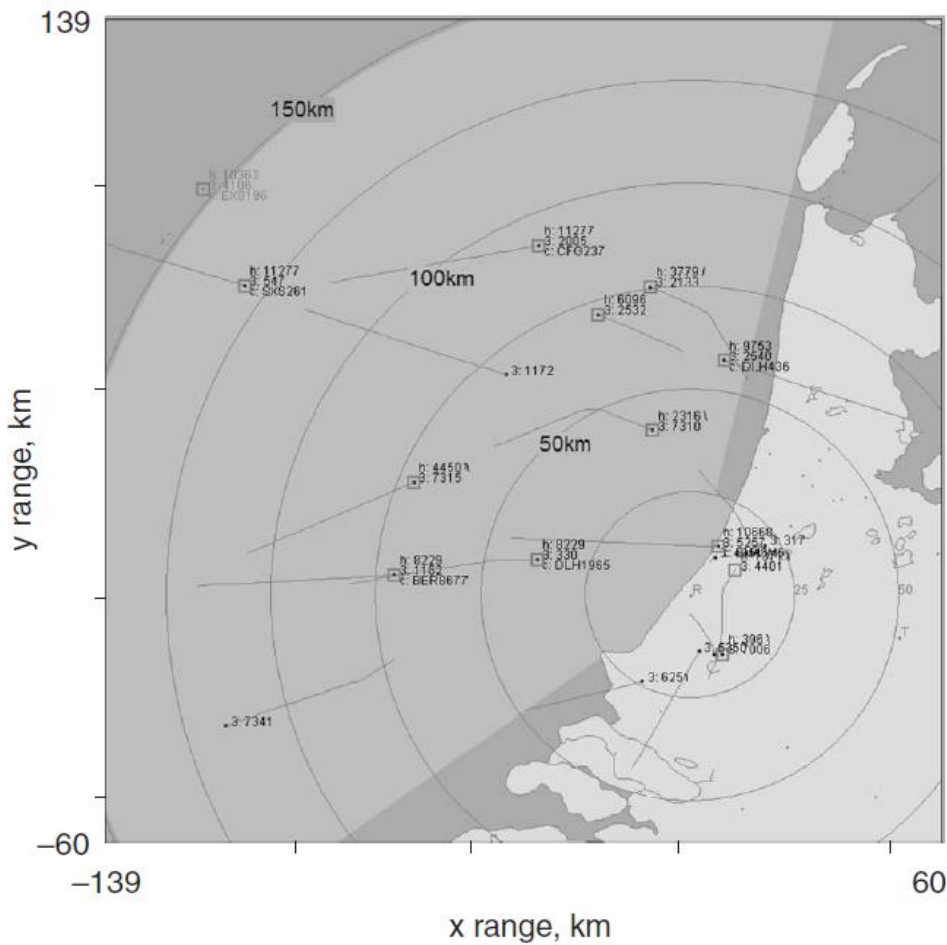
Λαμβάνουμε επίσης αυτά τα δεδομένα και υπολογίζουμε το διστατικό εύρος και τις μετατοπίσεις Doppler που κάθε στόχος θα παρουσίαζε στο Σύστημά μας. Εμφανίζουμε αυτά τα δεδομένα σε ξεχωριστή απεικόνιση εύρους – Doppler (Εικόνα 31).

Επιλέγοντας το σημείο ενός αεροσκάφους στην απεικόνιση εύρους – Doppler επισημαίνει το ίδιο αεροσκάφος στον χάρτη. Τα επιλεγμένα ίχνη και στις δύο απεικονίσεις εμφανίζονται ως τετράγωνα και είναι ορατά στις εικόνες 30 και 31. Μπορούμε επίσης να επικαλύψουμε τα πραγματικά δεδομένα απευθείας στην απεικόνιση εύρους – Doppler του συστήματος (Εικόνα 32) ως γρήγορο έλεγχο για το ποια αεροσκάφη έχουν εντοπιστεί.

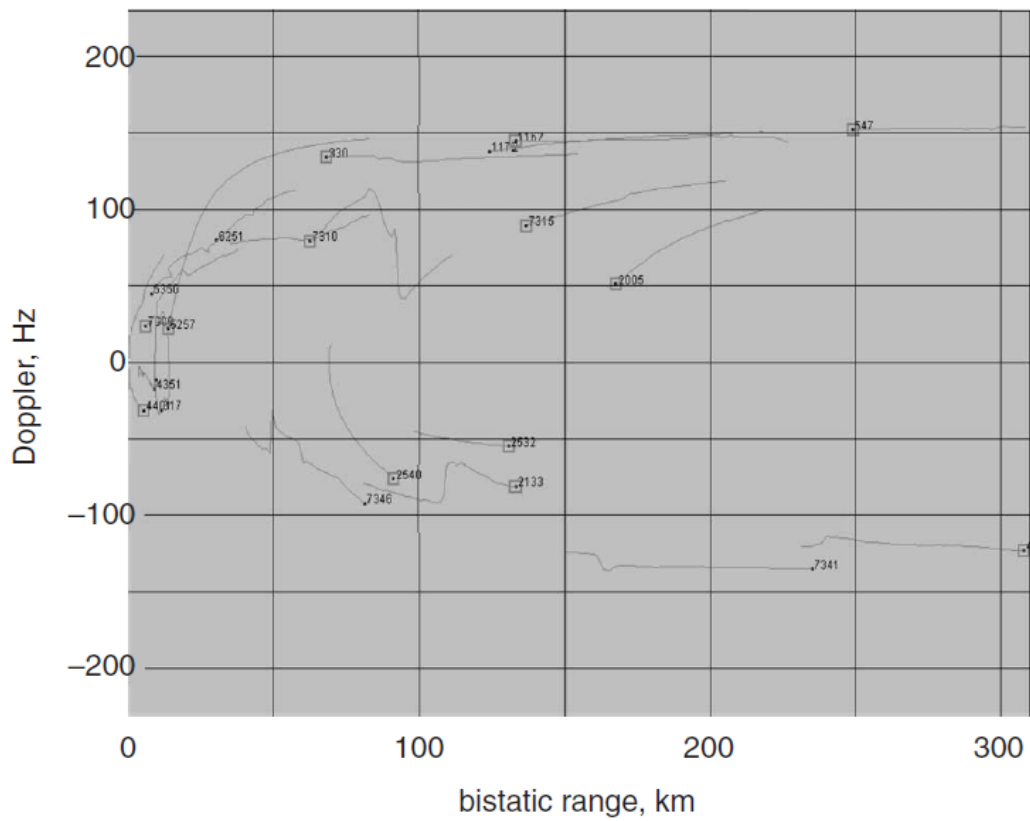
Αυτές οι τεχνικές παρέχουν επαλήθευση σε πραγματικό χρόνο για την απόδοση του συστήματος. Στα παραδείγματα που παρέχονται εδώ, είναι δυνατόν να συγκρίνουμε τα ίχνη στην Εικόνα 32 με τα πραγματικά ίχνη στην Εικόνα 31. Τα τελευταία ίχνη μπορούν στη συνέχεια να σχετίζονται άμεσα με τις θέσεις των αεροσκαφών συγκρίνοντας τους κωδικούς μεταξύ των εικόνων 30 και 31, ή απλώς αναζητώντας τα ίχνη που επισημαίνονται με τα τετράγωνα. Επιπλέον, είναι δυνατόν να συγκριθούν τα αποτελέσματα του συσχετισμού στόχου του παθητικού ραντάρ της εικόνας 28, με τα πραγματικά ίχνη, στην Εικόνα 31. Και στις δύο περιπτώσεις διαισθανόμαστε ότι τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά.



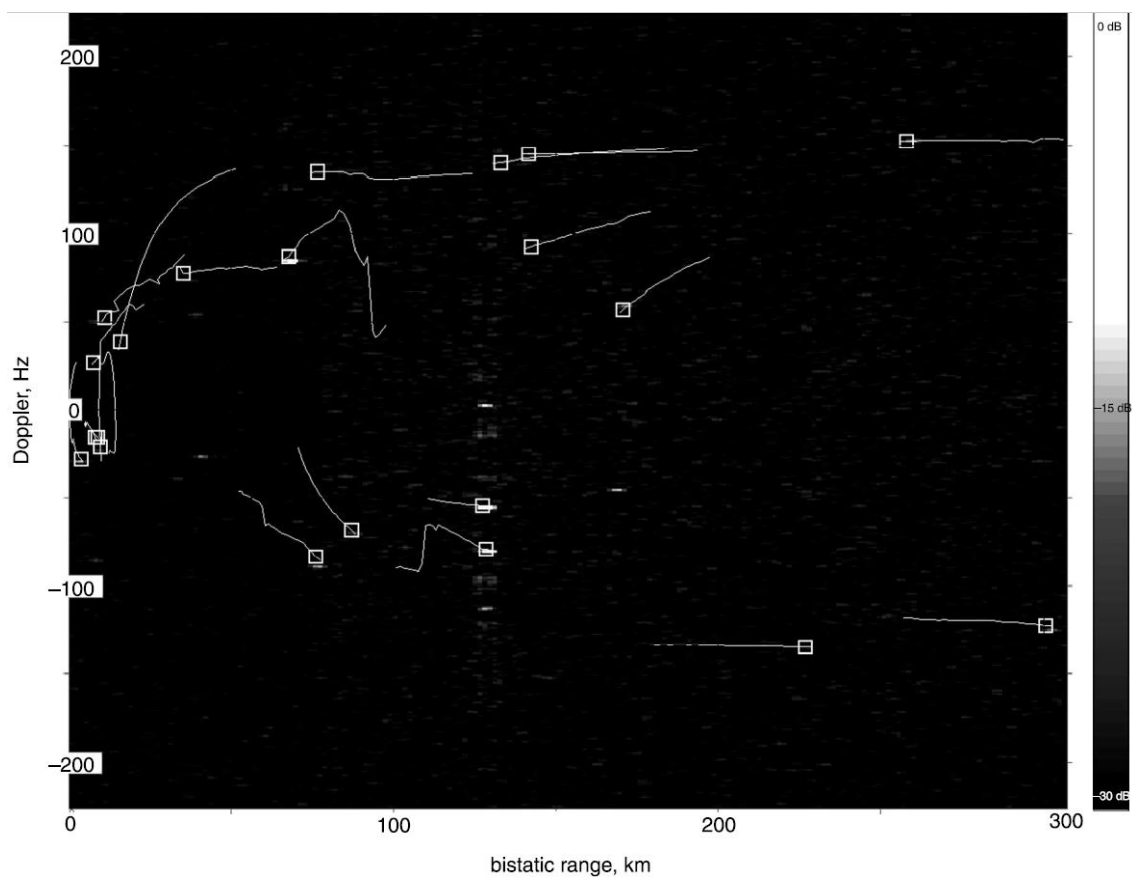
Εικόνα 29: Προβολή Ιχνών-Στόχων σε χάρτη[4, σελ 114]



Εικόνα 30: Πραγματικά Δεδομένα Εντοπισμένων Στόχων από παθητικό ραντάρ[4, σελ 114]



Εικόνα 31: Πραγματικά Δεδομένα Στόχων σε απεικόνιση Εύρους - Doppler[4, σελ 114]



Εικόνα 32: Επικάλυψη Πραγματικών Δεδομένων στην απεικόνιση Εύρους - Doppler [4, σελ 115]

Χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση, επαληθεύσαμε ότι το ραντάρ είναι ικανό για την αξιόπιστη ανίχνευση και παρακολούθηση αεροσκαφών σε διστατικές περιοχές πέραν των 300 χλμ., που αντιστοιχεί σε εμβέλεια έως 150 χλμ από τον δέκτη. Η αρχικοποίηση των εντοπισμών είναι αξιόπιστη σπάνια παρατηρούνται και εσφαλμένοι εντοπισμοί στόχων.

6. Συμπεράσματα

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση των συστημάτων παθητικών ραντάρ και των χαρακτηριστικών τους. Αναλύθηκαν βασικοί ορισμοί, ιστορικά στοιχεία, και έγινε εκτενής περιγραφή της διαμόρφωσης και λειτουργίας του διστατικού ραντάρ και των παραγόντων που το επηρεάζουν όπως ο θόρυβος και το clutter. Τέλος έγινε η περιγραφή ενός συστήματος παθητικού ραντάρ που ανιχνεύει αεροσκάφη πέρα από τα 150 km. Βασικές προκλήσεις υπήρξαν η ακύρωση του ανεπιθύμητου απ' ευθείας σήματος και οι επιστροφές του clutter επιφανείας από τα κανάλια παρακολούθησης και η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ικανού να επεξεργαστεί τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Οι μελλοντικές τάσεις στα συστήματα PCL θα πρέπει να επικεντρωθούν στην αντιμετώπιση των ελλείψεων των κυματομορφών ακτινοβολίας εκμεταλλεόμενες το δυναμικό των αναδυόμενων τεχνολογιών και εξερευνώντας νέες περιοχές εφαρμογής των παθητικών ραντάρ.

Με την ανάπτυξη της επεξεργασίας σήματος, της τεχνολογίας επεξεργασίας δεδομένων τα τελευταία χρόνια, και τις εξελίξεις στην αλγοριθμική ανάπτυξη, τα συστήματα PBR και το PCL έχουν φτάσει σε ένα στάδιο ωριμότητας που έχει επιτρέψει στις βιομηχανίες να προσεγγίσουν την αγορά στοχεύοντας κυρίως σε στρατιωτικές ανάγκες επιτήρησης αέρος ενώ ερευνητικοί οργανισμοί, πανεπιστήμια και βιομηχανίες έχουν προτείνει παθητικούς αισθητήρες ραντάρ για μη στρατιωτικές εφαρμογές [27].

Παραδείγματα περιλαμβάνουν παρακολούθηση της πυκνότητας κυκλοφορίας, παρακολούθηση ιδιωτικών αεροδρομίων και παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε λιμάνια. Ενώ η τεχνολογία είναι έτοιμη και η επεξεργασία έχει αποδείξει την ικανότητα διαχείρισης των σημερινών σημάτων εκπομπής, το περιβάλλον αλλάζει συνεχώς λόγω των αλλαγών στις ανάγκες δικτύων μετάδοσης και επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η αναλογική τηλεόραση αντικαταστάθηκε από ψηφιακή τηλεόραση (DVB-T). Το ραδιόφωνο FM εξαφανίζεται σταδιακά, αντικαθιστάμενο εν μέρει από το DAB. Οι κινητές επικοινωνίες έχουν αναπτυχθεί από GSM (Global System for Mobile Communication) σε UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) και LTE (Long Term Evolution) με την προοπτική του 5G.

Αυτή η συνεχής αλλαγή απαιτεί υψηλή ευελιξία του παθητικού δέκτη ραντάρ, που μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να υλοποιηθεί με έννοιες που βασίζονται στην ψηφιοποίηση των ληφθέντων σημάτων όσο το δυνατόν πιο κοντά στα στοιχεία της κεραίας του δέκτη και την επεξεργασία τους στον ψηφιακό τομέα. Ωστόσο, υφίσταται ο

περιορισμός ικανότητας της μετατροπής AD να καλύπτει το απαιτούμενο δυναμικό εύρος. Καθώς η ανάπτυξη των μετατροπέων AD προς υψηλότερους ρυθμούς δειγματοληψίας και μεγαλύτερα δυναμικά εύρη καθοδηγείται από τις ανάγκες της καταναλωτικής αγοράς και δεν συμβαδίζει με την ανάπτυξη ισχύος της υπολογιστικής επεξεργασίας, η ελλιπής απόδοση μπορεί να χρειαστεί ακόμη εξέταση προηγμένων λύσεων για τα υπόλοιπα αναλογικά εξαρτήματα, ειδικά της κεραίας. Έτσι, για ορισμένες εφαρμογές, έξυπνες ιδέες κεραιών με εξελιγμένη χωρική και φασματική απόδοση εξακολουθεί να είναι μια απαίτηση και μπορεί να είναι για αρκετό καιρό ακόμη. [6]

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κυριακού, “Σημειώσεις Συστημάτων Ραντάρ”, Ξάνθη 1991.
- [2] M. Tobias, A.D. Lanterman, “*Probability hypothesis density-based multitarget tracking with bistatic range and Doppler observations*,” IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, Vol. 152, No. 3, Atlanta, GA, USA, June 2005.
- [3] “*Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*,” Naval Air Warfare Center Weapons Division, Point Mugu, California, April 1999.
- [4] P.E. Howland, D. Maksimiuk, G. Reitsma, “*FM radio based bistatic radar*,” IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, Vol. 152, No. 3, Netherlands, June 2005.
- [5] Tamas Peto, Levente Dudas, “*DVB-T Based Passive Radar*”, Rudolf Sella Radar Research Group Broadband Infocommunications and Electromagnetic Theory Department Budapest University of Technology and Economics Budapest, Hungary, 2012-2015
- [6] Heiner Kuschel, Diego Cristallini, Fraunhofer, “*Tutorial: Passive Radar Tutorial*” Germany, February 2019
- [7] Μαλαχίας, Νικόλαος, Σάγος, Γεώργιος Α., “*Αρχές Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου*”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1998
- [8] Willis, N. J. “*Bistatic Radar*”. Silver Spring, MD: Technology Service Corporation, 1995.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radar
- [10] Γεώργιος Λημναίος, Κωνσταντίνος Ζηκίδης “*Παρουσίαση – Εξέταση Υλοποίησης Παθητικού Ραντάρ (PASSIVE RADAR)*”, Αύγουστος 2016
- [11] Junaid Abdullah , “*Geometry Optimization for Passive WiFi Radar Systems*”, January 2016
- [12] Hugh Griffiths, “*Passive Radar - From Inception to Maturity*”, February 2017
- [13] <https://www.leonardocompany.com/en/products/aulos>
- [14] F. Colone, P. Lombardo, and the RRSN Group – Dip. DIET, Univ. di Roma “La Sapienza” “*Passive Coherent Location – Principles and ongoing activity at DIET*”
- [15] Kuala Lumpur “*Passive Radar Technology used for the Detection of Small Aircraft*” F.D.V. Maasdorp fmaasdorp@csir.co.za EW Asia 2014 March 2014
- [16] S&T Organization Public Release, “*Passive Coherent Locator History and Fundamentals*”, STO-EN-SET-243
- [17] James W. A. Brown , “*FM Airborne Passive Radar*” ,April 2013

- [18] Terje Johnsen, Karl Erik Olsen, “*Bi- and Multistatic Radar*,” RTO-EN-SET-086, Norway, 2006.
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Radar_cross-section
- [20] Mateusz Malanowski, Krzysztof Kulpa, “*Analysis of Integration Gain in Passive Radar*,” International Conference on Radar, Warsaw, October 2008.
- [21] Hogenauer, E.B.: “*An economical class of digital filters for decimation and interpolation*”, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., 1981, ASSP-29, (2), pp. 155–162
- [22] Willson, Jr., A.N., Kwentus, A.Y., and Jiang, Z.: “*Application of filter sharpening to cascaded integrator-comb decimation filter*”, IEEE Trans. Signal Process., 1997, 45, (2), pp. 457–467
- [23] Blackman, S., and Popoli, R. “*Design and Analysis of Modern Tracking Systems*” Artech House Publishers, 1999.
- [24] Bar-Shalom, Y., Li, X., and Kirubarajan, T. “*Estimation with Applications to Tracking and Navigation*” Wiley-Interscience, 2001.
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Radar_cross-section#cite_note-A_Modis_17-17
- [26] Γεώργιος Λημναίος, Κωνσταντίνος Ζηκίδης “*Passive Radars and their use in modern Battlefield*”, Απρίλιος 2019
- [27] Kuschel, H., and Olsen, K. E. “*Passive and multi-static radar for civil applications*”, *IEEE AESS Systems Magazine Special Issue*, Vol. 32, 2 (Φεβρουάριος 2017).
- [28] http://www.mobileradar.org/Documents/Silent_Sentry.pdf
- [29] <http://www.radarmasters.uct.ac.za/news/remembering-birth-british-radar-%E2%80%9380-years-ago>