



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Αλγόριθμος Αυτοεστίασης Ειδώλου Αντίστροφου Ραντάρ
Συνθετικού Παραθύρου με Ελαχιστοποίηση της Εντροπίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Κ. ΠΟΥΡΑΪΜΗ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Φράγκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αλγόριθμος Αυτοεστίασης Ειδώλου Αντίστροφου Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου με Ελαχιστοποίηση της Εντροπίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Κ. ΠΟΥΡΑΪΜΗ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Φράγκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13η Ιουλίου 2011.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Παναγιώτης Φράγκος

Νικόλαος Ουζούνογλου

Κωνσταντίνα Νικήτα

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

(Υπογραφή)

.....

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΠΟΥΡΑΪΜΗΣ

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

Copyright © ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΠΟΥΡΑΪΜΗΣ

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

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι να μελετήσει την αυτοεστίαση ενός ειδώλου με την μέθοδο της ελαχιστοποίησης της εντροπίας σε ένα αντίστροφο ραντάρ συνθετικού παραθύρου (ISAR). Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στην θεωρία των ραντάρ με αναφορά σε βασικές έννοιες λειτουργίας. Στην συνέχεια, αναπτύσσεται η θεωρία των ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει τον τρόπο εντοπισμού ενός στόχου με το συγκεκριμένο είδος ραντάρ. Για την βέλτιστη κατανόηση της τεχνικής αυτοεστίασης του ραντάρ γίνεται αναφορά στην λειτουργία του αντίστροφου ραντάρ συνθετικού παραθύρου. Τέλος, αναπτύσσεται ο αλγόριθμος αυτοεστίασης και αναλύονται τα αποτελέσματα του πειράματος που γίνεται φανερή η βελτιστοποίηση του παραμορφωμένου ειδώλου μέσω της μεθόδου ελαχιστοποίησης της εντροπίας.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 2: Θεωρία ραντάρ.....	11
Εισαγωγή	11
Ιστορική αναδρομή	11
Εισαγωγή στα ραντάρ	12
Εξίσωση Ραντάρ	15
Συχνότητες ακτινοβολίας	17
Πομπός	18
Κεραίες ραντάρ	19
Δέκτης.....	20
Ραδιοδιατομή Στόχου.....	22
Ανίχνευση Στόχων	24
Επεξεργασία Σήματος.....	24
Επεξεργασία Σήματος.....	25
Προσαρμοσμένο Φίλτρο	26
Συνάρτηση Αβεβαιότητας	28
Κεφάλαιο 3: Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου (SAR).....	31
Εισαγωγή	31
Ιστορική Αναδρομή	31
Αρχές Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου	32
Εστιασμένες και μη-Εστιασμένες Κεραίες	33
Γεωμετρία Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου	34
Επιχειρησιακές Λειτουργίες Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου	36
Έρευνα Λωρίδας (Strip)	37
Έρευνα Σάρωση Δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening)	37
Έρευνα Φωτοδέσμης (Spotlight).....	38
Έρευνα Πολλαπλής Σάρωσης (Scansar)	38
Επεξεργασία Σήματος	39
Στοιχειώδη Επεξεργασία Σήματος	39
Συχνότητα Doppler	41
Επεξεργαστής Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου	47

Διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση και κατά διόπτρευση	48
Διακριβωτική Ικανότητα σε Εστιασμένα και Μη-Εστιασμένα Ραντάρ SAR.....	49
Σηματοθορυβικός λόγος	52
Συμπληρωματικά Θέματα	53
Σφάλμα Φάσης και Αντιστάθμιση Κίνησης.....	53
Αυτόματη Εστίαση (Autofocusing).....	54
Ελάττωση Φαινομένου Στίγματος/Κηλίδας (Speckle)	55
Κεφάλαιο 4: Ραντάρ Αντίστροφου Συνθετικού Παραθύρου (ISAR)	57
Εισαγωγή.....	57
Γεωμετρία και Περιγραφή ISAR	57
Εκπομπή και Λήψη Σήματος	60
Διακριβωτική Ικανότητα ISAR	61
Επεξεργασία βηματικής συχνότητας ISAR	62
Θεωρία Τεχνικής Αυτοεστίασης Ειδώλου ISAR.....	63
Συμπίεση Παλμών Κατά Απόσταση	64
Αντιστάθμιση Κίνησης Στόχου	65
Συμπίεση Παλμών Κατά Διόπτρευση.....	65
Κεφάλαιο 5: Αυτοεστίαση Ειδώλου ISAR με μέθοδο Ελαχιστοποίηση Εντροπίας.....	67
Εισαγωγή.....	67
Σήμα ISAR Βηματικής Συχνότητας.....	68
Αλγόριθμος αυτόματης εστίασης	70
Αριθμητικά Αποτελέσματα	74
Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία	81
Βιβλιογραφία	83
Πίνακας Εικόνων	85
Πίνακας Σχημάτων	87

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το ραντάρ είναι ένα σύστημα που το οποίο βασίστηκε στις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού και εξελίχθηκε από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα. Στην ακόλουθη διπλωματική εργασία μελετάται το ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) και πιο συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση του ειδώλου ενός αντιστρόφου ραντάρ συνθετικού παραθύρου (ISAR) με την μέθοδο της αυτοεστίασης και της ελαχιστοποίησης της εντροπίας.

Το ραντάρ συνθετικού παραθύρου βασίζεται στην τεχνολογία αεροπορικών ραντάρ εν κινήσει που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία τοπογραφικών υψηλής ευκρίνειας χαρτών για στόχους ακίνητους ή που εκτελούν μη δραστικές κινήσεις. Στόχοι υψηλής κινητικότητας που εκτελούν ελιγμούς δεν δύναται να αποδοθούν με μεγάλη ευκρίνεια λόγω της περιστροφικής τους κίνησης.

Το αντίστροφο ραντάρ συνθετικού παραθύρου (ISAR) είναι ένα είδος ραντάρ συνθετικού παραθύρου όπου το ραντάρ παραμένει ακίνητο ενώ ο στόχος κινείται. Το ραντάρ αυτό δύναται να παρέχει είδωλα υψηλής ευκρίνειας τα οποία εκτελούν δραστικές περιστροφικές κινήσεις.

Το κεφάλαιο 2 της παρούσης διπλωματικής εργασίας αναφέρεται στις αρχές του ραντάρ. Αρχικά, γίνεται μία ιστορική αναδρομή από την σύλληψη της ιδέας του ραντάρ μέχρι την πλήρη χρησιμοποίησή του. Στην συνέχεια αναφέρεται η θεωρία του ραντάρ όπως η εξίσωση ραντάρ, ο πομπός και δέκτης, οι συχνότητες λειτουργίας και εκπομπής και τέλος η ανίχνευση των στόχων μέσω της επεξεργασίας του σήματος, το προσαρμοσμένο φίλτρο, την συχνότητα αβεβαιότητας κ.α.

Στην συνέχεια στο κεφάλαιο 3, αναφέρεται η θεωρία του ραντάρ συνθετικού παραθύρου που άρχεται με την εξέλιξη αυτού στο πέρασμα του χρόνου, ενώ στην συνέχεια γίνεται λόγος για το είδος της κεραίας του ραντάρ (εστιασμένη, μη-εστιασμένη) και την γεωμετρία του. Επιπρόσθετα, αναφέρονται τα είδη ερεύνης του ραντάρ (έρευνα λωρίδας, σάρωσης δέσμης Doppler, φωτοδέσμης και πολλαπλής σάρωσης). Ακολούθως, αναπτύσσεται η επεξεργασία σήματος και η συχνότητα Doppler, ο επεξεργαστής του ραντάρ και οι διακριβωτικές ικανότητες κατά απόσταση και κατά διόπτευση σε εστιασμένα και μη-εστιασμένα ραντάρ και ο σηματοθορυβικός λόγος. Τέλος, γίνεται αναφορά στο σφάλμα φάσης και αντιστάθμιση της κίνησης του στόχου, στην αυτόματη εστίαση και στην ελάττωση του φαινομένου στίγματος/κηλίδας.

Στο κεφάλαιο 4, αναπτύσσεται η θεωρία του αντίστροφου ραντάρ συνθετικού παραθύρου όπου γίνεται αναφορά στην γεωμετρία και την περιγραφή του ραντάρ, στο σήμα εκπομπής και λήψης, στην διακριβωτική ικανότητα και στην επεξεργασία βηματικής συχνότητα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του αλγόριθμου αυτοεστίαση ειδώλου ISAR με χρησιμοποίησης της μεθόδου ελαχιστοποίησης της εντροπίας. Αναφέρεται η γεωμετρία του πειράματος και το σήμα βηματικής συχνότητας, η τεχνική αναδόμηση ειδώλου του ραντάρ μέσω της συμπίεσης παλμών κατά απόστασης, της αντιστάθμισης της κίνησης του στόχου και την συμπίεση παλμών κατά διόπτευση. Στην συνέχεια αναφέρεται αναλυτικά η λειτουργία του αλγορίθμου και τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 2: Θεωρία ραντάρ

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται εισαγωγικά στα ραντάρ, ξεκινώντας με μία ιστορική αναδρομή, για το πότε και πως ξεκίνησε το ραντάρ και πως εξελίχθηκε μέσα στον χρόνο. Στην συνέχεια, αναφέρεται στον σκοπό που εξυπηρετεί ένα ραντάρ καθώς και τα είδη που υπάρχουν. Ακολουθούν οι αρχές και οι βασικές εξισώσεις των ραντάρ προκειμένου να κατανοήσουμε το πώς λειτουργούν. Ανάλογα με την χρήση του ραντάρ (πολιτική ή στρατιωτική) αναφέρονται οι συχνότητες λειτουργίας. Τα βασικά μέρη ενός ραντάρ θεωρήθηκε σκόπιμο να αναφερθούν όπως ο πομπός και τα είδη αυτού, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται και τι εξυπηρετούν, ο δέκτης και η τοπολογία αυτού με τις εκάστοτε επιμέρους συσκευές. Τέλος γίνεται μία αναφορά στην ραδιοδιατομή του στόχου και στην διαδικασία ανίχνευσης των στόχων μέσω της επεξεργασίας και ανίχνευσης του σήματος, το προσαρμοσμένο φίλτρο και την συνάρτηση αβεβαιότητας.

Ιστορική αναδρομή

Η ιστορική αναδρομή του ραντάρ ξεκινάει από το 1887 όταν ο γερμανός φυσικός Heinrich Hertz ανακαλύπτει την ύπαρξη και τις ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001). Τα κύματα αυτά στην συνέχεια και προς τιμή του εφευρέτη τους ονομάστηκαν και 'ερτζιανά κύματα' (Hertzian waves). Το 1895 ο φυσικός Alexander Popov στο Imperial Russian Navy School κατασκεύασε μία συνεκτική καθοδική λυχνία εντοπισμού κεραυνών (Kostenko, Nosich, & Tishchenko, 2003). Δύο χρόνια μετά κατά την διάρκεια εκπομπής και λήψης σημάτων μεταξύ δύο πλοίων στην Βαλτική θάλασσα ο Popov παρατήρησε τον εντοπισμό ενός τρίτου πλοίου. Στην αναφορά του γράφει ότι το ανωτέρω φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον εντοπισμό στόχων χωρίς να δίνει περεταίρω συνέχεια.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, τόσο ο Tesla στις Ην. Πολιτείες της Αμερικής όσο και ο Hülsmeyer στην Γερμανία μελέτησαν τον εντοπισμό στόχων με την χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001). Ενώ, ο γάλλος επιστήμονας Pierre David χρησιμοποίησε επιτυχώς για πρώτη φορά το ραντάρ για τον εντοπισμό ενός αεροσκάφους και το 1935 οι Maurice Ponte και Henri Gutton κατά την διάρκεια δοκιμών επί του πλοίου *Orégon* εντόπισαν παγόβουνα με χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με μήκος κύματος $\lambda = 16 \text{ cm}$.

Κατά την διάρκεια του Β Παγκόσμιου Πολέμου η χρήση του ραντάρ έδωσε την δυνατότητα εντοπισμού στόχων αέρος τόσο την ημέρα όσο και την νύχτα. Από τις αρχές του 1940, ο Watson Watt για λογαριασμό της Βρετανικής Πολεμικής Αεροπορίας (RAF) ανέπτυξε ένα επίγειο δίκτυο από ραντάρ που έδωσε την δυνατότητα στους Άγγλους πιλότους της έγκαιρης προειδοποίησης κατά την "Μάχη

της Βρετανίας". Το 1942 ο γερμανικός στρατός κατασκεύασε το δικό του δίκτυο επίγειων ραντάρ που ειδοποιούσε το κέντρο ελέγχου αναχαίτισης για τους συμμαχικούς στόχους αέρος.

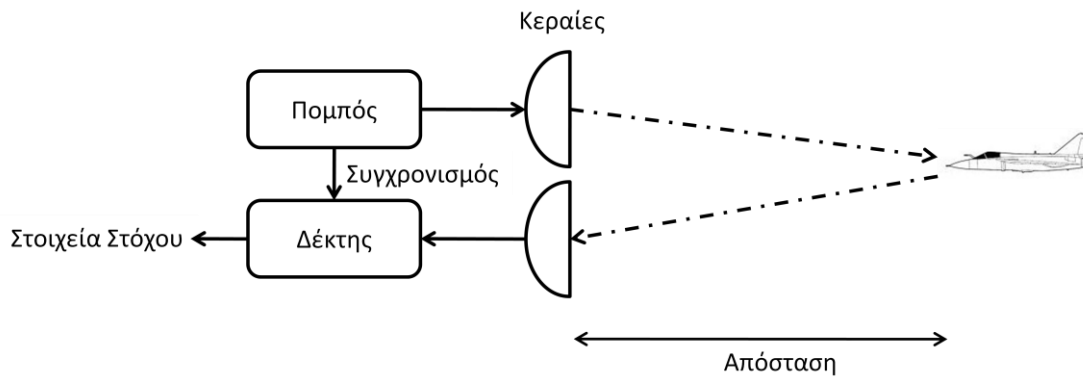
Το πρώτο ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε επιχειρησιακά από αεροσκάφος ήταν επί του γερμανικού αεροσκάφους Messerschmitt Me 110 G-4 το 1941. Άξιο λόγου είναι ότι το 1943 τα βομβαρδιστικά αεροσκάφη της Βρετανικής Πολεμικής Αεροπορίας χρησιμοποίησαν άφηση αντιμέτρων (λωρίδες μεταλλικών λεπτών φύλλων) προκειμένου να δημιουργήσουν σύγχυση στους χειριστές των γερμανικών ραντάρ. Το 1943 τοποθετήθηκαν τα πρώτα επιχειρησιακά ραντάρ επί πλοίων των συμμαχικών δυνάμεων για εντοπισμό περισκοπίων υποβρυχίων.

Τέλος, τα βασικά στάδια εξέλιξης της τεχνολογίας ραντάρ ήταν η συμπίεση παλμών (αρχές δεκαετίας '60), το Doppler ραντάρ (τέλη δεκαετίας '60), τα ψηφιακά ραντάρ (δεκαετία '70), τα ραντάρ μεσαίου PRF (τέλη δεκαετίας '70, αρχές '80), η απεικόνιση της γης με ραντάρ σε δορυφόρο (τέλη δεκαετίας '70), ραντάρ πολλαπλών λειτουργιών (μέσα '80) και ραντάρ αέρος ηλεκτρονικής σάρωσης (δεκαετία '90).

Εισαγωγή στα ραντάρ

Το ραντάρ είναι το ηλεκτρονικό σύστημα που χρησιμοποιείται για εντοπισμό στόχων - αντικειμένων. Η λέξη ραντάρ προέρχεται από την αγγλική λέξη radar (RADIo Detection And Ranging). Το ραντάρ αρχικά συσχετίστηκε με τα ραδιοκύματα ενώ στην συνέχεια κατασκευάστηκαν και ραντάρ που χρησιμοποιούσαν οπτικά κύματα και λέιζερ (laser) (Peebles, 1998).

Η βασική μορφή ενός διαγράμματος ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 1. Η συσκευή ραντάρ αποτελείται από ένα πομπό που είναι συνδεδεμένος με μία κεραία εκπομπής με σκοπό την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τον πομπό και ένα δέκτη που συνδέεται με μία κεραία λήψης προκειμένου να λαμβάνονται τα ανακλώμενα σήματα από τους στόχους. Γενικά, ο χώρος μεταξύ της συσκευής και του στόχου ονομάζεται μέσο ή κανάλι διάδοσης. Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ βασίζεται σε ένα σήμα που παράγεται από τον πομπό, μετατρέπεται από την κεραία σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όπου ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός μέχρι τον στόχο, ανακλάται και επιστρέφει στην κεραία λήψης, όπου μετατρέπεται σε σήμα λήψης και με κατάλληλη επεξεργασία στον δέκτη και στον επεξεργαστή σημάτων παρέχει τα στοιχεία του στόχου.



Σχήμα 1: Αρχή Λειτουργίας Ραντάρ

Τα ραντάρ διαχωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τα μονοστατικά, τα διστατικά και τα πολυστατικά ραντάρ. Στα μονοστατικά ραντάρ, οι κεραίες εκπομπής και λήψης ταυτίζονται και γι' αυτό μία κεραία λειτουργεί για εκπομπή και λήψη κατά περίπτωση. Τα διστατικά ραντάρ διατηρούν ξεχωριστές θέσεις για τις κεραίες εκπομπής και λήψης. Σε περίπτωση που υφίστανται πολλές κεραίες εκπομπής και λήψης τότε τα ραντάρ ονομάζονται πολυστατικά. Στην συνέχεια τα ραντάρ διαχωρίζονται ανάλογα με την κυματομορφή εκπομπής. Τα συνεχούς κύματος ραντάρ (continuous-wave radar) εκπέμπουν συνεχώς, συνήθως σταθερού πλάτους, ραδιοκύματα τα οποία μπορεί να είναι διαμορφωμένα κατά συχνότητα (FM: frequency modulation) ή να διατηρούν σταθερή την συχνότητα τους. Στην περίπτωση που η κυματομορφή είναι παλμικής μορφής τότε τα ραντάρ ονομάζονται παλμικά. Τα συνηθέστερα ραντάρ είναι τα μονοστατικά παλμικά ραντάρ.

Μία από τις βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των ραντάρ προκειμένου να διαχωρίσουν τους στόχους από τις ανεπιθύμητες επιστροφές (clutter) του περιβάλλοντος χώρου είναι η χρήση του φαινομένου της ολίσθησης Doppler (Nathanson, Reilly, & Cohen, 1999). Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι οι περισσότεροι στόχοι ενδιαφέροντος έχουν ένα γωνιακό ρυθμό μετατόπισης σε σχέση με το ραντάρ, ενώ οι περισσότερες ανεπιθύμητες επιστροφές που προέρχονται από το περιβάλλον παρουσιάζουν μηδενικό ρυθμό μετατόπισης. Στην περίπτωση που ο στόχος και οι ανεπιθύμητες επιστροφές δεν διατηρούν έστω ελάχιστη διαφορά στις ταχύτητες τους το φαινόμενο Doppler δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί. Η ολίσθηση Doppler για ένα συνεχούς κύματος σήμα δίνεται από την σχέση

$$f_d = \frac{2R'}{c} f = \frac{2u_r}{\lambda} \quad (2.1)$$

Όπου:

c = ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8$ m/sec)

f = συχνότητα εκπομπής

R' ή u_r = ρυθμός μετατόπισης ή ταχύτητα

Στην συνέχεια, ας θεωρήσουμε ότι η εκπεμπόμενη κυματομορφή ενός ραντάρ στην έξοδο του πομπού είναι $s(t)$. Η γενική μορφή της $s(t)$ δίνεται από την σχέση (2.2)

$$s(t) = \alpha(t) \cos[\omega(t) + \theta(t) + \varphi_0] \quad (2.2)$$

Όπου:

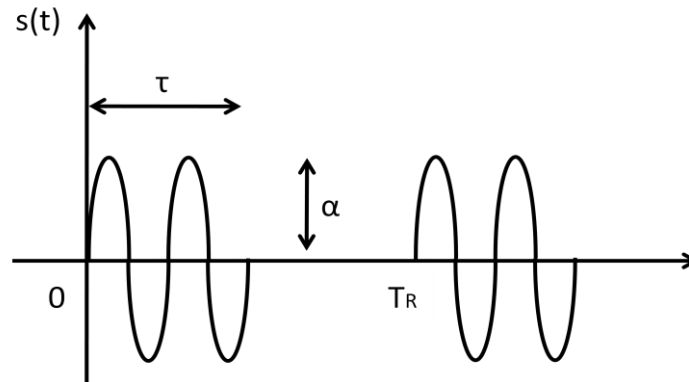
$\alpha(t)$ = πλάτος του διαμορφωμένου σήματος,

$\theta(t)$ = φάση λόγω της διαμόρφωσης,

φ_0 = αυθαίρετη γωνία φάσης.

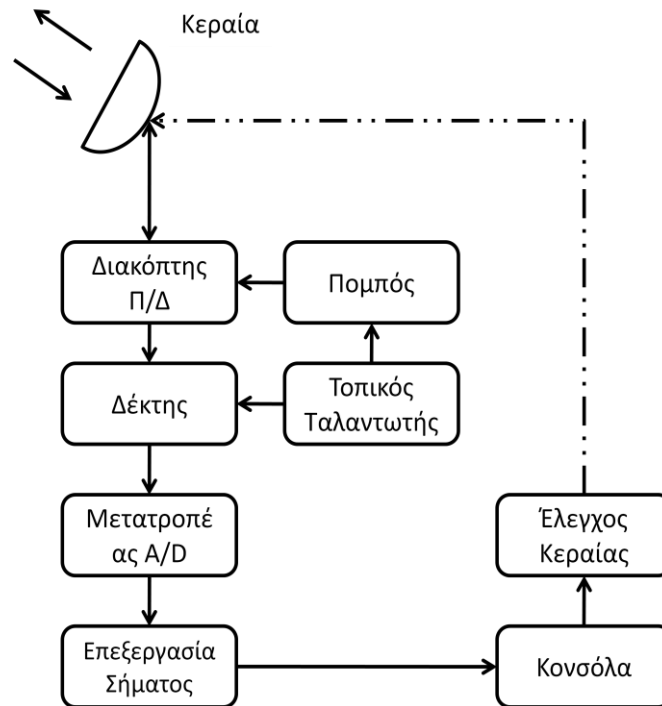
Η κυματομορφή $s(t)$ για ένα παλμικό ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 2. Όπου τ είναι η διάρκεια παλμού, T_R είναι η περίοδος επανάληψης παλμού (PRF) και α το πλάτος. Χαρακτηριστικό μέγεθος για ένα ραντάρ είναι η γωνιακή ή κυκλική συχνότητα επανάληψης του παλμού (PRF) που δίνεται από την σχέση (2.3)

$$PRF = \frac{1}{PRI} = \frac{1}{T_R} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2: Κυματομορφή Εκπομπής

Μία τυπική διάταξη ενός μονοπαλμικού ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 3. Το συγκεκριμένο ραντάρ αποτελείται από μία κεραία εκπομπής και λήψης, ένα διακόπτη που επιτρέπει να εκπέμπονται σήματα από τον πομπό και να λαμβάνονται οι επιστροφές από τους στόχους στον δέκτη, ένα τοπικό ταλαντωτή που διεγείρει τον πομπό και δίνει αντίστοιχο σήμα αναφοράς στον δέκτη, τον μετατροπέα του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και τέλος τον επεξεργαστή όπου γίνεται η επεξεργασία του σήματος προκειμένου να σταλεί στην κονσόλα του χειριστή.



Σχήμα 3: Διάταξη Συστήματος Ραντάρ

Εξίσωση Ραντάρ

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε την ισχύ και τον σηματοθορυβικό λόγο ενός ραντάρ. Σε περίπτωση που θεωρήσουμε ότι ο χώρος που δύναται να εκπέμψει ένα ραντάρ είναι μία σφαίρα ακτίνας R τότε το εμβαδόν της σφαιρικής επιφάνειας αυτής είναι $4\pi R^2$. Επίσης, θεωρώντας ότι ο στόχος προς εντοπισμό βρίσκεται επί της ακτίνας της σφαίρας τότε η πυκνότητα ισχύος στον στόχο δίνεται από την σχέση (2.4) (Kolawole, 2002)

$$P_{\Delta} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (2.4)$$

Όπου:

P_t = εκπεμπόμενη ισχύς στην κατεύθυνση του στόχου σε Watt

G_t = κέρδος κεραίας εκπομπής

Η ισχύς που λαμβάνεται από τον στόχο είναι $P_c = P_{\Delta} \sigma$ όπου σ είναι η ενεργός επιφάνεια του στόχου (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001). Ο στόχος διαχέει την ισχύ αυτή ισοτροπικά στον χώρο ανάλογα με το μοντέλο του στόχου. Η ισχύς που επιστρέφει στο ραντάρ από τον στόχο δίνεται από την σχέση (2.5)

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (2.5)$$

Το κέρδος της κεραίας G_r είναι ανάλογο της ενεργού επιφάνειας S_{ef} και το αντίστροφο όπως φαίνεται στην σχέση (2.6).

$$S_{ef} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.6)$$

Η ισχύς που λαμβάνεται από την κεραία μέσω της ενεργού επιφάνειας της γίνεται

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.7)$$

Στην περίπτωση όπου αναφερόμαστε σε μονοστατικό ραντάρ τότε έχουμε $G_t = G_r = G$. Επίσης αναφέρεται ότι P_t είναι η μέση ισχύς εκπομπής του ραντάρ.

Ο σημαντικότερος λόγος ισχύων στο ραντάρ είναι ο λόγος ισχύς σήματος προς ισχύ θορύβου σήματος, γνωστός και ως σηματοθορυβικός λόγος. Το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου υπεισέρχεται στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας του σήματος στον δέκτη και εξαρτάται από την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου σε αυτόν (Meikle, 2008).

$$N = kTB \quad (2.8)$$

Όπου:

k = σταθερά Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T = θερμοκρασία θορύβου σε Κ

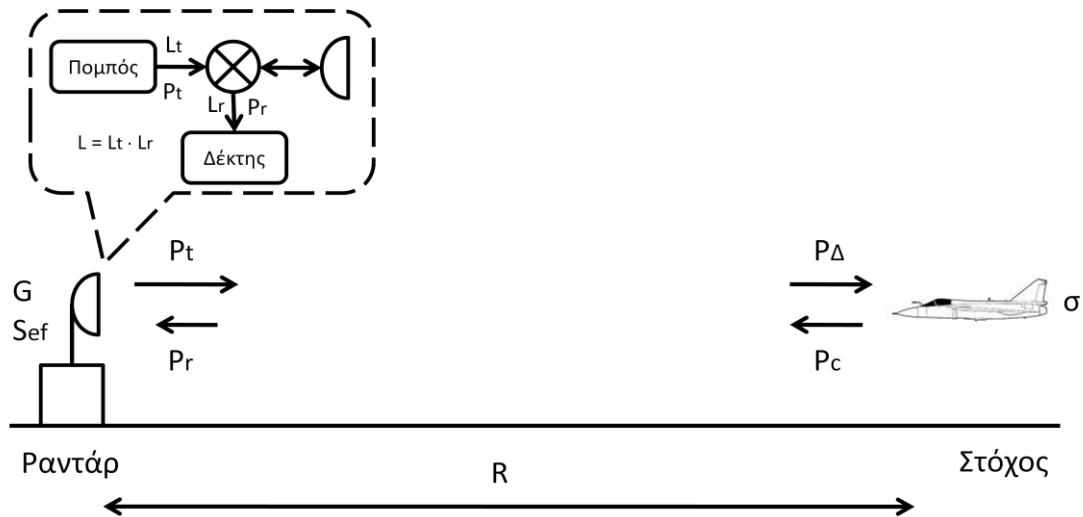
B = εύρος ζώνης του δέκτη σε Hz

Το εύρος ζώνης B σε Hz δίνεται από τον αντίστροφο του μήκους παλμού τ . Επομένως, ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη του ραντάρ (χωρίς απώλειες) είναι:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \frac{\tau}{kT} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 R^4 kT} \quad (2.9)$$

Οι απώλειες στον σηματοθορυβικό λόγο οφείλονται επί το πλείστον στις ωμικές απώλειες στο σύστημα και στον σχεδιασμό του δέκτη. Στην περίπτωση που οι απώλειες ισχύος στους κυματοδηγούς του ραντάρ είναι L ως φαίνεται στο Σχήμα 4 τότε ο σηματοθορυβικός λόγος του ραντάρ γράφεται ως

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \frac{\tau}{kT} \frac{1}{L} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 R^4 kTL} \quad (2.10)$$

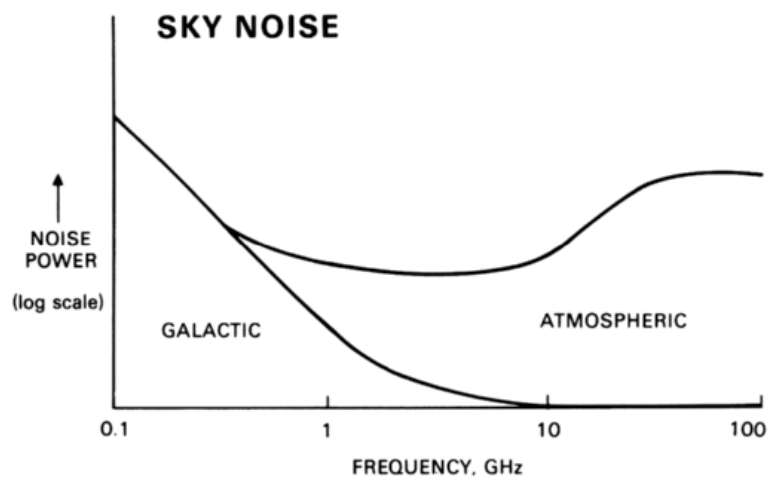


Σχήμα 4: Εξίσωση Ραντάρ και Μικροκυματικές Απώλειες

Συχνότητες ακτινοβολίας

Τα ραντάρ λειτουργούν σε ένα ευρύ πεδίο συχνοτήτων από 40 MHz έως 100 GHz. Θεωρητικά, δεν υφίστανται περιοριστικοί παράγοντες στην επιλογή συχνότητας λειτουργίας των ραντάρ. Πρακτικά όμως, υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν δραστικά την επιλογή της συχνότητας εκπομπής. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι ιδιότητες της ατμόσφαιρας, φυσικοί περιορισμοί καθώς και οι δυνατότητες των συσκευών ραντάρ (Barton & Leonov, 1998).

Για παράδειγμα, συνήθως το φυσικό μέγεθος των υποσυστημάτων (κεραία, κυματοδηγοί) ενός ραντάρ είναι αντιστρόφως ανάλογο με την συχνότητα λειτουργίας του. Άλλο παράδειγμα είναι ο θόρυβος του περιβάλλοντος, όπου παρουσιάζει υψηλές τιμές σε υψηλές συχνότητες ενώ ελαχιστοποιείται μεταξύ των 0.3 και 10 GHz (Stimson, 1998) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Θόρυβος Περιβάλλοντος

Μία πρακτική που ακολουθείται στις συχνότητες λειτουργίας των ραντάρ είναι η χρήση κεφαλαίων γραμμάτων του λατινικού αλφάβητου σε αντιστοιχία των πεδίων λειτουργίας αυτών. Αυτό συμβαίνει διότι πολλές φορές η ακριβής συχνότητα λειτουργίας ενός ραντάρ δεν αναφέρεται για πρακτικούς λόγους. Παράδειγμα είναι οι στρατιωτικές εφαρμογές όπου τέτοιες πληροφορίες είναι καθοριστικές στην υποκλοπή της συχνότητας ενός ραντάρ και στην αναγνώριση του στόχου ή ακόμα και σε εφαρμογές παρεμβολής θορύβου (Skolnik, 2008).

Η συνήθης κεντρική συχνότητα λειτουργίας των ραντάρ για πολιτικές εφαρμογές είναι στις μπάντες UHF, 425 MHz; L band, 1.3 GHz; S band, 3.3 GHz; C band, 5.5 GHz; και X band, 9.5 GHz. Το φάσμα συχνότητας λειτουργίας ενός ραντάρ δεν ξεπερνά το 5 έως 15% της κεντρικής συχνότητας (Curry, 2005). Οι βασικές συχνότητες λειτουργίας των ραντάρ φαίνονται στον Πίνακας 1 (Σάγος & Μαλαχίας, 2004).

Κωδικές ονομασίες περιοχών συχνοτήτων Πολιτικό Πρότυπο IEEE (1984)	Εύρος συχνοτήτων (GHZ)	Κωδικές ονομασίες περιοχών συχνοτήτων Στρατιωτικό Πρότυπο USN & NATO (1969)	Εύρος συχνοτήτων (GHZ)
S	2 - 4	E	2 - 3
C	4 - 8	F	3 - 4
X	8 - 12	G	4 - 6
Ku	12 - 18	H	6 - 8
K	18 - 27	I	8 - 10
Ka	27 - 40	J	10 - 20

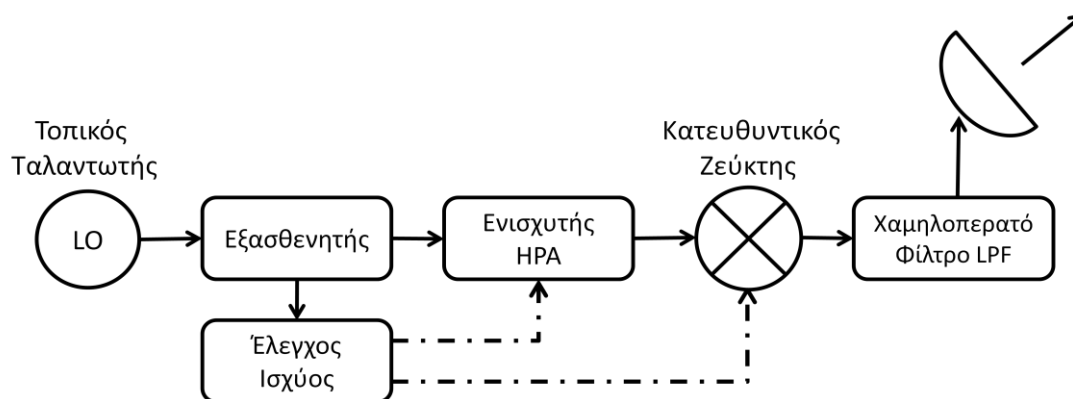
Πίνακας 1: Συχνότητες Λειτουργίας Ραντάρ

Πομπός

Ο πομπός είναι ένα υποσύστημα του ραντάρ που παράγει κατάλληλα σήματα ραδιοσυχνοτήτων τα οποία εκπέμπονται προς την κατεύθυνση του στόχου (Barton & Leonov, 1998). Δηλαδή, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων (ηλεκτρομαγνητική ενέργεια), η οποία εκπέμπεται στο περιβάλλοντα χώρο μέσω της κατευθυντικής κεραίας (Meikle, 2008).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πομπών ραντάρ οι οποίοι είναι οι πομποί με λυχνία κενού (vacuum-tube transmitters) και οι πομποί στερεάς κατάστασης (solid-state transmitters) (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001). Η επιλογή του τύπου ραντάρ καθορίζει την απεικόνιση του ραντάρ και συνδέεται άμεσα με το σχεδιασμό και τις επιδόσεις του συστήματος. Επιπρόσθετα, υπάρχουν δύο μέθοδοι παραγωγής ραδιοσυχνοτήτων στους ποπούς, πομποί αυτοδιεγείρομενης γεννήτριας ραδιοσυχνοτήτων (power-oscillator transmitters) και πομποί ενίσχυσης ραδιοσυχνοτήτων (power-amplifier transmitters) (Σάγος & Μαλαχίας, 2004).

Οι ενισχυτές ραδιοσυχνοτήτων συνήθως προτιμούνται έναντι των πομπών με τοπικούς ταλαντωτές (Skolnik, 2008). Σε έναν ενισχυτή το σήμα που παράγεται έχει χαμηλή ισχύ και στην συνέχεια ενισχύεται προκειμένου να αποκτήσει την επιθυμητή ισχύ και να εκπεμφθεί από την κεραία. Ένα τυπικό σχηματικό διάγραμμα πομπού φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Σχηματικό Διάγραμμα Πομπού

Οι ενισχυτές έχουν το πλεονέκτημα να παρέχουν σταθερές κυματομορφές σημάτων, διαμορφωμένους κατάλληλα συμπιεσμένους παλμούς, εύκολη αλλαγή συχνότητας κ.α. Σε αντίθεση, οι τοπικοί ταλαντωτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χαμηλού κόστους πομπών που δεν απαιτείται κατά ανάγκη υψηλή ποιότητα παρακολούθησης κινούμενων στόχων (MTI). Χαρακτηριστικό είναι η χρήση ταλαντωτών με λυχνίες magnetron σε ραντάρ ναυτιλιακού τύπου.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των πομπών είναι η ισχύς που παράγουν (Curry, 2005). Αυτή συνήθως χαρακτηρίζεται από την μέγιστη στιγμιαία ισχύ (transmitter peak RF power, P_p) και την μέση ισχύ (transmitter average RF power, P_a). Η διάρκεια του παλμού που παράγεται είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας. Η μέγιστη στιγμιαία ισχύς μπορεί να παραχθεί για ένα χρονικό διάστημα το οποίο ονομάζεται μέγιστη διάρκεια παλμού και συμβολίζεται ως τ_M .

Τα περισσότερα σύγχρονα ραντάρ χρησιμοποιούν συνεκτικούς / σύμφωνους πομπούς (Curry, 2005). Αυτό σημαίνει ότι η φάση της εκπεμπόμενης κυματομορφής προκύπτει από ένα σταθερό σήμα αναφοράς που χρησιμοποιείται επίσης από τον δέκτη. Τα ανωτέρω ραντάρ επεξεργάζονται τα σήματα λήψης συνεκτικά έτσι ώστε να μετρήσουν την ολίσθηση της συχνότητας Doppler, να εκτελείται συνεκτική ολοκλήρωση των παλμών και τέλος να μηδενίζουν τις επιστροφές από ακίνητους στόχους.

Κεραίες ραντάρ

Η κεραία ραντάρ είναι το μέσο για την εκπομπή και λήψη της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος. Η κεραία συνδέει την περιοχή της μετάβασης του κατευθυνόμενου κύματος

από το ραντάρ στο περιβάλλον και αντίστροφα. Κάθε κεραία παρουσιάζει ένα μοναδικό διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο και την χαρακτηρίζει (Barton & Leonov, 1998).

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κεραίας ραντάρ, ο κυκλικός ανακλαστήρας πιάτο (circular dish antenna), ο παραβολικός ανακλαστήρας ημικυκλίου (parabolic antenna) και η στοιχειοκεραία (array antenna).

Το κέρδος της κεραίας είναι βασικό χαρακτηριστικό αυτής και περιγράφει την ικανότητα της κεραίας να συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ενέργεια σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση (Mahafza, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, 2000). Το κέρδος δίνεται από την σχέση (2.11).

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.11)$$

Όπου:

G = κέρδος κεραίας

A_e = ενεργός επιφάνεια κεραίας

λ = μήκος κύματος κεραίας

Βασική λειτουργία της κεραίας είναι να συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ενέργεια, εντός της δέσμης ακτινοβολίας που είναι γνωστή ως λοβός ακτινοβολίας, να την εκπέμπει στην επιθυμητή κατευθυντικότητα και να λαμβάνει την ανάκλαση του σήματος από τους εκάστοτε στόχους. Οι κεραίες ραντάρ είναι κατευθυντικές και παρέχουν διακριβωτική ικανότητα κατά γωνία και κατά απόσταση. Οι βασικές παράμετροι μίας κεραίας ραντάρ είναι το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, ο λοβός εκπομπής, το κατευθυντικό κέρδος, το κέρδος κεραίας, το εύρος λοβού, οι πλευρικοί λοβοί, το είδος πόλωσης, ο σηματοθορυβικός λόγος και η δυνατότητα ισχύος εκπομπής (Barton & Leonov, 1998).

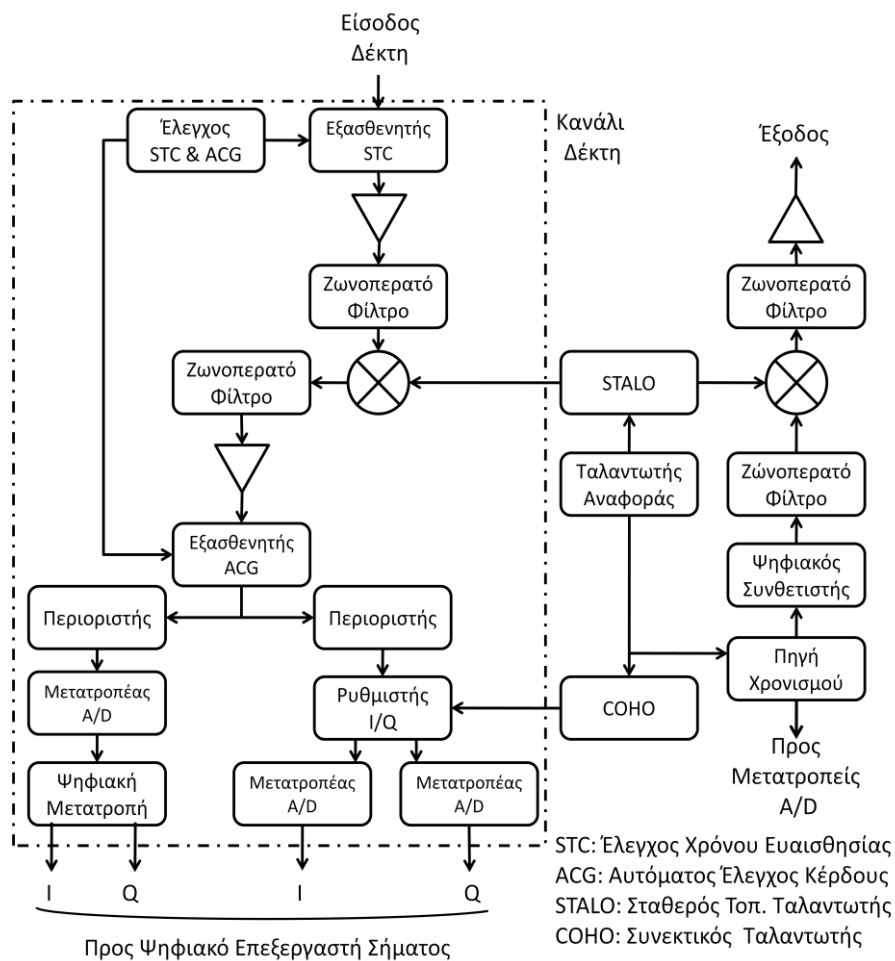
Δέκτης

Ο δέκτης είναι ένα υποσύστημα του ραντάρ το οποίο λαμβάνει την επιστροφή του σήματος, την ενισχύει, την μετασχηματίζει στο πεδίο της συχνότητας και τέλος την φιλτράρει αποκόβοντας τις ανεπιθύμητες επιστροφές (Barton & Leonov, 1998).

Πρακτικά, όλοι οι δέκτες ραντάρ λειτουργούν ως υπερετερόδουνοι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του σχήματος ο δέκτης φιλτράρει το σήμα προκειμένου να διαχωρίσει το επιθυμητό σήμα του στόχου από λοιπές ανεπιθύμητες επιστροφές και θορύβους. Στην συνέχεια, το σήμα ενισχύεται και με την βοήθεια ενός τοπικού ταλαντωτή μετατοπίζεται σε μία ενδιάμεση συχνότητα.

Αυτή η ενδιάμεση συχνότητα συνήθως είναι καθορισμένη ώστε να υπάρχει μία τυποποίηση στους δέκτες και επεξεργαστές σήματος και να μην εξαρτώνται από την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας της συσκευής.

Για την δημιουργία μίας αποδεκτής εικόνας απαιτούνται περισσότερες της μίας μετατροπής του σήματος. Τα μοντέρνα συστήματα ραντάρ έχουν την δυνατότητα να επεξεργάζονται ένα μεγάλο αριθμό παλμών προκειμένου να εξαγουν σωστά στοιχεία, γι αυτό και απαιτούν αντίστοιχα μεγάλο αριθμό καναλιών στον δέκτη (Meikle, 2008). Στο Σχήμα 7 φαίνεται ένα κανάλι του δέκτη, το οποίο μπορεί να επαναληφθεί N φορές.

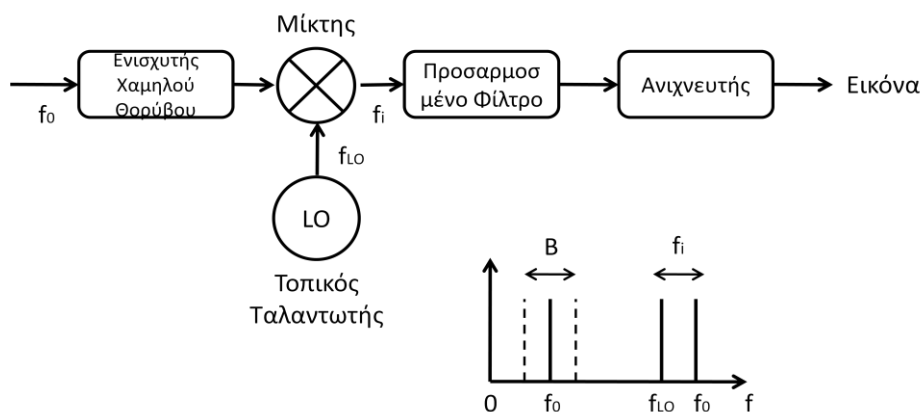


Σχήμα 7: Σχηματικό Διάγραμμα Δέκτη

Οι υπερετερόδουνοι δέκτες μεταβάλλουν την συχνότητα των τοπικών ταλαντωτών με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ακολουθούν τον αντίστοιχο συντονισμό του πομπού δίχως να επηρεάζουν το φιλτράρισμα της ενδιάμεσης συχνότητας (IF: intermediate frequency). Το πλεονέκτημα αυτό έχει καταστήσει τους υπερετερόδουνους δέκτες κυρίαρχους έναντι άλλων τύπων δεκτών (Skolnik, 2008).

Το διάγραμμα στο Σχήμα 7 περιλαμβάνει έναν εξασθενητή του ελέγχου χρονισμού ευαισθησίας (STC: Sensitivity Time Control) κατά την είσοδο του σήματος. Ο εξασθενητής STC συχνά ακολουθείται από ένα ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA: Low Noise Amplifier). Ο ενισχυτής LNA ενισχύει το ασθενές σήμα λήψης έτσι ώστε να αποφευχθεί η μετέπειτα απώλεια του σήματος λόγω του θορύβου που θα εισαχθεί από το ίδιο το ραντάρ. Στην συνέχεια τα ζωνοπερατά φίλτρα αποκόβουν τα σήματα που βρίσκονται εκτός του επιθυμητού εύρους ζώνης. Το σήμα ενισχύεται ξανά προκειμένου να εισέλθει στο απαιτούμενο επίπεδο ισχύος και να μετατραπεί από αναλογικό σε ψηφιακό. Στο Σχήμα 7 παρατηρούμε την αποδιαμόρφωση του σήματος παρόλο που τυπικά δεν αποτελεί μέρος του δέκτη. Ο τοπικός ταλαντωτής (STALO) παρέχει την κατάλληλη συχνότητα για τον υποβιβασμό της συχνότητας στον δέκτη και την υπέρθεση αυτής στην έξοδο. Για την πλήρη συνεκτική λειτουργία του δέκτη ο ταλαντωτής (STALO) έχει σταθερή τιμή σε μία χαμηλή συχνότητα αναφοράς που χρησιμοποιείται ως βάση τόσο για τους χρονιστές (clocks) όσο και για τον σύμφωνο ταλαντωτή (COHO).

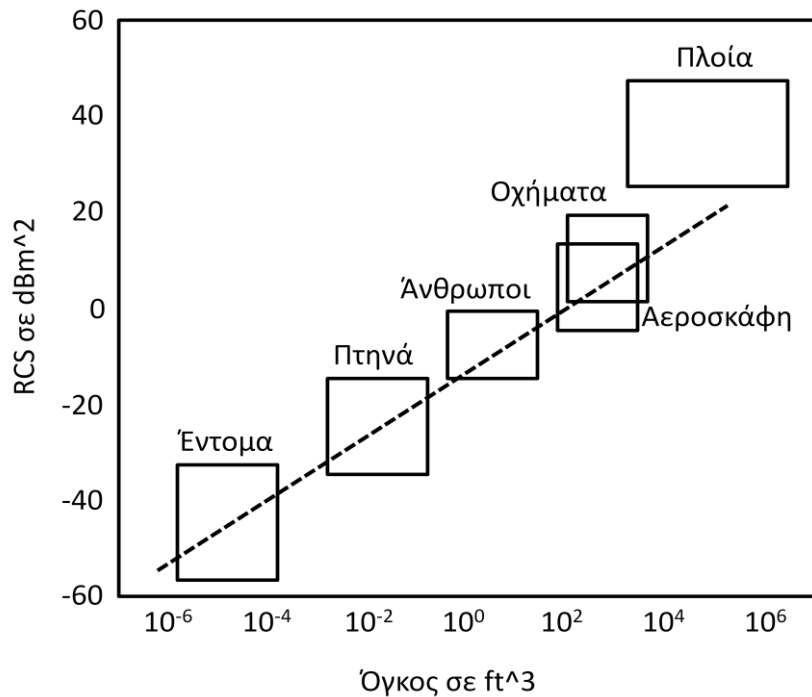
Ένα απλούστερο διάγραμμα δέκτη ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 8, όπου ο παλμός που επιστρέφει στο ραντάρ από τους στόχους έχει συχνότητα f_0 . Στην συνέχεια ένας μίκτης (κρυσταλλική δίοδος), με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, λαμβάνει το σήμα λήψης καθώς και ένα παλμό συχνότητας f_{LO} από ένα τοπικό ταλαντωτή. Όποτε υφίσταται σήμα επιστροφής συχνότητας f_0 , ένα έτερο σήμα f_i εξέρχεται από τον μίκτη. Η συχνότητα f_i ουσιαστικά είναι η διαφορά των συχνοτήτων f_0 και f_{LO} . Στην συνέχεια, το προσαρμοσμένο φίλτρο (ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας) φιλτράρει τις αρμονικές του σήματος συχνότητας f_i προσαρμόζοντας το εύρος ζώνης B στο εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001).



Σχήμα 8: Τυπικό Διάγραμμα Δέκτη

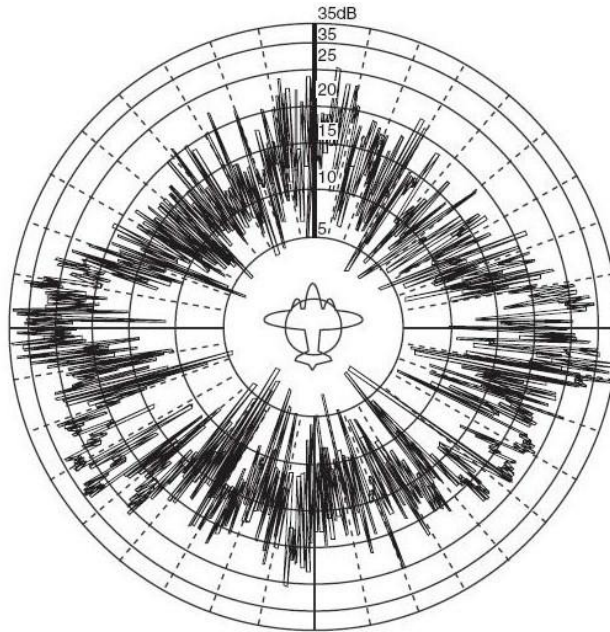
Ραδιοδιατομή Στόχου

Η ραδιοδιατομή σ (RCS: Radio Cross Section) είναι η ενεργός επιφάνεια ενός στόχου. Γενικά, η ραδιοδιατομή ενός στόχου είναι δύσκολο να υπολογισθεί καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πληθώρα παραγόντων όπως το σχήμα του στόχου, η συχνότητα εκπομπής του ραντάρ, η πόλωση του κύματος, τα υλικά που είναι κατασκευασμένος ο στόχος κ.α. Η δυσκολία υπολογισμού της ραδιοδιατομής σ οδήγησε τους μηχανικούς, πέρα από τους θεωρητικούς υπολογισμούς, να την υπολογίζουν κατόπιν πειραματικών μετρήσεων προκειμένου να εξασφαλίζουν ακριβή στοιχεία. Τυπικές τιμές ραδιοδιατομής για τεχνητούς και φυσικούς στόχους φαίνονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Ραδιοδιατομή Τυπικών Στόχων

Τέλος, μία τυπική ραδιοδιατομή ενός αεροσκάφους δεν είναι ομοιόμορφη και παρουσιάζει πληθώρα αιχμών όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001).



Εικόνα 1: Ραδιοδιατομή Αεροσκάφους (S-band, $\lambda=10\text{cm}$)

Ανίχνευση Στόχων

Το βασικό πρόβλημα εντοπισμού ενός στόχου που συνοδεύεται από θόρυβο μπορεί να μελετηθεί σε δύο φάσεις. Πρώτη φάση είναι η ενίσχυση του σήματος λήψης και το φιλτράρισμα αυτού, που έχει στόχο να εξαλειφθεί ο θόρυβος που περιβάλλει το χρήσιμο σήμα. Επόμενη φάση είναι ο εντοπισμός του στόχου, όπου χρησιμοποιώντας το ενισχυμένο / φιλτραρισμένο σήμα και με κατάλληλη επεξεργασία, το ραντάρ είναι σε θέση να διακρίνει την ύπαρξη στόχου (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001).

Επεξεργασία Σήματος

Ο βασική λειτουργία ενός επεξεργαστή ραντάρ, στο πλαίσιο τόσο του εντοπισμού σήματος όσο και της μέγιστης απόστασης εντοπισμού, είναι η μεγιστοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου. Σύμφωνα με τους Nathanson, Reilly και Cohen (1999), ο σχεδιασμός ενός επεξεργαστή ραντάρ μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος σηματοθορυβικός λόγος. Το κόστος, η πολυπλοκότητα και η αξιοπιστία είναι παράγοντες που καθορίζουν τον σχεδιασμό.

Η μέθοδος της επεξεργασίας σήματος εξαρτάται από τις υφιστάμενες περιβαντολογικές συνθήκες κάτω από τις οποίες το σήμα είναι διαθέσιμο στον δέκτη. Η πλέον διαδεδομένη διαδικασία επεξεργασίας περιλαμβάνει την προεπεξεργασία (preprocessing), την διατήρηση της πληροφορίας στον λευκό θόρυβο (prewhitening) και τέλος την παρεμβολή πληροφορίας στην εξομάλυνση του σήματος (Kolawole, 2002).

Η προεπεξεργασία του σήματος είναι η μέθοδος διατήρησης του σήματος σε μορφή που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση. Η διατήρηση της πληροφορίας έχει την έννοια της μετάβασης του σήματος στο φάσμα του λευκού θορύβου απορρίπτοντας κάθε ανεπιθύμητη πληροφορία (έτερο θόρυβο) από το σήμα προτού ξεκινήσει η ανάλυση. Τέλος, η παρεμβολή πληροφορίας μπορεί να είναι απαραίτητη λόγω της διασποράς της ενέργειας του σήματος που μπορεί να γίνει σε παρακείμενα στοιχεία ανάλυσης κατά την διαδικασία εξομάλυνσης του σήματος.

Επεξεργασία Σήματος

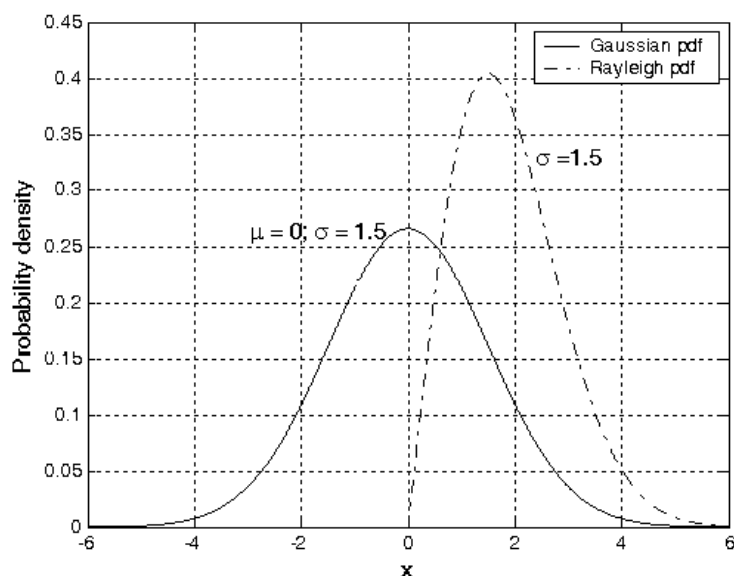
Ας θεωρήσουμε ότι το σήμα λήψης στον δέκτη είναι η σύνθεση του σήματος $u(t)$ και του λευκού θορύβου $n(t)$. Ο θόρυβος θεωρείται ότι είναι χωρικά μη-συνεκτικός και μη-πεπλεγμένος με το σήμα. Το σήμα στην έξοδο του ζωνοπερατού φίλτρου στον δέκτη είναι $v(t)$ και έχει την μορφή

$$v(t) = r(t)\cos(\omega_0 t - \varphi(t)) \quad (2.12)$$

Ένας στόχος είναι ανιχνεύσιμος όταν το $r(t)$ υπερβαίνει μία τιμή κατωφλίου V_T , ενώ έχουμε ψευδοστόχο όταν ο θόρυβος υπερβαίνει την ίδια τιμή του κατωφλίου V_T , δηλαδή

$$\begin{aligned} u(t) + n(t) > V_T: & \text{ Εντοπισμός} \\ n(t) > V_T: & \text{ Ψευδός συναγερμός} \end{aligned}$$

Η κατανομή της περιβάλλουσας του σήματος εξόδου από το ζωνοπερατό φίλτρο (σήμα εισόδου στο κύκλωμα απόφασης) συγκρίνεται με την τιμή κατωφλίου V_T προκειμένου να ληφθεί απόφαση για την ανίχνευση του στόχου. Δεδομένου ότι το σήμα και ο θόρυβος ακολουθούν την κατανομή Rice (Gaussian) και ότι ο θόρυβος ακολουθεί την κατανομή Rayleigh από την Εικόνα 2 (Mahafza & Elsherbeni, MATLAB Simulations for Radar Systems Design, 2004) μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις πιθανότητες εντοπισμού και ψευδού συναγερμού του ραντάρ.



Εικόνα 2: Κατανομή Περιβάλλουσας κατά την μη σύμφωνη αποκωδικοποίηση

Προσαρμοσμένο Φίλτρο

Θεωρούμε ένα παλμό που λαμβάνεται από ένα στόχο και στον οποίο υπεισέρχεται θόρυβος κατά την είσοδο του στον δέκτη. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του σήματος σε σχέση με το πλάτος του θορύβου τόσο καλύτερα θα αναγνωρίσει ο δέκτης τον στόχο. Το προσαρμοσμένο φίλτρο είναι το φίλτρο που μπορεί να βελτιστοποιήσει τον σηματοθορυβικό λόγο (Peebles, 1998).

Θεωρούμε ότι η κυματομορφή που λαμβάνεται από τον στόχο είναι $u(t)$. Τότε ο μετασχηματισμός Fourier φαίνεται στην σχέση (2.13).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} u(t) dt \quad (2.13)$$

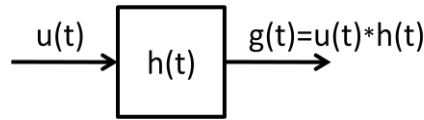
Εάν η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου είναι $H(\omega)$, τότε το σήμα που εξέρχεται από τον δέκτη προτού εισέλθει στον φάκελο (διαδικασία) εντοπισμού είναι της μορφής

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} F(\omega) H(\omega) d\omega \quad (2.14)$$

Έστω ότι $g(t_0)$ είναι η μέγιστη τιμή του $g(t)$. Το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του φίλτρου είναι

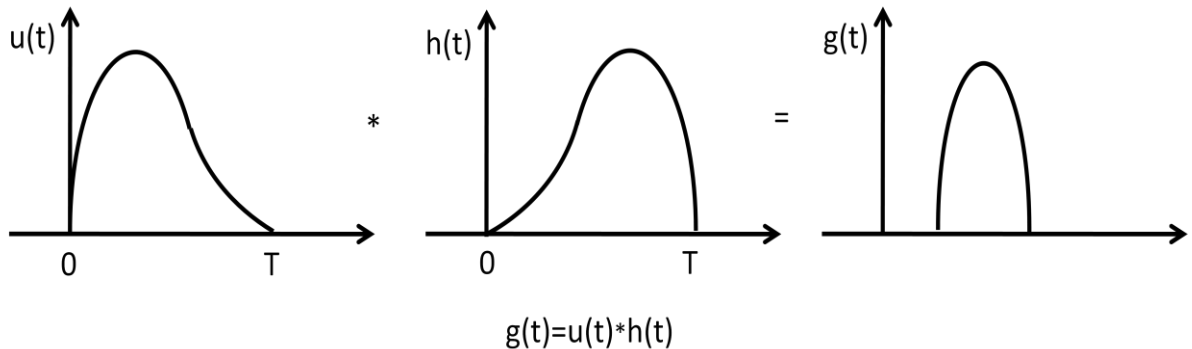
$$G(\omega) = \frac{N_0}{2} |H(\omega)|^2 \quad (2.15)$$

Όπου: N_0 = φασματική πυκνότητα θορύβου στην είσοδο του φίλτρου [Watt/Hz]. Ο παράγοντας 1/2 υπεισέρχεται επειδή χρησιμοποιούνται τόσο οι θετικές όσο και οι αρνητικές τιμές της συχνότητας κατά την ανάλυση. Ένα προσαρμοσμένο φίλτρο φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Προσαρμοσμένο Φίλτρο

Ενώ στο Σχήμα 11 φαίνεται η απεικόνιση του εισερχόμενου σήματος που σε συνέλιξη με την συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου μας δίνει το σήμα εξόδου.



Σχήμα 11: Απεικόνιση Σημάτων Προσαρμοσμένου Φίλτρου

η μέση ισχύς θορύβου είναι

$$N = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\omega)|^2 df \quad (2.16)$$

Επομένως, η ενέργεια του σήματος λήψης μπορεί να γραφτεί ως

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 df \quad (2.17)$$

Ο επεξεργαστής ραντάρ θα πρέπει να μεγιστοποιεί τον λόγο της μέγιστης ισχύος σήματος προς την μέση ισχύ θορύβου στην έξοδο του.

$$SNR = \frac{|g(t_0)|^2}{N} = \frac{|\int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)H(\omega)e^{i\omega t_0} df|^2}{\frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\omega)|^2 df} \quad (2.18)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του δέκτη που μεγιστοποιεί το λόγο της σχέσης (2.18) μπορεί να υπολογισθεί με την χρήση της ανισότητας Schwartz που δίνεται από την σχέση (2.19).

$$|\int_{-\infty}^{+\infty} x(\omega)y(\omega)d\omega|^2 \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |x(\omega)|^2 d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} |y(\omega)|^2 d\omega \quad (2.19)$$

Από την παραπάνω ανισότητα, έχουμε ότι

$$SNR = \frac{|g(t_0)|^2}{N} \leq \frac{2E}{N_0} \quad (2.20)$$

Ο σηματοθορυβικός λόγος γίνεται μέγιστος όταν η σχέση (2.20) γίνεται ισότητα. Σε περίπτωση που το σήμα εξόδου είναι ένας ημιτονικός παλμός τότε το βέλτιστο φίλτρο έχει σηματοθορυβικό λόγο την σχέση (2.21) (Nathanson, Reilly, & Cohen, 1999).

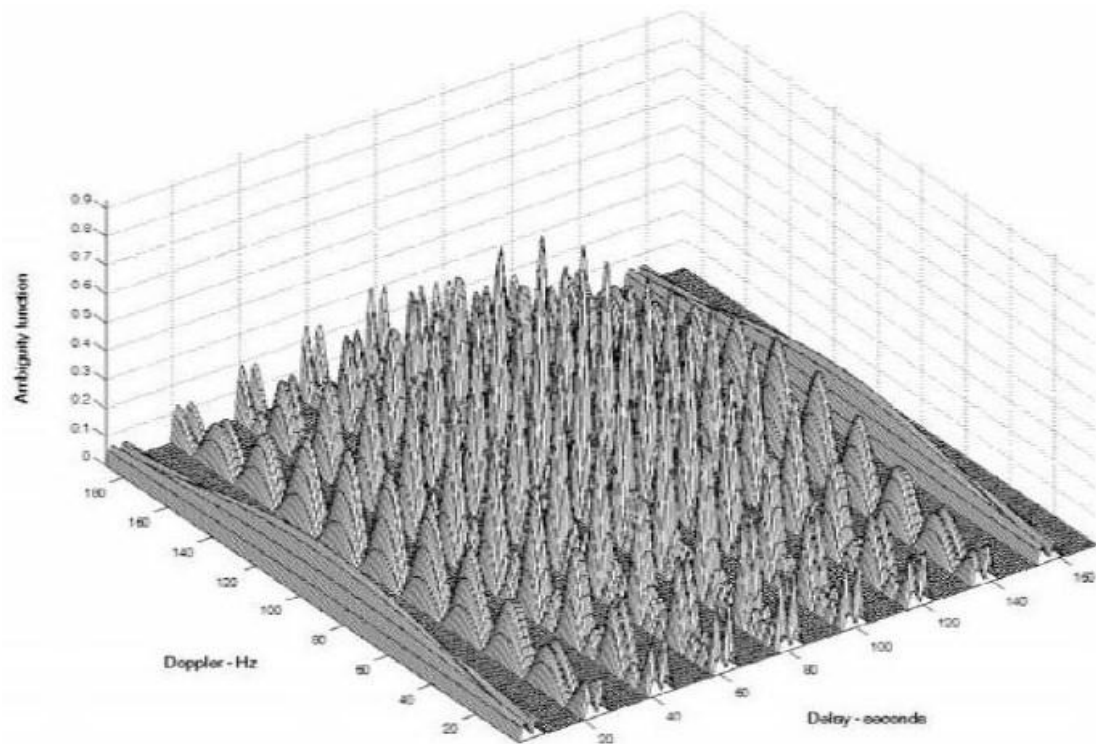
$$SNR = \frac{\hat{S}}{N} = \frac{E}{N_0} \quad (2.21)$$

Συνάρτηση Αβεβαιότητας

Η συνάρτηση αβεβαιότητας του ραντάρ αντιπροσωπεύει την έξοδο από το προσαρμοσμένο φίλτρο και περιγράφει την παρεμβολή που οφείλεται στην απόσταση ή / και στην ολίσθηση κατά Doppler ενός στόχου σε σχέση με ένα στόχο αναφοράς ισοδύναμης ραδιοδιατομής (RCS) (Mahafza & Elsherbeni, MATLAB Simulations for Radar Systems Design, 2004).

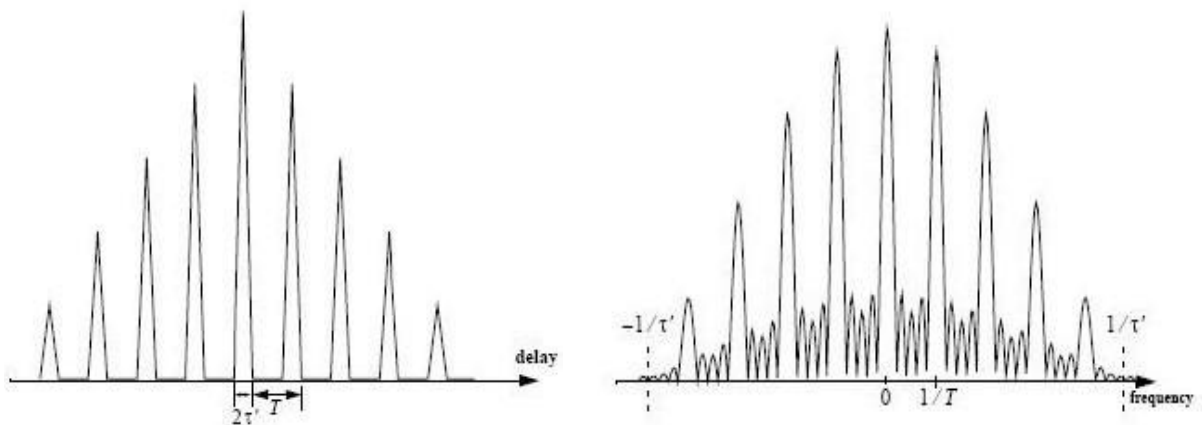
Η συνάρτηση αβεβαιότητας που αξιολογείται, είναι ίση με την έξοδο του προσαρμοσμένου φίλτρου και είναι προσαρμοσμένη ακριβώς στο σήμα που ανακλάται από τον στόχο ενδιαφέροντος. Με άλλα λόγια, οι επιστροφές από τον εν λόγω στόχο τοποθετούνται στις αρχές των αξόνων της συνάρτησης αβεβαιότητας. Επομένως, η συνάρτηση αβεβαιότητας, σε περιοχές διάφορες του μηδενός, παριστάνει τις επιστροφές για κάποιες αποστάσεις και συχνότητες Doppler διαφορετικές από αυτές του στόχου που μελετάται.

Η συνάρτηση αβεβαιότητας χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς των ραντάρ σαν μία έννοια για την μελέτη διαφορετικών κυματομορφών, καθώς μπορεί να παρέχει στοιχεία για την χρήση διαφορετικών κυματομορφών για διάφορους τύπους ραντάρ. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διακριβωτικής ικανότητας κατά απόσταση και κατά συχνότητα Doppler για συγκεκριμένες κυματομορφές ραντάρ. Το τρισδιάστατο διάγραμμα της συνάρτησης αβεβαιότητας σε σχέση με την συχνότητα και τον χρόνο καθυστέρησης καλείται διάγραμμα αβεβαιότητας ραντάρ και φαίνεται στην Εικόνα 3 (Mahafza & Elsherbeni, MATLAB Simulations for Radar Systems Design, 2004).



Εικόνα 3: Διάγραμμα Αβεβαιότητας 3-D

Ενώ στην Εικόνα 4 (Mahafza & Elsherbeni, MATLAB Simulations for Radar Systems Design, 2004) φαίνονται τα αντίστοιχα δισδιάστατα διαγράμματα αβεβαιότητας στον χρόνο και την συχνότητα.



Εικόνα 4: Διάγραμμα Αβεβαιότητας 2-D

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερθήκαμε γενικά στα ραντάρ, κάνοντας μία ιστορική αναδρομή των ραντάρ, για το πως εξελίχθηκαν μέσα στον χρόνο. Στην συνέχεια, αναφερθήκαμε στον σκοπό που εξυπηρετούν τα ραντάρ καθώς και τα είδη ραντάρ που υπάρχουν. Οι βασικές εξισώσεις των ραντάρ βοήθησαν να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας τους. Επισημάνθηκαν και αναλύθηκαν τα βασικά μέρη ενός ραντάρ όπως ο πομπός και τα είδη αυτού, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται και τι

εξυπηρετούν, ο δέκτης και οι επιμέρους συσκευές. Τέλος έγινε μία αναφορά στην ραδιοδιατομή του στόχου και τι εκφράζει, στην διαδικασία ανίχνευσης των στόχων μέσω της επεξεργασίας και ανίχνευσης του σήματος, το προσαρμοσμένο φίλτρο και την συνάρτηση αβεβαιότητας.

Κεφάλαιο 3: Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου (SAR)

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται αρχικά στην σύλληψη της ιδέας του ραντάρ συνθετικού παραθύρου και τον τρόπο που εξελίχθηκε στο βάθος του χρόνου. Στη συνέχεια αναφέρεται η αρχή λειτουργίας του ραντάρ SAR και η γεωμετρία τόσο του φορέα όσο και του στόχου. Αναπτύσσονται τα δύο είδη κεραίας συνθετικού παραθύρου όπου φαίνονται οι διαφορές τους καθώς και η επιχειρησιακή χρησιμοποίηση του ραντάρ ανάλογα με το είδος έρευνας που εκτελεί. Ακόμα, γίνεται αναφορά στην επεξεργασία σήματος του SAR, στην δομή και τρόπο λειτουργίας του επεξεργαστή, στην συχνότητα Doppler και στην διαμόρφωση κατά συχνότητα (FM) καθώς επίσης και στην διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά απόσταση και διόπτευση. Αναφέρεται ο σηματοθορυβικός λόγος, η αντιστάθμιση της κίνησης του στόχου και το σφάλμα φάσης που υπεισέρχεται στο σήμα καθώς και η αυτοεστίαση και το φαινόμενο κηλίδας (speckle).

Ιστορική Αναδρομή

Η αρχή του Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου (ΡΣΠ) ή Synthetic Aperture Radar (SAR) πρώτο-διατυπώθηκε το 1951 στις Ηνωμένες Πολιτείες στην εταιρεία Goodyear Co από τον Carl Wiley (Lacomme, Hardange, Marchais, & Normant, 2001). Για να βελτιώσουμε την διακριβωτική ικανότητα σε ένα ραντάρ θα πρέπει η κεραία να επιμηκυνθεί. Καθώς αυτό δεν είναι δυνατό να συμβεί πρακτικά, ο αμερικάνος Carl Wiley πρώτος είχε την ιδέα το 1951 της χρησιμοποίησης μίας κινούμενης πλατφόρμας όπου μεταξύ δύο εκπομπών είναι απαραίτητο να συνδυάζει τις φάσεις όλων των παλμών και κατά συνέπεια να συνθέτει μία μεγάλη στοιχειοκεραία (Maitre, 2008).

Αρχικά η θεωρία του συγκεκριμένου ραντάρ χαρακτηρίστηκε ως έρευνα σάρωσης δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening - DBS) αλλά στην συνέχεια η ονομασία αυτή είχε διττή έννοια, αφενός την έννοια του ίδιου του ραντάρ συνθετικού παραθύρου αφετέρου την έννοια της απεικόνισης της αποκλίνουσας (διόπτευση υπό γωνία) λειτουργίας (squint mode) (Skolnik, 2008).

Η έννοια του ραντάρ συνθετικού παραθύρου παρουσιάσθηκε εκτενέστερα το 1952 στο πανεπιστήμιο του Illinois. Το καλοκαίρι του επόμενου έτους κατά την διάρκεια του ερευνητικού έργου Michigan (Michigan Project) διατυπώθηκαν από την ερευνητική ομάδα του Michigan ιδέες που είχαν σχέση με τα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, ενώ η ομάδα του Illinois παρουσίασε μία απεικόνιση του Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου.

Στην Ευρώπη, οι πρώτες μελέτες έλαβαν χώρα το 1960 από την εταιρεία CSF και το πρώτο πείραμα εν πτήση πραγματοποιήθηκε το 1964. Το σύστημα Raphael TH

χρησιμοποιήθηκε από την Γαλλική Αεροπορία από το τέλος της δεκαετίας 1980 και παραμένει το μοναδικό στρατιωτικό επιχειρησιακό σύστημα σε ενέργεια στην Ευρώπη μέχρι σήμερα.

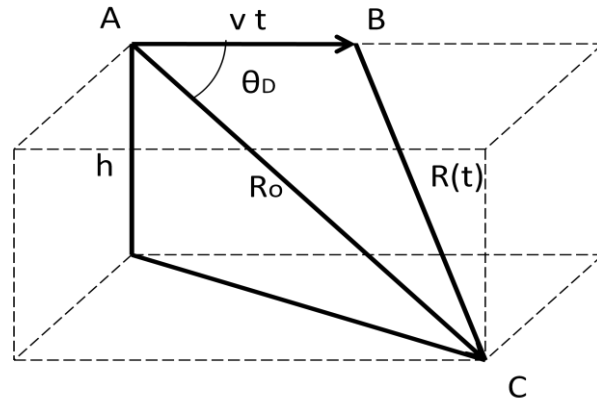
Αρχές Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

Όπως φανερώνει και το όνομα του, το ραντάρ συνθετικού παραθύρου παρακολουθεί μεγάλα πλαίσια (παράθυρα) στο έδαφος, εκπέμποντας στενούς παλμούς που μπορούν να δώσουν διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση ανάλογη της διακριβωτική ικανότητας κατά απόσταση. Τα ραντάρ συνθετικού παραθύρου πιθανόν να μπορούν να χαρακτηρισθούν ως τα πιο πολύπλοκα ραντάρ. Στα ραντάρ αυτά χρησιμοποιείται η τεχνική του συνθετικού παραθύρου, που δύναται να εφαρμοσθεί από ένα αεροσκάφος ή δορυφόρο, όπου δημιουργείται μία ενεργού παραθύρου κεραία που είναι πολύ μεγαλύτερη από μία πραγματική επιχειρησιακή κεραία. Η κίνηση του ραντάρ είναι προαπαιτούμενο στοιχείο προκειμένου να είναι λειτουργική η τεχνική αυτή (Levanon, 1988).

Το βασικό πλεονέκτημα των ραντάρ αυτών είναι ότι δύναται να παρέχουν υψηλής ανάλυσης εικόνες μεγάλων εκτάσεων της επιφάνειας της γης από μία πλατφόρμα που επιχειρεί σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς οι παρεχόμενες εικόνες να επηρεάζονται από τις συνθήκες καιρού ή το σκοτάδι (Kingsley & Quegan, 1992). Τα ραντάρ συνθετικού παραθύρου μπορούν να αντικαταστήσουν την οπτική και υπέρυθρη (infrared) απεικόνιση σε εφαρμογές που απαιτούν επιχειρήσεις παντός καιρού (Levanon, 1988).

Το πλεονέκτημα των ανωτέρω ραντάρ να μην επηρεάζονται από τις συνθήκες καιρού, πηγάζει από την επιλογή του μήκους κύματος (ή συχνότητας) στο οποίο λειτουργούν, και συνήθως οι μπάντες που χρησιμοποιούνται είναι οι X-band (3cm), C-band (6cm) και L-band (24 cm). Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τέτοιου είδους ραντάρ είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για στρατιωτικές εφαρμογές και ειδικά στην παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων στην επιφάνεια της γης με μεγάλη διακριβωτική ικανότητα.

Θέλοντας να εξετάσουμε σχηματικά την λειτουργία του ραντάρ, θεωρούμε ότι ένα αεροσκάφος κινείται επί του διανύσματος AB με ταχύτητα v όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. Η απόσταση που διανύει κατά την διάρκεια συλλογής πληροφοριών είναι vt . Το αρχικό διάνυσμα οπτικής επαφής (LOS: Line of Sight) του αεροσκάφους με το στόχο στο σημείο C είναι AC .



Σχήμα 12: Θεμελιώδης Γεωμετρία Συνθετικού Παραθύρου

Στην ακόλουθη σχέση φαίνεται η υπό κλίση απόσταση $R(t)$ του στόχου συναρτήσει του χρόνου,

$$R(t) = R_0 \left(1 - \frac{vt \cos \theta_D}{R_0} + \frac{v^2 t^2 \sin^2 \theta_D}{2R_0^2} \right) \quad (3.1)$$

Όπου θ_D είναι η γωνία Doppler και h είναι το ύψος πτήσης του αεροσκάφους από το έδαφος.

Η φάση του σήματος λήψης, που όπως θα δούμε και παρακάτω εισέρχεται στον ανιχνευτή φάσης του δέκτη δίνεται από την σχέση:

$$\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(2vt \cos \theta_D - \frac{v^2 t^2 \sin^2 \theta_D}{R_0} \right) \quad (3.2)$$

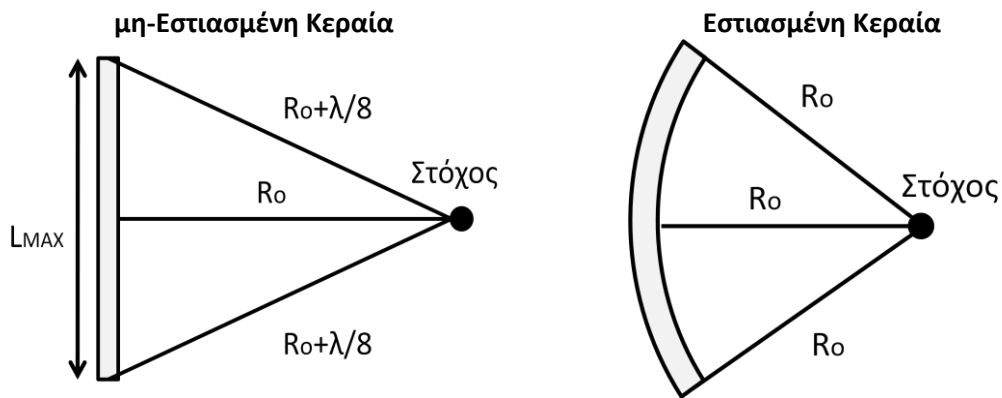
Παρατηρούμε ότι η φάση εξαρτάται τόσο από το γινόμενο vt όσο και από $v^2 t^2$. Το γινόμενο του $1/2\pi$ και της παραγώγου της φάσης μας δίνει την συχνότητα Doppler του σήματος λήψης.

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_D - \frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \sin^2 \theta_D \quad (3.3)$$

Η τελευταία σχέση χρησιμεύει στην ταξινόμηση της συχνότητας που είναι απαραίτητη προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα διακρίβωσης μεταξύ δύο στόχων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Εστιασμένες και μη-Εστιασμένες Κεραίες

Προτού συνεχίσουμε στην θεωρία των ραντάρ συνθετικού παραθύρου θα αναφερθούμε στις εστιασμένες και μη-εστιασμένες κεραίες όπως φαίνονται στο Σχήμα 13 και να αναφερθούμε στις διαφορές αυτών.



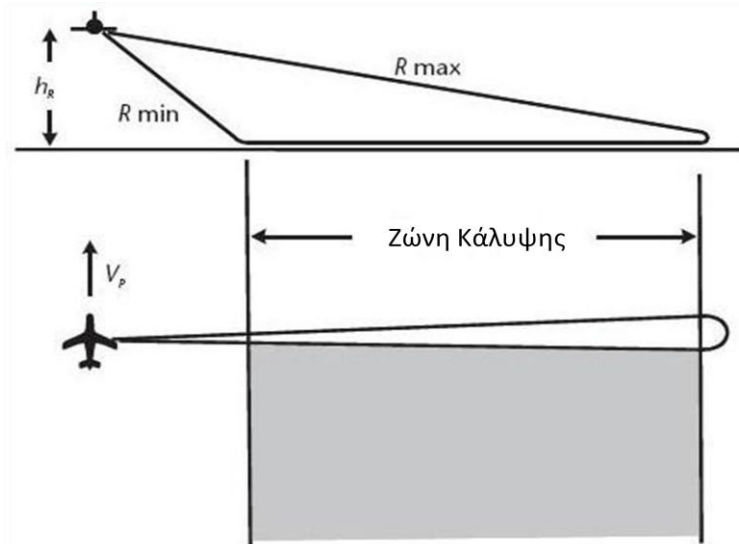
Σχήμα 13: μη-Εστιασμένη και Εστιασμένη Κεραία

Παρατηρούμε ότι στην μη-εστιασμένη κεραία το σήμα λήψης καθυστερεί να φθάσει στα άκρα της κεραίας από τον στόχο κατά $1/8$ του μήκους κύματος λ σε σχέση με το κέντρο αυτής. Σε περίπτωση που το μήκος της κεραίας αυξανόταν περαιτέρω, η φάση του σήματος στα άκρα σε σχέση με το κέντρο αυτής θα αυξανόταν μέχρι να υπερβεί τις 90° . Καθώς το μήκος κεραίας θα μεγάλωνε κι άλλο, το σήμα θα άρχιζε να εξασθενεί αντί να ενισχύεται. Το σημείο αυτό είναι το όριο του μέγιστου μήκους μίας γραμμικής κεραίας και δύναται να ξεπερασθεί με την κατασκευή μίας εστιασμένης κεραίας σε μία συγκεκριμένη απόσταση (Brookner, 1979).

Το μειονέκτημα της εστιασμένης κεραίας είναι ότι εστιάζει σε μία μοναδική απόσταση. Για την αναίρεση αυτού μπορεί να σχεδιασθεί ένας επεξεργαστής όπου παράγει μία συνθετική κεραία που δύναται να εστιάζει σε όλες τις αποστάσεις. Οι περισσότερες εφαρμογές των ραντάρ χρησιμοποιούν γραμμικές κεραίες που εστιάζουν στο άπειρο, όπου τέτοιες κεραίες όπως προαναφέρθηκε έχουν περιορισμό μήκους.

Γεωμετρία Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

Τα ραντάρ πέρα του διαχωρισμού που αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, μπορούν να διαχωριστούν σε ραντάρ έρευνας και απεικόνισης (Maitre, 2008). Τα ραντάρ έρευνας βασίζουν την λειτουργία τους στον εντοπισμό αντικειμένων (στόχων) με εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών παλμών χρησιμοποιώντας κεραίες που περιστρέφονται. Αντίθετα, τα ραντάρ απεικόνισης (imaging radars) σχετίζονται με την κίνηση της πλατφόρμας που φέρει την κεραία. Η κεραία στην περίπτωση αυτή βρίσκεται στην πλευρά της πλατφόρμας και εκπέμπει μια στενή δέσμη προς το έδαφος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 14 (Massonnet & Souyris, 2008).



Σχήμα 14: Βασική Γεωμετρία SAR

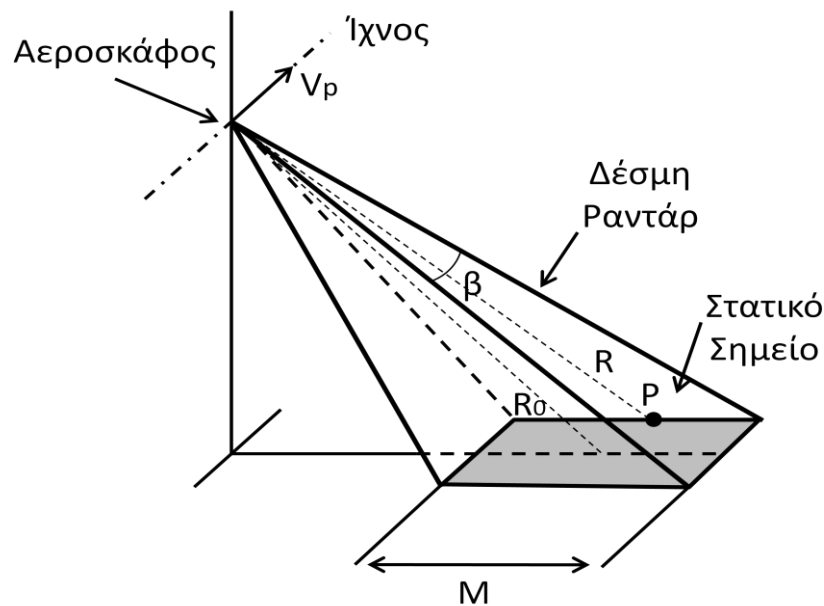
Το ανωτέρω σχήμα αποτελεί την αρχή των ραντάρ απεικόνισης και έτσι όπως περιγράφηκε είναι γνωστό και ως αεροπορικό ραντάρ πλευρικής απεικόνισης (SLAR: Side Looking Airborne Radar). Η ζώνη εδάφους που αντιστοιχεί στην εικόνα που εξετάζει το ραντάρ εξαρτάται από τις αποστάσεις R_{min} και R_{max} . Όπου R_{min} είναι η κοντινή απόσταση του φορέα από το έδαφος και R_{max} είναι η μακρινή απόσταση του ραντάρ από το έδαφος.

Η καταγραφή του παλμού ξεκινάει την χρονική στιγμή t_{min} , όπου t_{min} είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο παλμός από την στιγμή της εκπομπής να διανύσει απόσταση R_{min} μέχρι την στιγμή επιστροφής και λήψης αυτού στην κεραία. Ενώ, η καταγραφή παύει την χρονική στιγμή t_{max} , με t_{max} ο χρόνος που απαιτείται ο ίδιος παλμός να διανύσει απόσταση R_{max} και να επιστρέψει στην κεραία.

Το Σχήμα 15 καθορίζει την γεωμετρία ενός ραντάρ πλευρικής απεικόνισης, όπου έχουμε θεωρήσει ότι το αεροσκάφος φέρει ένα συνεκτικό (σύμφωνης ολοκλήρωσης) ραντάρ. Η επεξεργασία σήματος ενός ραντάρ SAR κάνει βασικά μία συνεκτική αντιστάθμιση φάσης που διορθώνει την συγκεκριμένη μετατόπιση φάσης του ανακλώμενου σήματος, από ένα συγκεκριμένο σημείο του εδάφους, κατά την διάρκεια κίνησης του αεροσκάφους (Levanon, 1988).

Το ραντάρ εκπέμπει έναν παλμό RF (Radio Frequency), όπου το εύρος της δέσμης είναι β . Το γραμμοσκιασμένο παράθυρο του Σχήμα 15 φωτίζεται με ενέργεια RF καθώς το αεροσκάφος κινείται με σταθερή ταχύτητα επί της χαραχθείσας πορείας (ίχνος). Ένα σημείο P , το οποίο βρίσκεται στο έδαφος και εισέρχεται στον λοβό του παλμού απέχει από το ραντάρ απόσταση R . Καθώς το αεροσκάφος κινείται επί του ίχνους το σημείο P μετακινείται μέσα στον χώρο που φωτίζει το ραντάρ. Το σημείο P

φθάνει στην πλησιέστερη απόσταση R_0 από το ραντάρ όταν το P βρίσκεται σε παράλληλη με το αεροσκάφος. Το σημείο P συνεχίζει να μένει πίσω μέσα στο λοβό και απέχει από το ραντάρ απόσταση R όταν εξέρχεται του φωτιζόμενου παραθύρου.



Σχήμα 15: Γεωμετρία Ραντάρ Πλευρικής Απεικόνισης

Επιχειρησιακές Λειτουργίες Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

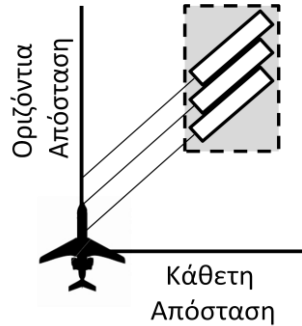
Όσον αφορά τα είδη της έρευνας, που μπορεί να εφαρμόσει ένα ιπτάμενο μέσο που φέρει ραντάρ συνθετικού παραθύρου, ποικίλουν. Τα πρώτα έτη που χρησιμοποιήθηκαν τα ανωτέρω ραντάρ η έρευνα γινόταν στην παράλληλη της πορείας του μέσου (δηλαδή σε διόπτευση 90° από την πορεία του αεροσκάφους) όπου αντιστοιχούσε στο μέγιστο εύρος ζώνης Doppler. Η μέθοδος αυτή ήταν η βέλτιστη για την δημιουργία χαρτών παρακολούθησης / επιτήρησης του εδάφους.

Σε όλα τα είδη έρευνας με ραντάρ συνθετικού παραθύρου έχει θεωρηθεί ότι έχει γίνει συμπίεση παλμών στην διεύθυνση της απόστασης. Καθώς αυτό του είδους ραντάρ σχετίζεται με πληροφορία απόστασης, η πλευρική απεικόνιση είναι απαραίτητη. Σε περίπτωση που φωτίζαμε το έδαφος κάθετα τότε θα είχαμε πάντοτε δύο σημεία του εδάφους να βρίσκονται στην ίδια απόσταση.

Στο πέρασμα των ετών, χρησιμοποιήθηκαν και άλλα είδη έρευνας προκειμένου αφενός να επιτύχουμε καλύτερη διακριβωτική ικανότητα, αφετέρου να μπορούν τα ραντάρ να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες χρήσεις.

Έρευνα Λωρίδας (Strip)

Ένα σχετικά παλιό είδος έρευνας SAR είναι η έρευνα λωρίδας (strip) όπου η έρευνα γίνεται διαγώνια σε σχέση με την πορεία του μέσου και η γωνία της διαγωνίου είναι χαρακτηριστική όπως φαίνεται και στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16: Έρευνα Λωρίδας (Strip)

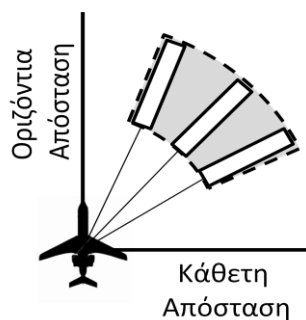
Η σχέση που δίνει την διακριβωτική ικανότητα της ανωτέρω έρευνας είναι:

$$\delta A_z = \frac{\lambda R_0}{2V_p T \sin \theta_s} \quad (3.4)$$

Με T και θ_s να παίρνουν σταθερές τιμές.

Έρευνα Σάρωση Δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening)

Ένας δεύτερος τύπος έρευνας είναι η σάρωση δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening) όπου το ραντάρ ερευνά κυκλικό τομέα υπό γωνία σε σχέση με την πορεία του αεροσκάφους όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Ο κυκλικός τομέας δεν δύναται να βρίσκεται επί της πορείας του αεροσκάφους καθώς ο χρόνος ολοκλήρωσης των παλμών απειρίζεται.



Σχήμα 17: Έρευνα Σάρωσης Δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening)

Η διακριβωτική ικανότητα αυτής της έρευνας δίνεται από την σχέση:

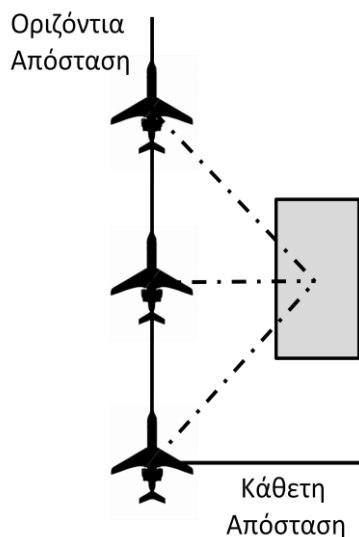
$$\delta A_z = \frac{\lambda R_0}{2V_p T \sin \theta_s} \quad (3.5)$$

Με το T να αυξάνεται κατάλληλα έτσι ώστε το δA_z να παραμένει σταθερό.

Έρευνα Φωτοδέσμης (Spotlight)

Ένα άλλο είδος έρευνας είναι η έρευνα φωτοδέσμης (spotlight) που φαίνεται στο Σχήμα 18. Για να βελτιώσουμε την διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση είναι αναγκαίο να μειώσουμε το μήκος της κεραίας (καθώς προκύπτει από την ανάγκη να αυξήσουμε το εύρος ζώνης Doppler) και να αυξήσουμε αναλογικά την συχνότητα δειγματοληψίας κατά διόπτρευση (προκειμένου να ικανοποιείται ο κανόνας του Shannon περί ελαχίστου χρόνου δειγματοληψίας) (Massonnet & Souyris, 2008).

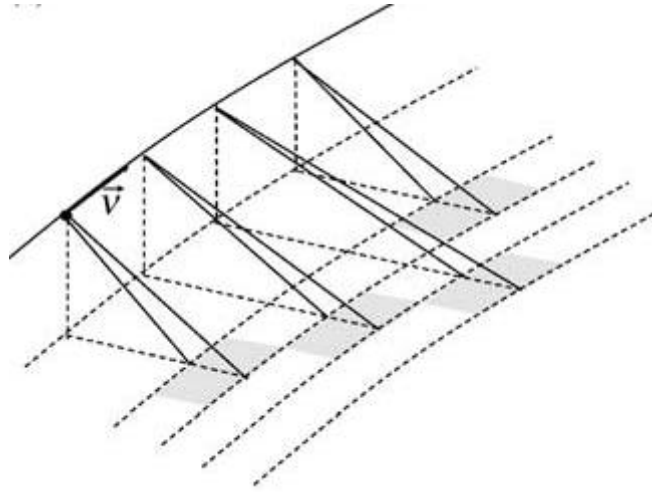
Αποτέλεσμα των ανωτέρω θα ήταν να μειώσουμε τον τομέα έρευνας, προκειμένου να αποφύγουμε την αβεβαιότητα κατά απόσταση, και να αυξήσουμε το ύψος της κεραίας. Για να διατηρήσουμε το μέγεθος του τομέα ερεύνης και ταυτόχρονα να αυξήσουμε την διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ, ο στόχος παρακολουθείται από την κεραία για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά την κίνηση του αεροσκάφους. Δηλαδή, το ραντάρ παρακολουθεί τον στόχο πολύ πριν και μετά την παράλλαξη αυτού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18: Έρευνα Φωτοδέσμης (Spotlight)

Έρευνα Πολλαπλής Σάρωσης (Scansar)

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να αυξήσουμε το πλάτος του τομέα έρευνας, θα ήταν απαραίτητο να αυξήσουμε το μήκος της κεραίας και να μειώσουμε την συχνότητα δειγματοληψίας κατά διόπτρευση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μία εξάρτηση μεταξύ της διακριβωτικής ικανότητας κατά διόπτρευση και του πλάτους τομέα ερεύνης. Ένα τέτοιο είδος έρευνας ραντάρ συνθετικού παραθύρου φαίνεται στο Σχήμα 19 και ονομάζεται έρευνα πολλαπλής σάρωσης (Scansar ή Multilook).



Σχήμα 19: Έρευνα Πολλαπλής Σάρωσης (Scansar)

Στην έρευνα αυτή το ραντάρ επεξεργάζεται πολλές περιοχές του τομέα ταυτόχρονα, στέλνοντας διαδοχικές ριπές παλμών σε κάθε μία περιοχή του τομέα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε ο χρόνος των διαδοχικών ριπών να μην υπερβαίνει τον χρόνο επεξεργασίας του παραθύρου κατά διόπτρευση. Η έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε επιχειρησιακά στον канаδικό δορυφόρο RADARSAT το 1995 (Massonnet & Souyris, 2008).

Επεξεργασία Σήματος

Καθώς το ραντάρ κινείται σταθερά επί της πορείας του, εκπέμπει παλμούς κατά διαστήματα και αποθηκεύει τις επιστροφές διατηρώντας την φάση του κάθε σήματος λήψης στην μνήμη αποθήκευσης. Τα αποθηκευμένα σήματα λήψης επεξεργάζονται συνεκτικά έτσι ώστε να παρέχουν την απαραίτητη διακριβωτική ανάλυση κατά διόπτρευση μίας στοιχειοκεραίας όπου το μήκος της αντιστοιχεί στο διάστημα που ταξιδεύει το ραντάρ κατά την διάρκεια επεξεργασίας του συνεκτικού σήματος. Η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση επιτυγχάνεται κατά τον συνήθη τρόπο και οι εκπεμπόμενοι παλμοί είναι συμπιεσμένες κυματομορφές (Rihaczek, 1996). Η παραπάνω ιδέα προσομοιώνει ή «συνθέτει» μία μεγάλου μήκους κεραία.

Στοιχειώδη Επεξεργασία Σήματος

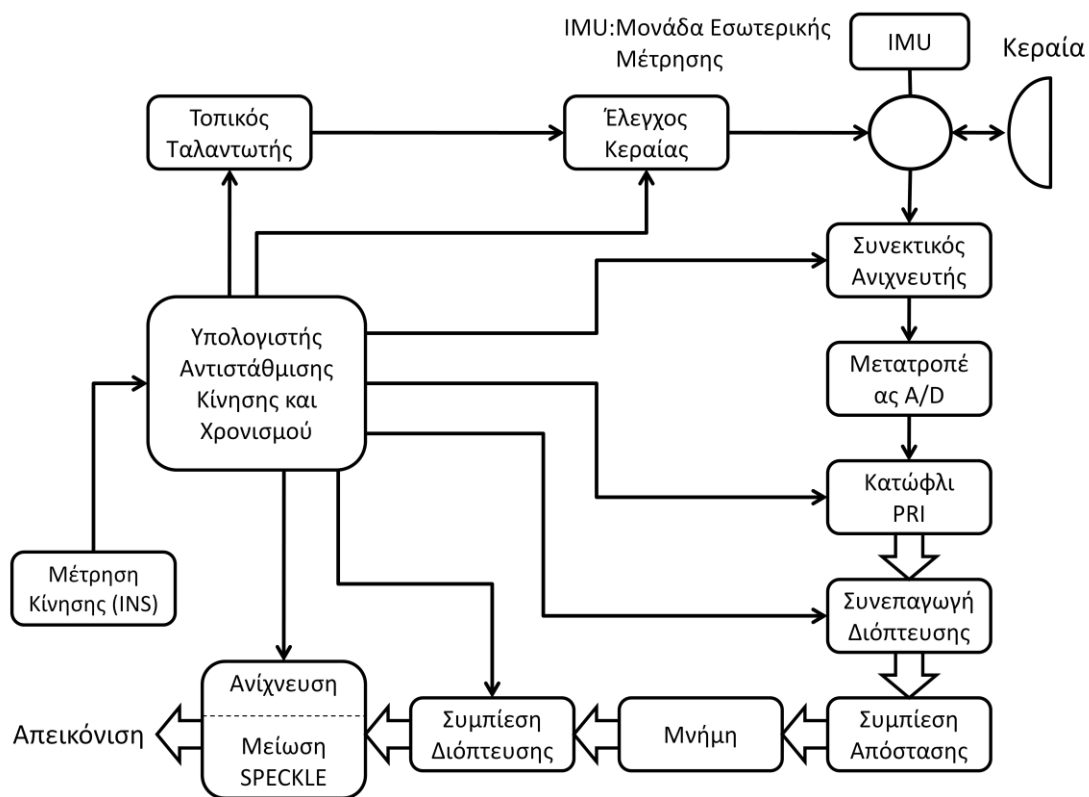
Θεωρούμε την επιστροφή του σήματος $s(n,m)$ ενός στόχου που βρίσκεται στο σημείο P του Σχήμα 15, όπου n είναι η πληροφορία της απόστασης του στόχου και m η πληροφορία της διόπτρευσης. Τότε, η επιθυμητή δισδιάστατη συσχέτιση δίνεται από την σχέση:

$$i(n, m) = \sum_k \sum_l s(k, l) h^*(k + n, l + m; n, m) \quad (3.6)$$

Όπου h^* είναι η συνάρτηση μεταφοράς ή συνάρτηση πυρήνα (Kernel function). Σημειωτέον ότι η συνάρτηση μεταφοράς είναι διαφορετική για κάθε σήμα και

εξαρτάται από την μεταβαλλόμενη υπογραφή της ηχούς του στόχου. Κατά συνέπεια, ο επεξεργαστής πρέπει να διατηρεί μία βιβλιοθήκη των σημάτων αναφοράς ως συναρτήσεις της απόστασης και της διόπτεισης της εικόνας του παραθύρου ή θα πρέπει να υπολογίζει την συνάρτηση αναφοράς άμεσα και κατά περίπτωση (Morris & Harkness, 1996).

Η γενική δομή του επεξεργαστή ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου που μπορεί να εκτελέσει την απαιτούμενη επεξεργασία σήματος του συγκεκριμένου ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 20. Αυτός ο επεξεργαστής είναι κατάλληλος για όποια αυθαίρετη κυματομορφή ραντάρ συνθετικού παραθύρου, αλλά ειδικότερα για την έρευνα φωτοδέσμης (spotlight SAR).



Σχήμα 20: Δομή Επεξεργαστή Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

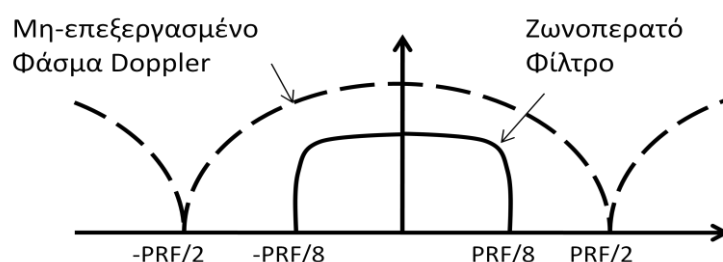
Στα συστήματα συνθετικού παραθύρου προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση εφαρμόζουμε τη συμπίεση των παλμών κατά απόσταση, με τη βοήθεια ενός προσαρμοσμένου φίλτρου. Αυτό το επαναλαμβάνουμε για κάθε παλμό που σε κάθε επανεκπομπή του παλμού.

Καθώς η συσχέτιση γίνεται σε δύο διαστάσεις, μας ενδιαφέρει και η διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά διόπτειση, όπου επιτυγχάνεται με τη συμπίεση των παλμών κατά διόπτειση και αποτελεί τη βασική διαδικασία της επεξεργασίας του ραντάρ συνθετικού παραθύρου. Στους ψηφιακούς επεξεργαστές η συμπίεση παλμών κατά διόπτειση αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια: συνεπαγωγή (presum)

διακριβωτικής ικανότητας δύο στόχων κατά διόπτευση, διόρθωση διακριβωτικής ικανότητας κατά απόσταση και συσχέτιση κατά διόπτευση.

Η συνεπαγωγή κατά διόπτευση είναι μία τεχνική για την ελάττωση του όγκου πληροφορίας μέσα στον επεξεργαστή του ραντάρ. Συχνά, το μέγιστο εύρος ζώνης Doppler είναι μεγαλύτερο από ότι χρειάζεται για την διαχωριστική ικανότητα του ραντάρ (Morris & Harkness, 1996), που σημαίνει ότι απαιτείται λιγότερο από τον μέγιστο χρόνο εκπομπής παραθύρου.

Ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης Doppler που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή διαχωριστική ικανότητα, η συχνότητα παλμικής επανάληψης (PRF) πρέπει να τεθεί τουλάχιστον ίση με το μέγιστο εύρος ζώνης Doppler για να αποφευχθεί η αλλοίωση των δεδομένων. Στο Σχήμα 21 φαίνεται η επίδραση της συνεπαγωγής κατά διόπτευση στο φάσμα Doppler. Το μη-επεξεργασμένο φάσμα Doppler επαναλαμβάνεται με την συχνότητα παλμικής επανάληψης (PRF). Το ζωνοπερατό φίλτρο επιτρέπει να περάσει ένα μέρος του φάσματος Doppler προκειμένου να περιορίσει τον όγκο πληροφορίας που εισέρχεται στον επεξεργαστή.



Σχήμα 21: Φάσμα Doppler σε χρήση Συνεπαγωγής Διόπτευσης

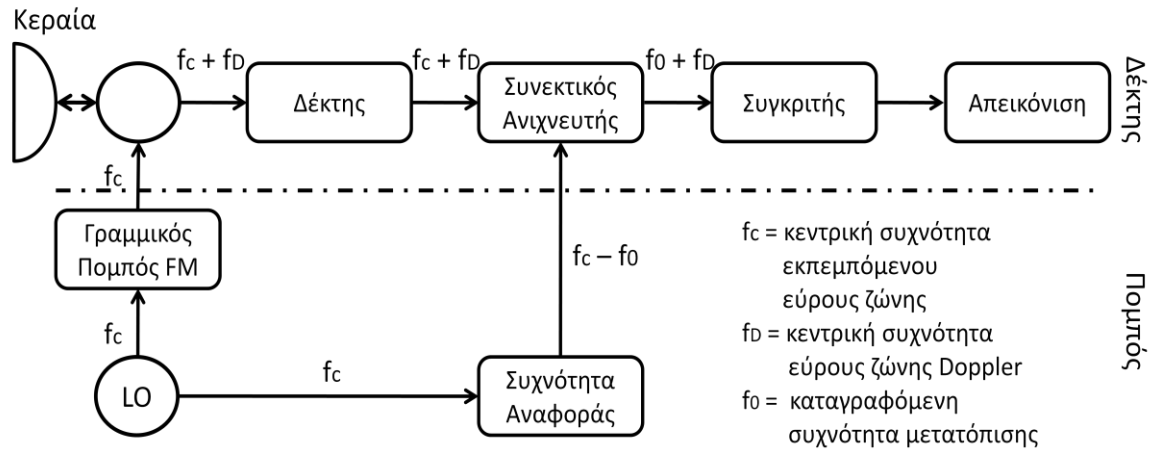
Η ανωτέρω διαδικασία μπορεί να εφαρμοσθεί πριν ή μετά την συμπίεση παλμών (Morris & Harkness, 1996). Συνήθως τοποθετείται πριν συμπίεση παλμών καθώς προσφέρει μείωση στο φόρτο εργασίας του επεξεργαστή στην συμπίεση παλμών κατά απόσταση.

Στην συνέχεια, η συμπίεση παλμών κατά διόπτευση μπορεί να εφαρμοσθεί με διάφορους τρόπους όπως με το άμεσο προσαρμοσμένο φίλτρο, το φίλτρο γρήγορης συσχέτισης, το φίλτρο υποβάθμισης (deramp) και φασματικής ανάλυσης ή τέλος με το φίλτρο επεξεργασίας πολικής διάταξης. Ανωτέρω μέθοδοι διαφέρουν στις αρχικές παραδοχές που γίνονται τόσο για την κυματομορφή όσο και για το σχήμα της αναδιαμόρφωσης που χρησιμοποιείται.

Συχνότητα Doppler

Η διάταξη ενός συνεκτικού (coherent) ραντάρ SAR φαίνεται στο Σχήμα 22. Στα ραντάρ συνθετικού παραθύρου, το έδαφος και τα στατικά αντικείμενα είναι οι στόχοι. Οι κινούμενοι στόχοι δημιουργούν μετατοπίσεις Doppler που μπορούν να

εξαλειφθούν με την συχνότητα Doppler που δημιουργείται από την κίνηση του ραντάρ, όπου στην ουσία είναι και το βασικό χαρακτηριστικό της τεχνικής συνθετικού παραθύρου. Παρόλα αυτά οι κινούμενοι στόχοι είναι δύσκολο να αναλυθούν (Levanon, 1988).

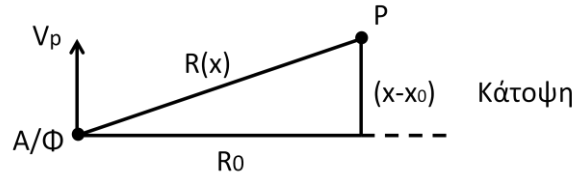


Σχήμα 22: Διάταξη Συνεκτικού/Σύμφωνου Ραντάρ

Το συνεκτικό ραντάρ όπως φαίνεται στο Σχήμα 22 διατηρεί στην μνήμη την διαφορά φάσης από την εκπομπή ενός παλμού στην λήψη αυτού, καθώς ο τοπικός ταλαντωτής παράγει την συχνότητα του φέροντος f_c . Ο εκπεμπόμενος παλμός διαμορφώνεται γύρω από το φέρον το οποίο μεταβάλλεται γραμμικά από μία υψηλή συχνότητα (στην αρχή του παλμού) σε μία χαμηλή συχνότητα (στο πέρας αυτού). Το ραντάρ εκπέμπει ενέργεια υπό μορφή δέσμης και λαμβάνει το ανακλώμενο σήμα.

Το ανακλώμενο σήμα περιέχει την φέρουσα συχνότητα μετατοπισμένη κατά την συχνότητα Doppler, όπου στην πραγματικότητα είναι η φάση σαν συνάρτηση του χρόνου (Brookner, 1979). Ο δέκτης προωθεί το ανακλώμενο σήμα και στον συνεκτικό ανιχνευτή όπου συγκρίνεται με το άθροισμα του αντίγραφου του φέροντος σήματος και της καταγεγραμμένης συχνότητας αναφοράς, f_0 . Η συχνότητα αναφοράς χρησιμοποιείται για την μετατόπιση του φάσματος Doppler, πέρα από την μηδενική συχνότητα. Το αποτέλεσμα του συνεκτικού ανιχνευτή είναι το φάσμα Doppler γύρω από την συχνότητα f_0 . Μετά την συνεκτική ανίχνευση η πληροφορία εισέρχεται στον συγκριτή και τελικά απεικονίζεται στην οθόνη του χρήστη.

Στην κάτοψη του Σχήμα 23 μπορούμε να δούμε μέσω του Πυθαγόρειου θεωρήματος ότι η υπό κλίση απόσταση από το αεροσκάφος προς το σημείο P εξαρτάται από τον χρόνο.



Σχήμα 23: Συχνότητα Doppler Στατικού Σημείου στο Έδαφος

$$R(x) = \sqrt{R_0^2 + (x - x_0)^2} = R_0 + \frac{(x - x_0)^2}{2R_0} \quad (3.7)$$

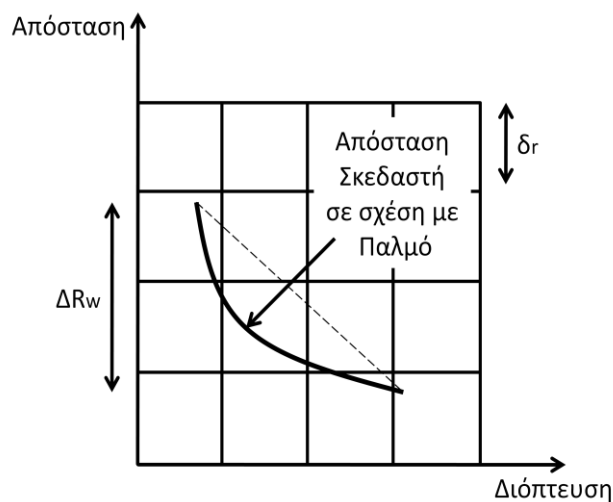
Όπου:

$$(x - x_0) = V_p(t - t_0) \quad (3.8)$$

Κατά συνέπεια έχουμε:

$$R(t) = R_0 + \frac{V_p^2(t - t_0)^2}{2R_0} \quad (3.9)$$

Βάζοντας τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές στον γραμμικό όρο της τελευταίας σχέσης για τις χρονικές στιγμές $t = -T_\alpha / 2$ και $t = T_\alpha / 2$, όπου T_α ο χρόνος συλλογής πληροφορίας γνωστός και ως χρόνος παραθύρου (aperture time), δύναται να προσδιορίσουμε τον όρο ΔR_w που ονομάζεται εύρος κίνησης (range walk) και φαίνεται στο Σχήμα 24 (Morris & Harkness, 1996). Το εύρος κίνησης είναι ιδανικό όταν είναι μεγαλύτερο της διακριβωτικής ικανότητας κατά την απόσταση του ραντάρ.



Σχήμα 24: Εύρος Κίνησης Στόχου

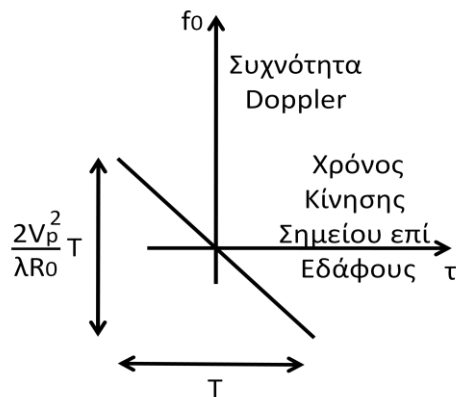
Η μετατόπιση Doppler είναι ίση με την χρονική μεταβολή της απόστασης προς τον λόγο $2/\lambda$ όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση και σημαίνει ότι η συχνότητα Doppler

αυξάνεται όταν η μεταβολή της απόστασης μειώνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ μειώνεται όταν συμβαίνει το αντίθετο.

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} = -\frac{V_p^2(t-t_0)^2}{2\lambda} \quad (3.10)$$

Συνεχίζοντας την περιγραφή της διάταξης ενός ραντάρ SAR και πιο συγκεκριμένα του δέκτη του ραντάρ, παρατηρείται ότι καθώς το ανιχνεύσιμο σήμα εισέρχεται στον συνεκτικό ανιχνευτή και αφού γίνουν οι κατάλληλες διεργασίες η ανιχνεύσιμη συχνότητα του εισερχόμενου σήματος είναι το άθροισμα της συχνότητας αναφοράς f_0 και της μετατόπισης της συχνότητας Doppler f_D .

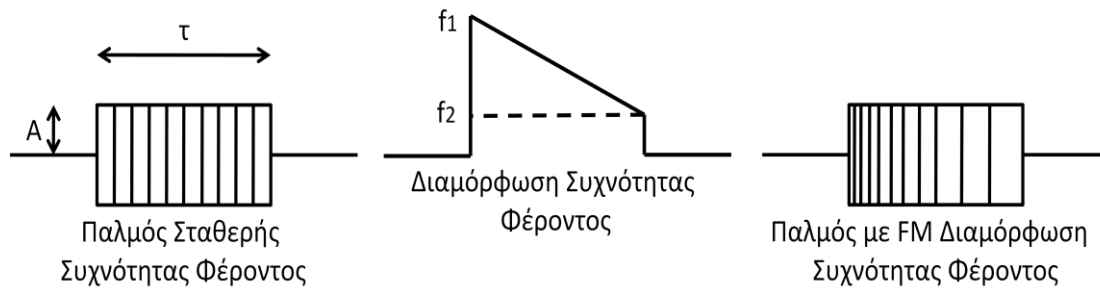
Η έξοδος από τον συνεκτικό ανιχνευτή σήματος είναι γνωστή και ως ιστορικό συχνότητας Doppler και φαίνεται στο Σχήμα 25. Το ιστορικό της συχνότητας αυτής για κάθε σκεδαστή είναι το χρονικό διάστημα που δημιουργείται από την χρονική στιγμή όπου σκεδαστής εισέρχεται στην δέσμης ραντάρ μέχρι την στιγμή που εξέρχεται από αυτήν. Το χρονικό περιθώριο αυτό συμβολίζεται με T . Ο κάθε σκεδαστής έχει το ίδιο ιστορικό Doppler το οποίο μεταβάλλεται από μία υψηλή σε μία χαμηλή συχνότητα.



Σχήμα 25: Ιστορικό Συχνότητας Doppler

Το συνολικό εύρος ζώνης συχνοτήτων που παράγεται στο ανωτέρω χρονικό διάστημα είναι ίσο με την γωνιακή επιτάχυνση του σημείου στο έδαφος πολλαπλασιασμένο με τον λόγο T/λ . Στα παραπάνω συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε και στην περίπτωση που η δέσμη του ραντάρ δεν βρίσκεται στην παράλληλη (κάθετη διόπτρευση) του ίχνους του αεροσκάφους αλλά υπό κάποια γωνία.

Τα χαρακτηριστικά του σήματος εκπομπής φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 26: Παλμός Εκπομπής FM

Το ραντάρ παράγει ένα παλμό τ εύρους μερικών μs πλάτους A . Για να επιτευχθεί μία αξιόλογη διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση, το φέρον υφίσταται μία γραμμική διαμόρφωση κατά συχνότητα (FM διαμόρφωση) από μία συχνότητα f_1 σε μία συχνότητα f_2 στο εύρος τ . Ο διαμορφωμένος παλμός κατά συχνότητα (FM) δίνεται από την σχέση:

$$f(t) = A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{2\pi\alpha t^2}{2}\right), \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (3.11)$$

Όπου:

f_c = Συχνότητα φέροντος

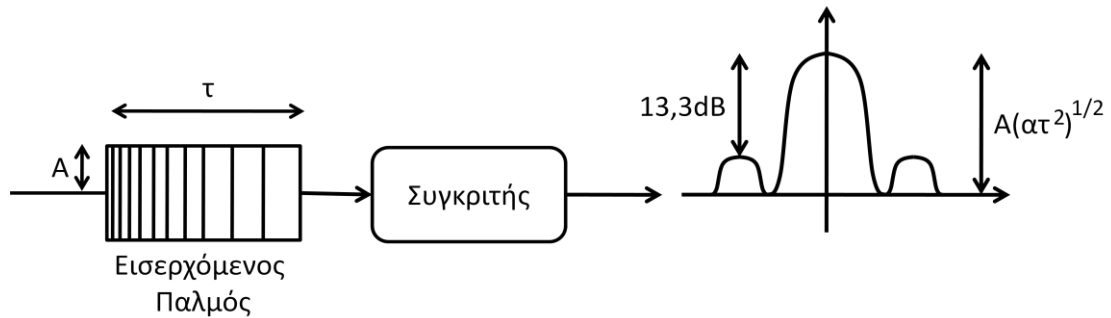
α = Ρυθμός σάρωσης της συχνότητας

τ = Μη-συμπιεσμένο εύρος παλμού

Η συχνότητα του παλμού που ανιχνεύεται στον συνεκτικό ανιχνευτή είναι της μορφής:

$$f_{DET}(t) = f_0 - \alpha t \quad (3.12)$$

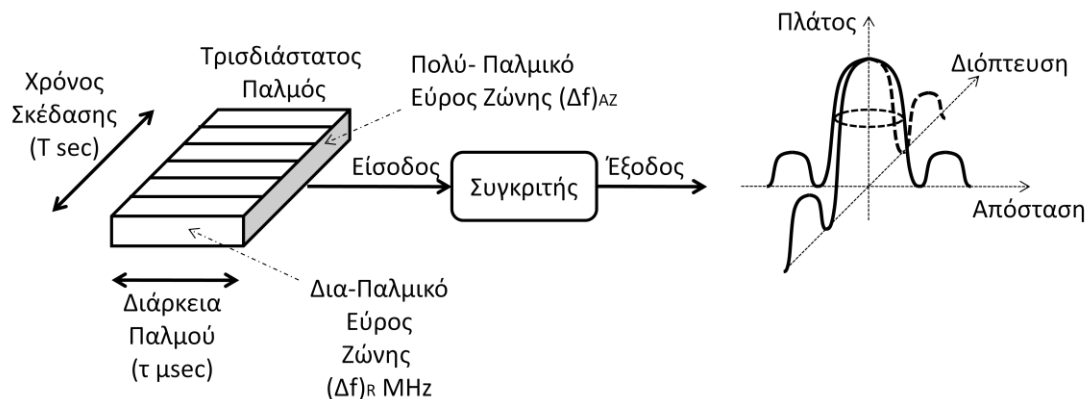
Η παραπάνω συχνότητα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συχνότητα Doppler, έχει την ίδια μορφή με το ιστορικό συχνότητας Doppler. Καθώς το σήμα εισέρχεται και επεξεργάζεται στον συγκριτή (συμπιεστή παλμών) το εξερχόμενο σήμα έχει την μορφή της συνάρτησης $\text{sinc} x / x$ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 27.



Σχήμα 27: Μονοδιάστατος Συγκριτής

Λόγω της κωδικοποίησης της συχνότητας του παλμού και της προβλεπόμενης προσαρμογής της φάσης στον συγκριτή, λαμβάνουμε τον κύριο λοβό με πλάτος προσαυξημένο σε σχέση με το πλάτος του εισερχόμενου σήματος A κατά ένα μέγεθος που είναι ίσο με την ρίζα του γινομένου του εύρους ζώνης $\alpha\tau$ και του χρόνου τ . Στην έξοδο του προσαρμοσμένου δέκτη έχουμε το σήμα με τον κύριο λοβό να είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τους πλευρικούς κατά 13,3dB. Εξειδικευμένες τεχνικές καταπίεσης παλμών χρησιμοποιούνται τόσο στον δέκτη όσο και στον πομπό προκειμένου να μειωθεί το πλάτος των πλευρικών λοβών.

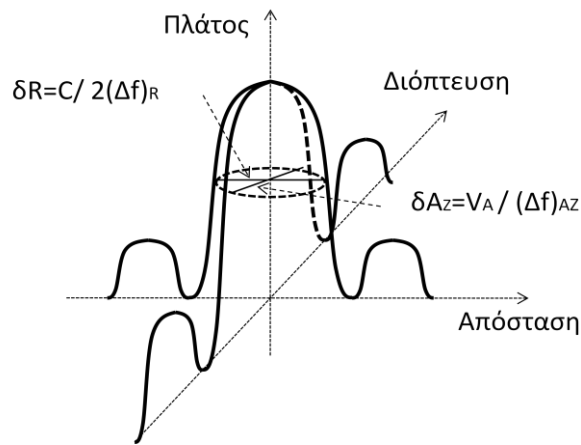
Η δημιουργία συνθετικού παραθύρου (ιστορικό συχνότητας Doppler) και η συμπίεση παλμών (εκπεμπόμενος παλμός FM) είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και μπορούν να συνδυαστούν όπως φαίνεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28: Δισδιάστατος Συγκριτής

Οι τρεις άξονες του σχήματος είναι το πλάτος, η απόσταση (παλμός) και η διόπτευση (Doppler). Στο Σχήμα 28 φαίνεται ότι η έξοδος από τον συνεκτικό ανιχνευτή είναι μία σειρά από παλμούς. Ο κάθε παλμός έχει μία διάρκεια της τάξης msec και ένα εύρος ζώνης της τάξης MHz. Οι παλμοί αυτοί είναι οι επιστροφές από τα σκεδαζόμενα σήματα και εισέρχονται στον συγκριτή για χρονικό διάστημα T που είναι τάξης sec. Κατά το χρονικό διάστημα T , ένα εύρος ζώνης Doppler παράγεται. Εισάγοντας την ανωτέρω σειρά παλμών στον δισδιάστατο συγκριτή λαμβάνουμε ως έξοδο μία

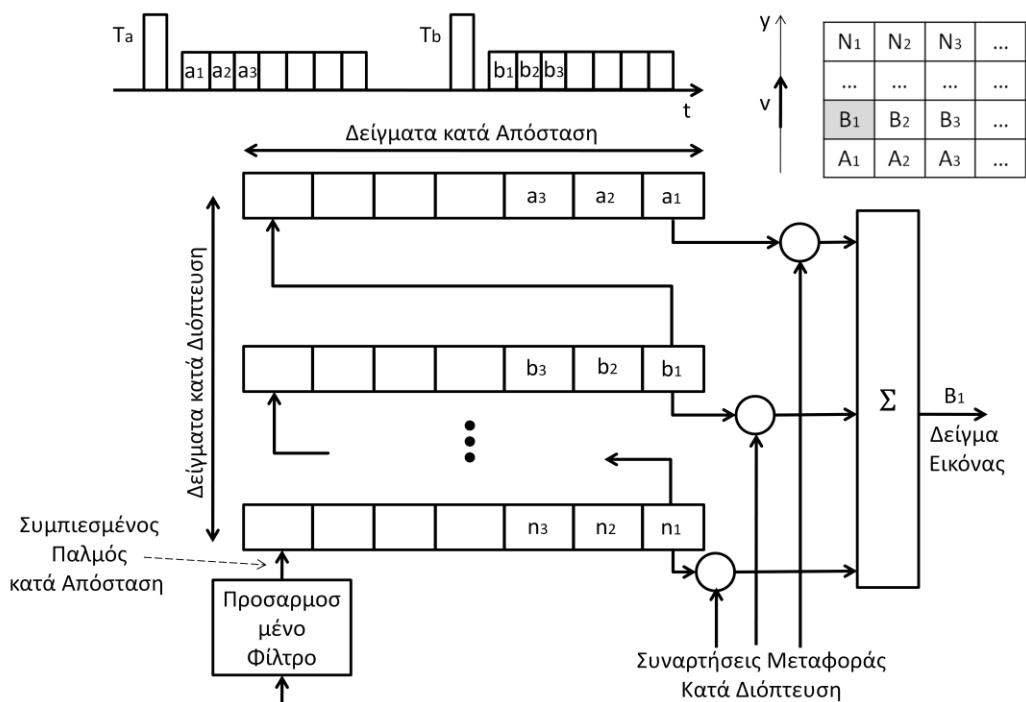
δισδιάστατη κατανομή sinc/x . Στον άξονα της απόστασης η διακριβωτική ικανότητα είναι δR ενώ στον άξονα της διόπτεισης είναι δA_z .



Σχήμα 29: Διακριβωτικές ικανότητες

Επεξεργαστής Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

Η επεξεργασία σήματος παράγει μία εικόνα της οποίας κάθε εικονοκύτταρο (pixel) είναι το αποτέλεσμα των υπολογισμών των προσαρμοσμένων φίλτρων και της επεξεργασίας Doppler. Η εννοιολογική περιγραφή του επεξεργαστή του ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 30. Σύμφωνα με τον Levanon (1988), οι εκπεμπόμενοι παλμοί T_a , $T_b \dots$, δύναται να κωδικοποιηθούν εσωτερικά προκειμένου να διευκολύνουν την συμπίεση παλμών κατά απόσταση.



Σχήμα 30: Επεξεργαστής Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

Έτσι, τα στοιχεία $a_1, a_2, a_3 \dots b_1, b_2, b_3 \dots$ των σημάτων λήψης που αντιστοιχούν στους εκπεμπόμενους παλμούς είναι ήδη το αποτέλεσμα της συμπίεσης των παλμών κατά απόσταση. Ο παλμός T_a εκπέμπεται όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στην παράλλαξη με την σειρά A του πίνακα, ο παλμός T_b εκπέμπεται όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στην παράλλαξη με την σειρά B του πίνακα κ.ο.κ. Όμως η επιστροφή για παράδειγμα του στοιχείου απόστασης b_1 δεν προέρχεται μόνο από το στοιχείο της περιοχής B_1 αλλά και από τα στοιχεία των γειτονικών περιοχών που βρίσκονται σε παραπλήσια απόσταση ($A_1, C_1, D_1 \dots$).

Επιστρέφοντας στον επεξεργαστή, βλέπουμε ότι η έξοδος του προσαρμοσμένου φίλτρου εισέρχεται σε μία ουρά (γραμμή καθυστέρησης). Η ουρά αυτή χωρίζεται σε συνδεδεμένα τμήματα τα οποία σχηματίζουν στήλες. Ο επεξεργαστής μπορεί να υλοποιηθεί ψηφιακά, επομένως η είσοδος της ουράς υφίσταται I-Q δειγματοληψία και μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή μορφή. Η ουρά μπορεί να υλοποιηθεί από καταχωρητές μετατόπισης (shift registers), όπου κάθε στοιχείο της στήλης (δηλαδή του καταχωρητή) περιέχει ένα μιγαδικό αριθμό.

Η ανωτέρω διαδικασία όπως περιγράφηκε δίνει μία εικόνα την στιγμή που ο επεξεργαστής παρέχει την επιστροφή του στοιχείου B_1 . Οι έξοδοι από τις παράλληλες στήλες του σχήματος αποτελούνται από επιστροφές με καθυστέρηση από όλους τους παλμούς. Η κάθε έξοδος της στήλης πολλαπλασιάζεται με ένα μιγαδικό αριθμό που φέρει την μετατόπιση της φάσης που σχετίζεται με την αντίστοιχη στήλη και το άθροισμα αυτό αποτελεί την εικόνα του στοιχείου B_1 .

Άρα συνοψίζοντας, ο επεξεργαστής κατά βάση εφαρμόζει δύο συσχετίσεις, αρχικά συσχέτιση κατά απόσταση που εκτελείται από το προσαρμοσμένο φίλτρο και στην συνέχεια συσχέτιση κατά διόπτευση που εκτελείται στους πολλαπλασιαστές στις εξόδους των στηλών στο Σχήμα 30.

Διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση και κατά διόπτευση

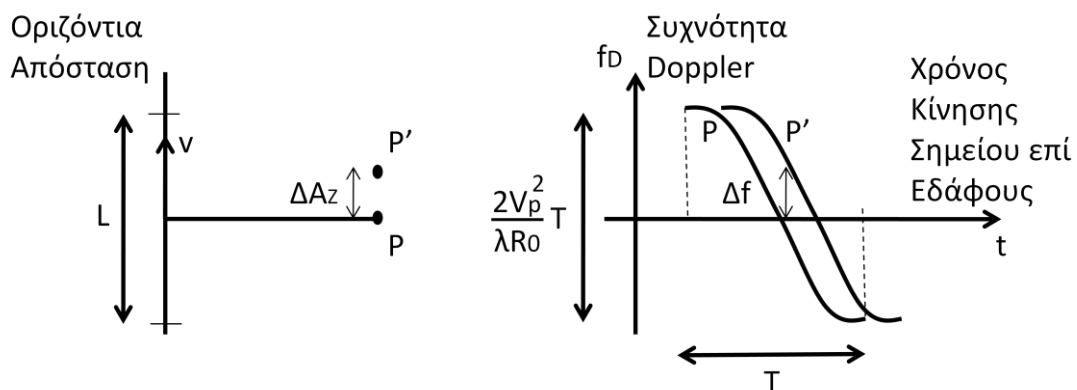
Οι διακριβωτικές ικανότητες τόσο κατά απόσταση όσο και κατά διόπτευση έχουν στον αριθμητή των σχέσεων που τις περιγράφουν τον όρο της ταχύτητας. Η δR είναι ανάλογη της ταχύτητας του φωτός ενώ η δA_z είναι ανάλογη της ταχύτητας του αεροσκάφους. Αντίθετα, οι διακριβωτικές ικανότητες είναι αντιστρόφως ανάλογες ενός εύρους ζώνης. Η δR είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους ζώνης του ραδιοκύματος, ενώ η δA_z είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους ζώνης Doppler. Δηλαδή, η διακριβωτική ικανότητα επιτυγχάνεται και στις δύο διευθύνσεις από την δημιουργία ενός εύρους ζώνης. Κατά συνέπεια, όταν υλοποιείται η συνάρτηση των ανωτέρω διακριβωτικών ικανοτήτων δημιουργείται ένα συνθετικό παράθυρο. Η σύγκριση των δύο διακριβωτικών ικανοτήτων φαίνεται στον Πίνακα 2.

Διακριβωτική Ικανότητα κατά Απόσταση	Διακριβωτική Ικανότητα κατά Διόπτευση
Εύρος παλμού τ_R της εικόνας στο επίπεδο - 4dB $\tau_R = \frac{1}{(\Delta f)_R}$ Όπου $(\Delta f)_R$ είναι το εκπεμπόμενο εύρος ζώνης διαμορφωμένο κατά FM.	Εύρος παλμού τ_{AZ} της εικόνας στο επίπεδο - 4dB $\tau_{AZ} = \frac{1}{(\Delta f)_{AZ}}$ Όπου $(\Delta f)_{AZ}$ είναι το εύρος ζώνης Doppler.
Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της παραπάνω σχέσης με $C/2$ όπου C είναι η ταχύτητα του φωτός (ο όρος $\frac{1}{2}$ απαιτείται για την εκπομπή και την επιστροφή του σήματος) έχουμε:	Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της παραπάνω σχέσης με την ταχύτητα του αεροσκάφους V_P έχουμε:
$\frac{C\tau_R}{2} = \frac{C}{2(\Delta f)_R}$	$V_P\tau_{AZ} = \frac{V_P}{(\Delta f)_{AZ}}$
Ο όρος $C\tau_R/2$ ορίζεται ως η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση δR :	Ο όρος $V_P\tau_{AZ}$ ορίζεται ως η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση δA_Z :
$\delta R = \frac{C}{2(\Delta f)_R}$	$\delta A_Z = \frac{V_P}{(\Delta f)_{AZ}}$

Πίνακας 2: Σύγκριση Διακριβωτικής Ικανότητας κατά Απόσταση και κατά Διόπτευση

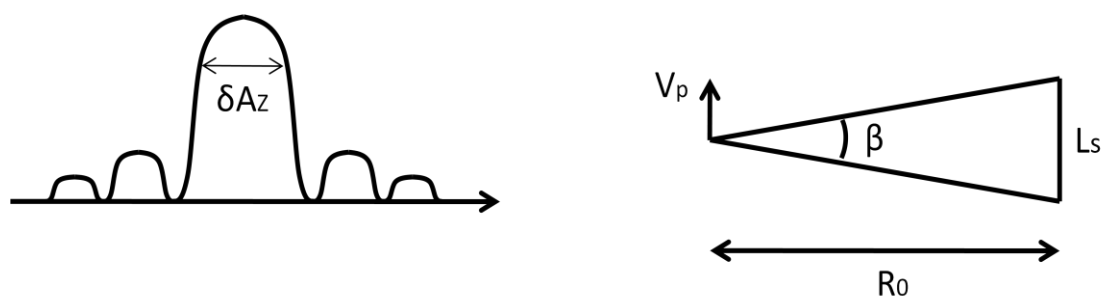
Διακριβωτική Ικανότητα σε Εστιασμένα και Μη-Εστιασμένα Ραντάρ SAR

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε δύο στόχους P και P' όπως φαίνεται στο Σχήμα 29, η διακριβωτική ικανότητα δA_Z είναι άμεσα συνυφασμένη με την ικανότητα ενός φίλτρου να διαχωρίζει δύο συχνότητες Δf . Η διαφορά συχνοτήτων δύο στόχων είναι αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου διάρκειας του σήματος όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2 (Levanon, 1988).



Σχήμα 31: Διακριβωτική Ικανότητα κατά Διόπτευση

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του συστήματος, η μέγιστη διακριβωτική ικανότητα μπορεί να επιτευχθεί επεξεργάζοντας το συνολικό εύρος ζώνης Doppler και αντισταθμίζοντας την διαφορά φάσης από παλμό σε παλμό. Σε περίπτωση που δεν αντισταθμιστεί η διαφορά φάσης τότε το αποτέλεσμα μία μη εστιασμένη ή χαμηλού επιπέδου διακριβωτική ικανότητα. Η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση για ένα εστιασμένο ραντάρ συνθετικού παραθύρου φαίνεται στο Σχήμα 32. Η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση ενός εστιασμένου ΡΠΣ δύναται να προσεγγισθεί με δύο τρόπους. Την προσέγγιση του προσαρμοσμένου φίλτρου και την προσέγγιση εύρους δέσμης.



Σχήμα 32: Διακριβωτική Ικανότητα κατά διόπτρευση εστιασμένου ΡΠΣ

Η προσέγγιση του προσαρμοσμένου φίλτρου ξεκινάει με την αλληλεπίδραση της ταχύτητας του αεροσκάφους και το εύρος ζώνης Doppler.

$$\delta A_Z = V_p / m(\Delta f)_{AZ} \quad (3.13)$$

με

$$(\Delta f)_{AZ} = m \frac{2V_p^2}{\lambda R_0} T \quad (3.14)$$

και

$$V_p T = L_s \quad (3.15)$$

Επομένως διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση του εστιασμένου ραντάρ είναι:

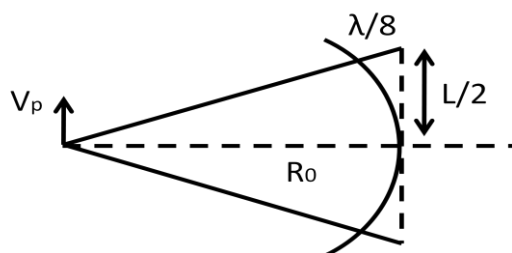
$$\delta A_Z = \frac{\lambda R_0}{2mL_s} = \frac{\lambda}{2m\beta} = \frac{D}{2m} \quad (3.16)$$

Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι με το εύρος δέσμης της κεραίας $\beta = \lambda/D$ και $L_s = R_0\beta_s$ αλλά $\beta_s = \lambda/2L_s$. Επομένως καταλήγουμε στην ίδια σχέση με την σχέση (2.16):

$$\delta A_Z = R_0\beta_s = \frac{\lambda R_0}{2mL_s} = \frac{D}{2m} \quad (3.17)$$

Το m είναι ένας συντελεστής (ονομάζεται και συντελεστής χρησιμοποίησης) όπου μπορεί να παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, εξαρτώμενος από την ποσότητα του εύρους ζώνης Doppler που επεξεργάζεται το ραντάρ. Η εστιασμένη διακριβωτική ικανότητα είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα εκπομπής ενώ εξαρτάται μόνο από το μήκος της κεραίας D και τον συντελεστή m .

Στον αντίποδα, στο Σχήμα 33 φαίνεται η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση ενός μη-εστιασμένου ραντάρ συνθετικού παραθύρου.



Σχήμα 33: Διακριβωτική Ικανότητα κατά Διόπτρευση μη-εστιασμένου ΡΠΣ

Στην περίπτωση αυτή η πληροφορία αποθηκεύεται χωρίς αντιστάθμιση των διαφορών φάσης. Η φάση δύναται να μεταβληθεί μέχρι η διαφορά φάσης να λάβει την τιμή 90° . Εξετάζοντας την γεωμετρία του ανωτέρω σχήματος έχουμε:

$$\left(R_0 + \frac{\lambda}{8}\right)^2 = R_0^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (3.18)$$

και

$$L = \sqrt{\lambda R_0} \quad (3.19)$$

επομένως

$$\delta A_z = \frac{\lambda R_0}{2L} = \frac{\lambda R_0}{2\sqrt{\lambda R_0}} = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda R_0} \quad (3.20)$$

Όπου διαπιστώνουμε ότι η διακριβωτική ικανότητα ενός μη-εστιασμένου ραντάρ εξαρτάται από το ήμισυ της τετραγωνικής ρίζας του γινομένου του μήκους κύματος λ και της απόστασης του στόχου R_0 . Επίσης, από την τελευταία σχέση είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι η ελάχιστη διακριβωτική ικανότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της συνθετικής κεραίας.

Οι μαθηματικές σχέσεις της διακριβωτικής ικανότητας κατά διόπτρευση για συμβατική, εστιασμένη και μη εστιασμένη συνθετικού παραθύρου κεραία δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

Συμβατική (conventional) περίπτωση

$$\Delta X_{CONV} = \frac{\lambda R}{D} \quad (3.21)$$

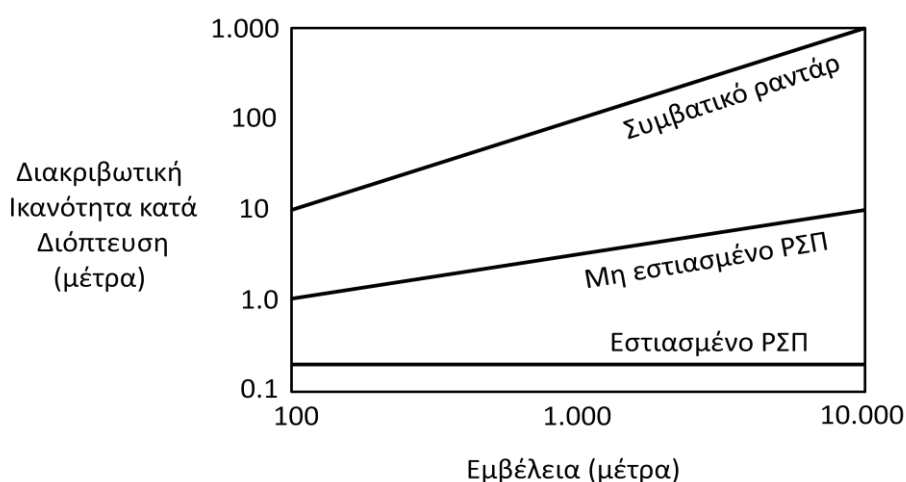
Εστιασμένη (focused) συνθετικού παραθύρου κεραία

$$\Delta X_{FOC} = \frac{D}{2m} \quad (3.22)$$

Μη εστιασμένη (unfocused) συνθετικού παραθύρου κεραία

$$\Delta X_{UNF} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda R} \quad (3.23)$$

Ενώ σχηματικά η διακριβωτική ικανότητα των τριών κεραιών για κεραία με μήκος παραθύρου 2 μέτρων είναι:



Σχήμα 34: Διακριβωτική Ικανότητα ανά τύπο κεραίας

Σηματοθορυβικός λόγος

Ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal to Noise Ratio - SNR) ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_p G^2 \lambda^2 \sigma n_i}{(4\pi)^3 R_0^4 k T_0 B F} \quad (3.24)$$

Όπου

P_p : μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς

G : κέρδος κεραίας

n_i : αριθμός παλμών συνεκτικής ολοκλήρωσης

σ : ραδιοδιατομή στόχου

k : σταθερά Boltzmann

B : εύρος φάσματος δέκτη

T_0 : θερμοκρασία δέκτη

F : συντελεστής θορύβου δέκτη

Θέτουμε $P_p = P_{av}/\tau_u PRF$, όπου P_{av} η μέση ισχύς και τ_u η διάρκεια του ασυμπιέστου παλμού. Θεωρούμε $B = Q/\tau_u$, όπου Q είναι το γινόμενο του εύρους ζώνης με την διάρκεια της κυματομορφής. Καθώς αναφερόμαστε σε συνεκτικό ραντάρ έχουμε $n_i = T_a PRF$. Το κέρδος της κεραίας μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της οριζόντιας και κάθετης γωνίας του εύρους δέσμης θ_h και θ_u ως $G = 4\pi\eta/\theta_h\theta_u$ όπου η είναι ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας, $\theta_h = \lambda/D_h$ και $\theta_u = \lambda/D_u$. Η ραδιοδιατομή RCS είναι $\sigma = \sigma^o \delta R \delta A_z$ όπου σ^o είναι ο συντελεστής σκέδασης σε μοίρες, δR είναι η διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά απόσταση και δA_z είναι η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση. Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος γίνεται:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av} n^2 D_h^2 D_u^2 \delta R \sigma^o}{8\pi R_0^3 Q \lambda u k T_0 F \cos \xi \sin \psi} \quad (3.25)$$

Σύμφωνα με τους Morris και Harkness (1996), η ανωτέρω σχέση δείχνει ότι ο σηματοθορυβικός λόγος αυξάνει με την αύξηση της μέσης ισχύς και του πραγματικού συνθετικού παραθύρου (πραγματικές διαστάσεις κεραίας). Αντίθετα, μειώνεται καθώς η ταχύτητα του φορέα αυξάνει και η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση βελτιώνεται (μικραίνει). Επίσης, ο λόγος μειώνεται σε υπό γωνία διόπτρευση έρευνα ($\psi \neq 90^\circ$) σε αντίθεση με την πλευρική έρευνα ($\psi = 90^\circ$). Σημαντικό είναι ότι ο σηματοθορυβικός λόγος δεν εξαρτάται από διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση.

Συμπληρωματικά Θέματα

Σφάλμα Φάσης και Αντιστάθμιση Κίνησης

Μέχρι τώρα σιωπηρά θεωρήσαμε ότι το αεροσκάφος κινείται σε ευθύγραμμη τροχιά και με σταθερή ταχύτητα. Επί του πρακτέου, αυτό δεν συμβαίνει ποτέ. Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις, οι μικροί ελιγμοί, οι διορθώσεις επί της πορείας, οι δονήσεις και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την κίνηση του αεροσκάφους και κατά συνέπεια δημιουργούν σφάλματα στην φάση των ανακλώμενων σημάτων.

Θεωρώντας ότι η κυματομορφή του εκπεμπόμενου παλμού είναι της μορφής:

$$s(t) = A \exp[2\pi f t] \quad (3.26)$$

Καθώς και η απόσταση ενός σκεδαστή είναι R σε ένα συγκεκριμένο παλμό, τότε το σήμα λήψης είναι:

$$y(t) = A \exp[j2\pi f(t - \frac{2R}{c})] \quad (3.27)$$

Στην συνέχεια, αν θεωρήσουμε ότι το αεροσκάφος, για κάποιους λόγους, παρέκλινε της πορείας του κατά μία απόσταση ε , τότε το σήμα λήψης θα είναι:

$$\tilde{y}(t) = \tilde{A} \exp\left[j2\pi f\left(t - \frac{2R - 2\varepsilon}{c}\right)\right] = \frac{\tilde{A}}{A} \exp\left[-j4\pi \frac{\varepsilon}{\lambda}\right] y(t) \quad (3.28)$$

Το πλάτος της σχέσης (3.28) μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ίση με την μονάδα, κατά συνέπεια τα σφάλματα της κίνησης του αεροσκάφους είναι μία κυκλική (φασική) εναλλαγή της σχέσης (3.27) (Morris & Harkness, 1996). η αντιστάθμιση της κίνησης μπορεί να γίνει υπολογίζοντας την απόσταση ε και διορθώνοντας το σήμα λήψης $y(t)$ με την αντίστροφη κυκλική εναλλαγή.

$$\hat{y}(t) = \exp\left[+j4\pi \frac{\varepsilon}{\lambda}\right] \tilde{y}(t) \cong y(t) \quad (3.29)$$

Αυτόματη Εστίαση (Autofocusing)

Οι τεχνικές αντιστάθμισης της κίνησης του φορέα του ραντάρ προκύπτουν από την θεωρητική ονομαστική ταχύτητα και θέση κατά την διάρκεια του χρόνου φωτισμού του παραθύρου. Σε περίπτωση που η ονομαστική ταχύτητα που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία σήματος είναι λανθασμένη, τότε η συσχέτιση της συνάρτησης μεταφοράς (kernel function) κατά διόπτρευσης θα είναι λανθασμένη επίσης. Επομένως, οι παραγόμενες εικόνες θα είναι μη εστιασμένες και μετατοπισμένες.

Σύμφωνα με τους Morris και Harkness (1996), η αυτόματη εστίαση προσπαθεί να υπολογίσει τα σφάλματα της φάσης που δημιουργούνται από την κίνηση του αεροσκάφους και τα αντισταθμίζει προκειμένου να μειώσει τις κηλίδες της παραγόμενης εικόνας. Η αυτόματη εστίαση μπορεί γίνει με διάφορες τεχνικές από τις οποίες δύο είναι οι πιο διαδεδομένες: η μέθοδος μετατόπισης του χάρτη (map drift) και η μέθοδος μεταβολής της φάσης (phase gradient).

Η μέθοδος μετατόπισης του χάρτη σχεδιάστηκε αποκλειστικά για την διόρθωση των τετραγωνικών σφαλμάτων της φάσης. Η μέθοδος διαιρεί στο ήμισυ το παράθυρο έρευνας του ραντάρ και εφαρμόζει μείωση της ανάλυσης έκαστης εικόνας. Εάν υφίστανται τετραγωνικά σφάλματα φάσης οι κορυφές (peaks) της εικόνας θα μετατοπισθούν από τις ορθές τοποθεσίες τους προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, συσχετίζοντας τις δύο εικόνες δημιουργείται μία κορυφή που αποκλίνει από την ορθή θέση αναλογικά δεξιότερα κατά το τετραγωνικό σφάλμα της φάσης. Η διόρθωση της απόκλισης αυτής είναι εύκολο να διορθωθεί. Το παράθυρο έρευνας

του ραντάρ δύναται να διαιρεθεί σε περισσότερα των δύο υπό-παραθύρων προκειμένου να βελτιωθεί ο εντοπισμός του τετραγωνικών σφαλμάτων φάσης.

Η μέθοδος μεταβολής της φάσης είναι μεταγενέστερη μέθοδος διόρθωσης του σφάλματος φάσης. Η βασική προσέγγιση του αλγόριθμου είναι να υπολογίσει την πρώτη παράγωγο των σφαλμάτων φάσης κατά διόπτρευση από την μερική συμπιεσμένη εικόνα του ραντάρ. Στην συνέχεια, η παράγωγος του σφάλματος φάσης ολοκληρώνεται για να λάβει την πραγματική συνάρτηση του σφάλματος και η εικόνα διορθώνεται ανάλογα.

Ελάττωση Φαινομένου Στίγματος/Κηλίδας (Speckle)

Στον επεξεργαστή καταφθάνει ένας συνδυασμός από σκεδαζόμενα σήματα από διαφορετικούς σκεδαστές προκειμένου να διαμορφωθεί μία εικόνα. Όταν η κατανομή του πλάτους των σημάτων είναι κανονική (Gaussian) και η φάση ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή τότε το πλάτος του εικονοστοιχείου (pixel) ακολουθεί κατανομή Rayleigh. Επομένως, τα εικονοστοιχεία που αντιπροσωπεύουν περιοχές με την ίδια ραδιοδιατομή (ενεργός επιφάνεια ή RCS) μπορεί να δώσουν αύξηση σε άλλα πλάτη εικονοστοιχείων (Morris & Harkness, 1996). Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να χαρακτηρισθούν ως θόρυβος, (όχι απαραίτητα θερμικός, κβαντικός κ.ο.κ) καθώς επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας και έχουν μορφή στιγμάτων ή κηλίδων πάνω σε αυτή.

Το φαινόμενο του στίγματος/κηλίδας μειώνεται με μη σύμφωνη ολοκλήρωση πολλαπλών ασυσχέτιστων εικόνων της ίδια περιοχής. Αυτή η διαδικασία περιορίζει τις διακυμάνσεις των εικονοστοιχείων, περιορίζοντας τις διακυμάνσεις του πλάτους αυτών των εικονοστοιχείων που παρουσιάζουν την ίδια ραδιοδιατομή. Καθώς, το μέγιστο εύρος ζώνης Doppler συχνά υπερβαίνει το απαιτούμενο για να πετύχουμε την βέλτιστη διακριβωτική ικανότητα, η καλύτερη προσέγγιση είναι να διαιρέσουμε την ζώνη (band) σε υπό-ζώνες, κάθε μία από αυτές θα έχει τέτοιο εύρος ώστε να διαμορφώσουμε μία εικόνα με την κατάλληλη ανάλυση. Έτσι, οι εικόνες υπολογίζονται για την κάθε υπό-ζώνη και στην συνέχεια συνδυάζονται προκειμένου να παρέχουν την βέλτιστη εικόνα.

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρθηκε η σύλληψη της ιδέας του ραντάρ συνθετικού παραθύρου και ο τρόπος που εξελίχθηκε στο πέρασμα του χρόνου. Στη συνέχεια έγινε λόγος για την αρχή λειτουργίας του ραντάρ SAR και την γεωμετρία τόσο του φορέα όσο και του στόχου. Έγινε μνεία για τα δύο είδη κεραίας συνθετικού παραθύρου και οι διαφορές τους καθώς και η επιχειρησιακή χρησιμοποίηση των ραντάρ SAR από αεροσκάφη ή δορυφόρους ανάλογα με το είδος έρευνας που εκτελούν. Έγινε αναφορά στην επεξεργασία του σήματος εκπομπής και λήψης, στην δομή και τρόπο λειτουργίας του επεξεργαστή, στην συχνότητα Doppler και στην διαμόρφωση κατά συχνότητα (FM) καθώς επίσης και στην διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά απόσταση και διόπτρευση. Αναφέρθηκε ο σηματοθορυβικός λόγος ,

η αντιστάθμιση της κίνησης του στόχου και το σφάλμα φάσης που παραμορφώνει το σήμα καθώς και η μέθοδοι αυτοεστίασης και το φαινόμενο κηλίδας (speckle).

Κεφάλαιο 4: Ραντάρ Αντίστροφου Συνθετικού Παραθύρου (ISAR)

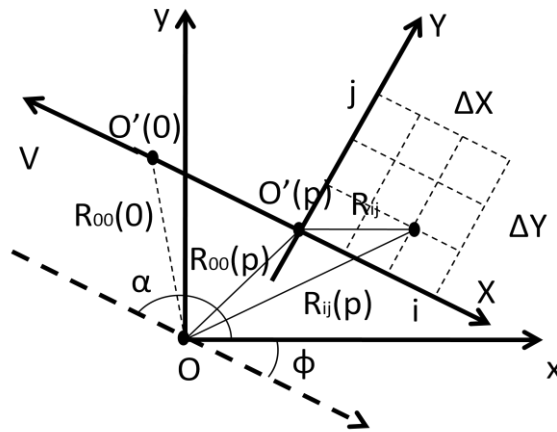
Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε σε ένα ειδικό τύπου ραντάρ SAR που είναι το αντίστροφο ραντάρ συνθετικού παραθύρου και το οποίο μπορεί να απεικονίζει κινούμενους στόχους (πλοία, αεροσκάφη). Αρχικά, αναπτύσσεται η ειδική γεωμετρία του ραντάρ, η διαφορετική φιλοσοφία εκπομπής και λήψης καθώς και η διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά απόσταση και διόπτευση. Τέλος, αναπτύσσεται η επεξεργασία της βηματικής συχνότητας αρχικά εκπομπής και στην συνέχεια λήψης.

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ένα είδωλο SAR δημιουργείται από την ανάκλαση των δεδομένων που συλλέγονται καθώς η πλατφόρμα του ραντάρ κινείται σε σχέση με την περιοχή που ερευνάται. Σε αντίθεση, το είδωλο ISAR δημιουργείται από την ανάκλαση δεδομένων που συλλέγονται καθώς ο στόχος κινείται / περιστρέφεται ενώ βρίσκεται μέσα στην δέσμη του ραντάρ (Son, Thomas, & Flores, 2001).

Γεωμετρία και Περιγραφή ISAR

Ας θεωρούμε έναν στόχο στις δύο διαστάσεις σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $XO'Y$.



Σχήμα 35: Δισδιάστατη Γεωμετρία ISAR

Ο στόχος κινείται αρχικά με σταθερή ταχύτητα και επί σταθερής πορείας και κατά συνέπεια το διάνυσμα της απόστασης του j -οστού σκεδαστή του στόχου από το ραντάρ ISAR που βρίσκεται στο κέντρο του συστήματος O δίνεται από το διάνυσμα:

$$R_{ij}(p) = R_{00}(0) + V \cdot \left(p - \frac{N}{2}\right) \cdot T_b + A \cdot R_{ij} \quad (4.1)$$

Όπου:

$R_{00}(0)$: το διάνυσμα απόστασης του σημείου O στο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων XOY

V : το διάνυσμα της ταχύτητας του στόχου

N : ο αριθμός των εκπεμπόμενων ριπών

T_b : ο χρόνος επανάληψης ριπής, που είναι ίσο με την διάρκεια της ριπής ($T_b=M \cdot T$)

M : ο αριθμός των παλμών σε κάθε ριπή

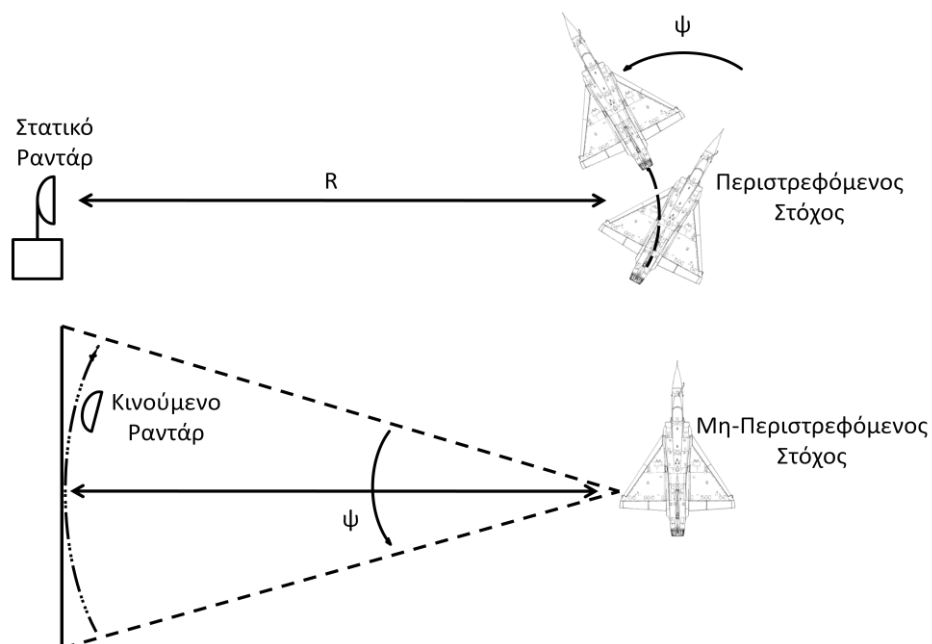
T : ο χρόνος επανάληψης παλμών (PRI)

A : $\begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$, ο πίνακας μετασχηματισμού καρτεσιανών συντεταγμένων

φ : η γωνία μεταξύ O x και O' x

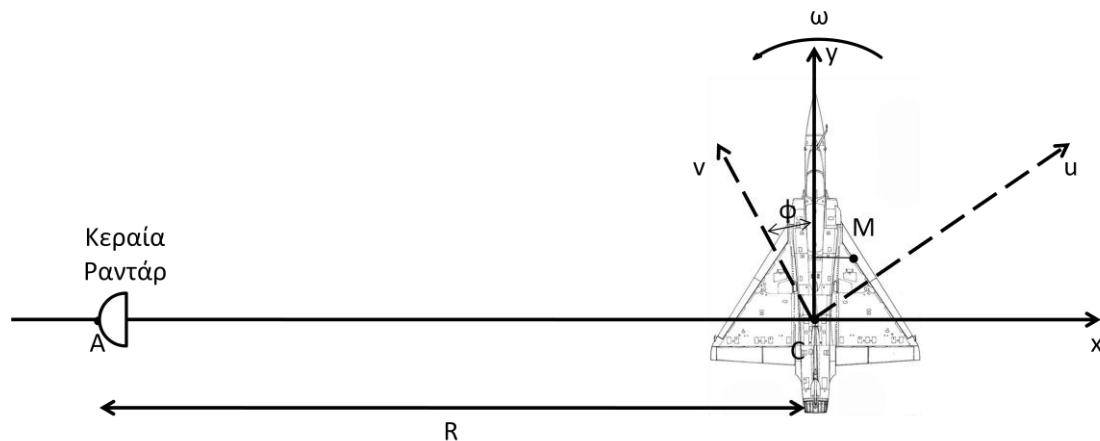
R_{ij} : το διάνυσμα απόστασης του ij -οστού σημείου του σκεδαστή στο σύστημα XO'Y

Η γεωμετρία ενός ραντάρ ISAR σχετίζεται άμεσα με τις αρχές έρευνας που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο για τα ραντάρ SAR. Στην περίπτωση έρευνας στόχων με χρήση ραντάρ ISAR έχουμε ένα στατικό ραντάρ ενώ ο στόχος κινείται ελεύθερα στον χώρο. Η αναλογία με την έρευνα ενός στόχου με ραντάρ SAR είναι η έρευνα φωτοδέσμης (spotlight) όπου ο φορέας του ραντάρ κινείται ενώ ο στόχος παραμένει ακίνητος. Στο Σχήμα 36 φαίνεται η αναλογία μεταξύ έρευνας ISAR και SAR.



Σχήμα 36: Απεικόνιση ISAR

Πιο συγκεκριμένα, το ISAR ραντάρ είναι πακτωμένο στο σημείο A του Σχήμα 37. Ο στόχος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι το αεροσκάφος, περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Το κέντρο περιστροφής είναι στο σημείο C ενώ η απόσταση μεταξύ του ραντάρ και του κέντρου περιστροφής είναι R . Θεωρούμε ένα σημείο ανάκλασης M του στόχου, το οποίο βρίσκεται σε συντεταγμένες $(x,y,0)$, την χρονική στιγμή $(t=0)$, ενώ τα x, y θεωρούνται αμελητέα σε σχέση με την απόσταση R .



Σχήμα 37: Στοιχειώδη Γεωμετρία ISAR

Οι συντεταγμένες του σημείου M σε κάθε χρονική στιγμή είναι $(u,v,0)$:

$$u = x \cos \omega t - y \sin \omega t \quad (4.2)$$

$$v = x \sin \omega t + y \cos \omega t \quad (4.3)$$

Η απόσταση του ανακλώμενου σημείου είναι:

$$R_M^2 = (R + u)^2 + v^2 \quad (4.4)$$

$$R_M^2 = (R + x \cos \omega t - y \sin \omega t)^2 + (x \sin \omega t + y \cos \omega t)^2 \quad (4.5)$$

$$R_M^2 = R_0^2 + 2R x \cos \omega t - 2R y \sin \omega t \quad (4.6)$$

Με $R_0=R_M$ την χρονική στιγμή $t=0$:

$$R_M \cong R_0 \left(1 + \frac{R x \cos \omega t - R y \sin \omega t}{R_0^2} \right) \quad (4.7)$$

Η συχνότητα Doppler του σημείου M είναι:

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \omega (y \cos \omega t + x \sin \omega t) \quad (4.8)$$

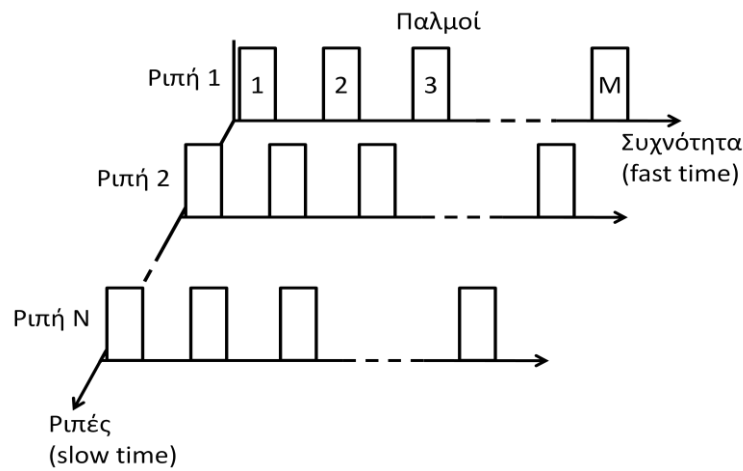
Για χρόνο παρατήρησης T_α πολύ μικρό ($t=0$) η συχνότητα Doppler εξαρτάται μόνο από τις τιμές του άξονα y .

$$f_D = \frac{2y\omega}{\lambda} \quad (4.9)$$

Έτσι, καθορίσαμε μία απευθείας σχέση μεταξύ της συχνότητας Doppler και του άξονα της απόστασης κατά διόπτρευση του ανακλώμενου σημείου, σε σχέση με το κέντρο περιστροφής.

Εκπομπή και Λήψη Σήματος

Η αρχή ενός ραντάρ ISAR είναι η εκπομπή μία σειρά κυματομορφών N ριπών προς τον στόχο, όπου κάθε ριπή αποτελείται από M παλμούς με συχνότητες διαφορετικές και αυξανόμενες βηματικά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 38.



Σχήμα 38: Κυματομορφή N -ριπών, M -βηματικής Συχνότητας Παλμών

Για την κυματομορφή του ανωτέρω σχήματος, το σήμα λήψης U ενός στόχου μπορεί να γραφεί σε συνάρτηση της συνάρτησης μεταφοράς H ως:

$$U = Ae^{\left(\frac{i4\pi rf}{c}\right)} H(\tilde{p}, \tilde{q}) \quad (4.10)$$

Όπου

$$H(\tilde{p}, \tilde{q}) = \iint h(x', y') e^{[i2\pi(\tilde{p}x' + \tilde{q}y')] } dx' dy' \quad (4.11)$$

Η σχέση (4.11) είναι ο δύο διαστάσεων μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης πυκνότητας ανάκλασης του στόχου $h(x', y')$. Στην σχέση (4.10) f είναι η συχνότητα, r είναι η στιγμιαία απόσταση του στόχου, c η ταχύτητα του φωτός και A είναι το πλάτος του σήματος το οποίο μπορεί να τεθεί ίσο με την μονάδα χωρίς βλάβη της γενικότητας.

Στην σχέση (4.11) έχουμε:

$$\tilde{p} = 2(f/c) \sin \theta \text{ και } \tilde{q} = 2(f/c) \cos \theta \quad (4.12)$$

Επίσης, η απόσταση του στόχου από το ραντάρ που αντιστοιχεί στην N ριπή και στον M παλμό δίνεται από την σχέση:

$$r_{n,m} = v_0 t_{n,m} + \frac{1}{2} \gamma_0 t_{n,m}^2 \quad (4.13)$$

Όπου v_0 και γ_0 είναι η αρχική ταχύτητα και αρχική επιτάχυνση του στόχου αντίστοιχα. Ο χρόνος $t_{n,m}$ αναφέρεται στην αρχική στιγμή δειγματοληψίας και δίνεται από την σχέση:

$$t_{n,m} = (m + nM)\Delta t \quad (4.14)$$

Όπου Δt είναι ο χρόνος επανάληψης του παλμού (PRI) και η συχνότητα του m -οστού παλμού σε μία ριπή είναι:

$$f_m = f_0 + m\Delta f \quad (4.15)$$

Όπου f_0 είναι η αρχική συχνότητα σε μία ριπή και Δf είναι το βήμα της συχνότητας από παλμό σε παλμό.

Διακριβωτική Ικανότητα ISAR

Η κυματομορφή της βηματικής συχνότητας που περιγράφηκε ανωτέρω, δειγματοληπτώντας μια σχεδόν σταθερή έκδοση της ανάκλασης H σε διακριτές συχνότητες από παλμό σε παλμό, αυξάνει στιγμιαία τόσο την απαίτηση του εύρους ζώνης καθώς όσο και του αυξημένου ρυθμού δειγματοληψίας (Son, Thomas, & Flores, 2001). Η διακριβωτική ικανότητα μεγάλης ευκρίνειας επιτυγχάνεται με την επεξεργασία του σήματος κατά Fourier. Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει την διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση δR και το εύρος ζώνης του κύματος β δίνεται από την σχέση:

$$\delta R = c/2\beta \quad (4.16)$$

Για N ριπές που περιέχουν M συχνότητες αυξανόμενες βηματικά κατά μία συχνότητα f , η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\delta R = c/[2(M - 1)\Delta f] \quad (4.17)$$

Είναι δυνατόν να επιτύχουμε μεγαλύτερη διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογισμού οι οποίες όμως απαιτούν μεγάλο σηματοθυροβικό λόγο και μεγάλη υπολογιστική ισχύ (Hardange, J P, 1992).

Η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση δA_z , εξαρτάται από την επίλυση της διαφοράς δύο συχνοτήτων Doppler από δύο σκεδαστές που βρίσκονται στην ίδια περιοχή ερεύνης. Επιπρόσθετα, η ευκρίνεια κατά Doppler σχετίζεται με το διαθέσιμο συνεκτικό χρόνο ολοκλήρωσης. Ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι σχεδόν ο ίδιος με τον χρόνο που απαιτείται για την συλλογή των N επιστροφών. Επομένως,

$$\delta f_D = 1/[M(N - 1)\Delta t] \cong 1/T \quad (4.18)$$

Και η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση είναι:

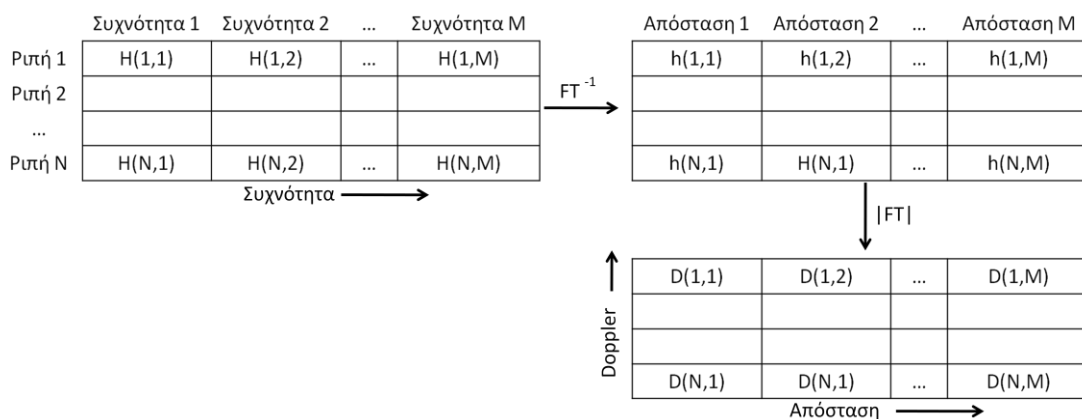
$$\delta A_Z = c\delta f_D/(2\omega_0 f_c) = \lambda/(2\omega_0 T) \quad (4.19)$$

Όπου ω_0 είναι ο ρυθμός περιστροφής του στόχου και $\lambda=c/f_0$ είναι το κεντρικό μήκος κύματος της κυματομορφής.

Συμπερασματικά λοιπόν καταλήγουμε ότι η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του συμπιεσμένου παλμού του σήματος εκπομπής ενώ η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση εξαρτάται από την συχνότητα Doppler του ανακλώμενου σήματος του ραντάρ (Kostis, 2001).

Επεξεργασία βηματικής συχνότητας ISAR

Η ακολουθία της επεξεργασίας του ειδώλου ενός πίνακα με στοιχεία N ριπών (γραμμές) και M επιστροφές σήματος (στήλες), φαίνεται στο Σχήμα 39 (Son, Thomas, & Flores, 2001). Θεωρούμε ότι έχει γίνει διόρθωση για την όποια κίνηση του στόχου. Έστω ότι $H(k,j)$ είναι η ανάκλαση της συχνότητας f_j για την k ριπή. Είναι φανερό ότι η H είναι μία ακολουθία δύο διαστάσεων τάξης ($N \times M$) όπου ουσιαστικά είναι ο πάνω αριστερά πίνακας στο Σχήμα 39.



Σχήμα 39: Ανάλυση Συνθετικού Ειδώλου ISAR

Για να ληφθεί η κατανομή των στόχων σε διάφορες αποστάσεις από το $H(k,j)$, εφαρμόζουμε αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Fourier Transformation, IDFT) για κάθε μία από τις N ριπές που αποτελείται από M δείγματα συχνότητας, από γραμμή σε γραμμή του πίνακα και δημιουργούμε ένα νέο πίνακα με N κατανομές συνθετικής απόστασης (γραμμές) και M στοιχεία συνθετικής απόστασης (στήλες). Η συνάρτηση $h(k,m)$ χαρακτηρίζεται ως κατανομή στόχων κατά απόσταση, όπου m είναι το στοιχείο της απόστασης. Η σχέση που μετασχηματίζει την πληροφορία συχνότητας σε ανακλάσεις κατά απόσταση είναι η ακόλουθη

$$h(k, m) = 1/M \sum_{j=1}^M H(k, j) e^{i2\pi m j/M} \quad (4.20)$$

Για $m=1,2,\dots,M$.

Τα στοιχεία του χρόνου στην σχέση (4.20) μπορούν να μετασχηματισθούν με τον μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transformation, DFT) των N μιγαδικών τιμών του κάθε στοιχείου απόστασης, από στήλη σε στήλη. Κατά συνέπεια, κάθε επιστροφή της μιγαδικής ανάκλασης από σκεδαστή που βρίσκεται σε κάποια διόπτρευση μετασχηματίζεται σε μία κατανομή ανακλάσεων υπό διόπτρευση μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Χαρακτηρίζεται ως το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού Fourier η συνάρτηση $D(m,n)$ όπου m είναι το περιεχόμενο των στοιχείων κατά διόπτρευση στον κάτω δεξιά πίνακα του Σχήμα 39. Επομένως,

$$D(n, m) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h(k, m) \cdot e^{-i2\pi k n/N} \quad (4.21)$$

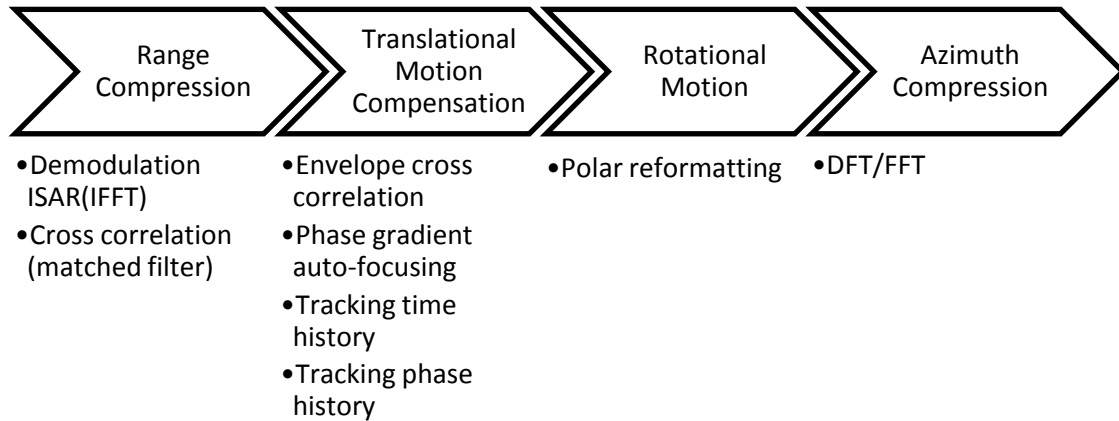
Όπου, $n=1,2,\dots,N$. Το αποτέλεσμα μετά την μετατροπή των μιγαδικών τιμών του $D(n, m)$ σε απόλυτες τιμές είναι ένας πίνακας απόστασης – Doppler, ο οποίος είναι το είδωλο ISAR.

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι η μορφοποίηση ενός ειδώλου ISAR εμπεριέχει την ανάλυση του μετασχηματισμού Fourier σε δύο διαστάσεις. Ο δυσδιάστατος μετασχηματισμός μπορεί να εκφρασθεί ως,

$$D(n, m) = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M H(k, j) e^{i2\pi m j/M} \cdot e^{-i2\pi k n/N} \quad (4.22)$$

Θεωρία Τεχνικής Αυτοεστίασης Ειδώλου ISAR

Ο αντικειμενικός στόχος ενός ISAR ραντάρ είναι η αναδόμηση του ειδώλου ενός στόχου. Για την κατασκευή ενός καλά εστιασμένου δύο διαστάσεων ISAR ειδώλου, ο δέκτης ενός συμβατικού ραντάρ εφαρμόζει μία σειρά από θεμελιώδεις διαδικασίες όπως φαίνεται στο Σχήμα 40.



Σχήμα 40: Διαδικασία Δέκτη ISAR

Αρχικά, ο δέκτης συμπιέζει τους παλμούς κατά απόσταση, με την βοήθεια ενός προσαρμοσμένου φίλτρου το οποίο διαχωρίζει τους σκεδαστές του στόχου κατά απόσταση. Στην συνέχεια, ο δέκτης αντισταθμίζει την πιθανή κίνηση του στόχου, εφαρμόζοντας προσεγγιστική ευθυγράμμιση κατά απόσταση, έτσι ώστε να τοποθετήσει τις επιστροφές των σκεδαστών στα κελιά ενός πίνακα στην διεύθυνση της απόστασης (range tracking). Ταυτόχρονα διορθώνει την φάση ώστε να διατηρείται σταθερή η ολίσθηση συχνότητας Doppler κατά την διάρκεια του διαστήματος σύμφωνης επεξεργασίας (CPI). Ακολούθως, ο δέκτης αντισταθμίζει την περιστροφική/κυκλική κίνηση, συνήθως εφαρμόζοντας πολική αναμόρφωση (polar reformatting). Τελευταία διαδικασία στον δέκτη είναι η συμπίεση του σήματος κατά διόπτευση, όπου συνήθως εφαρμόζεται με διακριτό ή ταχύ μετασχηματισμό Fourier (DFT/FFT).

Συμπίεση Παλμών Κατά Απόσταση

Η συμπίεση παλμών κατά απόσταση δύναται να γίνει με δύο μεθόδους, την αποδιαμόρφωση του σήματος και την εφαρμογή αντίστροφου ταχύ μετασχηματισμού Fourier (IFFT) ή την ετεροσυσχέτιση κάθε ριπής του σήματος λήψης σε σχέση με μία ριπή αναφοράς του εκπεμπόμενου σήματος βηματικής συχνότητας.

Στην πρώτη μέθοδο που αναφέρθηκε δηλαδή την αποδιαμόρφωση του σήματος και την εφαρμογή αντίστροφου ταχύ μετασχηματισμού Fourier (IFFT), το σήμα πρέπει να αποδιαμορφωθεί πριν την εφαρμογή του αντίστροφου ταχύ μετασχηματισμού Fourier, διαδικασία που γίνεται με πολλαπλασιασμό της κάθε ριπής λήψης $S_n(p, m)$, με τον συζυγή μιγαδικό της εκπεμπόμενης ριπής βηματικής συχνότητας.

$$\tilde{S}(p, m) = S_n(p, m) \cdot e^{-i2\pi \cdot f_m \cdot (m-1) \cdot T} \quad (4.23)$$

Στην συνέχεια, εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier στο αποδιαμορφωμένο σήμα, δημιουργώντας ένα προφίλ απόστασης για κάθε ριπή λήψης.

$$\tilde{S}(p, n) = \sum_{m=1}^M \tilde{S}(p, m) \cdot e^{i2\pi \cdot \frac{n \cdot m}{M}} \quad (4.24)$$

Στην δεύτερη μέθοδο, η ετεροσυσχέτιση κάθε ριπής του σήματος λήψης $S_n(p, m)$ γίνεται σε σχέση με ένα σήμα αναφοράς και το αποτέλεσμα είναι ένα προφίλ απόστασης για κάθε ριπή, το οποίο παρουσιάζει υψηλές τιμές στα πλάτη ετεροσυσχέτισης, τα οποία και αντιστοιχούν στους σκεδαστές του στόχου.

$$\tilde{S}(p, n_{ccl}) = \sum_{m=n_{ccl}}^{n_{ccl}+M-1} S_n(p, m) \cdot e^{i2\pi \cdot f_m - n_{ccl} + 1 \cdot (m - n_{ccl}) \cdot T} \quad (4.25)$$

Αντιστάθμιση Κίνησης Στόχου

Για τον εντοπισμό ενδεχόμενης κίνησης του στόχου καταγράφεται, ο πρώτος εκπεμπόμενος παλμός βηματικής συχνότητας του πλησιέστερου σκεδαστή του στόχου, στο πρώτο κελί απόστασης για κάθε προφίλ απόστασης. Όταν το πρώτο στοιχείο του κοντινότερου σκεδαστή δεν παραμένει το ίδιο σημαίνει ότι ο στόχος κινείται και πρέπει να εφαρμοσθούν τεχνικές αυτοεστίασης.

Συμπίεση Παλμών Κατά Διόπτρευση

Η συμπίεση των παλμών κατά διόπτρευση πραγματοποιείται με ταχύ μετασχηματισμό Fourier. Τα προφίλ απόστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο $\tilde{S}(p, n)$ μετασχηματίζονται στο φάσμα Doppler συναρτήσεως της συχνότητας $\tilde{S}(k, n)$.

$$\tilde{S}(k, n) = \sum_{p=1}^N \tilde{S}(p, n) \cdot e^{-i2\pi \cdot \frac{k \cdot p}{N}} \quad (4.26)$$

Για πρακτικούς λόγους, η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση Δr_s επιλέγεται να είναι ίση με την διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση Δr_c .

Η μαθηματική σχέση που δίνει τον χρόνο επανάληψης των ριπών σε σχέση με την διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση δίνεται από την σχέση

$$T_n = \frac{0,5 \cdot \lambda \cdot R_{00}(n)}{\Delta r \cdot N \cdot V \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \quad (4.27)$$

Για να εξασφαλίσουμε την συνθήκη $\Delta r_s = \Delta r_c = c/2 \cdot B$ όπου $B = M \cdot \Delta f$

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρθηκε στον ειδικό τύπου ραντάρ SAR που είναι το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού παραθύρου ISAR και το οποίο μπορεί να απεικονίζει

κινούμενους στόχους επιφανείας και αέρος. Η γεωμετρία του ραντάρ και η φιλοσοφία εκπομπής και λήψης είναι διαφορετική από του ραντάρ SAR καθώς στο ISAR ο φορέας είναι σταθερός και ο στόχος κινείται. Η διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά απόσταση και διόπτευση υπόκεινται στους ίδιους τύπους του ραντάρ SAR. Τέλος, αναπτύσσεται η επεξεργασία της βηματικής συχνότητας λήψης του σήματος και η τεχνική αυτοεστίασης ειδώλου ISAR.

Κεφάλαιο 5: Αυτοεστίαση Ειδώλου ISAR με μέθοδο Ελαχιστοποίηση Εντροπίας

Εισαγωγή

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα ραντάρ ISAR χρησιμοποιούνται στην αυτοεστίαση υψηλής ανάλυσης ειδώλων κινούμενων στόχων σε σχέση με την κεραία του ραντάρ που παραμένει σταθερή. Αρχικά, εκπέμπονται μεγάλοι εύρους ζώνης παλμοί και οι ανακλάσεις τους επιστρέφουν στο δέκτη όπου επεξεργάζονται (σύμφωνη επεξεργασία – coherent process) προκειμένου να δώσουν το είδωλο του στόχου. Σημαντικό βήμα στην διαδικασία αυτή είναι η εστίαση του ειδώλου (image focusing) ή αλλιώς αντιστάθμιση κίνησης του στόχου (Kallitsis, Karakasiliotis, Boultradakis, & Frangos, 2011).

Η κίνηση των στόχων σε πραγματικές συνθήκες είναι ελεύθερη στον χώρο, που σημαίνει ότι ένας στόχος δύναται να εκτελεί τόσο ευθύγραμμη όσο και περιστροφική/κυκλική κίνηση. Η περιστροφική κίνηση εισάγει ανεπιθύμητη φασική παραμόρφωση στο σήμα και εξαρτάται από τις παραμέτρους κίνησης του στόχου. Στην ομοιόμορφη περιστροφή, όπου ο στόχος παρουσιάζει σταθερή γωνιακή ταχύτητα, είναι εύκολο να πετύχουμε καλή διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση, ενώ στην μη ομοιόμορφη περιστροφή, όπου ο στόχος φέρει γωνιακή επιτάχυνση/επιβράδυνση, υποβαθμίζεται η ποιότητα του ειδώλου.

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην διαδικασία αυτόματης εστίασης (auto-focusing) ενός ραντάρ ISAR με την μέθοδο της ελαχιστοποίησης της εντροπίας έτσι όπως αναπτύχθηκε από τους Καλλιτση, Καρακασιλιώτη, Μπουλταδάκη και Φράγκο (Kallitsis, Karakasiliotis, Boultradakis, & Frangos, 2011). Λέγοντας αυτόματη εστίαση εννοούμε την τεχνική η οποία χρησιμοποιείται μετά την επεξεργασία του σήματος λήψης με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας του ειδώλου ISAR (Kallitsis, et al.). Επίσης, η αυτόματη εστίαση είναι τεχνική που εφαρμόζεται αφού το σήμα λήψης έχει επεξεργασθεί και προτού εφαρμοσθούν τεχνικές αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης του στόχου. Εναλλακτικά η μέθοδος της αυτοεστίασης μπορεί να επιτευχθεί με την μεγιστοποίηση της αντίθεσης (contrast) του ειδώλου.

Πρωταρχικός στόχος της μελέτης είναι η βελτίωση της ποιότητας ενός ειδώλου ISAR δύο διαστάσεων, που αντιστοιχεί σε στόχο που εκτελεί μη-ομοιόμορφη κίνηση, που σημαίνει ότι κινείται με γωνιακή επιτάχυνση/επιβράδυνση. Τέτοιοι στόχοι μπορεί να είναι ταχέως κινούμενοι στόχοι αέρος (π.χ. πολεμικά αεροσκάφη). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται ονομάζεται Αυτόματη Εστίαση με Διαχωρισμό Διαστημάτων Σύμφωνης Επεξεργασίας (Coherent Processing Interval Split Auto-focusing) και είναι ο διαχωρισμός και η αλληλουχία δύο ακατέργαστων πινάκων με ισάριθμα στοιχεία που αποτελούν διαστήματα σύμφωνης επεξεργασίας (CPI). Ο αλγόριθμος λαμβάνοντας υπόψη του μία καθορισμένη τιμή της εντροπίας του στόχου,

απορρίπτει χαμηλής ποιότητας στοιχεία του ειδώλου ISAR και στην συνέχεια χρησιμοποιεί γειτονικά στοιχεία υψηλής ποιότητας προκειμένου να τοποθετήσει στην θέση αυτών. Λέγοντας εντροπία ενός ειδώλου εννοούμε τον βαθμό ευκρίνειας σε σχέση με την εστίαση και την συνολική ανάλυση του ειδώλου.

Σήμα ISAR Βηματικής Συχνότητας

Όπως ήδη αναφέρθηκε η υλοποίηση ενός ραντάρ βηματικής συχνότητας γίνεται με την εκπομπή μίας σειράς από ριπές παλμών, έστω N στο πλήθος. Θεωρούμε ότι κάθε ριπή αποτελείται από M παλμούς βηματικής συχνότητας. Επιπρόσθετα, η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης του ISAR ειδώλου όπου εκπέμπονται N παλμοί δίνεται από την σχέση:

$$T_{int} = N \cdot T_b = N \cdot M \cdot T \quad (5.1)$$

Όπου:

T_b : η διάρκεια ριπής παλμών

T : η περίοδος παλμικής επανάληψης (PRI – Pulse Repetition Interval)

Ο παλμός που εκπέμπεται δίνεται από την σχέση:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{rect}\left(\frac{t - t_{mp}}{T_b}\right) \cdot e^{i2\pi \cdot f_m \cdot t} \quad (5.2)$$

Όπου:

$$\text{rect}\left(\frac{t - t_{mp}}{T_b}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{t - t_{mp}}{T_b} < 1 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}, \text{ φανερώνει ότι το πλάτος του παλμού είναι}$$

κανονικοποιημένο ως προς την μονάδα

$t_{pn} = [(m-1) + (p-1) \cdot M] \cdot T$, η χρονική στιγμή που ο m -οστός παλμός της n -οστής ριπής άρχεται

m : το περιεχόμενο του εκπεμπόμενου παλμού στον άξονα ταχέως χρόνου (fast time index)

n : το περιεχόμενο του εκπεμπόμενου παλμού στον άξονα βραδέως χρόνου (slow time index)

$f_m = f_0 + (m-1) \cdot \Delta f$, η φέρουσα συχνότητα του m -οστού παλμού που εκπέμπεται σε χρόνο t_{mn}

f_0 : η αρχική φέρουσα συχνότητα, για το καθορισμένο εύρος ζώνης $B = M \cdot \Delta f$

Δf : το βήμα συχνότητας της διαμορφωμένης βηματικής συχνότητας

Στον αντίποδα, θεωρούμε για απλότητα ότι ο συντελεστής ανάκλασης του σήματος λήψης παίρνει θετικές πραγματικές τιμές και ότι το ανακλώμενο σήμα δίνεται από την σχέση:

$$s_{ij}(p, m) = a_{ij} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - t_{ij}(p)}{T_b}\right) \cdot e^{i2\pi \cdot f_{m-r+1} \cdot (t - t_{ij}(p))} \quad (5.3)$$

Όπου:

$$\text{rect}\left(\frac{t - t_{ij}(p)}{T_b}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{t_{ij \min}(p) + (m-1) \cdot T - t_{ij}(p)}{T_b} < 1 \\ 0, & \text{αλλιού} \end{cases}, \text{ δίνει την διάρκεια της}$$

ανακλώμενης ριπής βηματικής συχνότητας του ij -οστού σκεδαστή

$t = t_p = t_{ij \min}(p) + (m-1) \cdot T$, είναι ο διακριτός χρόνος έδρασης που αντιστοιχεί στο ij -οστό σκεδαστή του n -οστής ριπής

m : το περιεχόμενο του εκπεμπόμενου παλμού στον άξονα ταχέως χρόνου (fast time index)

n : το περιεχόμενο του εκπεμπόμενου παλμού στον άξονα βραδέως χρόνου (slow time index)

$f_{m-r+1} = f_0 + (m-r) \cdot \Delta f$, η φέρουσα συχνότητα του παλμού λήψης την χρονική στιγμή $t_{ij \min}(n)$

f_0 : η αρχική φέρουσα συχνότητα, για το καθορισμένο εύρος ζώνης $B = M \cdot \Delta f$

Δf : το βήμα συχνότητας της διαμορφωμένης βηματικής συχνότητας

Το σήμα λήψης από το σύνολο των σκεδαστών του στόχου είναι

$$S(p, m) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} a_{ij} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - t_{ij}(p)}{T_b}\right) \cdot e^{i2\pi \cdot f_{m-r+1} \cdot (t - t_{ij}(p))} \quad (5.4)$$

Τέλος, η κεραία του ραντάρ λαμβάνει εκτός από το ανακλώμενο σήμα από τους σκεδαστές και εξωτερικό ή θερμικό θόρυβο. Θεωρούμε ότι ο προσθετικός θόρυβος αυτός είναι μία μιγαδική Γκαουσιανή (Gaussian) τυχαία μεταβλητή, με μηδενική μέση τιμή και σταθερή απόκλιση εξαρτώμενη από τον επιλεγόμενο σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Noise Ratio - SNR). Επομένως, για περισσότερο ρεαλισμό στην προσομοίωση, προστίθεται στο συνολικό σήμα λήψης $S(p, m)$ λευκός Γκαουσιανός θόρυβος (white Gaussian noise). Κατά συνέπεια, το ISAR σήμα λήψης είναι το άθροισμα του νετερμινιστικού σήματος $S(p, m)$ και του τυχαίου θορύβου $N(p, m)$.

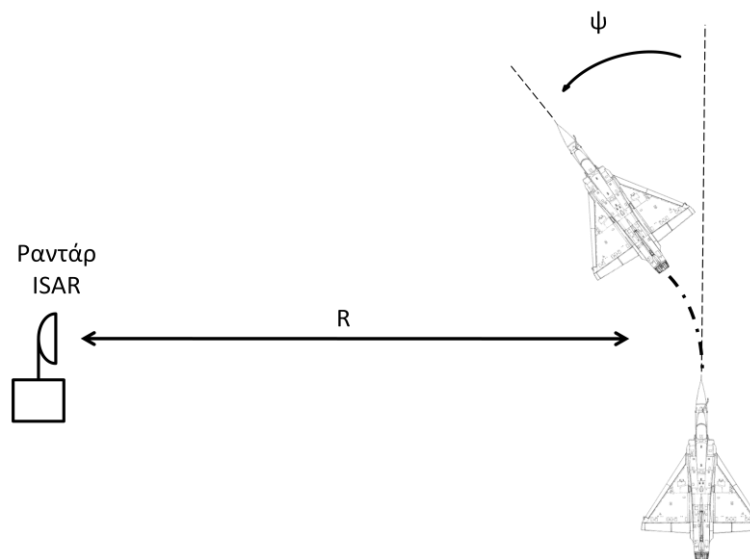
$$S_n(p, m) = S(p, m) + N(p, m) \quad (5.5)$$

Ανωτέρω σχέση αποτελεί το σήμα λήψης σε δύο διαστάσεις πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία του σήματος.

Αλγόριθμος αυτόματης εστίασης

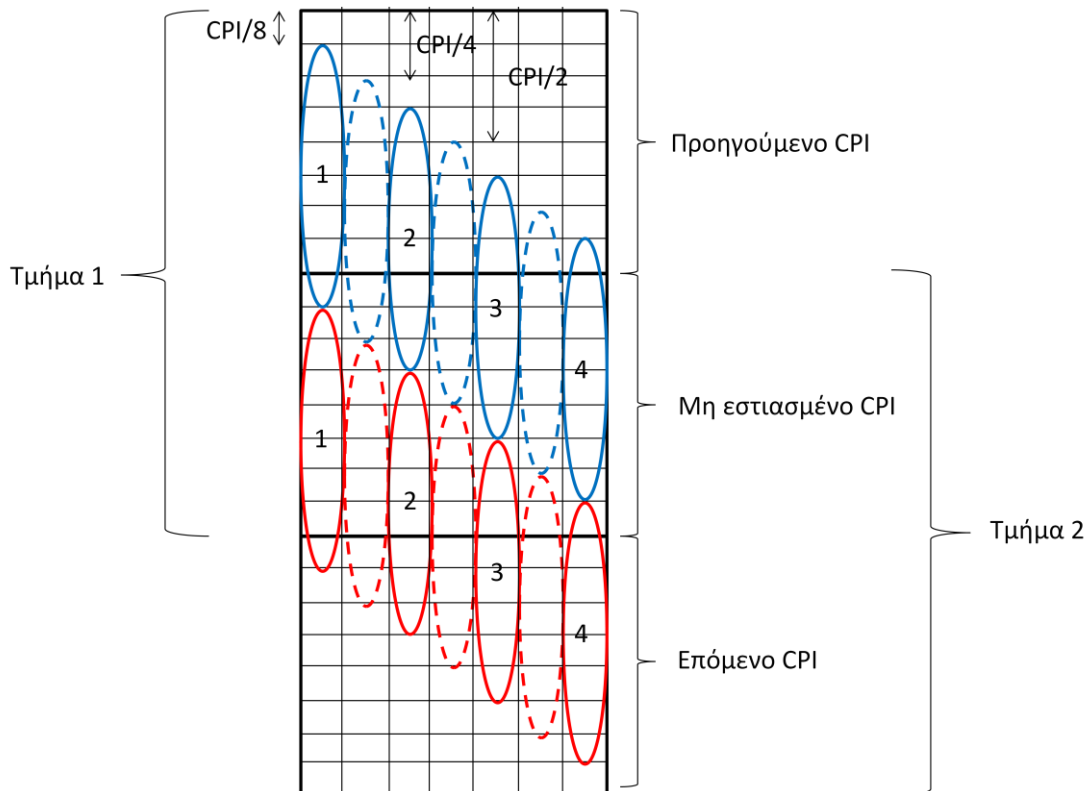
Ο προτεινόμενος αλγόριθμος που αναπτύσσεται στην παρούσα παράγραφο έχει βασισθεί στην τεχνική απόστασης και Doppler (Wehner, 1995) και (Chen & Ling, 2002) έτσι όπως περιγράφεται στην εργασία *A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization* (Kallitsis, Karakasiliotis, Boultadakis, & Frangos, 2011).

Αν θεωρήσουμε την περιστροφική μη-ομοιόμορφη κίνηση του στόχου του Σχήμα 41 τότε το σήμα λήψης επηρεάζεται από την γωνιακή επιτάχυνση αυτού. Στην περίπτωση απότομης περιστροφικής κίνησης του στόχου τα στοιχεία ενός CPI πιθανόν να έχουν δεχθεί παραμόρφωση. Για την αντιστάθμιση της παραμόρφωσης του ISAR ειδώλου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος αυτοεστίασης. Υπολογίζεται η εντροπία του ISAR ειδώλου της κανονικοποιημένης ισχύος και στην περίπτωση που υπερβαίνει ένα κατώφλι εντροπίας, εφαρμόζεται η μεθοδολογία αντικατάστασης του σήματος λήψης που έχει επηρεασθεί από την γωνιακή επιτάχυνση.



Σχήμα 41: Περιστροφική μη-ομοιόμορφη Κίνηση Στόχου

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την βελτίωση της ποιότητας του ειδώλου ονομάζεται «διαχωρισμός συνεκτικού διαστήματος επεξεργασίας» (CPI-split auto focusing) και φαίνεται στο Σχήμα 42.



Σχήμα 42: Μεθοδολογία Προτεινόμενου Αλγόριθμου

Αρχικά, το χρονικό διάστημα που ο στόχος υφίσταται περιστροφική κίνηση με γωνιακή επιτάχυνση ονομάζεται μη-εστιασμένο σύμφωνο διάστημα επεξεργασίας (unfocused Coherent Processing Interval) και ουσιαστικά είναι το CPI που έχει δεχθεί παραμόρφωση. Διαπιστώνεται εύκολα ότι σχηματίζονται δύο τμήματα (segments), όπου το πρώτο τμήμα περιέχει το προηγούμενο σύμφωνο διάστημα επεξεργασίας και το μη-εστιασμένο σύμφωνο διάστημα επεξεργασίας, ενώ το δεύτερο τμήμα περιέχει το μη-εστιασμένο σύμφωνο διάστημα επεξεργασίας και το επόμενο σύμφωνο διάστημα επεξεργασίας.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος διαχωρισμού των CPI αποτελείται από ένα πλήθος από στάδια (N_{stages}) που σχετίζονται με τον αριθμό των υπό-τμημάτων που δύναται να διαιρεθεί το CPI. Ο αριθμός, των δυνατών συνδυασμών ανά i -οστό στάδιο CPI διαχωρισμού, που μπορούμε να πάρουμε είναι:

$$N_{i\ comb} = 2^i \quad (i = 1, \dots, N_{stages}) \quad (5.6)$$

Για να μειώσουμε την υπολογιστική πολυπλοκότητα επιλέγουμε το CPI να διαιρείται σε τμήματα δύναμης του δύο. Το κάθε μη-εστιασμένο CPI μπορεί να χωρισθεί σε δύο, τέσσερα, οχτώ κ.ο.κ στάδια (CPI/2, CPI/4, CPI/8). Επίσης, αποθηκεύοντας τον πρώτο μετασχηματισμό Fourier σε κατάλληλη εικόνα απόστασης – Doppler, μειώνεται σημαντικά η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου.

Στο Σχήμα 42 περιγράφεται η μεθοδολογία, διαχωρισμού και αλληλουχίας τρίτου σταδίου (CPI/8), του αλγόριθμου. Η ιδέα του αλγόριθμου είναι ίδια για όλα τα στάδια (CPI/2, CPI/4, CPI/8). Στο ίδιο σχήμα ο κάθετος άξονας είναι ο άξονας βραδέως χρόνου και περιέχει τις ριπές ενώ ο οριζόντιος άξονας είναι ο άξονας ταχέως χρόνου και περιέχει τις επιστροφές των βηματικών συχνοτήτων εκπομπής.

Αρχικά, υπολογίζουμε την εντροπία των CPI και όταν εντοπίσουμε κάποιο με εντροπία υψηλότερη από την τιμή κατωφλίου τότε εφαρμόζεται ο αλγόριθμος. Εντοπίζοντας κάποιο CPI με αυξημένη εντροπία, διαιρούμε το CPI σε δύο μέρη (CPI/2). Υπολογίζουμε την εντροπία του κάθε μέρους και έστω ότι διαπιστώσουμε πως η παραμόρφωση υφίσταται στο κάτω μέρος του χρονικού διαστήματος. Τότε, αντικαθιστούμε το παραμορφωμένο κάτω μέρος (διακεκομμένο κόκκινο ελλειψοειδές που αντιστοιχεί σε CPI/2) με το άνω μέρος (διακεκομμένο κυανό ελλειψοειδές που αντιστοιχεί σε CPI/2).

Στην συνέχεια εξετάζουμε την εντροπία σε δυάδες γραμμών, π.χ την δυάδα πρώτης και δεύτερης γραμμής του μη εστιασμένου CPI, την δυάδα τρίτης και τέταρτης γραμμής του μη εστιασμένου CPI κ.ο.κ. Στην περίπτωση αυτή έχουμε χωρίσει το χρονικό διάστημα σε CPI/4 και αν θεωρήσουμε ότι εντοπίζεται αυξημένη εντροπία στην δυάδα των δύο τελευταίων γραμμών του μη εστιασμένου CPI τότε αντικαθιστούμε το κόκκινο ελλειψοειδές που βρίσκεται μεταξύ των ελλειψοειδών 3 και 4 με το αντίστοιχο κυανό ελλειψοειδές που βρίσκεται από πάνω του. Αντίστοιχα εργαζόμαστε για οποιαδήποτε δυάδα γραμμών όπου εντοπίζεται εντροπία πέραν του κατωφλίου.

Τέλος, το μη εστιασμένο CPI δύναται να διαιρεθεί σε CPI/8, όπου στην περίπτωση αυτή εξετάζονται οι γραμμές του CPI ξεχωριστά. Αν θεωρήσουμε ότι εντοπίζεται εντροπία πέραν του κατωφλίου στην πρώτη γραμμή του μη εστιασμένου CPI τότε αντικαθιστούμε το κυανό ελλειψοειδές με τον αριθμό 1 με το κόκκινο ελλειψοειδές αριθμού 1.

Για κάθε συνδυασμό στοιχείων, μέσω του μετασχηματισμού Fourier, δημιουργείται ένα ISAR είδωλο το οποίο έχει μία τιμή για την εντροπία. Στην περίπτωση που η εντροπία H του ειδώλου έχει τιμή μεγαλύτερη από μία τιμή κατωφλίου H_{thr} που θα καθορισθεί ως αποδεκτή τότε εφαρμόζεται ο αλγόριθμος έτσι όπως αναπτύσσεται στον παρών κεφάλαιο.

Η εντροπία δίνεται από την σχέση (Karakasiliotis, Lazarov, Frangos, Boultadakis, & Kalognomos, 2008):

$$H = - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \bar{P}_s(k, n) \ln(\bar{P}_s(k, n)) \quad (5.7)$$

Όπου $P_s(k,n)$ είναι η κανονικοποιημένη ισχύς του ειδώλου ISAR:

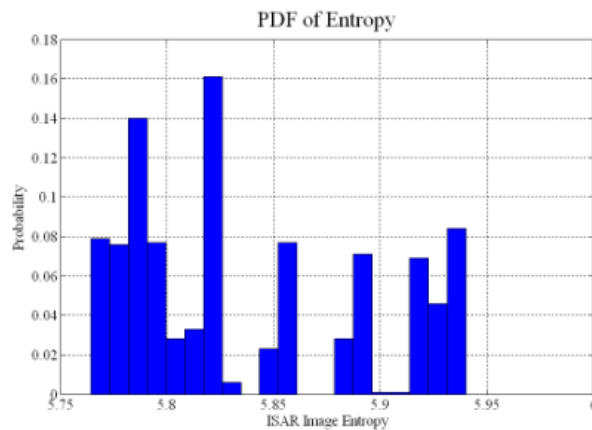
$$\bar{P}_s(k,n) = \frac{|\tilde{S}(k,n)|^2}{\sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^M |\tilde{S}(k,n)|^2} \quad (5.8)$$

Και

$$\hat{S}(k,n) = \sum_{p=1}^N \hat{S}(p,n) e^{-i2\pi \frac{kp}{j}} \quad (5.9)$$

Όπου $k=1,\dots,N$ και $j=1,\dots,M$.

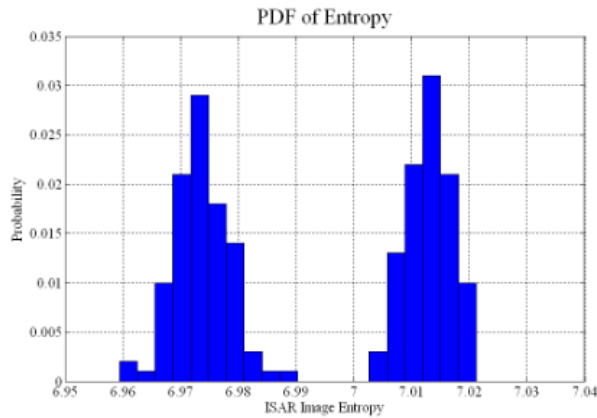
Η τιμή κατωφλίου της εντροπίας, τόσο για την άνω όσο και για την κάτω τιμή, προσδιορίζεται εκτελώντας Monte-Carlo προσομοίωση της εξίσωσης εντροπίας και λαμβάνοντας υπόψη το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος, την γωνιακή επιτάχυνση του στόχου και την γωνία του στόχου σε σχέση με την κεραία του ραντάρ. Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (probability distribution function - PDF) της εντροπίας για ομοιόμορφη κίνηση του στόχου για SNR=15dB φαίνεται στο Σχήμα 43.



Σχήμα 43: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ομοιόμορφης Κίνησης

Το γράφημα του σχήματος 43 παρέχει τα αποδεκτά όρια της εντροπίας του στόχου, H_{low} και H_{upp} όπου είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 5,76 και 5,94.

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (probability distribution function - PDF) της εντροπίας για μη-ομοιόμορφη κίνηση του στόχου για SNR=15dB φαίνεται στο Σχήμα 44.

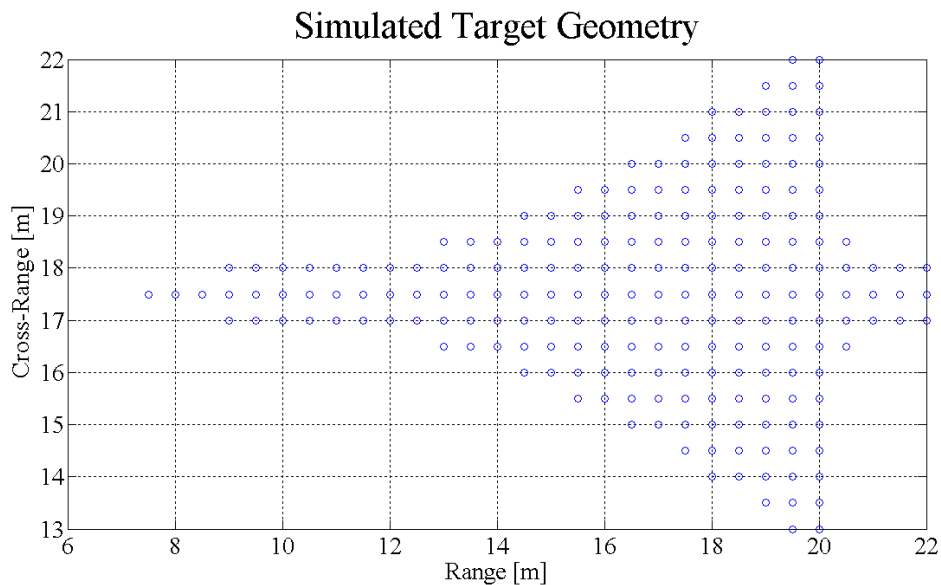


Σχήμα 44: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Μη-Ομοιόμορφης Κίνησης

Στο γράφημα του σχήματος 44 φαίνεται ότι οι τιμές της εντροπίας για την μη ομοιόμορφη κίνηση είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές την ομοιόμορφης κίνησης του σχήματος 43. Το κατώφλι εντροπίας του στόχου, H_{thr} από το οποίο είναι δυνατόν να καθορισθεί αν η κίνηση είναι ομοιόμορφη ή μη, δύναται να παίρνει την τιμή 6.

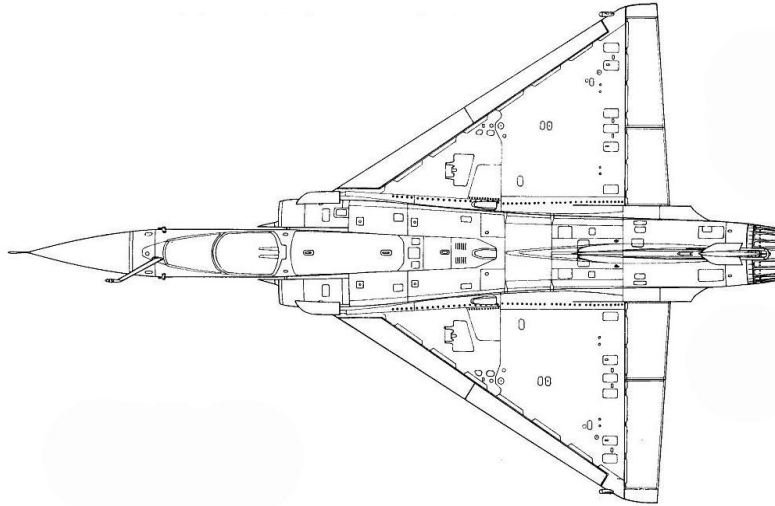
Αριθμητικά Αποτελέσματα

Είναι σύνηθες ο στόχος που μελετάται να θεωρείται ως συμπαγής έτσι ώστε το σύνολο των σκεδασμών να βρίσκεται στο κέντρο του στόχου. Παρόλα αυτά, στην συγκεκριμένη μελέτη θεωρήσαμε τον στόχο να αποτελείται από πλήθος 208 σκεδαστών όπως φαίνεται στο Σχήμα 45.



Σχήμα 45: Γεωμετρία Στόχου και Πλήθος Σκεδαστών

Το μήκος του στόχου είναι 14,5m ενώ το άνοιγμα των φτερών ανέρχεται στα 9m και η κάτοψη του πραγματικού στόχου φαίνεται στο Σχήμα 46.



Σχήμα 46: Απεικόνιση Πραγματικού Στόχου

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του ISAR ραντάρ φαίνονται στον Πίνακα 3.

Παράμετροι	Τιμές
Αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]
Διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση, Δr_s	0,46875 [m]
Διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτειση, Δr_c	0,47244 [m]
Εύρος ζώνης ραντάρ, B	320 [MHz]
Πλήθος συχνοτήτων, M	64
Βηματική συχνότητα, Δf	5 [MHz]
Συχνότητα παλμικής επανάληψης, PRF	15 [kHz]
Διάρκεια ριπής, T_b	4,266 [msec]
Διάστημα σύμφωνης επεξεργασίας, CPI	0,546 [sec]
Πλήθος ριπών, N	128
Πλήθος CPI, N_{CPI}	10
Γωνιακή ταχύτητα, ω	0,0586 [rad/sec]
Γωνιακή επιτάχυνση, γ	0,64 [rad/sec ²]

Πίνακας 3: Πίνακας Παραμέτρων Προσομοίωσης ISAR

Το σήμα λήψης που ανακλάται από τον στόχο θεωρούμε ότι δίνεται από την σχέση

$$x(m, n) = \sum_{k=1}^d s_k e^{-i \frac{4\pi}{c} f_m (x_k \cos \theta_n - y_k \sin \theta_n)} + u(m, n) \quad (5.10)$$

Όπου:

d : το πλήθος των σκεδαστών

s_k : η πυκνότητα σκέδασης του k -οστού σκεδασμού

m : η ένδειξη της βηματικής συχνότητας

n : η ένδειξη ριπής

N : το πλήθος των ριπών κατά την διάρκεια ενός CPI

$u(m,n)$: ο δύο διαστάσεων λευκός Γκαουσιανός θόρυβος

Η γωνία θέσης θ_n του στόχου δίνεται από την σχέση:

$$\theta_n = \begin{cases} \theta_0 + \omega \cdot t_n + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (t_n - t_{start})^2, & \gamma \in N \\ \theta_0 + \omega \cdot t_n, & \gamma = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

Όπου:

θ_0 : η αρχική γωνία θέσης του στόχου

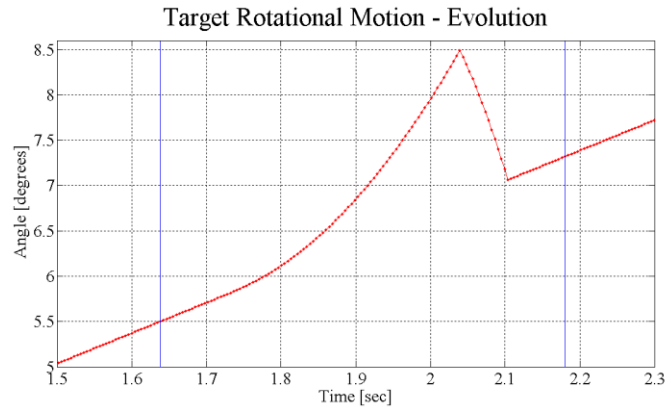
ω : η σταθερή γωνιακή ταχύτητα

γ : η γωνιακή επιτάχυνση,

t_{start} : η χρονική στιγμή που άρχεται η περίοδος της γωνιακής επιτάχυνσης

Στην προσομοίωση, η σχέση (4.16) παρέχει τα στοιχεία του σήματος λήψης που ανακλάται από τον στόχο και που εισάγονται στους πίνακες των CPI χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη κίνηση, εκτός από το τέταρτο και όγδοο CPI που τέθηκε δραστική γωνιακή επιτάχυνση στον στόχο προκειμένου να εισαχθεί παραμόρφωση στο είδωλο. Η γωνιακή επιτάχυνση εισάχθηκε μέσω της σχέσης (5.11) στο τέταρτο και όγδοο CPI.

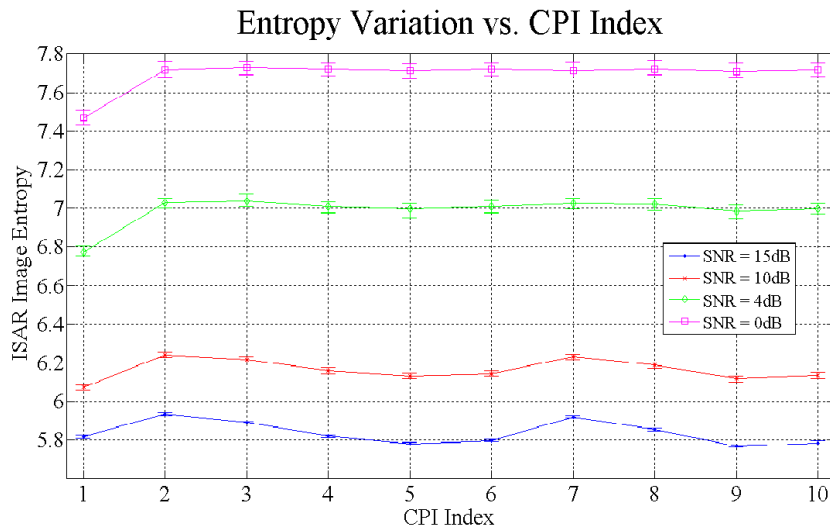
Η προσομοίωση της κυκλικής κίνησης φαίνεται στο Σχήμα 47, έτσι όπως καταγράφηκε στο τέταρτο CPI. Το ίδιο προφίλ στόχου χρησιμοποιήθηκε και στο όγδοο CPI. Στο ακόλουθο σχήμα παρατηρούμε ότι η γωνία θέσης θ_n του στόχου για το χρονικό διάστημα [1.5, 2.05] sec, δεν είναι γραμμική όπως ήταν αναμενόμενο διότι χρησιμοποιήσαμε μία μικρή γωνιακή επιτάχυνση στον στόχο τέτοια ώστε να μην είναι δραστική και να μην εισάγει παραμόρφωση στο είδωλο.



Σχήμα 47: Προσομοίωση στόχου με γωνιακή επιτάχυνση

Στην τρέχουσα προσομοίωση, τα είδωλα ISAR αναδομήθηκαν, για 10 CPI με την μέθοδο απόστασης-Doppler, έτσι όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο περί τεχνικής αυτοεστίασης ειδώλων ISAR του προηγούμενου κεφαλαίου. Για κάθε CPI υπολογίστηκε η εντροπία, όπου ελέγχτηκε για το αν είναι μικρότερη από το κατώφλι εντροπίας έτσι ώστε να εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος αυτοεστίασης.

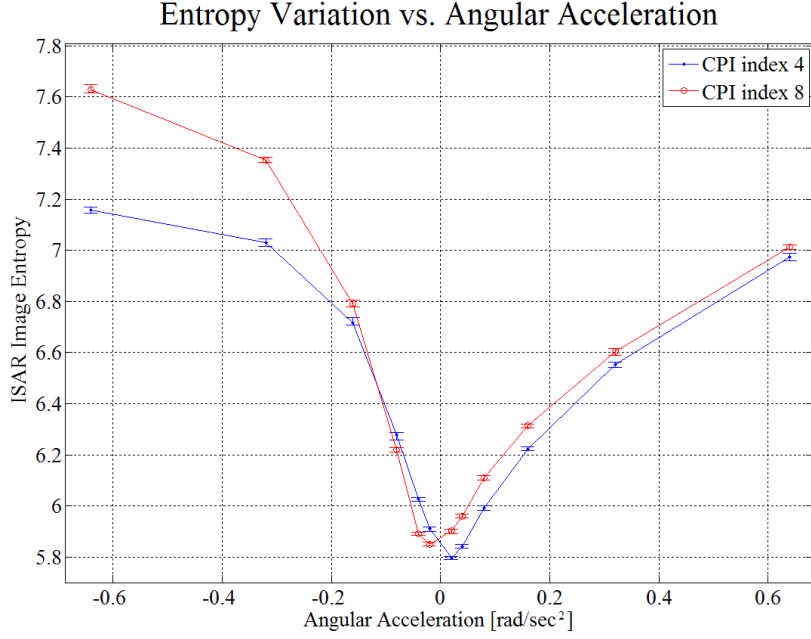
Η μεταβλητή της εντροπίας ISAR, λαμβάνοντας υπόψη το σηματοθορυβικό λόγο SNR και την γωνιακή επιτάχυνση γ , καθορίστηκε μέσω εκατό στο πλήθος Monte-Carlo προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν τόσο για ομοιόμορφη όσο και για μη ομοιόμορφη κίνηση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte-Carlo για την εντροπία σε σχέση με το CPI και το SNR φαίνονται στο Σχήμα 48.



Σχήμα 48: Εντροπία σε σχέση με τα CPI και SNR

Στο σχήμα 48 παρατηρούμε ότι η εντροπία είναι αυξημένη όταν ο σηματοθορυβικός λόγος είναι μικρός και μικραίνει καθώς ο ίδιος λόγος αυξάνει.

Ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte-Carlo για την εντροπία σε σχέση με την γωνιακή επιτάχυνση φαίνονται στο Σχήμα 49.



Σχήμα 49: Εντροπία σε σχέση με την Γωνιακή Επιτάχυνση

Για μη ομοιόμορφη κίνηση η γωνιακή επιτάχυνση μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών $[-0.64, 0.64]$ rad/sec^2 , με το SNR ίσο με 15dB. Το άνω και κάτω όριο της εντροπίας καθορίζεται και αυτό με την βοήθεια στατιστικών αναλύσεων με Monte-Carlo προσομοιώσεις. Για σταθερή γωνιακή ταχύτητα, ορίζουμε την συνάρτηση εντροπίας σε σχέση με τον δείκτη του CPI (n_{CPI}), τον σηματοθορυβικό λόγο SNR, την γωνιακή επιτάχυνση, ως $H(n_{CPI}, SNR, \gamma)$. Τα όρια της εντροπίας που εξασφαλίζουν την εστίαση ενός ειδώλου ISAR δίνονται από τις σχέσεις:

$$H_{low} = \min_{n_{CPI}} \left\{ \min_{SNR} [H(n_{CPI}, SNR, \gamma = 0)] \right\} - 2 \cdot \overline{\sigma_H} \quad (5.12)$$

Και

$$H_{upp} = \max_{n_{CPI}} \left\{ \max_{SNR} [H(n_{CPI}, SNR, \gamma = 0)] \right\} + 2 \cdot \overline{\sigma_H} \quad (5.13)$$

Το κατώφλι εντροπίας δίνεται, κατά συνέπεια, από την σχέση:

$$H_{upp} < H_{thr} < \min_{n_{CPI}} \left\{ \min_{SNR} [H(n_{CPI}, SNR, \gamma)] \right\} - 2 \cdot \overline{\sigma_{H,\gamma}} \quad (5.14)$$

Όπου,

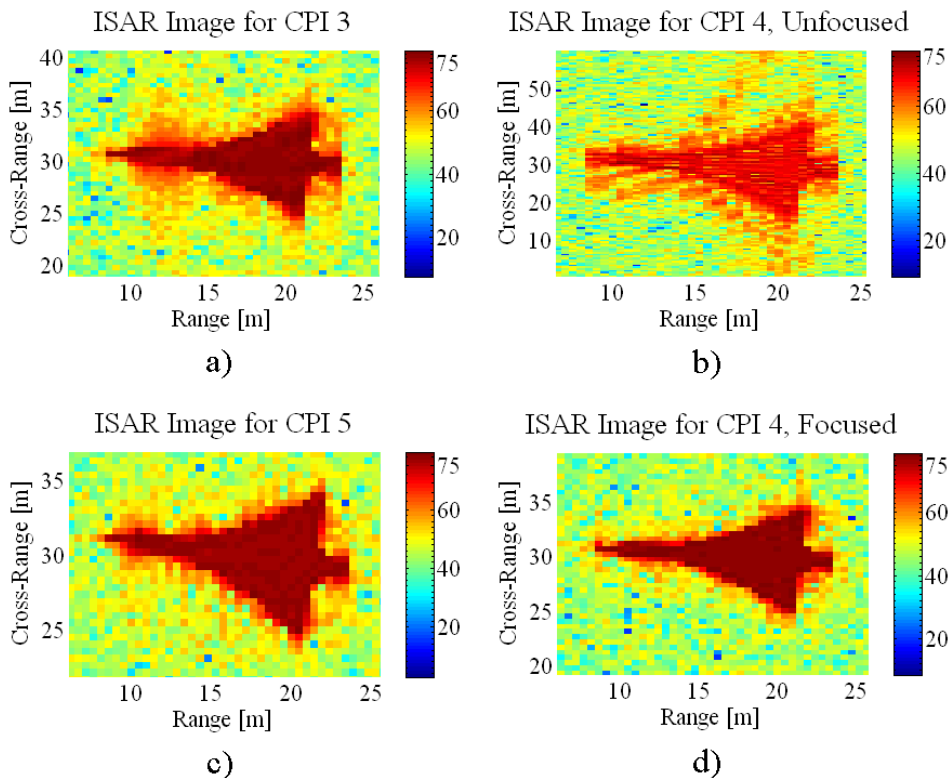
$\overline{\sigma_{H,\gamma}}$: η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης της εντροπίας του ειδώλου για την συγκεκριμένη τιμή της γωνιακής επιτάχυνσης γ .

Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα όρια και το κατώφλι της εντροπίας:

Παράμετροι Αλγορίθμου	Τιμές
Κάτω όριο εντροπίας, H_{low}	5,7586
Άνω όριο εντροπίας, H_{upp}	5,9460
Κατώφλι εντροπίας, H_{thr}	6,0000

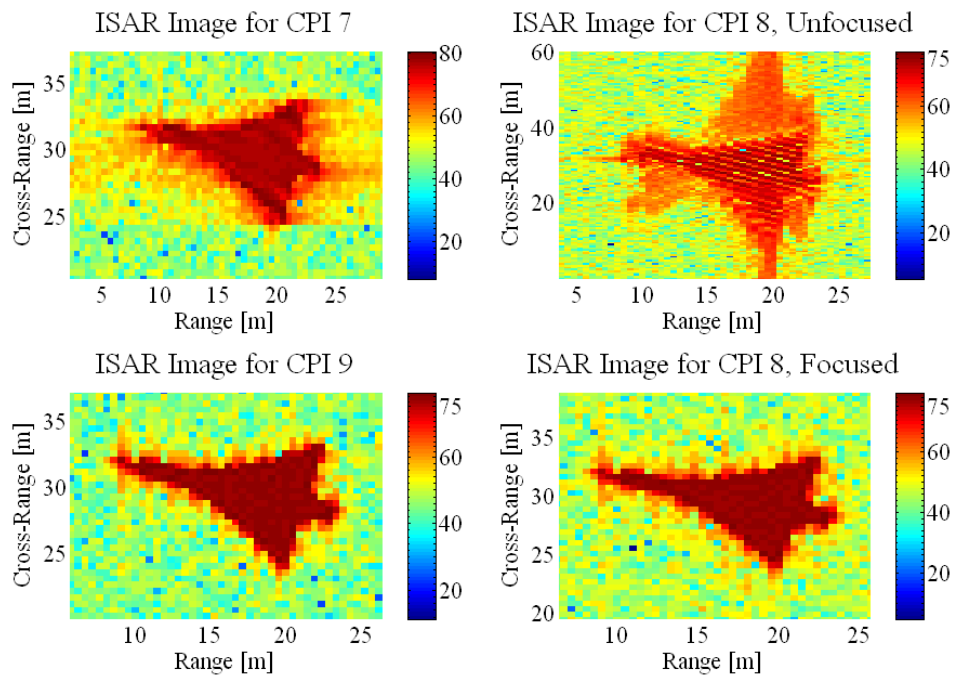
Πίνακας 4: Όρια Και Κατώφλι Εντροπίας

Στο Σχήμα 50, φαίνεται το αναδομημένο είδωλο ISAR για σηματοθορυβικό λόγο SNR ίσο με 15dB και γωνιακή επιτάχυνση γ ίση με $0,64 \text{ rad/sec}^2$ για το 4° CPI. Παρατηρούμε ότι στο 3° και 5° CPI (σχήματα a και c), που αποτελούν το προηγούμενο και επόμενο CPI του μη εστιασμένου παραθύρου, το είδωλο είναι ευδιάκριτο φέροντας ελάχιστη παραμόρφωση. Αντίθετα, το 4° CPI (σχήμα b) που εισήχθη γωνιακή επιτάχυνση στον στόχο, το είδωλο παρουσιάζει παραμόρφωση. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο αυτόματης εστίασης για μείωση της εντροπίας έτσι όπως αναπτύχθηκε πρωτύτερα καταλήγουμε στο εστιασμένο 4° CPI όπου ο στόχος διακρίνεται πλήρως στο είδωλο (σχήμα d).



Σχήμα 50: Αναδομημένο Είδωλο ISAR 4ου CPI

Σε αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούμε να οδηγηθούμε για το 8° CPI όπου εισήχθη γωνιακή επιτάχυνση στον στόχο όπως φαίνεται στο Σχήμα 51 και είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι το τελικό είδωλο (κάτω δεξιά) είναι πλήρως εστιασμένο.



Σχήμα 51: Αναδομημένο Είδωλο ISAR 8ου CPI

Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

Η μελέτη του συστήματος ραντάρ ξεκίνησε από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, βασίσθηκε στην θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού και εξελίσσεται μέχρι και σήμερα. Στην διπλωματική εργασία αυτή μελετήθηκε η βελτιστοποίηση του ειδώλου ενός αντίστροφου ραντάρ συνθετικού παραθύρου (ISAR) με την μέθοδο της αυτοεστίασης χρησιμοποιώντας της ελαχιστοποίησης της εντροπίας.

Αρχικά, αναφερθήκαμε στις αρχές του ραντάρ κάνοντας μία ιστορική αναδρομή από στο πέρασμα του χρόνου έτσι ώστε να διαπιστωθεί η χρησιμότητα του τόσο στο παρελθόν όσο και τώρα. Στην συνέχεια αναπτύσσεται η θεωρία του ραντάρ όπως η εξίσωση ραντάρ, ο πομπός και δέκτης, οι συχνότητες λειτουργίας και εκπομπής και τέλος η ανίχνευση των στόχων μέσω της επεξεργασίας του σήματος, το προσαρμοσμένο φίλτρο, την συχνότητα αβεβαιότητας κ.α.

Στην συνέχεια αναφέρεται η θεωρία του ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) μέσω μίας ιστορικής αναδρομής, ενώ στην συνέχεια γίνεται λόγος για το είδος της κεραίας του ραντάρ (εστιασμένη, μη-εστιασμένη) και την γεωμετρία του. Επιπρόσθετα, αναφέρονται τα είδη ερεύνης του ραντάρ (έρευνα λωρίδας, σάρωσης δέσμης Doppler, φωτοδέσμης και πολλαπλής σάρωσης). Ακολούθως, αναπτύσσεται η επεξεργασία σήματος και η συχνότητα Doppler, ο επεξεργαστής του ραντάρ και οι διακριβωτικές ικανότητες κατά απόσταση και κατά διόπτρευση σε εστιασμένα και μη-εστιασμένα ραντάρ και ο σηματοθορυβικός λόγος. Τέλος, γίνεται αναφορά στο σφάλμα φάσης και αντιστάθμιση της κίνησης του στόχου, στην αυτόματη εστίαση και στην ελάττωση του φαινομένου στίγματος/κηλίδας.

Στην συνέχεια, αναπτύσσεται η θεωρία του αντίστροφου ραντάρ συνθετικού παραθύρου όπου γίνεται αναφορά στην γεωμετρία και την περιγραφή του ραντάρ, στο σήμα εκπομπής και λήψης, στην διακριβωτική ικανότητα και στην επεξεργασία βηματικής συχνότητα.

Τέλος, περιγράφεται ο αλγόριθμος αυτοεστίασης ειδώλου ISAR με χρησιμοποίησης της μεθόδου ελαχιστοποίησης της εντροπίας. Αναφέρεται η γεωμετρία του πειράματος και το σήμα βηματικής συχνότητας, η τεχνική αναδόμηση ειδώλου του ραντάρ μέσω της συμπίεσης παλμών κατά απόστασης, της αντιστάθμισης της κίνησης του στόχου και την συμπίεση παλμών κατά διόπτρευση. Στην συνέχεια αναφέρεται αναλυτικά η λειτουργία του αλγορίθμου και τα αριθμητικά αποτελέσματα. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο (αεροσκάφος) που εκτελεί ελιγμούς τέτοιους ώστε να δημιουργεί παραμόρφωση στο ISAR είδωλο και που βοηθάει να γίνουν εμφανή τα αποτελέσματα της αυτοεστίαση του ειδώλου.

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος δύναται να παρέχει εστιασμένα είδωλα, αποφεύγοντας την υπολογιστική πολυπλοκότητα της πολικής αναδόμησης (polar reformatting). Αυτό επιτυγχάνεται απορρίπτοντας είδωλα χαμηλής ποιότητας

(αυξημένης εντροπίας) και αντικαθιστώντας αυτά με γειτονικά είδωλα καλύτερης ποιότητας (χαμηλής εντροπίας).

Μελλοντικά, ο αλγόριθμος αυτοεστίασης έτσι όπως αναπτύσσεται στο τελευταίο κεφάλαιο και με κατάλληλη τροποποίηση θα ήταν σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί για στόχους που εκτελούν πιο ρεαλιστική κίνηση, έτσι ώστε να εφαρμόζεται περεταίρω αντιστάθμιση της κίνησης (motion compensation) του στόχου. Επιπρόσθετα, είναι επιθυμητό να διερευνηθεί περεταίρω η εντροπία των πειραματικών πραγματικών δεδομένων έτσι όπως ανάγονται από το δεδομένα ORFEO του οργανισμού TNO της Ολλανδίας.

Βιβλιογραφία

Barton, D. K., & Leonov, S. A. (1998). *Radar Technology Encyclopedia*. Norwood, MA: Artech House, Inc.

Brookner, E. (1979). *Radar Technology*. Dedham, MA: Artech House Inc.

Chen, V. C., & Ling, H. (2002). *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*. Norwood, MA: Artech House Inc.

Curry, R. G. (2005). *Radar System Performance Modelling*. Norwood, MA: Artech House.

Hardange, J. P. (1992). Inverse Synthetic Aperture Radars. *Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar* (pp. 9-5). Neuilly Sur Siene, France: AGARD NATO.

Kallitsis, E. D., Karakasiliotis, A. V., Boultadakis, G. E., & Frangos, P. V. (2011). *A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization*. Athens, Greece.

Kallitsis, E., Boultadakis, G., Karakasiliotis, A., Tseremoglou, I., Stergiannis, E., Hristakis, H., et al. *An Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization*. Athens, Greece.

Karakasiliotis, A., Lazarov, A., Frangos, P., Boultadakis, G., & Kalognomos, G. (2008). *Two-dimensional ISAR model and image reconstruction with stepped frequency-modulated signal*. IET Signal Processing.

Kingsley, S., & Quegan, S. (1992). *Understanding Radar Systems*. Berkshire, UK: McGraw-Hill International.

Kolawole, M. O. (2002). *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*. Burlington, MA: Elsevier Science.

Kostenko, A., Nosich, A. I., & Tishchenko, I. (2003). Radar Prehistory, Soviet Side. *Proc. of IEEE APS International Symposium 2001*, vol.IV, p.44.

Kostis, T. G. (2001). *Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar*. London: University College London.

Lacomme, P., Hardange, J. P., Marchais, J. C., & Normant, E. (2001). *Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction*. Norwich, NY: William Andrew Publishing, LLC.

Levanon, N. (1988). *Radar Principles*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.

Mahafza, B. R. (2000). *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Boca Raton, FL: CRC Press, LLC.

Mahafza, B. R., & Elsherbeni, A. Z. (2004). *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*. Boca Raton, FL: CRC Press, LLC.

- Maitre, H. (2008). *Processing of Synthetic Aperture Radar Images* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Massonnet, D., & Souyris, J. C. (2008). *Imaging with Synthetic Aperture Radar*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Meikle, H. (2008). *Modern Radar Systems* (2nd ed.). Norwood, MA: Artech House, Inc.
- Morris, G., & Harkness, L. (1996). *Airborne Pulsed Doppler Radar* (2nd ed.). Norwood, MA: Artech House, Inc.
- Nathanson, F. E., Reilly, P. J., & Cohen, M. N. (1999). *Radar Design Principles* (2nd ed.). Mendham, NJ: McGraw-Hill, Inc.
- Peebles, P. Z. (1998). *Radar Principles*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Rihaczek, A. W. (1996). *Principles of High-resolution Radar*. Norwood, MA: Artech House, Inc.
- Skolnik, M. I. (2008). *Radar Handbook* (3rd Edition ed.). New York: Mc-Graw Hill Companies.
- Son, J. S., Thomas, G., & Flores, B. C. (2001). *Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation*. Norwood, MA: Artech House, Inc.
- Stimson, G. W. (1998). *Introduction to Airborne Radar* (2nd ed.). Mendham, NJ: SciTech Publishing, Inc.
- Wehner, D. (1995). *High Resolution Radar*. Norwood, MA: Artech House Inc.
- Σάγος, Γ. Α., & Μαλαχίας, Ν. Γ. (2004). *Αρχές Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου στην εποχή της Πληροφορικής*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΡΑΔΙΟΔΙΑΤΟΜΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ (S-BAND, $\lambda=10\text{CM}$)	24
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΗ ΣΥΜΦΩΝΗ ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	26
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ 3-D	29
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ 2-D	29

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ.....	13
ΣΧΗΜΑ 2: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ.....	14
ΣΧΗΜΑ 3: ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΑΝΤΑΡ.....	15
ΣΧΗΜΑ 4: ΕΞΙΣΩΣΗ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ.....	17
ΣΧΗΜΑ 5: ΘΟΡΥΒΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	17
ΣΧΗΜΑ 6: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΜΠΟΥ.....	19
ΣΧΗΜΑ 7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΚΤΗ.....	21
ΣΧΗΜΑ 8: ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΚΤΗ.....	22
ΣΧΗΜΑ 9: ΡΑΔΙΟΔΙΑΤΟΜΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΣΤΟΧΩΝ.....	23
ΣΧΗΜΑ 10: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ.....	27
ΣΧΗΜΑ 11: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ.....	27
ΣΧΗΜΑ 12: ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ.....	33
ΣΧΗΜΑ 13: ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ ΚΕΡΑΙΑ.....	34
ΣΧΗΜΑ 14: ΒΑΣΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ SAR.....	35
ΣΧΗΜΑ 15: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΡΑΝΤΑΡ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ.....	36
ΣΧΗΜΑ 16: ΈΡΕΥΝΑ ΛΩΡΙΔΑΣ (STRIP).....	37
ΣΧΗΜΑ 17: ΈΡΕΥΝΑ ΣΑΡΩΣΗΣ ΔΈΣΜΗΣ DOPPLER (DOPPLER BEAM SHARPENING).....	37
ΣΧΗΜΑ 18: ΈΡΕΥΝΑ ΦΩΤΟΔΕΣΜΗΣ (SPOTLIGHT).....	38
ΣΧΗΜΑ 19: ΈΡΕΥΝΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANSAR).....	39
ΣΧΗΜΑ 20: ΔΟΜΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ.....	40
ΣΧΗΜΑ 21: ΦΑΣΜΑ DOPPLER ΣΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΟΠΤΕΥΣΗΣ.....	41
ΣΧΗΜΑ 22: ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΥ/ΣΥΜΦΩΝΟΥ ΡΑΝΤΑΡ.....	42
ΣΧΗΜΑ 23: ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ DOPPLER ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΤΟ ΈΔΑΦΟΣ.....	43
ΣΧΗΜΑ 24: ΕΥΡΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟΧΟΥ.....	43
ΣΧΗΜΑ 25: ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ DOPPLER.....	44
ΣΧΗΜΑ 26: ΠΑΛΜΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ FM.....	45
ΣΧΗΜΑ 27: ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΥΓΚΡΙΤΗΣ.....	46
ΣΧΗΜΑ 28: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΥΓΚΡΙΤΗΣ.....	46
ΣΧΗΜΑ 29: ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΕΣ.....	47
ΣΧΗΜΑ 30: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ.....	47
ΣΧΗΜΑ 31: ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΔΙΟΠΤΕΥΣΗ.....	49
ΣΧΗΜΑ 32: ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΔΙΟΠΤΕΥΣΗ ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΟΥ ΡΠΣ.....	50
ΣΧΗΜΑ 33: ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΔΙΟΠΤΕΥΣΗ ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΟΥ ΡΠΣ.....	51
ΣΧΗΜΑ 34: ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΕΡΑΙΑΣ.....	52
ΣΧΗΜΑ 35: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ISAR.....	57
ΣΧΗΜΑ 36: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ISAR.....	58
ΣΧΗΜΑ 37: ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ISAR.....	59
ΣΧΗΜΑ 38: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ Ν-ΡΙΠΩΝ, Μ-ΒΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΛΜΩΝ.....	60
ΣΧΗΜΑ 39: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΕΙΔΩΛΟΥ ISAR.....	62
ΣΧΗΜΑ 40: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΕΚΤΗ ISAR.....	64
ΣΧΗΜΑ 41: ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΜΗ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΟΧΟΥ.....	70
ΣΧΗΜΑ 42: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	71
ΣΧΗΜΑ 43: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	73
ΣΧΗΜΑ 44: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΗ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	74
ΣΧΗΜΑ 45: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΟΧΟΥ ΚΑΙ ΠΛΗΘΟΣ ΣΚΕΔΑΣΤΩΝ.....	74
ΣΧΗΜΑ 46: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΣΤΟΧΟΥ.....	75
ΣΧΗΜΑ 47: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟΧΟΥ ΜΕ ΓΩΝΙΑΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ.....	77
ΣΧΗΜΑ 48: ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ CRI ΚΑΙ SNR.....	77

ΣΧΗΜΑ 49: ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ	78
ΣΧΗΜΑ 50: ΑΝΑΔΟΜΗΜΕΝΟ ΕΙΔΩΛΟ ISAR 4ΟΥ CPI	79
ΣΧΗΜΑ 51: ΑΝΑΔΟΜΗΜΕΝΟ ΕΙΔΩΛΟ ISAR 8ΟΥ CPI	80