



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας
και Τεχνολογίας Υλικών

Συστήματα ραντάρ τύπου αντίστροφου συνθετικού
ανοίγματος (ISAR) : Μέθοδοι Βελτιστοποίησης εικόνας ISAR

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ Δ. ΚΑΛΛΙΤΣΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού
Υπολογιστών Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Π. Φράγκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας
και Τεχνολογίας Υλικών

Συστήματα ραντάρ τύπου αντίστροφου συνθετικού
ανοίγματος (ISAR) : Μέθοδοι Βελτιστοποίησης εικόνας ISAR

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ Δ. ΚΑΛΛΙΤΣΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού
Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Συμβουλευτική Επιτροπή: Π. Φράγκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π (επιβλέπων)
Φ. Κωνσταντίνου, Καθηγητής Ε.Μ.Π
Β. Καραθανάση, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Ιουλίου 2013.

Π. Φράγκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Μ.Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σ. Κόλλιας
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Β.Καραθανάση
Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Γ. Φικιώρης
Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθ. Παναγόπουλος Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....
Ευάγγελος Δ. Καλλίτσης

Διδάκτωρ Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευάγγελος Δ. Καλλίτσης, 2013.

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.

Αφιερώνεται

*στην σύζυγό μου Φιλαρέτη,
στις κόρες μου Ελένη και
Επιστήμη, καθώς και στον
φίλο μου Τάσο.*

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη των συστημάτων ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR, Inverse Synthetic Aperture Radar), καθώς και η ανάπτυξη καινοτόμων αλγορίθμων απεικόνισης στόχων ραντάρ. Η σπουδαιότερη καινοτομία της διατριβής αυτής είναι ο προτεινόμενος πλήρης αυτοματοποιημένος αλγόριθμος αυτοεστίασης για την μετεπεξεργασμένη εικόνα του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR) που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας, καθώς και η μέθοδος που αφορά την ακριβή ευθυγράμμιση της απόστασης για την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση με εφαρμογή στο ραντάρ ISAR (τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο). Στην παρούσα έρευνα συγκριτικά με αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες, ο μεν προτεινόμενος αλγόριθμος για την αυτοεστίαση της εικόνας ISAR είναι ευριστικός και βασίζεται στον διαχωρισμό του συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI) σε βαθμίδες, η δε μέθοδος της ευθυγράμμισης της απόστασης που βασίζεται στην τεχνική της υπεραναλυμένης φασματικής εκτίμησης με υποδιπλασιασμό (Super-resolution DESED-decimative Spectrum Estimation) χρησιμοποιεί έναντι των κλασικών μεθόδων ευθυγράμμισης της απόστασης, την τεχνική της κλασματικής διόρθωσης του κελιού απόστασης (fractional range bin correction) ανά σκεδαστή. Για την εγκυρότητα και αποδοτικότητα των μεθόδων που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή περιλαμβάνονται ακριβείς μαθηματικές αναλύσεις καθώς και τα αποτελέσματα προσομοίωσης με συνθετικά δεδομένα ISAR κάτω από ρεαλιστικά σενάρια για την ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση.

Λέξεις – κλειδιά: ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, απεικόνιση στόχου ραντάρ, αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης, αντιστάθμιση μετατοπιστικής κίνησης, ευθυγράμμιση κελιού απόστασης, μέθοδος DESED, αλγόριθμος αυτοεστίασης

Abstract

This dissertation focuses on the study of inverse synthetic aperture radar systems (ISAR) and, in particular, the development of innovative algorithms for ISAR imaging of radar targets. The most important innovations of this thesis are : first, a fully automatic autofocusing algorithm for post-processing ISAR imaging based on image entropy minimization and, second, the fine range alignment method for slant range rotational compensation with application to ISAR imaging. In the present study compared with corresponding published works, the proposed autofocusing algorithm of ISAR imaging is heuristic based on CPI split with a number of stages, while the method of range alignment based on super-resolution decimative spectrum estimation technique uses the fractional range bin correction technique per scatterer instead of classical range alignment methods. The validity and efficiency of the methods which are developed in this thesis include precise mathematical analysis and simulation results with synthetic ISAR data under realistic scenarios for both uniform and nonuniform rotational motion.

Index terms: inverse synthetic aperture radar, radar target imaging, rotational motion compensation, translational motion compensation, range bin alignment, DESED method, autofocusing algorithm

Ευχαριστίες

Πολλοί είναι οι άνθρωποι, ακαδημαϊκοί και μη, που θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συνεισφορά τους στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Πρώτον από όλους, τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Παναγιώτη Φράγκο του οποίου η καθοδήγηση και συνεχής παρότρυνση για επιστημονική έρευνα σε βάθος υπήρξε θεμελιώδης. Από το 2006 που ξεκινήσαμε να ασχολούμαστε με το αντικείμενο του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, η συνδρομή του στη διάνοιξη των επιστημονικών μου οριζόντων ήταν καταλυτική, τόσο με τη συμμετοχή μας σε συνέδρια υψηλού επιπέδου, όσο και με τη συνεργασία μας με πεπειραμένους καθηγητές του εξωτερικού. Εύχομαι στο μέλλον να διατηρήσουμε τόσο την ακαδημαϊκή μας συνεργασία όσο και τη φιλική μας σχέση.

Για την επιστημονική μας συνεργασία και τις κοινές μας δημοσιεύσεις θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα του Ε.Μ.Π. και φίλο μου κ. Αναστάσιο Καρακασιλιότη, του οποίου η συνεισφορά του στη συγγραφή της βασικής δημοσίευσης υπήρξε πολύτιμη και οδηγός για τις μελλοντικές μου προσπάθειες.

Για τις επιστημονικές και προσωπικές συμβουλές του θέλω επίσης να ευχαριστήσω το συνάδελφο και φίλο μου κ. Γεώργιο Μπουλταδάκη.

Τέλος, την αγάπη μου και την ευγνωμοσύνη μου θέλω να εκφράσω στην οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε κάθε βήμα της διδακτορικής μου έρευνας.

Περιεχόμενα

Εισαγωγικό σημείωμα 1

Δημοσιεύσεις του Υποψήφιου Διδάκτορα Ε. Καλλίτση	2
Περιοδικά	2
Συνέδρια	2

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγικά στοιχεία για το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος 5

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή	7
1.2 Εισαγωγικά στα συστήματα ραντάρ.....	8
1.3 Το παλμικό ραντάρ	9
1.4 Κυματομορφές ραντάρ.....	11
1.5 Βασικές έννοιες επεξεργασίας σήματος ραντάρ	14
1.5.1 Διαχωριστική ικανότητα στόχων ραντάρ	15
1.5.2 Χωρική συχνότητα	17
1.5.3 Μετασχηματισμοί Fourier.....	17
1.6 Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης.....	18
1.7 Μονοδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος	22
1.8 Δισδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος	25
1.8.1 Εκπομπή και λήψη σήματος	25
1.8.2 Διαχωριστική ακρίβεια ISAR	28
1.8.3 Επεξεργασία βηματικής συχνότητας.....	29
1.9 Δομή διδακτορικής διατριβής	32
1.10 Βιβλιογραφικές αναφορές	38

Κεφάλαιο 2

ΚΛΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΑΝΤΑΡ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ..... 41

2.1 Εισαγωγή στην αντιστάθμιση κίνησης	42
2.2 Μαθηματική ανάλυση της αντιστάθμισης κίνησης σε δισδιάστατη απεικόνιση ISAR	43
2.3 Κλασικός τρόπος αντιστάθμισης κίνησης	50
2.4 Αλγόριθμοι αντιστάθμισης.....	52

2.5	Μελέτη της μετατοπιστικής κίνησης για ISAR	56
2.5.1	Εισαγωγή	56
2.5.2	Αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης	57
2.6	Αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης	62
2.6.1	Σκεδαστής περιστρεφόμενου στόχου	62
2.6.2	Ακτίνα θόλωσης (Blur Radius) – Πολική επαναμορφοποίηση (Polar Reformatting)	65
2.6.3	Ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση στόχου (Uniform Rotational Motion)	69
2.6.4	Μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση στόχου (Non Uniform Rotational Motion)	70
2.6.4.1	Εισαγωγή	70
2.6.4.2	Μαθηματικό ανάλυση της μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης	71
2.7	Βιβλιογραφικές αναφορές	77

Κεφάλαιο 3

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΥΤΟΕΣΤΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΤΟΕΣΤΙΑΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ISAR ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ.. 81

3.1	Αυτοεστίαση εικόνας ISAR	82
3.1.1	Εισαγωγή	82
3.1.2	Τεχνικές αυτοεστίασης	82
3.1.2.1	Αυτοεστίαση με ICBA	82
3.1.2.2	Αυτοεστίαση με ελαχιστοποίηση εντροπίας (Minimum Entropy Autofocusing, MEA)	87
3.2	Μη παραμετρικές τεχνικές αυτοεστίασης	88
3.2.1	Επικρατέστερο σημείο επεξεργασίας (Point Prominent Processing, PPP)	88
3.2.2	Αλγόριθμος κλίσης φάσης (PGA)	90
3.3	Εντροπία εικόνας - ορισμός της εντροπίας	91
3.4	Ενδείκτες εστιακής ποιότητας	94
3.5	Συγκρίσεις	96
3.6	Προτεινόμενος αλγόριθμος αυτόματης αυτοεστίασης δισδιάστατου στόχου ISAR	96
3.6.1	Εισαγωγή	96
3.6.2	Μεθοδολογία του αλγορίθμου	99
3.7	Προσδιορισμός των κατωφλίων εντροπίας	102
3.8	Αριθμητικά αποτελέσματα	107
3.9	Περαιτέρω προσομοιώσεις	116
3.9.1	Εισαγωγή	116
3.9.2	Mirage 2000, περίπτωση 1	117
3.9.3	Mirage 2000, περίπτωση 2	127
3.9.4	Mirage 2000, περίπτωση 3	136

3.9.5 Προσομοίωση με Boeing 727	146
3.9.5.1 Εισαγωγή	146
3.9.5.2 Boeing 727, περίπτωση 1	151
3.9.5.3 Boeing 727, περίπτωση 2	161
3.9.5.4 Boeing 727, περίπτωση 3	171
3.10 Συμπεράσματα.....	182
3.11 Βιβλιογραφικές αναφορές	184

Κεφάλαιο 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (DEcimative Spectrum Estimation by factor D / ΜΕΘΟΔΟΣ DESED) ΣΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ SRRC (SLANT RANGE ROTATIONAL COMPENSATION)..... 187

4.1 Μονοδιάστατη εκτίμηση παραμέτρων ραντάρ με χρήση μεθόδων υψηλής φασματικής ανάλυσης.....	189
4.1.1 Εισαγωγή	189
4.2 Μέθοδος DESED (DEcimative Spectrum Estimation by factor D)	191
4.2.1 Μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου DESED.....	192
4.3 Καινοτόμος μέθοδος ακριβούς ευθυγράμμισης απόστασης (μέθοδος SRRC-Slant Range Rotational Compensation)	195
4.3.1 Περίληψη.....	195
4.3.2 Εισαγωγή	195
4.3.3 Μαθηματική περιγραφή.....	198
4.3.4 Προτεινόμενη μέθοδος ευθυγράμμισης απόστασης	201
4.3.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης	206
4.3.6 Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου (DESED) με άλλες μεθόδους.....	215
4.3.6.1 1 ^η Περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή -1)	215
4.3.6.2 1 ^η Περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή - 2)	222
4.3.6.2 2 ^η Περίπτωση προσομοίωσης (σχόλιο)	229
4.3.7 Συμπεράσματα.....	230
4.4 Βιβλιογραφικές αναφορές	231

Κεφάλαιο 5

Επίλογος 233

5.1 Συμπεράσματα - μελλοντικές κατευθύνσεις	235
5.2 Βιβλιογραφικές αναφορές	236

Γλωσσάριο

Αγγλο-ελληνικοί τεχνικοί όροι ραντάρ..... 237

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1. Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ.....	9
Σχήμα 1-2. Διάγραμμα λειτουργίας μονοστατικού παλμικού ραντάρ.....	10
Σχήμα 1-3. Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας με ανοδική κλίση.....	12
Σχήμα 1-4. Φάσμα της κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας.....	13
Σχήμα 1-5. Διαμόρφωση βηματικής συχνότητας.....	14
Σχήμα 1-6. Γεωμετρία περιγραφής ανάλυσης απόστασης παλμού	15
Σχήμα 1-7. Γεωμετρία περιγραφής γωνιακής ανάλυσης	16
Σχήμα 1-8. Περιγραφή χωρικής συχνότητας.....	17
Σχήμα 1-9. Ισοδυναμία ραντάρ τύπου SAR και ISAR	20
Σχήμα 1-10. Στοιχειώδη Γεωμετρία ISAR	20
Σχήμα 1-11. Παράδειγμα προφίλ απόστασης.....	24
Σχήμα 1-12. Επικάλυψη σκεδαστών στόχου ανάλογα με το διάστημα αναμφιβόλου αποστάσης.....	25
Σχήμα 1-13. Κυματομορφή N-ριπών, M-βηματικής Συχνότητας Παλμών	26
Σχήμα 1-14. Ανάλυση Συνθετικού Ειδώλου ISAR.....	29
Σχήμα 1-15. Διάγραμμα περιγραφής της δισδιάστατης απεικόνισης ISAR	31
Σχήμα 2-1. Γεωμετρία απεικόνισης ραντάρ ενός στόχου	44
Σχήμα 2-2. Στόχος με γενική κίνηση	47
Σχήμα 2-3. Διάγραμμα κανονικής αντιστάθμισης κίνησης.....	52
Σχήμα 2-4. Σύνθετη κίνηση στόχου ISAR ως συνδυασμός μετατοπιστικών και περιστροφικών κινήσεων σε σχέση με το ραντάρ.....	53
Σχήμα 2-5. Απόκλιση κελιών απόστασης λόγω μετατοπιστικής κίνησης στόχου	60
Σχήμα 2-6. Αντιστάθμιση μεταφορικής κίνησης τριών σημειακών στόχων	61
Σχήμα 2-7. Σκεδαστής περιστρεφόμενου στόχου	63
Σχήμα 2-8. Ακτίνα θόλωσης.....	66
Σχήμα 2-9. Σύστημα συντεταγμένων λήψης δεδομένων ανάκλασης	67
Σχήμα 2-10. Επίδραση της συχνότητας στην εστίαση της εικόνας του στόχου	68
Σχήμα 2-11. Πολική επαναδιαμόρφωση – βήμα 1	69
Σχήμα 2-12. Πολική επαναδιαμόρφωση – βήμα 2	69
Σχήμα 2-13. Πολική επαναδιαμόρφωση – βήμα 3	69
Σχήμα 2-14. Κατανομή χρόνου συχνότητας των σκεδαστών κίνησης.....	73
Σχήμα 2-15. Μετασχηματισμός WVD πραγματικών δεδομένων ραντάρ (πλάνο	75
Σχήμα 3-1. Διάγραμμα αλγορίθμου ICBA	86
Σχήμα 3-2. Διάγραμμα αλγορίθμου PPP.....	90
Σχήμα 3-3. Διάγραμμα αλγορίθμου PGA	91
Σχήμα 3-4. Μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση στόχου	99
Σχήμα 3-5. Μεθοδολογία προτεινόμενου αλγόριθμου.....	99
Σχήμα 3-6. Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας ομοιόμορφης κίνησης	106
Σχήμα 3-7. Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας μη ομοιόμορφης κίνησης ..	107
Σχήμα 3-8. Γεωμετρία προσομοιωμένου στόχου Mirage 2000 C.....	108
Σχήμα 3-9. Απεικόνιση πραγματικού στόχου	108

Σχήμα 3-10. Προσομοίωση στόχου με γωνιακή επιτάχυνση (περιοχή 4 ^{ου} CPI)	110
Σχήμα 3-11. Εντροπία σε σχέση με τον δείκτη CPI και το SNR	111
Σχήμα 3-12. Μεταβολή της εντροπίας σε σχέση με την γωνιακή επιτάχυνση	112
Σχήμα 3-13. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες Νο1	115
Σχήμα 3-14. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες Νο2	115
Σχήμα 3-15. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-1	118
Σχήμα 3-16. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-2	119
Σχήμα 3-17. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-3	120
Σχήμα 3-18. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-4	121
Σχήμα 3-19. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-5	122
Σχήμα 3-20. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-6	123
Σχήμα 3-21. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-7	124
Σχήμα 3-22. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-8	125
Σχήμα 3-23. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-9	126
Σχήμα 3-24. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-10	128
Σχήμα 3-25. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-11	129
Σχήμα 3-26. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-12	130
Σχήμα 3-27. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-13	131
Σχήμα 3-28. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-14	132
Σχήμα 3-29. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-15	133
Σχήμα 3-30. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-16	134
Σχήμα 3-31. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-17	135
Σχήμα 3-32. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-18	136
Σχήμα 3-33. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-19	138
Σχήμα 3-34. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-20	139
Σχήμα 3-35. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-21	140
Σχήμα 3-36. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-22	141
Σχήμα 3-37. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-23	142
Σχήμα 3-38. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-24	143
Σχήμα 3-39. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-25	144
Σχήμα 3-40. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-26	145
Σχήμα 3-41. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-27	146
Σχήμα 3-42. Γεωμετρία προσομοιωμένου στόχου Boeing 727	148
Σχήμα 3-43. Απεικόνιση πραγματικού στόχου	149
Σχήμα 3-44. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-28	153
Σχήμα 3-45. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-29	154
Σχήμα 3-46. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-30	155
Σχήμα 3-47. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-31	156
Σχήμα 3-48. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-32	157
Σχήμα 3-49. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-33	158
Σχήμα 3-50. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-34	159
Σχήμα 3-51. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-35	160
Σχήμα 3-52. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-36	161
Σχήμα 3-53. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-37	163
Σχήμα 3-54. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-38	164
Σχήμα 3-55. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-39	165
Σχήμα 3-56. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-40	166
Σχήμα 3-57. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-41	167

Σχήμα 3-58. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-42.....	168
Σχήμα 3-59. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-43.....	169
Σχήμα 3-60. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-44.....	170
Σχήμα 3-61. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-45.....	171
Σχήμα 3-62. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-46.....	173
Σχήμα 3-63. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-47.....	174
Σχήμα 3-64. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-48.....	175
Σχήμα 3-65. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-49.....	176
Σχήμα 3-66. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-50.....	177
Σχήμα 3-67. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-51.....	178
Σχήμα 3-68. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-52.....	179
Σχήμα 3-69. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-53.....	180
Σχήμα 3-70. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-54.....	181
Σχήμα 4-1. Σενάριο με περιστρεφόμενο σκεδαστή	198
Σχήμα 4-2. Μετατόπιση απόστασης στην οριζόντια απόσταση που επιφέρεται	201
Σχήμα 4-3. Διάγραμμα αλγορίθμου SRRC.....	206
Σχήμα 4-4. Απλή γεωμετρία στόχου με πέντε σκεδαστές	209
Σχήμα 4-5. Προφίλ ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης.....	209
Σχήμα 4-6. Προφίλ μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης.....	210
Σχήμα 4-7. Κανονικοποιημένη μετακίνηση απόστασης του κάθε σκεδαστή	211
Σχήμα 4-8. Κανονικοποιημένη μετακίνηση απόστασης του κάθε σκεδαστή	211
Σχήμα 4-9. Ιστορία του προφίλ απόστασης πριν (α) και μετά (β) την	212
Σχήμα 4-10. Ιστορία του προφίλ απόστασης πριν (α) και μετά (β) την	212
Σχήμα 4-11. Εικόνες ISAR πριν (α) και μετά (β) την προτεινόμενη μέθοδο .	213
Σχήμα 4-12 . Εικόνες ISAR πριν (α) και μετά (β) την προτεινόμενη μέθοδο	213
Σχήμα 4-13. Εντροπία εικόνας ISAR πριν και μετά την προτεινόμενη μέθοδο	214
Σχήμα 4-14. Εντροπία εικόνας ISAR πριν και μετά την προτεινόμενη μέθοδο	214
Σχήμα 4-15. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1.....	216
Σχήμα 4-16. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1 (μεγέθυνση στο Σχήμα 4-15)	217
Σχήμα 4-17. Ιστορία της εκτιμώμενης ολίσθησης απόστασης με ετεροσυσχέτιση για το CPI-1.....	218
Σχήμα 4-18. Εικόνα ISAR (CPI – 4) μη ευθυγραμμισμένης απόστασης	219
Σχήμα 4-19. Εικόνα ISAR (CPI – 4) ευθυγραμμισμένης απόστασης με ετεροσυσχέτιση.....	219
Σχήμα 4-20. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης	220
Σχήμα 4-21. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης με ετεροσυσχέτιση.....	220
Σχήμα 4-22. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4)	221
Σχήμα 4-23. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4) με ετεροσυσχέτιση.....	221
Σχήμα 4-24. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1.....	223
Σχήμα 4-25. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1 (μεγέθυνση στο Σχήμα 4-24)	224

Σχήμα 4-26. Ιστορία της εκτιμώμενης ολίσθησης απόστασης με ετεροσυσχέτιση για το CPI-1.....	225
Σχήμα 4-27. Εικόνα ISAR (CPI – 4) μη ευθυγραμμισμένης απόστασης	226
Σχήμα 4-28. Εικόνα ISAR (CPI – 4) ευθυγραμμισμένης απόστασης με ετεροσυσχέτιση.....	226
Σχήμα 4-29. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης	227
Σχήμα 4-30. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης με ετεροσυσχέτιση.....	227
Σχήμα 4-31. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4)	228
Σχήμα 4-32. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4) με ετεροσυσχέτιση.....	228

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ.....	9
Πίνακας 3-1. Τιμές μέγιστης εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	103
Πίνακας 3-2. Τιμές ελάχιστης εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	103
Πίνακας 3-3. Τιμές τυπικής απόκλισης εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	104
Πίνακας 3-4. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	104
Πίνακας 3-5. Τιμές max of max, min of min και minmax difference.....	104
Πίνακας 3-6. Τιμές max mean difference=upper deviation.....	105
Πίνακας 3-7. Τιμές mean upper deviation, mean std και upper ratio factor..	105
Πίνακας 3-8. Τιμές mean min difference=low deviation	105
Πίνακας 3-9. Τιμές mean low deviation και low ratio factor	106
Πίνακας 3-10. Παράμετροι προσομοίωσης ραντάρ ISAR	109
Πίνακας 3-11. Όρια και κατώφλι εντροπίας.....	113
Πίνακας 3-12. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR N01- N02	114
Πίνακας 3-13. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	117
Πίνακας 3-14. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	117
Πίνακας 3-15. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	117
Πίνακας 3-16. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	117
Πίνακας 3-17. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR	117
Πίνακας 3-18. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-1	118
Πίνακας 3-19. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-2	119
Πίνακας 3-20. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-3	120
Πίνακας 3-21. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-4	121
Πίνακας 3-22. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-5	122
Πίνακας 3-23. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-6	123
Πίνακας 3-24. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-7	124
Πίνακας 3-25. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-8	125
Πίνακας 3-26. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-9	126
Πίνακας 3-27. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	127
Πίνακας 3-28. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	127
Πίνακας 3-29. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	127

Πίνακας 3-30. Τυπική απόκλιση για διάφορες τιμές του SNR	127
Πίνακας 3-31. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR	127
Πίνακας 3-32. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-10 ..	128
Πίνακας 3-33. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-11 ..	129
Πίνακας 3-34. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-12 ..	130
Πίνακας 3-35. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-13 ..	131
Πίνακας 3-36. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-14 ..	132
Πίνακας 3-37. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-15 ..	133
Πίνακας 3-38. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-16 ..	134
Πίνακας 3-39. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-17 ..	135
Πίνακας 3-40. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-18 ..	136
Πίνακας 3-41. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	137
Πίνακας 3-42. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	137
Πίνακας 3-43. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	137
Πίνακας 3-44. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	137
Πίνακας 3-45. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR	137
Πίνακας 3-46. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-19 ..	138
Πίνακας 3-47. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-20 ..	139
Πίνακας 3-48. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-21 ..	140
Πίνακας 3-49. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-22 ..	141
Πίνακας 3-50. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-23 ..	142
Πίνακας 3-51. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-24 ..	143
Πίνακας 3-52. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-25 ..	144
Πίνακας 3-53. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-26 ..	145
Πίνακας 3-54. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-27 ..	146
Πίνακας 3-55. Παρουσίαση της θέσης των 52 σκεδαστών στον χώρο.....	150
Πίνακας 3-56. Παράμετροι προσομοίωσης ραντάρ ISAR	151
Πίνακας 3-57. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	151
Πίνακας 3-58. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	151
Πίνακας 3-59. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	151
Πίνακας 3-60. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	152
Πίνακας 3-61. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR	152
Πίνακας 3-62. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-28 ..	153
Πίνακας 3-63. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-29 ..	154
Πίνακας 3-64. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-30 ..	155
Πίνακας 3-65. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-31 ..	156
Πίνακας 3-66. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-32 ..	157
Πίνακας 3-67. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-33 ..	158
Πίνακας 3-68. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-34 ..	159
Πίνακας 3-69. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-35 ..	160
Πίνακας 3-70. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-36 ..	161
Πίνακας 3-71. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	162
Πίνακας 3-72. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	162
Πίνακας 3-73. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	162
Πίνακας 3-74. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	162
Πίνακας 3-75. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR	162

Πίνακας 3- 76. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-37 ..	163
Πίνακας 3-77. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-38 ..	164
Πίνακας 3-78. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-39 ..	165
Πίνακας 3-79. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-40 ..	166
Πίνακας 3-80. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-41 ..	167
Πίνακας 3-81. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-42 ..	168
Πίνακας 3-82. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-43 ..	169
Πίνακας 3-83. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-44 ..	170
Πίνακας 3-84. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-45 ..	171
Πίνακας 3-85. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	171
Πίνακας 3-86. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR	172
Πίνακας 3-87. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	172
Πίνακας 3-88. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR.....	172
Πίνακας 3-89. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR	172
Πίνακας 3-90. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-46 ..	173
Πίνακας 3-91. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-47 ..	174
Πίνακας 3-92. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-48 ..	175
Πίνακας 3-93. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-49 ..	176
Πίνακας 3-94. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-50 ..	177
Πίνακας 3-95. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-51 ..	178
Πίνακας 3-96. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-52 ..	179
Πίνακας 3-97. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-53 ..	180
Πίνακας 3-98. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-54 ..	181
Πίνακας 4-1. Παράμετροι προσομοίωσης ISAR.....	208
Πίνακας 4-2. Κατώφλι εντροπίας για Raw Ovs και Xcorr	222
Πίνακας 4-3. Κατώφλι εντροπίας για Raw Ovs και Xcorr	229

Εισαγωγικό σημείωμα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή βασίζεται στην έρευνα που διεξήχθη από τον υποφαινόμενο στην ερευνητική περιοχή της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος ραντάρ για την βελτιστοποίηση εικόνας σε ραντάρ τύπου ISAR. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας (Δεκέμβριος 2006 – Απρίλιος 2012) παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3-4, έπειτα από ένα εισαγωγικό κεφάλαιο για τα συστήματα ραντάρ και τη συνθετική απεικόνιση στόχου ραντάρ. Στο τελευταίο κεφάλαιο-5 που αποτελεί τον επίλογο, παραθέτουμε τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας μας.

Οι βιβλιογραφικές αναφορές που δίδονται κατωτέρω (επιστημονικές εργασίες του συγγραφέα) αφορούν δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, κατά χρονολογική σειρά. Η πρώτη δημοσίευση της παρούσας διατριβής [1] παρουσιάζει λεπτομερώς τον προτεινόμενο αλγόριθμο πλήρους αυτοματοποιημένης αυτοεστίασης για την μετεπεξεργασμένη εικόνα του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR) που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας. Τα αποτελέσματα της δημοσίευσης αυτής και η δομή του προγράμματος προσομοίωσης αναλύονται στο τρίτο κεφάλαιο. Στις δημοσιεύσεις [2,10] παρουσιάζεται το πρόβλημα της ακριβούς ευθυγράμμισης της απόστασης για την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση με εφαρμογή στο ραντάρ ISAR, το οποίο αναπτύσσεται στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Τέλος, οι δημοσιεύσεις [3,4,5,6,7,8,9,11,12,13,14,15,16] παρατίθενται κατωτέρω για λόγους πληρότητας, καθώς η συμμετοχή μου σε ορισμένες από αυτές υπήρξε σημαντική.

Δημοσιεύσεις του Υποψήφιου Διδάκτορα Ε. Καλλίτση

Περιοδικά

- [1] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, G. E. Boultadakis, and P. V. Frangos, “A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, T121 Signal Technology, No. 4 (110), April 2011, pp.125-130.
- [2] **E. D Kallitsis**, A. V Karakasiliotis and P. V. Frangos, “Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging: A Novel Fine Range Profile Alignment Method for Air-Target Slant Range Rotational Motion Compensation”, *Journal of Applied Electromagnetism* (accepted for publication).
- [3] A. Malamou, A. Karakasiliotis, **E. Kallitsis** and P. Frangos, “An Autofocusing Algorithm for Post – processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) images based on Image Entropy Minimization”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, T121 Signal Technology (accepted for publication).

Συνέδρια

- [4] **E. Kallitsis**, G. Boultadakis, A. Karakasiliotis, I. Tseremoglou, E. Stergiannis, H. Hristakis, E. Grigoratou, A. Vagianou and P. Frangos, “An Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, 5th International Conference on Communications, Electromagnetics, and Medical Applications (CEMA10), National Technical University of Athens (NTUA), Athens, Greece, 7-9/10/2010.
- [5] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, G. E. Boultadakis, and P. V. Frangos, “A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, SET 160 Symposium on NCI / ATR in Air-Ground and Maritime Applications based on Radar and Acoustics, Athens, Greece, 11-12/10/2010 (presentation and corresponding paper in the Proceedings).

- [6] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, G. E. Boultradakis, and P. V. Frangos, “A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, presentation at the National Eurasian University, Astana, Kazakshtan, March 1, 2011.
- [7] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, G. E. Boultradakis, and P. V. Frangos, “A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, presentation at National Military University, V. Turnovo, Bulgaria, and University of V. Turnovo, Bulgaria, 25 – 30/3/2011.
- [8] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, G. E. Boultradakis, and P. V. Frangos, “A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, 15th International Conference on Electronics 2011, Kaunas Technical University, Kaunas, Lithuania, 17 – 19/5/2011.
- [9] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, and P. V. Frangos, “An Autofocusing Post-Processing Algorithm for ISAR Image Optimization”, 4th SET 163 Meeting, Dayton, Ohio, USA, 26 – 28 September 2011.
- [10] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, and P. V. Frangos, “Combination of range alignment technique with autofocusing post-processing algorithm for ISAR image optimization”, 6th International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA11), Sofia, Boulgaria, 6-8/10/2011.
- [11] **E. D. Kallitsis**, A. V. Karakasiliotis, and P. V. Frangos, “An Autofocusing Post-Processing Algorithm for ISAR Image Optimization”, Erasmus visit to the University of V. Turnovo, Bulgaria, 23 – 28/4/2012.
- [12] A. Malamou, A. Karakasiliotis, **E. Kallitsis** and P. Frangos, “An Autofocusing Post-Processing Algorithm for SAR Image Optimization”, SET 163 Working Group on SAR systems, Kavouri Attikis, Athens, Greece, 28 – 30/5/2012.
- [13] A. Malamou, A. Karakasiliotis, **E. Kallitsis**, G. Boultradakis and P. Frangos, “An autofocusing algorithm for post – processing of synthetic aperture radar (SAR) images based on image entropy minimization”, SET 163 Working Group on SAR systems, DLR, Munich, 15 – 18/10/2012.
- [14] A. Malamou, A. Karakasiliotis, **E. Kallitsis**, G. Boultradakis and P. Frangos, “An autofocusing algorithm for post – processing of Synthetic Aperture Radar (SAR)

Images based on Image Entropy Minimization”, 7th International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA’12), Athens, Greece, 8-10/11/2012.

- [15] A. Malamou, C. Pandis, P. Stefaneas, P. Frangos, A. Karakasiliotis and **E. Kallitsis**, “An autofocusing post – processing algorithm for ISAR and SAR Image Entropy Minimization – Modified – Fractal Signature (MFS) Method for a ISAR / SAR image classification” using fractal, 2nd International Conference on “Applications of Mathematics and Informatics in Military Science” (2nd AMIMS), Hellenic Military Academy, Vari Attikis, Athens, Greece, 11-12/4/2012.
- [16] A. Malamou, A. Karakasiliotis, **E. Kallitsis** and P. Frangos, “An autofocusing Post-Processing Algorithm For SAR Image Optimization based on Image Entropy Minimization’, SET 163 Working group, Ottawa, Canada, 24-26/4/2013.

Κεφάλαιο 1

***Εισαγωγικά στοιχεία για το ραντάρ
αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος***

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Τα ιστορικά στοιχεία για την ανακάλυψη των βασικών αρχών λειτουργίας του ραντάρ μας οδηγούν στις αρχές του περασμένου αιώνα όταν ο Γερμανός μηχανικός Hülsmeyer επιβεβαίωσε πειραματικά την ανίχνευση πλοίου μέσω της ανάκλασης ραδιοκυμάτων (1904). Οι βασικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης και ανάκλασης είχαν τεθεί στα τέλη του 19^{ου} αιώνα από τους Maxwell, Hertz και Tesla. Η ανιχνευτική συσκευή του Hülsmeyer είχε την δυνατότητα προειδοποίησης χωρίς εκτίμηση της απόστασης του πλοίου, και η ακτίνα ανίχνευσης ήταν πολύ μικρή (μέχρι 3Km). Το 1922, οι Taylor και Young του Ναυτικού Ερευνητικού Εργαστηρίου (NRL) των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής παρουσίασαν αντίστοιχα πειράματα ανίχνευσης πλοίων με στόχο την αποφυγή συγκρούσεων. Το 1930, ο Hyland (επίσης ερευνητής του NRL) πέτυχε την πειραματική ανίχνευση αεροσκάφους, ανακάλυψη που οδήγησε στη θεμελίωση του ραντάρ συνεχούς κύματος το 1934. Κατά τη πενταετία 1934-1939, πολλές χώρες ανέπτυξαν συστήματα ραντάρ με γοργούς ρυθμούς εν όψει του επικείμενου πολέμου (Ηνωμένες Πολιτείες, Μεγάλη Βρετανία, Γαλλία, Γερμανία, Ρωσία, Ιταλία, Ιαπωνία). Το Δεκέμβριο του 1934, ο Page μαζί με τους Taylor και Young ξεκίνησαν την προσπάθεια ανάπτυξης του πρώτου παλμικού ραντάρ, το οποίο λειτουργούσε σε αρκετά χαμηλές συχνότητες (28MHz) και μπορούσε να ανιχνεύσει αεροσκάφη σε απόσταση ενός μιλίου. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα με ακτίνα ανίχνευσης 25 μιλίων παρουσιάστηκε το 1936. Το 1939, οι Αμερικανοί ανέπτυξαν το σύστημα ραντάρ SCR-270 έγκαιρης αντιαεροπορικής προειδοποίησης. Τα ξημερώματα της 7^{ης} Δεκεμβρίου του 1941, το σύστημα SCR-270 ανίχνευσε Ιαπωνικό αεροσκάφος σε απόσταση 136 μιλίων, όμως η αμερικανική βάση του άση του Pearl Harbor αγνόησε την προειδοποίηση ταυτοποιώντας λανθασμένα το εχθρικό αεροσκάφος με αμερικάνικο βομβαρδιστικό. Η ανταλλαγή τεχνικών πληροφοριών για τα αναπτυσσόμενα συστήματα ραντάρ μεταξύ Μεγάλης Βρετανίας και Ηνωμένων Πολιτειών ξεκίνησε επίσημα το 1940. Μέχρι τότε, τα ραντάρ λειτουργούσαν σε σχετικά χαμηλές συχνότητες (μεγάλα μήκη κύματος). Η ανακάλυψη του κοίλου μάγνητρου από τους Βρετανούς για την εκπομπή μεγάλης μικροκυματικής

ισχύος υπήρξε πολύ σημαντική για την ανάπτυξη συστημάτων ραντάρ με μικροκυματικές συχνότητες λειτουργίας.

Η τεχνολογία ραντάρ αναπτύχθηκε ταχύτατα λόγω στρατιωτικών αναγκών και οι στρατιωτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν την παρακολούθηση, την πλοήγηση και την καθοδήγηση όπλων για επίγεια, θαλάσσια και εναέρια μέσα. Τη ραγδαία εξέλιξη του ραντάρ ως αμυντικό «όπλο» κατά τη διάρκεια του πολέμου ακολούθησαν πλήθος από καθημερινές εφαρμογές που σήμερα καθιστούν το ραντάρ αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Τα συστήματα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας στα αεροδρόμια, η αυτόματη πλοήγηση αεροσκαφών, η πλοήγηση πλοίων (αποφυγή συγκρούσεων), η πρόβλεψη του καιρού, η απεικόνιση της τοπολογίας του εδάφους και των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών μέσω δορυφορικών και αερομεταφερόμενων συστημάτων ραντάρ, είναι μερικές μόνο από τις σπουδαίες πρακτικές εφαρμογές του ραντάρ.

1.2 Εισαγωγικά στα συστήματα ραντάρ

Ο όρος «ραντάρ» καθιερώθηκε στη δεκαετία του '40 από τους ερευνητές του NRL, προέρχεται από το ακρωνύμιο RADAR (RAdio Detection And Ranging), και περιγράφει μία συσκευή εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς ένα συγκεκριμένο τμήμα του περιβάλλοντος χώρου, με στόχο την ανίχνευση στόχων και τη μέτρηση των χαρακτηριστικών τους στοιχείων (απόσταση, ταχύτητα, γωνιακή θέση, κτλ.) [1]. Τα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο διαμορφωμένες κυματομορφές και κατευθυντικές κεραίες. Οποιοσδήποτε στόχος στην περιοχή εμποπείας ενός ραντάρ ανακλά μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας που επιστρέφει στο δέκτη του ραντάρ (ηχώ). Ο δέκτης του ραντάρ εκτελεί μία σειρά από διαδικασίες αναλογικής και ψηφιακής επεξεργασίας του επιστρεφόμενου σήματος, για να εξάγει χρήσιμες πληροφορίες για το στόχο.

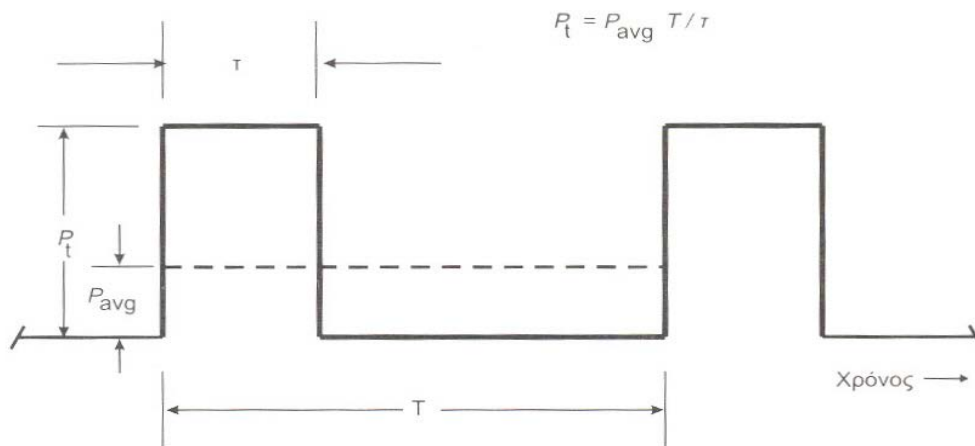
1.3 Το παλμικό ραντάρ

Η αρχή λειτουργίας του παλμικού ραντάρ βασίζεται στην εύρεση της θέσης ενός στόχου μέσω της εκπομπής και λήψης μίας σειράς παλμών μικρής χρονικής διάρκειας, ορθογώνιας μορφής περιβάλλουσας, με σύντομους χρόνους ανόδου και καθόδου και σταθερό πλάτος κατά τη διάρκειά τους [2].

Τα χαρακτηριστικά μέγεθθ του παλμικού ραντάρ συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα, και οι συσχετισμοί τους απεικονίζονται στο Σχήμα 1-1.

Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ

Μέγεθος	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης
φέρουσα συχνότητα	f_c	Hz
περίοδος επανάληψης παλμών	T	Sec
συχνότητα επανάληψης παλμών	$f_r = 1/T$	Hz
εύρος ή διάρκεια παλμού	τ	Sec
μέση εκπεμπόμενη ισχύς	P_{avg}	W
μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς	P_t	W
ενέργεια εκπεμπόμενου παλμού	$E = P_t \cdot \tau$	J

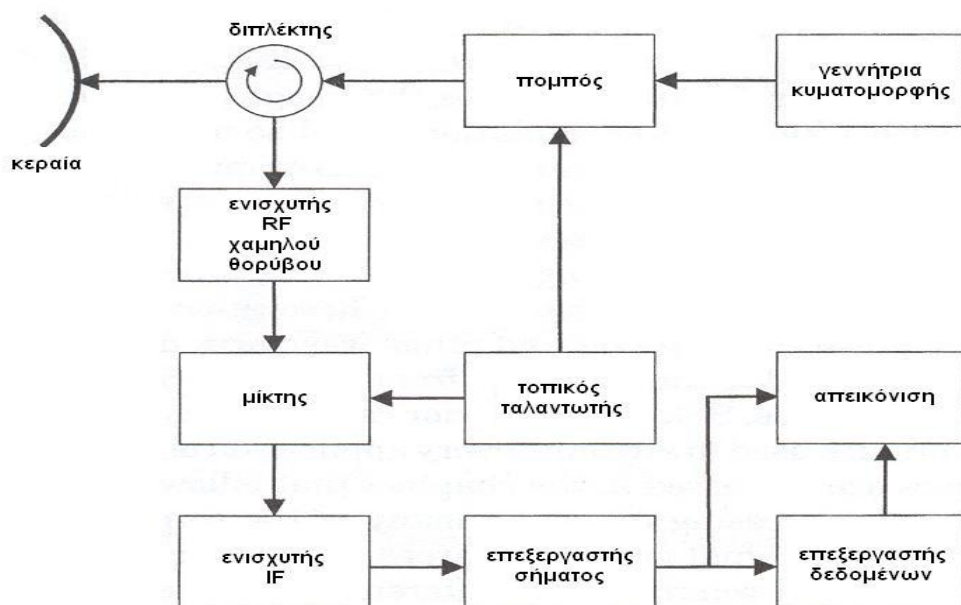


Σχήμα 1-1. Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ

Το διάγραμμα λειτουργίας του μονοστατικού παλμικού ραντάρ, στην πιο απλή του μορφή, απεικονίζεται στο Σχήμα 1-2. Υποθέτουμε ότι το υπό εξέταση σύστημα είναι μονοστατικό (συνήθης περίπτωση), δηλαδή ότι πομπός και δέκτης του συστήματος βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία. Κατά τη

διάρκεια της εκπομπής, η γεννήτρια κυματομορφής παράγει την επιθυμητή παλμοσειρά, και ο πομπός διαμορφώνει την κυματομορφή αυτή στην επιλεγμένη ραδιοσυχνότητα, ενισχύοντάς την στο κατάλληλο επίπεδο ισχύος.

Η έξοδος του πομπού οδηγείται στην κεραία μέσω του διπλέκτη (ή κυκλοφορητή). Κατά τη διάρκεια της λήψης, το επιστρεφόμενο σήμα από το στόχο οδηγείται μέσω του διπλέκτη στο δέκτη, ο οποίος είναι συνήθως υπερετερόδυνος. Το πρώτο στάδιο του δέκτη περιλαμβάνει έναν ενισχυτή ραδιοσυχνοτήτων χαμηλού θορύβου. Έπειτα ακολουθεί η μίξη του λαμβανόμενου σήματος με το σήμα αναφοράς του τοπικού ταλαντωτή στη συχνότητα εκπομπής, ώστε να αποδιαμορφωθεί σε κάποια ενδιάμεση συχνότητα και μετέπειτα στη βασική ζώνη. Ο επεξεργαστής σήματος λειτουργεί είτε στη βασική ζώνη είτε στην ενδιάμεση συχνότητα, ανάλογα με το σύστημα ραντάρ. Ορισμένες από τις διαδικασίες επεξεργασίας σήματος (συμπύεση παλμού, «πανομοιότυπο» φιλτράρισμα, φιλτράρισμα Doppler, ολοκλήρωση, αντιστάθμιση κίνησης, κ.ά.) υλοποιούνται στην ενδιάμεση συχνότητα μέσω αναλογικών τεχνικών, ενώ άλλες είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμες στη βασική ζώνη (όπως η αντιστάθμιση κίνησης). Για ένα ραντάρ απεικόνισης, ο επεξεργαστής δεδομένων παράγει μία δισδιάστατη (ή τρισδιάστατη) εικόνα του στόχου.



Σχήμα 1-2. Διάγραμμα λειτουργίας μονοστατικού παλμικού ραντάρ

1.4 Κυματομορφές ραντάρ

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εκπεμπόμενης κυματομορφής σε ένα σύστημα ραντάρ είναι συνυφασμένη με τη συγκεκριμένη αποστολή που επιτελεί. Το κόστος και η πολυπλοκότητα για ένα συγκεκριμένο τύπο κυματομορφής αποτελούν βασικούς παράγοντες στη διαδικασία λήψης απόφασης. Τα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούν συνεχείς ή παλμικές κυματομορφές, με ή χωρίς διαμόρφωση. Οι τεχνικές διαμόρφωσης είναι είτε αναλογικές είτε ψηφιακές. Επειδή η επιτυγχανόμενη ανάλυση κατά την απόσταση και κατά τη συχνότητα Doppler σχετίζεται άμεσα με τη φασματική πυκνότητα ισχύος της εκπεμπόμενης κυματομορφής, είναι πολύ σημαντική η γνώση της. Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζουμε τις δύο πιο διαδεδομένες κυματομορφές ραντάρ, κάνοντας μια συνοπτική περιγραφή τους στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Πρόκειται για τις κυματομορφές που προκύπτουν από τη γραμμική διαμόρφωση συχνότητας και τη διαμόρφωση βηματικής συχνότητας.

Στην περίπτωση της γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας, η συχνότητα σαρώνεται γραμμικά κατά τη διάρκεια κάθε παλμού, είτε με ανοδική κλίση είτε με καθοδική κλίση. Η στιγμιαία φάση της κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση

$$\psi(t) = 2\pi \left(f_0 t \pm \frac{\mu}{2} t^2 \right), \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (1.1)$$

όπου f_0 είναι η κεντρική συχνότητα, τ η διάρκεια παλμού, B το εύρος συχνοτήτων, και $\mu = B/\tau$ είναι η κλίση συχνότητας-χρόνου.

Παραγωγίζοντας τη φάση καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση για τη στιγμιαία συχνότητα της κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας

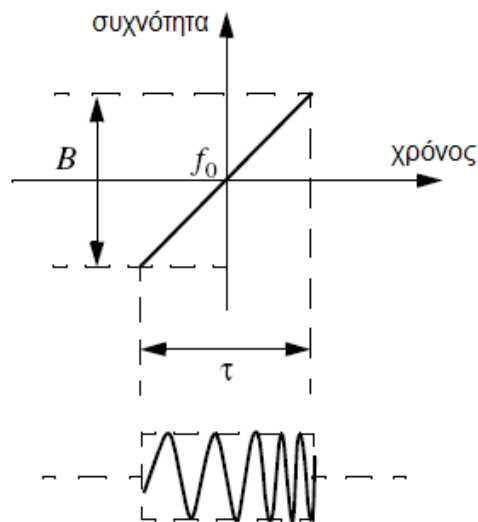
$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi(t) = f_0 \pm \mu t \quad (1.2)$$

Μία τυπική μαθηματική έκφραση για την κυματομορφή γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας είναι η εξής

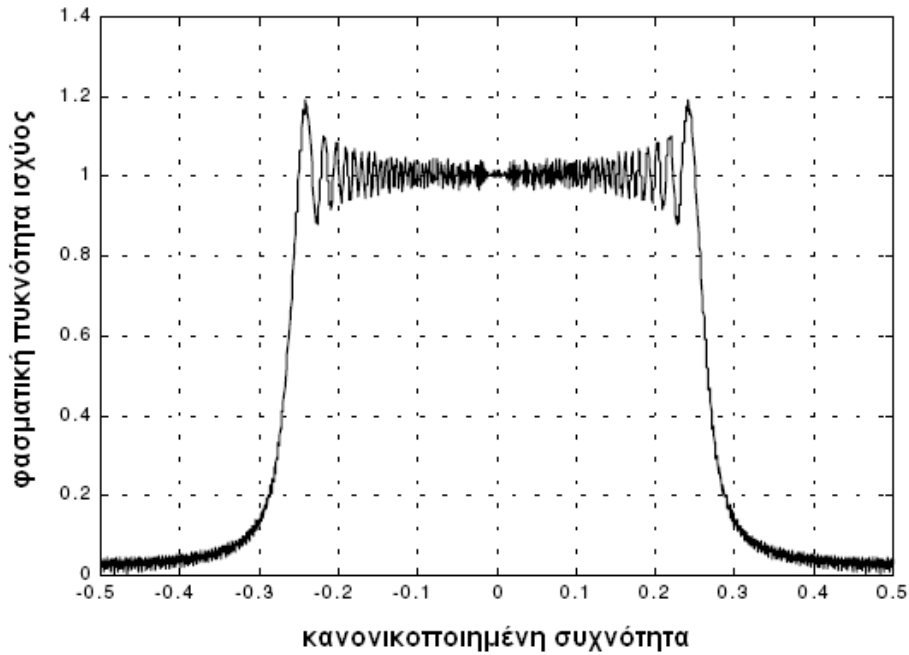
$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \exp\left(j 2\pi\left(f_0 t \pm \frac{\mu}{2} t^2\right)\right) \quad (1.3)$$

όπου ως $\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$ συμβολίζουμε έναν ορθογώνιο παλμό με διάρκεια τ .

Ένα παράδειγμα κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας με ανοδική κλίση παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-3, και η τυπική μορφή του φάσματος της κυματομορφής απεικονίζεται στο Σχήμα 1-4. Σημειώνουμε ότι το φασματικό περιεχόμενο είναι σε συνάρτηση με την κανονικοποιημένη συχνότητα, δηλαδή το σημείο 0 του άξονα αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα και κάθε τιμή της συχνότητας κανονικοποιείται ως προς το εύρος συχνοτήτων B .



Σχήμα 1-3. Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας με ανοδική κλίση

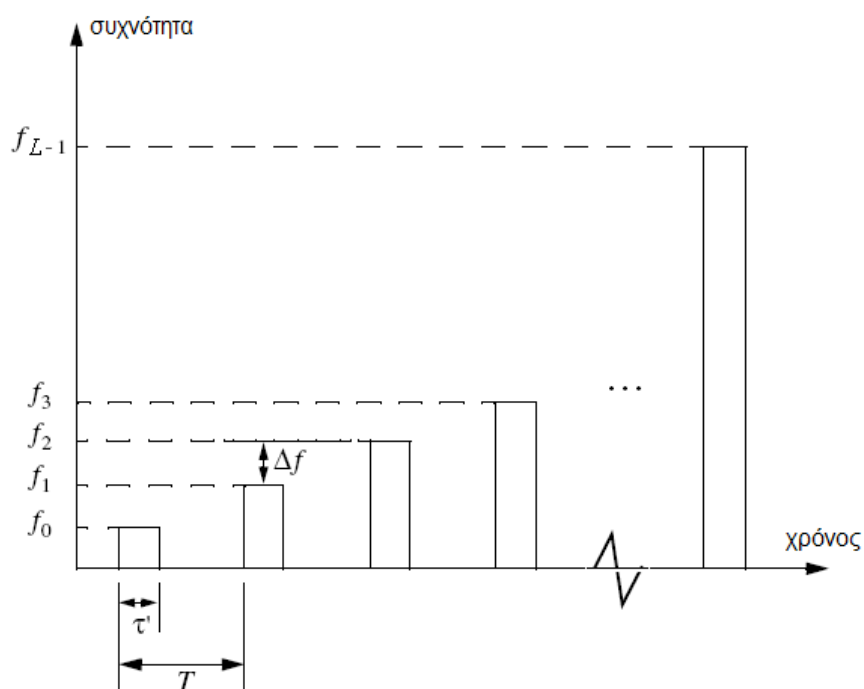


Σχήμα 1-4. Φάσμα της κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας

Η διαμόρφωση βηματικής συχνότητας αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση ραντάρ, και για το λόγο αυτό εφαρμόζεται κατά κόρον στην παρούσα διατριβή. Σε σύγκριση με τη γραμμική διαμόρφωση συχνότητας, κατά την οποία η στιγμιαία συχνότητα σαρώνει ένα επιθυμητό εύρος συχνοτήτων B εντός των χρονικών ορίων ενός παλμού, κατά τη διαμόρφωση βηματικής συχνότητας εκπέμπεται μία σειρά από L παλμούς με γραμμικά αυξανόμενες, διακριτές συχνότητες $f_l = f_0 + l\Delta f$, $l = \overline{0, L-1}$. Η δυσκολία στην παραγωγή της σάρωσης συχνοτήτων στον πομπό του ραντάρ, καθώς και η παραμόρφωση που εισάγουν τα αναλογικά μέρη του συστήματος ραντάρ για σχετικά μεγάλο στιγμιαίο εύρος συχνοτήτων, αποτελούν τα κυριότερα μειονεκτήματα της γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας που αντιμετωπίζονται με τη χρήση της κυματομορφής βηματικής συχνότητας.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γραμμική αύξηση των διακριτών τιμών συχνότητας κατά τη διάρκεια μίας ριπής της κυματομορφής βηματικής συχνότητας. Η περίοδος επανάληψης παλμού είναι T και η διάρκεια παλμού είναι τ' . Αυτή είναι η γραμμική εκδοχή της κυματομορφής βηματικής συχνότητας, με ισαπέχουσες χρονικές στιγμές t_l εκπομπής παλμού διακριτής συχνότητας. Στη βιβλιογραφία [3] αναφέρονται και δύο άλλες εκδοχές της

κυματομορφής βηματικής συχνότητας, η εκδοχή ανοχής ταχύτητας και η εκδοχή ανοχής επιτάχυνσης, για τις οποίες οι χρονικές στιγμές εκπομπής παλμού υπολογίζονται κατά τρόπο ώστε ο όρος της φάσης του επιστρεφόμενου σήματος που εξαρτάται από την ταχύτητα και την επιτάχυνση αντιστοίχως να είναι γραμμικός. Περισσότερες μαθηματικές λεπτομέρειες για τη γραμμική εκδοχή της κυματομορφής βηματικής συχνότητας παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής.



Σχήμα 1-5. Διαμόρφωση βηματικής συχνότητας

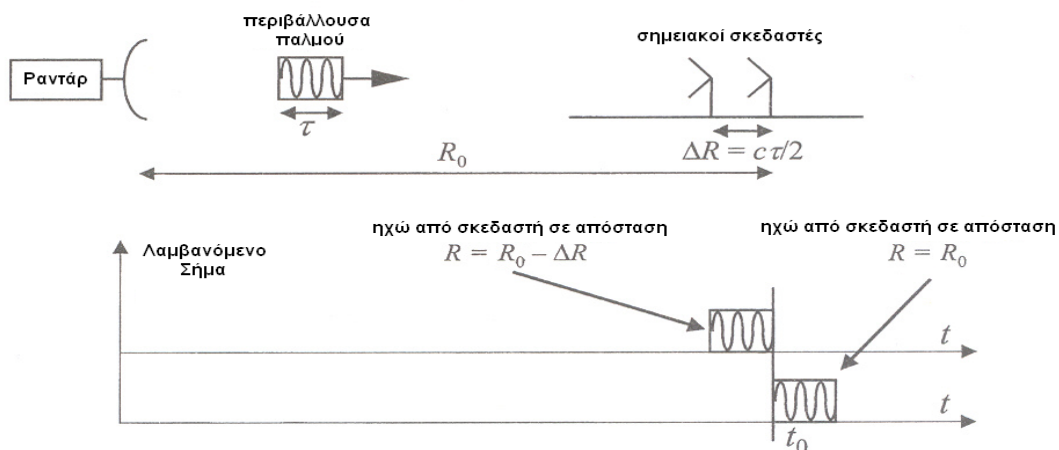
1.5 Βασικές έννοιες επεξεργασίας σήματος ραντάρ

Στην ενότητα αυτή αναλύουμε ορισμένες βασικές έννοιες επεξεργασίας σήματος [4], οι οποίες αποτελούν τη βάση για την κατανόηση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας σήματος ραντάρ.

1.5.1 Διαχωριστική ικανότητα στόχων ραντάρ

Η έννοια του κελιού ανάλυσης εμφανίζεται συχνά στη θεωρία ραντάρ. Ως κελί ανάλυσης ορίζεται ο όγκος στον τρισδιάστατο χώρο που συνεισφέρει στην ηχώ που λαμβάνεται από το ραντάρ σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Στο παρακάτω Σχήμα 1-6 απεικονίζεται η ανάλυση στην κατεύθυνση της απόστασης για έναν παλμό σταθερής συχνότητας. Υποθέτουμε ότι τη χρονική στιγμή $t = 0$ εκπέμπεται ένας παλμός διάρκειας τ . Τη χρονική στιγμή $t = t_0$ το ραντάρ λαμβάνει την αρχή του παλμού που ανακλάται από το σκεδαστή σε απόσταση $R = R_0$ και το τέλος του παλμού που ανακλάται από το σκεδαστή σε απόσταση $R = R_0 - \Delta R$. Κατά αυτό τον τρόπο, οι σκεδαστές που είναι διασκορπισμένοι σε απόσταση μικρότερη ή ίση με $c\tau/2$ συμβάλλουν από κοινού στο τελικό λαμβανόμενο σήμα στο ραντάρ.

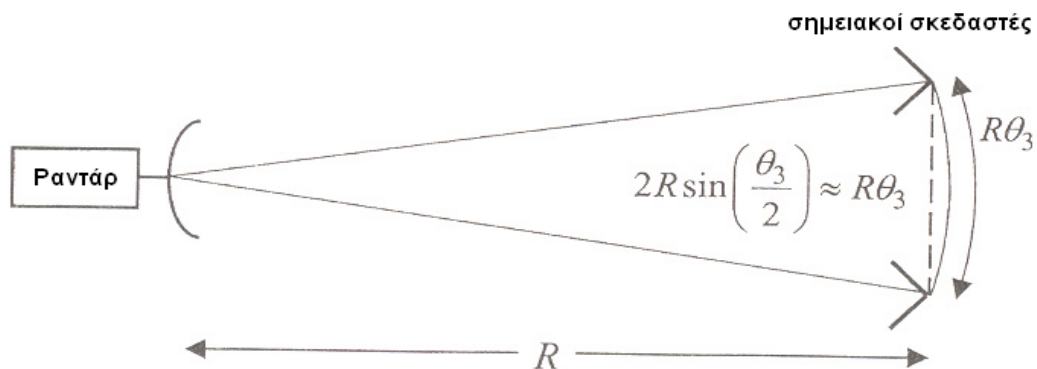


Σχήμα 1-6. Γεωμετρία περιγραφής ανάλυσης απόστασης παλμού

Για να διαχωρίσουμε τη συνεισφορά του κάθε σκεδαστή σε διαφορετικά δείγματα του λαμβανόμενου σήματος, έτσι ώστε κατά την απεικόνιση του στόχου σε ένα προφίλ απόστασης να διακρίνουμε δύο σκεδαστές αντί ενός, θα πρέπει η μεταξύ τους απόσταση να είναι μεγαλύτερη από $c\tau/2$. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται ανάλυση απόστασης (*range resolution*) ΔR (ή ΔR_s). Η περιγραφή αυτή για την ανάλυση απόστασης είναι ιδιαίτερα απλή και αφορά μη διαμορφωμένους παλμούς σταθερής συχνότητας. Η χρήση διαμόρφωσης σε συνδυασμό με τεχνικές συμπίεσης παλμών (λήψη μέσω

«πανομοιότυπου» φιλτραρίσματος) οδηγούν σε καλύτερη ανάλυση απόστασης.

Η γωνιακή ανάλυση, τόσο για τη γωνία αζιμουθίου όσο και για τη γωνία ανύψωσης, καθορίζεται από το ακτινικό εύρος της κεραίας του ραντάρ στα αντίστοιχα επίπεδα. Δύο σκεδαστές σε ίδια απόσταση από το ραντάρ, αλλά σε διαφορετική γωνία αζιμουθίου (ή ανύψωσης) θα συνεισφέρουν ταυτόχρονα στο λαμβανόμενο σήμα εάν βρίσκονται εντός του κεντρικού λοβού της κεραίας. Στο παρακάτω Σχήμα 1-7, υποθέτουμε ότι ο κεντρικός λοβός έχει εύρος ίσο με το ακτινικό εύρος των 3-dB (θ_3) της κεραίας. Δύο σημειακοί σκεδαστές βρίσκονται στις άκρες του κεντρικού λοβού και καθορίζουν τη γωνιακή ανάλυση του ραντάρ. Η απόσταση των δύο σκεδαστών στην κάθετη προς τη γραμμή στόχευσης του ραντάρ κατεύθυνση ονομάζεται ανάλυση κάθετης απόστασης (*cross-range resolution*) ΔR_c , και είναι περίπου ίση με $R\theta_3$.



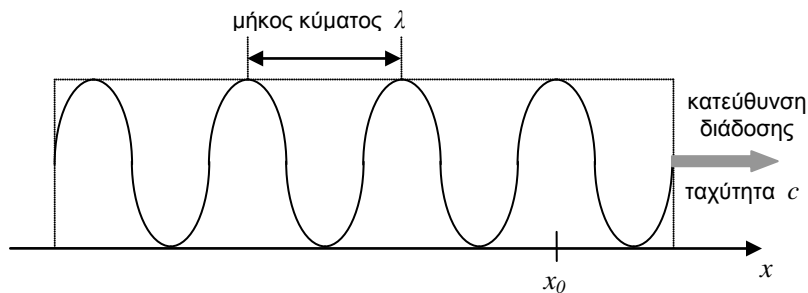
Σχήμα 1-7. Γεωμετρία περιγραφής γωνιακής ανάλυσης

Η προσέγγιση του προηγούμενου σχήματος για την ανάλυση κάθετης απόστασης ισχύει για μικρές τιμές του ακτινικού εύρους των 3-dB της κεραίας.

Παρομοίως με την ανάλυση απόστασης, η ανάλυση κάθετης απόστασης βελτιώνεται σημαντικά πέραν του ορίου $R\theta_3$ και γίνεται ανεξάρτητη από την απόσταση με την εφαρμογή μεθόδων συνθετικής απεικόνισης.

1.5.2 Χωρική συχνότητα

Η έννοια της χωρικής συχνότητας, κατά αντιστοιχία με τη χρονική συχνότητα, περιγράφεται εύκολα μέσω του ακόλουθου σχήματος. Αν και το σχήμα αυτό εξετάζει μία μόνο διάσταση του χώρου, η χωρική συχνότητα είναι γενικά ένα τρισδιάστατο μέγεθος. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται ένας ημιτονοειδής παλμός με φορά μετάδοσης κατά τον άξονα x , με μήκος κύματος λ και την ταχύτητα του φωτός c . Ένας παρατηρητής σε ένα σταθερό σημείο x_0 βλέπει τις διαδοχικές κορυφές του ηλεκτρικού πεδίου ανά χρονικό διάστημα $T = \lambda/c$. Επομένως, η χρονική συχνότητα F του διαδιδόμενου κύματος είναι ίση με $1/T = c/\lambda$ Hz ή $2\pi c/\lambda$ rad/sec. Αντίστοιχα, η χωρική περίοδος μπορεί να ορισθεί ως το διάστημα μεταξύ των κορυφών στο χώρο για συγκεκριμένο χρόνο παρατήρησης. Από το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι η χωρική περίοδος είναι ίση με το μήκος κύματος λ . Επομένως, η χωρική συχνότητα είναι ίση με $1/\lambda$ κύκλους ανά μέτρο ή $2\pi/\lambda$ rad ανά μέτρο. Η δεύτερη ποσότητα ονομάζεται και κυματαριθμός ($K = 2\pi/\lambda$).



Σχήμα 1-8. Περιγραφή χωρικής συχνότητας

1.5.3 Μετασχηματισμοί Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι πολύ σημαντικό εργαλείο στην επεξεργασία σήματος ραντάρ. Η αναπαράσταση του σήματος ραντάρ στο πεδίο της συχνότητας (φασματική ανάλυση) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για το

διαχωρισμό του επιθυμητού σήματος από τις όποιες παρεμβολές. Στα περισσότερα συστήματα ραντάρ, κυρίως στα ραντάρ απεικόνισης, τα συλλεγόμενα δεδομένα σχετίζονται με το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier.

Εφόσον ένα σήμα ραντάρ δειγματοληπτείται στο χρόνο, στη συχνότητα και στο χώρο, ο κλασσικός ορισμός του μετασχηματισμού Fourier ισχύει τόσο στο πεδίο χρόνου-συχνότητας όσο και στο πεδίο χώρου-συχνότητας. Καθώς τα λαμβανόμενα σήματα ραντάρ που εξετάζουμε στην παρούσα διατριβή είναι διακριτού χρόνου (ή χώρου) και ο υπολογισμός της φασματικής τους αναπαράστασης πραγματοποιείται για διακριτό αριθμό συχνοτήτων, παραθέτουμε σε αυτό το σημείο τους ορισμούς του διακριτού μετασχηματισμού Fourier και του αντιστρόφου του.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nk/N} \quad \text{όπου } k = \overline{0, N-1} \quad (1.4)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi nk/N} \quad \text{όπου } n = \overline{0, N-1} \quad (1.5)$$

Αξίζει να σημειώσουμε ότι τα N δείγματα του μετασχηματισμού Fourier κατανέμονται ομοιόμορφα στο πεδίο της συχνότητας (χρονικής ή χωρικής). Η περιοδικότητα (ανά N δείγματα) του παραγόμενου φασματικού περιεχομένου είναι πολύ σημαντική ιδιότητα του μετασχηματισμού Fourier.

1.6 Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

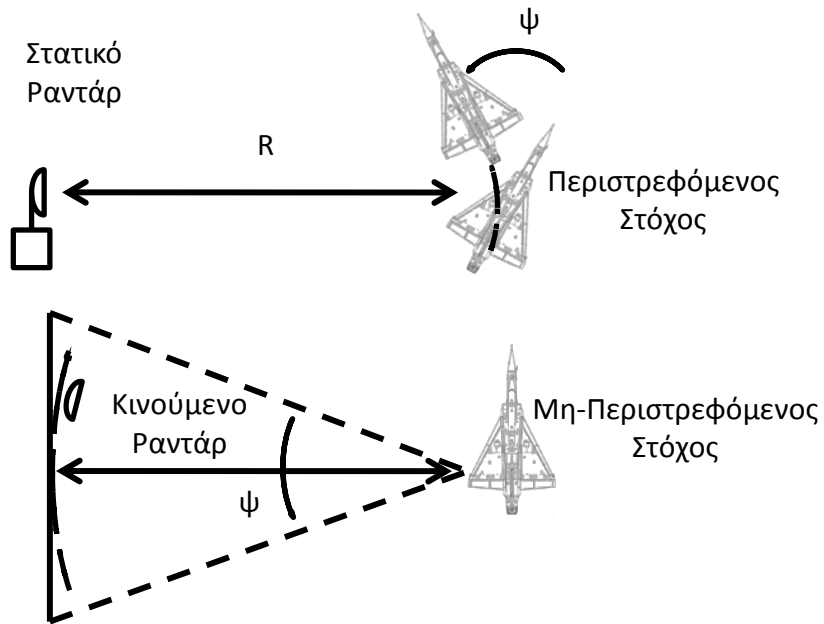
Έχοντας κάνει μία σύντομη περιγραφή των βασικών εννοιών της ανάλυσης απόστασης και της γωνιακής ανάλυσης, μπορούμε να κατανοήσουμε ευκολότερα τις αρχές του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (ή συνθετικού ανοίγματος) και του «αντιστρόφου» του (ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος). Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR, synthetic aperture radar) επιτυγχάνει τη μονοδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση ενός στόχου με υψηλή ανάλυση απόστασης και κάθετης απόστασης. Για να επιτευχθεί η υψηλή ανάλυση απόστασης απαιτείται συνήθως μεγάλο εύρος συχνοτήτων

ραντάρ, παρά το γεγονός ότι η ανάλυση αυτή μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση παραμετρικών ή μη μεθόδων υψηλής φασματικής ανάλυσης. Η συμφασική επεξεργασία («ολοκλήρωση» μέσω του εφαρμοζόμενου μετασχηματισμού Fourier) των επιστρεφόμενων σημάτων από μία σειρά επιμέρους μικρών ανοιγμάτων (δηλαδή μικρό ακτινικό εύρος κεραίας ραντάρ) υπό διαφορετικές γωνίες στόχευσης του ραντάρ είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλής γωνιακής ανάλυσης και κατά συνέπεια υψηλής ανάλυσης κάθετης απόστασης. Τα επιμέρους μικρά ανοίγματα συνθέτουν ένα μεγαλύτερο συνθετικό άνοιγμα, το οποίο διασφαλίζει όπως θα δούμε στη συνέχεια την υψηλή ανάλυση κάθετης απόστασης.

Στα συστήματα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ο στόχος είναι ακίνητος και το ραντάρ περιστρέφεται ώστε να εξασφαλίζεται η παρακολούθηση του στόχου υπό γωνία και να δημιουργείται ικανό συνθετικό άνοιγμα για τη δισδιάστατη απεικόνιση του στόχου. Αντιστοίχως, στα συστήματα ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR, inverse synthetic aperture radar) το ραντάρ είναι ακίνητο και ο στόχος κινείται. Η συνήθης θεωρητική υπόθεση είναι ότι ο στόχος εκτελεί μία απλή περιστροφή γύρω από τον άξονα του συστήματος συντεταγμένων του στόχου που είναι κάθετος στο επίπεδο απεικόνισης (προβολή του στόχου στο επίπεδο που ορίζεται από την κατεύθυνση στόχευσης του ραντάρ και την κατεύθυνση κάθετης απόστασης).

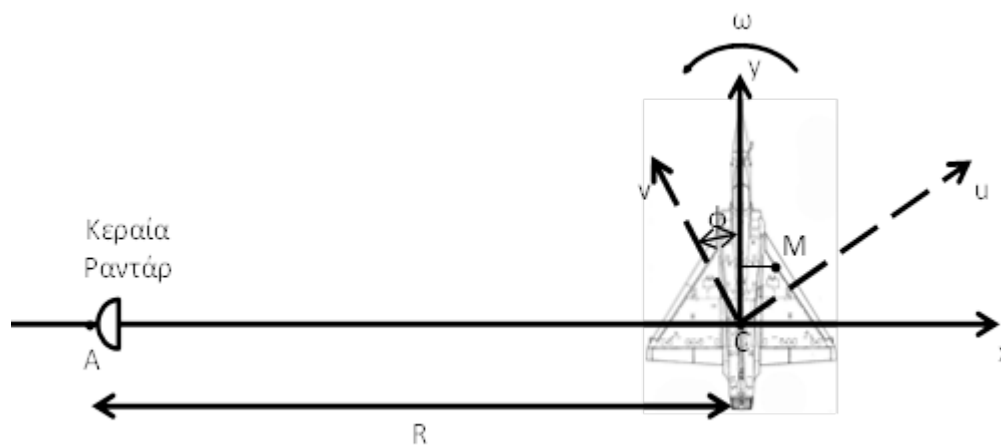
Στην πραγματικότητα, η κίνηση ενός στόχου μπορεί πάντα να αναλυθεί σε κίνηση μετατόπισης (π.χ. ευθύγραμμη ομαλή) και περιστροφική κίνηση [5].

Η γεωμετρία ενός ραντάρ ISAR σχετίζεται άμεσα με τις αρχές ερεύνης 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 1-9 φαίνεται η ισοδυναμία ραντάρ SAR και ISAR. Στις επόμενες παραγράφους αυτού του του εισαγωγικού κεφαλαίου περιγράφουμε τα μονοδιάστατα (προφίλ απόστασης) και διδιάστατα (εικόνες ISAR) προϊόντα της απεικόνισης ISAR [1].



Σχήμα 1-9. Ισοδυναμία ραντάρ τύπου SAR και ISAR

Πιο συγκεκριμένα, το ISAR ραντάρ είναι πακτωμένο στο σημείο A του Σχήματος 1-10. 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 1-10. Στοιχειώδη Γεωμετρία ISAR

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

$$u = x \cos \omega t - y \sin \omega t \quad (1.6)$$

$$v = x \sin \omega t + y \cos \omega t \quad (1.7)$$

Η απόσταση του ανακλώμενου σημείου είναι:

$$R_M^2 = (R + u)^2 + V^2 \quad (1.8)$$

$$R_M^2 = (R + x \cos \omega t - y \sin \omega t)^2 + (x \sin \omega t + y \cos \omega t)^2 \quad (1.9)$$

$$R_M^2 = R_0^2 + 2Rx \cos \omega t - 2Ry \sin \omega t \quad (1.10)$$

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

$$R_M \cong R_0 \left(1 + \frac{Rx \cos \omega t - Ry \sin \omega t}{R_0^2} \right) \quad (1.11)$$

Η συχνότητα Doppler του σημείου M είναι:

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \omega (y \cos \omega t + x \sin \omega t) \quad (1.12)$$

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

$$f_D = \frac{2y\omega}{\lambda} \quad (1.13)$$

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.

1.7 Μονοδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος

Για την περιγραφή της μονοδιάστατης απεικόνισης ISAR υποθέτουμε ότι το ραντάρ εκπέμπει μία κυματομορφή βηματικής συχνότητας. Μία ακολουθία L παλμών μεταδίδεται από το ραντάρ με σταθερή συχνότητα επανάληψης παλμών και η συχνότητα κάθε παλμού αυξάνεται γραμμικά από παλμό σε παλμό κατά ένα σταθερό βήμα. Για τον l -οστό παλμό της κυματομορφής (όπου το l παίρνει τιμές από 0 έως $L-1$) η φέρουσα συχνότητα δίνεται από τη γραμμική σχέση

$$f_l = f_0 + l \Delta f \quad (1.14)$$

Το σήμα που μεταδίδεται στον l -οστό παλμό δίνεται από τον τύπο

$$z_l^e = A \cdot \exp \left[j 2\pi \left(f_l (t + t_l) + \theta_{0,l} \right) \right] \quad (1.15)$$

όπου t_l η χρονική στιγμή εκπομπής του l -οστού παλμού, $\theta_{0,l}$ η αρχική φάση του και A το σταθερό πλάτος του.

Υποθέτουμε ότι η εκπεμπόμενη ενέργεια προσπίπτει σε ένα απλό, στατικό σημειακό σκεδαστή, οπότε η λαμβανόμενη ηχώ δίνεται από τον τύπο

$$z_l^r = \rho \cdot A \cdot \exp \left[j 2\pi \left(f_l \left(t + t_l - \frac{2R}{c} \right) + \theta_{0,l} \right) \right] \quad (1.16)$$

όπου ρ η ανακλαστικότητα του σημειακού σκεδαστή που βρίσκεται σε απόσταση R από το ραντάρ.

Ο λόγος του λαμβανόμενου σήματος προς το εκπεμπόμενο υπολογίζεται ως εξής

$$G_l = \frac{z_l^r}{z_l^e} = \rho \cdot \exp \left[-j 4\pi \frac{R}{c} \cdot f_l \right] = \rho' \cdot \exp \left[-j 4\pi \frac{R}{c} \cdot l \Delta f \right] \quad (1.17)$$

όπου η σταθερά $\exp\left[-j4\pi\frac{R}{c}\cdot f_0\right]$ ενσωματώνεται στο πλάτος ρ' .

Όπως φαίνεται από τον τύπο (1.17), η φάση της ακολουθίας G_l είναι γραμμική ως προς l και περιέχει ακριβώς μία αρμονική για κάθε l . Κάθε επιπλέον σκεδαστής i θα απέδιδε μία παραπάνω αρμονική στην ακολουθία G_l , κάθε μία με το δικό της πλάτος ρ_i και συχνότητα που εξαρτάται από την απόσταση R_i του i -οστού σκεδαστή από το ραντάρ. Η πιο κατάλληλη τεχνική για την εύρεση των αρμονικών της ακολουθίας αυτής είναι ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier. Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό αυτό στην ακολουθία μπορούμε να γράψουμε

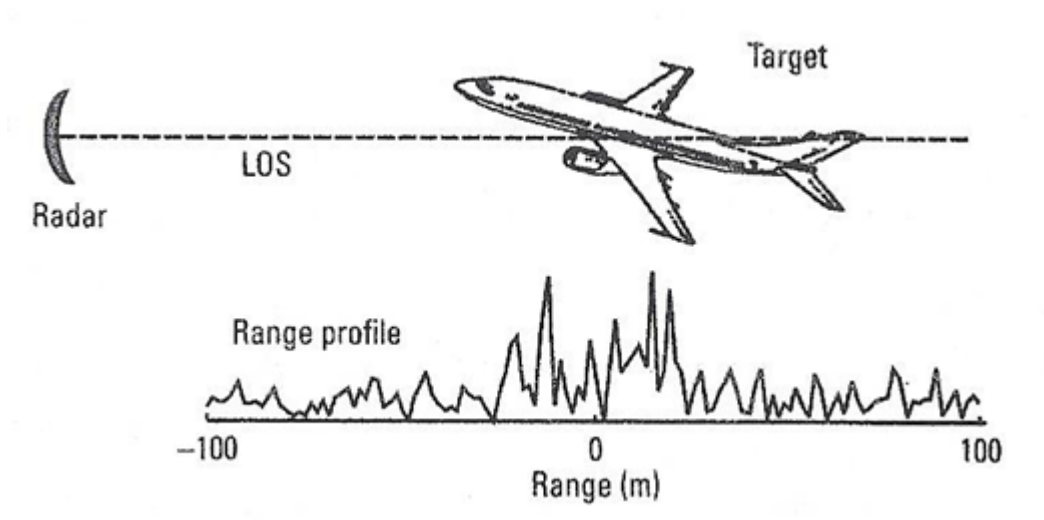
$$\begin{aligned} g_m &= \sum_{l=0}^{L-1} G_l \exp\left[j2\pi\frac{lm}{L}\right] \\ &= \rho \cdot \exp\left[-j4\pi\frac{R}{c}\cdot f_0\right] \cdot \sum_{l=0}^{L-1} \exp\left[j2\pi l\left(\frac{m}{L} - 2\Delta f \cdot \frac{R}{c}\right)\right] \end{aligned} \quad (1.18)$$

Μετά από μία σειρά πράξεων καταλήγουμε στην εξίσωση

$$|g_m|^2 = \rho^2 \cdot \left| \frac{\sin(\pi y_m)}{\sin\left(\frac{\pi y_m}{L}\right)} \right|^2 \quad (1.19)$$

όπου $B = L\Delta f$ και $y_m = m - \frac{2BR}{c}$.

Το διάνυσμα με στοιχεία $|g_m|^2$ ($m = \overline{0, L-1}$) ονομάζεται συνήθως προφίλ απόστασης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό προφίλ απόστασης ενός αεροσκάφους.



Σχήμα 1-11. Παράδειγμα προφίλ απόστασης

Μέσω της εξίσωσης (1.19) μπορούμε να εξάγουμε δύο θεμελιώδεις παραμέτρους: το μέγεθος της λεπτομέρειας που διαφαίνεται σε ένα προφίλ απόστασης και το μεγαλύτερο στόχο που χωράει σε αυτό. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία του προκύπτοντος προφίλ ισούται με $\frac{c}{2B}$. Αυτή η ποσότητα καλείται ελάχιστη διακριβωτική ικανότητα του προφίλ απόστασης και αποτελεί την επιτυγχανόμενη ανάλυση απόστασης με τη χρήση διαμορφωμένων παλμών.

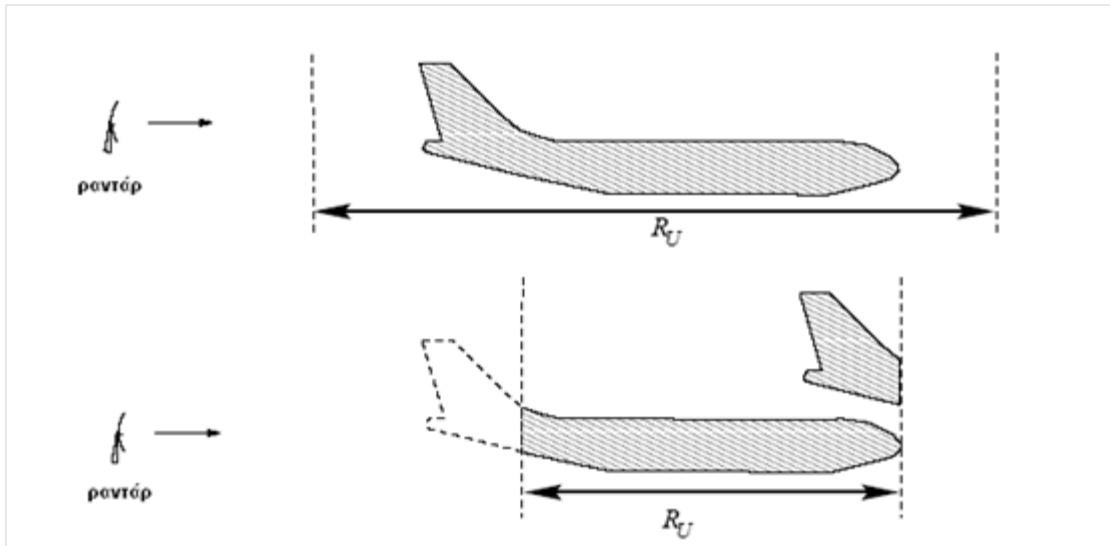
$$\Delta R_s = \frac{c}{2B} \quad (1.20)$$

Επιπρόσθετα, οι σκεδαστές σε αποστάσεις $\dots, R - 2\frac{c}{2\Delta f}, R - \frac{c}{2\Delta f}, R, R + \frac{c}{2\Delta f}, R + 2\frac{c}{2\Delta f}, \dots$ θα εμφανίζονται στην ίδια θέση στο προφίλ απόστασης. Η ποσότητα $\frac{c}{2\Delta f}$ καλείται διάστημα αναμφιβόλου αποστάσεως.

Το προφίλ απόστασης δεν παρέχει την απόλυτη απόσταση του στόχου από το ραντάρ αλλά τη σχετική θέση του κάθε σκεδαστή μέσα στο παράθυρο αναμφιβόλου αποστάσεως

$$R_u = \frac{c}{2\Delta f} \quad (1.21)$$

Σε περίπτωση που η διάσταση του στόχου στην κατεύθυνση στόχευσης του ραντάρ είναι μεγαλύτερη από R_U , παρατηρείται επικάλυψη σκεδαστών: στο προφίλ απόστασης οι ανακλάσεις από τη μακρινή πλευρά του στόχου επικαλύπτονται με τις ανακλάσεις της κοντινής πλευράς (ως προς το ραντάρ), όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα [3].

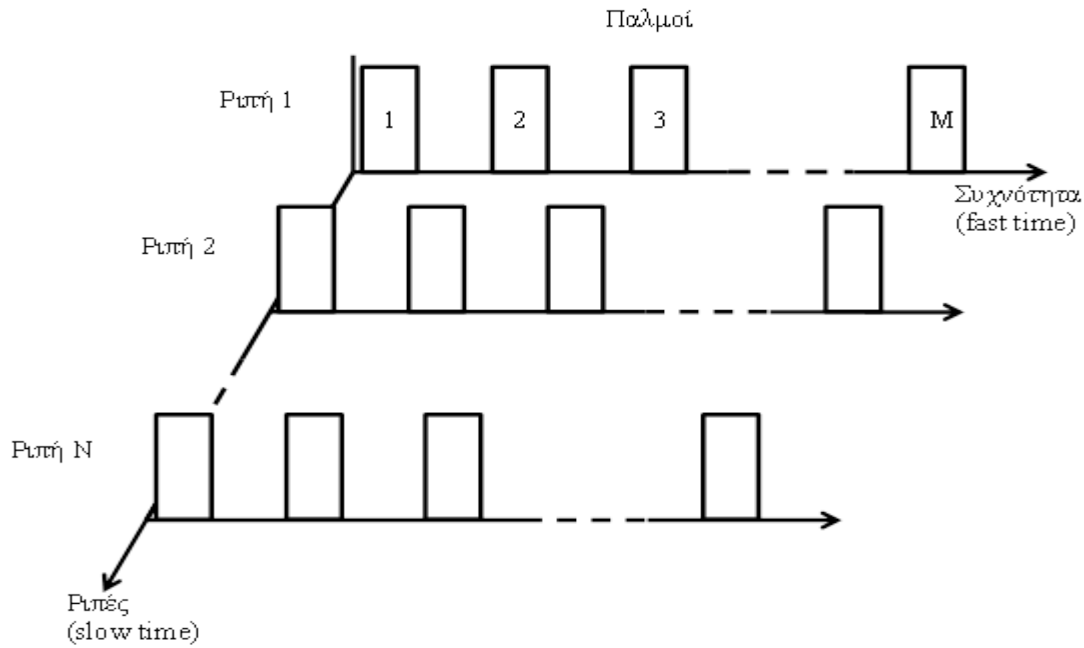


Σχήμα 1-12. Επικάλυψη σκεδαστών στόχου ανάλογα με το διάστημα αναμφιβόλου απόστασης

1.8 Δισδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος

1.8.1 Εκπομπή και λήψη σήματος

Η αρχή ενός ραντάρ ISAR είναι η εκπομπή μία σειράς κυματομορφών N ριπών προς τον στόχο, όπου κάθε ριπή αποτελείται από M παλμούς με συχνότητες διαφορετικές και αυξανόμενες βηματικά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-13.



Σχήμα 1-13. Κυματομορφή N-ριπών, M-βηματικής Συχνότητας Παλμών

Για την κυματομορφή του ανωτέρω σχήματος, η απόκριση συχνότητας U ενός στόχου μπορεί να γραφεί σε σχέση με την συνάρτηση μεταφοράς H της ανάκλασης στόχου ως: [6]

$$U = Ae^{\left(\frac{i4\pi rf}{c}\right)} H(\hat{p}, \hat{q}) \quad U = Ae^{\left(\frac{i4\pi rf}{c}\right)} H(\hat{p}, \hat{q}) \quad (1.22)$$

Όπου:

$$H(\hat{p}, \hat{q}) = \iint h(x', y') e^{[i2\pi(\hat{p}x' + \hat{q}y')] } dx' dy' \quad (1.23)$$

Η σχέση (1.23) είναι δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης πυκνότητας ανακλαστικότητας του στόχου $h(x', y')$. Στην σχέση (1.22) f είναι η συχνότητα, r είναι η στιγμιαία απόσταση του στόχου, c η ταχύτητα του φωτός και A είναι το πλάτος που συνδέεται με το εκπεμπόμενο σήμα, το κέρδος της κεραίας, την εξασθένηση διάδοσης του δέκτη, την απολαβή επεξεργασίας και την απώλεια του συστήματος ραντάρ [1]. Το πλάτος A επειδή είναι μια σταθερά μπορεί να τεθεί ίσο με την μονάδα χωρίς να επηρεαστεί κανένας από τους όρους φάσης της συχνότητας απόκρισης.

Στην σχέση (1.23) έχουμε:

$$\hat{p} = 2(f/c)\sin\theta, \hat{q} = 2(f/c)\cos\theta \quad (1.24)$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ του άξονα του ραντάρ και του άξονα του στόχου. Για τις υπογραφές ISAR με βηματική συχνότητα, η απόκριση f παίρνει την τιμή f_n ενώ το r γίνεται $(r_0 + r_{n,m})$ και το γίνεται $\theta_{n,m}$. Εδώ το r_0 δηλώνει την αρχική απόσταση του στόχου και το $r_{n,m}$ είναι η χρονικά εξαρτώμενη συνιστώσα της απόστασης. Συνεπώς το \tilde{p} και \tilde{q} γίνεται αντίστοιχα $\tilde{p}_{n,m} = 2(f_m/c)\sin\theta_{n,m}$ και $\tilde{q}_{n,m} = 2(f_m/c)\cos\theta_{n,m}$ όπου n και m είναι οι δείκτες που αντιστοιχούν στις ριπές (bursts) και στους παλμούς (frequencies).

Η απόκριση συχνότητας U μπορεί να γραφεί ως:

$$U_{n,m} = e^{[i4\pi(r_0+r_{n,m})]} H(n,m) \quad (1.25)$$

Το $H(n,m)$ ορίζεται ως:

$$H(n,m) = \iint h(x',y') e^{[i2\pi(\tilde{p}_{n,m}x' + \tilde{q}_{n,m}y')] } dx' dy' \quad (1.26)$$

Επίσης ένα δεύτερης τάξης παραμετρικό μοντέλο θα μπορούσε να είναι:

$$r_{n,m} = v_0 t_{n,m} + \frac{1}{2} \gamma_0 t_{n,m}^2 \quad (1.27)$$

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:

$$t_{n,m} = (m + nM) \Delta t \quad (1.28)$$

όπου Δt είναι το διάστημα επανάληψης του παλμού (PRI). Στην σχέση (1.25) η βηματική συχνότητα από παλμό σπαλμό είναι:

$$f_m = f_0 + m\Delta f \quad (1.29)$$

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

1.8.2 Διαχωριστική ακρίβεια ISAR

Η κυματομορφή της βηματικής συχνότητας που περιγράφηκε ανωτέρω, δειγματοληπτώντας μια σχεδόν σταθερή έκδοχή της ανάκλασης H σε διακριτές συχνότητες από παλμό σε παλμό, αυξάνει στιγμιαία τόσο την απαίτηση του εύρος ζώνης όσο και του αυξημένου ρυθμού δειγματοληψίας [6]. Η διακριβωτική ικανότητα μεγάλης ευκρίνειας επιτυγχάνεται με την επεξεργασία του σήματος κατά Fourier. Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει την διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση Δr_s και το εύρος ζώνης του κύματος B δίνεται από την σχέση:

$$\Delta r_s = c / 2B \quad \Delta r_s = c / 2B \quad (1.30)$$

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

$$\Delta r_s = c [2(M-1)\Delta f] \quad (1.31)$$

Είναι δυνατόν να επιτύχουμε μεγαλύτερη διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογισμού οι οποίες όμως απαιτούν μεγάλο σηματο-θορυβικό λόγο και μεγάλη υπολογιστική ισχύ [7]. Η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτειση Δr_c , εξαρτάται από την ανάλυση της διαφοράς δύο συχνοτήτων Doppler από δύο σκεδαστές που βρίσκονται στην ίδιο κελί διαγώνιας απόστασης. Επιπρόσθετα, η ευκρίνεια κατά Doppler σχετίζεται με το διαθέσιμο συμφασικό χρόνο ολοκλήρωσης T . Ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι σχεδόν ο ίδιος με τον χρόνο που απαιτείται για την συλλογή των N αποκρίσεων συχνοτήτων. Επειδή τα δείγματα ανακλαστικότητας των ίδιων συχνοτήτων λαμβάνονται κάθε $N\Delta t$ δευτερόλεπτα η ανάλυση Doppler δίνεται από την σχέση:

$$\Delta f_D = 1 / [M(N-1)\Delta t] \cong 1/T \quad (1.32)$$

Και η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση είναι:

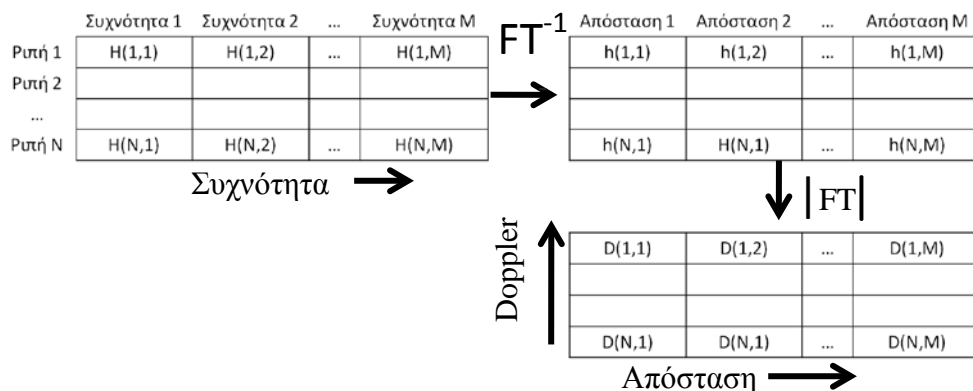
$$\Delta r_c = c\Delta f_D / (2\omega_0 f_c) = \lambda / (2\omega_0 T) \quad (1.33)$$

όπου ω_0 είναι ο ρυθμός περιστροφής του στόχου και $\lambda = c / f_c$ 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 διόπτευση εξαρτάται από την συχνότητα Doppler του ανακλώμενου σήματος του ραντάρ (Kostis, 2001).

1.8.3 Επεξεργασία βηματικής συχνότητας

Η ακολουθία της επεξεργασίας της εικόνας ISAR ενός πίνακα με στοιχεία N ριπών (γραμμές) και M μιγαδικά δείγματα ανάκλασης (στήλες), φαίνεται στο Σχήμα 1-14 [6]. Θεωρούμε ότι έχει γίνει η διόρθωση για την μετατοπιστική κίνηση του στόχου. Έστω ότι $H(k, j)$ είναι η απόκριση της συχνότητας f_j για την k ριπή. Συνεπώς H είναι μία ακολουθία δύο διαστάσεων τάξης ($N \times M$) όπου ουσιαστικά είναι ο πάνω αριστερά πίνακας στο Σχήμα 1-14.



Σχήμα 1-14. Ανάλυση Συνθετικού Ειδώλου ISAR

Για να ληφθεί η ιστορία του προφίλ απόστασης από το $H(k, j)$, εφαρμόζουμε αντίστροφο διακριτό 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 (πάνω δεξιός πίνακας του Σχήματος 1-14) με νέες σειρές από N συνθετικά προφίλ απόστασης (γραμμές), κάθε ένα με M συνθετικά κελιά απόστασης (στήλες). Η συνάρτηση $h(k, m)$ χαρακτηρίζεται ως η ιστορία του προφίλ, όπου m είναι ο δείκτης του κελιού απόστασης (range cell index). Η σχέση που μετασχηματίζει τα δεδομένα συχνότητας σε ανακλαστικότητα απόστασης είναι η ακόλουθη

$$h(k, m) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} H(k, j) e^{i2\pi mj/M} \quad (1.34)$$

Για $m = 1, 2, \dots, M-1$. Οι σκεδαστές τώρα αναλύονται στην διαγώνια απόσταση.

Ο πίνακας της χρονικής ιστορίας στην σχέση (1.34) μπορεί να μετασχηματισθεί σε ένα τρίτο πίνακα λαμβάνοντας τον μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transformation, DFT) των N μιγαδικών τιμών σε κάθε κελί απόστασης, από στήλη σε στήλη. Κατά συνέπεια, κάθε καταγραφή της μιγαδικής ανακλαστικότητας στο κελί διαγώνιας απόστασης (slant-range cell) μετασχηματίζεται σε προφίλ ανακλαστικότητας στην κάθετη απόσταση (cross-range) μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier. Η συνάρτηση $D(n, m)$ χαρακτηρίζεται ως η έξοδος του μετασχηματισμού όπου n είναι ο δείκτης του κελιού κάθετης απόστασης (cross-range cell index) στον κάτω δεξιά πίνακα του Σχήματος 1-14. Επομένως,

$$D(n, m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k, m) e^{-i2\pi kn/N} \quad (1.35)$$

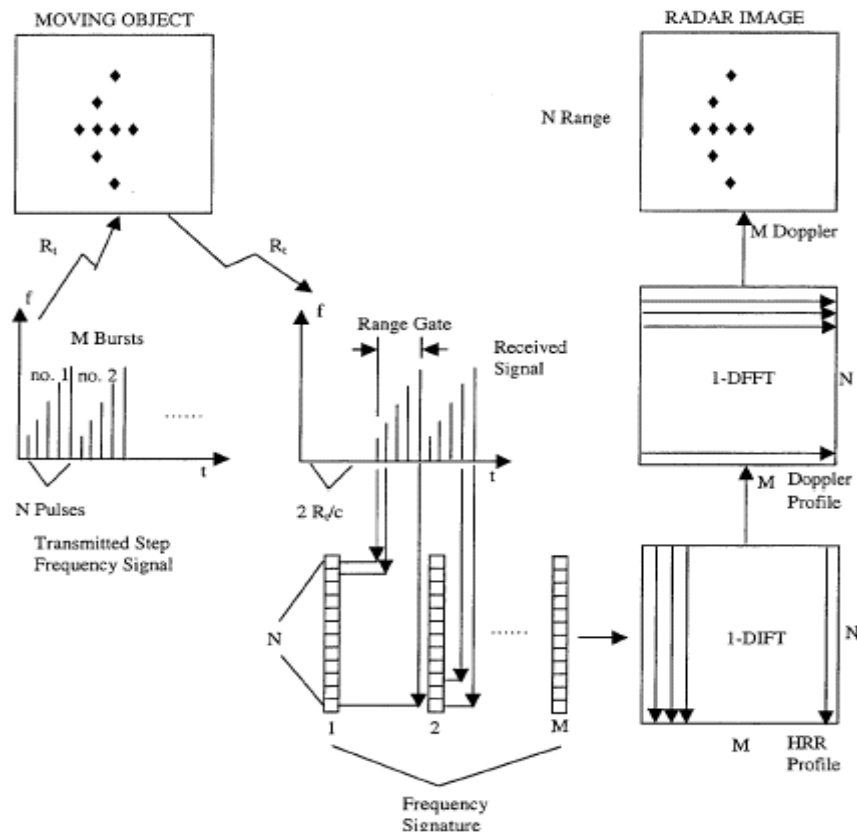
όπου, $n = 1, 2, \dots, N-1$. Το αποτέλεσμα μετά την μετατροπή των μιγαδικών τιμών του $D(n, m)$ σε απόλυτες τιμές είναι ένας πίνακας απόστασης – Doppler, ο οποίος είναι η εικόνα ISAR.

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι ο σχηματισμός εικόνας ISAR απαιτεί την ανάλυση του διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier σε πίνακα $N \times M$.

Γράφοντας τις σχέσεις (1.34) και (1.35) σε συμπαγή μορφή, ο δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier εκφράζεται ως

$$D(n, m) = \frac{1}{NM} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} H(k, j) e^{(i2\pi m j / M)} e^{(-i2\pi k n / N)} \quad (1.36)$$

Το βασικό διάγραμμα περιγραφής της απεικόνισης ISAR φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 1-15. Οι τεχνικές εστίασης της παραγόμενης εικόνας ISAR που αποτελούν και το αντικείμενο της διατριβής μου περιγράφονται στο κεφάλαιο τρία.



Σχήμα 1-15. Διάγραμμα περιγραφής της δισδιάστατης απεικόνισης ISAR

1.9 Δομή διδακτορικής διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη των συστημάτων ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR), καθώς και η ανάπτυξη καινοτόμων αλγορίθμων απεικόνισης στόχων ραντάρ. Η σπουδαιότερη καινοτομία της διατριβής αυτής είναι ο προτεινόμενος πλήρης αυτοματοποιημένος αλγόριθμος αυτοεστίασης για την μετεπεξεργασμένη εικόνα του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR), που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας, καθώς και η μέθοδος που αφορά την ακριβή ευθυγράμμιση του προφίλ απόστασης για την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση με εφαρμογή στο ραντάρ ISAR (**τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο**). Στην παρούσα έρευνα συγκριτικά με αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες, ο μεν προτεινόμενος αλγόριθμος για την αυτοεστίαση της εικόνας ISAR είναι ευριστικός και βασίζεται στον διαχωρισμό του συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI) σε βαθμίδες, η δε μέθοδος της ευθυγράμμισης της απόστασης, που βασίζεται στην τεχνική της φασματικής εκτίμησης με υψηλή ανάλυση (Super-resolution DESED-decimative Spectrum Estimation), χρησιμοποιεί έναντι των κλασικών μεθόδων ευθυγράμμισης της απόστασης την τεχνική της κλασματικής διόρθωσης του κελιού απόστασης (fractional range bin correction) ανά σκεδαστή. Για την εγκυρότητα και αποδοτικότητα των μεθόδων που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή περιλαμβάνονται ακριβείς μαθηματικές αναλύσεις καθώς και τα αποτελέσματα προσομοίωσης με συνθετικά δεδομένα ISAR κάτω από ρεαλιστικά σενάρια για την ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση.

Στο **πρώτο (εισαγωγικό) κεφάλαιο** παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες ενός συστήματος ραντάρ και ειδικότερα τα κύρια χαρακτηριστικά του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος. Γίνεται αναφορά σε διάφορες ευρέως χρησιμοποιούμενες κυματομορφές ραντάρ (γραμμική διαμόρφωση συχνότητας, διαμόρφωση βηματικής συχνότητας, κ.ά.) και στους μηχανισμούς παραγωγής μονοδιάστατων και διδιάστατων εικόνων ραντάρ. Η απεικόνιση στόχων ραντάρ και οι επιμέρους διαδικασίες στις οποίες συνίσταται

εξετάζονται εκτενέστερα για ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, καθώς αποτελούν και το βασικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι συμβατικοί αλγόριθμοι απεικόνισης για δισδιάστατα μη επεξεργασμένα δεδομένα ραντάρ. Το μαθηματικό υπόβαθρο των αλγορίθμων αυτών είναι ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier, του οποίου οι μαθηματικές ιδιότητες εξετάζονται στα πλαίσια της πληρέστερης κατανόησης του προβλήματος απεικόνισης.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται οι αντισταθμίσεις κίνησης που περιλαμβάνουν την μετατοπιστική και περιστροφική κίνηση του στόχου [5]. Συγκεκριμένα επεξηγούμε την αντιστάθμιση κίνησης στόχου (Motion-Compensation) μαζί με την μαθηματική ανάλυση για δισδιάστατη απεικόνιση στόχου ISAR [5].

Επίσης, αναφερόμαστε και στην κανονική αντιστάθμιση κίνησης, όπου εξηγούμε την ιχνηλασία απόστασης (range tracking) και την ιχνηλασία Doppler καθώς και την παρουσίαση των κυριότερων αλγορίθμων αντιστάθμισης κίνησης που είναι απαραίτητοι για την αντιμετώπιση του φαινομένου της μετακίνησης των σκεδαστών μέσω των κελιών ανάλυσης (MTRC-Migration Through Resolution Cells), ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι η καλή εστίαση της εικόνας ISAR [1]-[5]. Στο ίδιο κεφάλαιο, μελετούμε τα ανεπιθύμητα φαινόμενα που προκαλούνται από την μετατοπιστική κίνηση του στόχου, τέτοια όπως του βηματισμού απόστασης (Range Walking) και της απόκλισης απόστασης (Range Offset) [5]. Τέλος, παρουσιάζουμε για την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης, την μαθηματική ανάλυση του περιστρεφόμενου σκεδαστή, τον ορισμό της ακτίνας θόλωσης (Blur Radius), την πολική επαναδιαμόρφωση (Polar Reformatting) καθώς και την ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, κάνουμε μια εισαγωγή στην αυτοεστίαση εικόνας ISAR καθώς και στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα, εξετάζουμε τις παραμετρικές τεχνικές αυτοεστίασης, όπως η μεγιστοποίηση της αντίθεσης εικόνας (ICBA-Image Contrast Based Autofocusing) [11]-[12] και η ελαχιστοποίηση της εντροπίας της εικόνας (MEA-Minimum Entropy Autofocusing) [8], καθώς και τις μη παραμετρικές τεχνικές αυτοεστίασης εικόνας, όπως η επικρατέστερη σημειακή επεξεργασία (PPP-Prominent Point

Processing) και η αυτοεστίαση κλίσης φάσης (PGA-Phase Gradient Autofocus) [11]-[12].

Επίσης γίνεται αναφορά για τον ορισμό της εντροπίας και την μαθηματική ανάλυση της, καθώς και για τους εστιακούς ενδείκτες [6], [10]. Στη συνέχεια, κάνουμε μια εισαγωγή στον προτεινόμενο καινοτόμο αλγόριθμο αυτοεστίασης που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας [8]. Εδώ προσπαθούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα της δισδιάστατης εικόνας ISAR μέσω της μετεπεξεργασμένης πληροφορίας που αντισταθμίζει την μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση. Σε αυτή την έρευνα αναπτύσσεται μια μέθοδος αυτοεστίασης για αεροπορικούς στόχους με (πιθανή) ταχεία περιστροφική κίνηση (fast maneuvering). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ονομάζεται αυτοεστίαση με διαχωριζόμενο το συμφασικό διάστημα επεξεργασίας, αφού συνίσταται στην διαίρεση και συνένωση των πινάκων με μη επεξεργασμένα δεδομένα των δύο συνεχόμενων συμφασικών διαστημάτων επεξεργασίας. Με βάση μια αποδεκτή περιοχή τιμών εντροπίας, ο αλγόριθμος παραλείπει τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες χαμηλής ποιότητας και χρησιμοποιεί μόνο τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες ανώτερης ποιότητας. Ακολουθεί η μεθοδολογία του αλγορίθμου όπου εξηγούμε σε βάθος πως πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI Split Autofocusing) σε βαθμίδες. Συνεχίζουμε με τον προσδιορισμό των κατωφλίων εντροπίας καθώς και με τις αριθμητικές προσομοιώσεις από τις διάφορες δοκιμές Monte-Carlo για να ποσοτικοποιήσουμε την μεταβολή της εντροπίας της εικόνας ISAR σε σχέση με τον σηματοθορυβικό λόγο και τον δείκτη CPI. Προσομοιώνουμε αεροσκάφος Mirage 2000 με 208 σκεδαστές, βάσει του πίνακα με τις παραμέτρους προσομοίωσης του ραντάρ ISAR και με χρήση κώδικα σε περιβάλλον matlab. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ικανότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου ώστε να παραχθούν καλά εστιασμένες εικόνες ISAR, με σχεδόν βέλτιστες τιμές εντροπίας. Τελιώνουμε το κεφάλαιο αυτό με τις περαιτέρω προσομοιώσεις, όπου παρουσιάζουμε μετά από εξαντλητική έρευνα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω του προγράμματος matlab που αφορούν δυο τύπους στόχων, το mirage 2000 και το Boeing 727. Για κάθε στόχο εξετάζουμε τρεις περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo, για 100 δοκιμές με τα 10 CPI, και για τιμές $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$ και γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ προσδιορίζουμε τα όρια της εντροπίας. Το διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης ως ποσοστό του CPI είναι [0.35 0.75]. Εξετάζουμε την συμπεριφορά του αλγορίθμου σε πρωιμότερο στάδιο, δηλαδή μικραίνοντας τον αλγόριθμο ψάχνουμε για λύσεις στο συγκεκριμένο διάστημα που είναι μικρότερο του CPI/2

Στην δεύτερη περίπτωση με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo, για 100 δοκιμές με τα 10 CPI, και για τιμές $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$ και γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ προσδιορίζουμε τα νέα όρια της εντροπίας. Το διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης ως ποσοστό του CPI είναι [0.5 0.7]. Εδώ μικραίνοντας τον αλγόριθμο ψάχνουμε για λύσεις στο συγκεκριμένο διάστημα που είναι μικρότερο του CPI/4.

Στην Τρίτη περίπτωση με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo, για 100 δοκιμές με τα 10 CPI, και για τιμές $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$ και επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ προσδιορίζουμε τα νέα όρια της εντροπίας. Το διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης ως ποσοστό του CPI είναι [0.2 0.8].

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** προτείνεται η χρήση μίας συγκεκριμένης μονοδιάστατης τεχνικής φασματικής εκτίμησης με υψηλή ανάλυση για την εκτίμηση παραμέτρων σήματος ραντάρ. Η προτεινόμενη μέθοδος ονομάζεται DESED (Decimative Spectrum Estimation by factor D) και συνδέεται με την έννοια της υποδειγματοληψίας [13]-[14]. Η μέθοδος DESED εφαρμόζει υποδειγματοληψία σήματος και ανάλυση μοναδικών τιμών, αξιοποιεί όλα τα διαθέσιμα δεδομένα, και δεν επιβάλλει κάποιο περιορισμό στον παράγοντα υποδειγματοληψίας και στην τάξη του μοντέλου σήματος [15]-[16]-[17]. Οι συχνότητες, οι παράγοντες απόσβεσης και τα μιγαδικά πλάτη του γενικού μοντέλου σήματος με αποσβεννόμενους εκθετικούς όρους (damped exponentials, DE) μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της μεθόδου DESED. Συνεχίζουμε με τον προτεινόμενο αλγόριθμο ευθυγράμμισης των προφίλ

απόστασης, που υλοποιείται με την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης του στόχου στην οριζόντια διεύθυνση (SRRC-Slant Range Rotational Compensation) [9]-[18]. Στηριζόμενοι στην μέθοδο DESED υλοποιούμε αυτό τον καινοτόμο αλγόριθμο ώστε με πολύ μεγάλη ακρίβεια να αντισταθμίσουμε τις μετακινήσεις στην οριζόντια διεύθυνση των ξεχωριστών σκεδαστών ενός περιστρεφόμενου στόχου. Ακολουθεί η μαθηματική περιγραφή για το σενάριο του περιστρεφόμενου σκεδαστή όπου και υπολογίζουμε την μετακίνηση στην οριζόντια διεύθυνση καθώς και την φάση που σχετίζεται με την κάθετη απόσταση. Γίνεται πλήρης ανάλυση της προτεινόμενης μεθόδου εξετάζοντας την απλή γεωμετρία στόχου με πέντε σκεδαστές. Οι τρεις σκεδαστές είναι τοποθετημένοι στην άτρακτο του αεροσκάφους ενώ οι άλλοι δύο βρίσκονται στις δύο πτέρυγες. Παρατηρούμε ότι είναι εμφανής η μετακίνηση των σκεδαστών που βρίσκονται στα πτερύγια στην οριζόντια απόσταση, ενώ οι σκεδαστές στην άτρακτο του αεροσκάφους εμφανίζουν αρκετά μικρή ολίσθηση χωρίς να γίνεται λόγος για μηδενική ολίσθηση του κέντρου περιστροφής. Ο προτεινόμενος SRRC αλγόριθμος αποτελείται από τέσσερα βήματα με την εκτίμηση της απόστασης που βασίζεται στην DESED να αποτελεί το **θεμελιώδες βήμα**. Το **δεύτερο βήμα** είναι η ξεχωριστή εφαρμογή της ολίσθησης απόστασης που αναφέρεται στην εκτιμώμενη μετατόπιση του κάθε σκεδαστή. Στο **τρίτο βήμα** που ονομάζεται ξεχωριστός υπολογισμός του ακριβούς προφίλ απόστασης, οι ολισθημένες εκδοχές φάσης της κάθε ριπής με μη επεξεργασμένα δεδομένα (raw-data), μετασχηματίζονται μέσω FFT (με zero padding) σε κατάλληλες ολισθημένες φάσεις του αντίστοιχου προφίλ απόστασης. Το **τελευταίο βήμα** είναι η συνολική σύνθεση με ακρίβεια των προφίλ απόστασης.

Μετά με την χρήση κώδικα σε υπολογιστικό περιβάλλον matlab, η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου αποδεικνύεται μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων ISAR με ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση, εξετάζοντας την ιστορία των προφίλ απόστασης, τις λαμβανόμενες ISAR εικόνες και τις αντίστοιχες τιμές εντροπίας πριν και μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στο τέλος παραθέτουμε τα αποτελέσματα από τα συγκριτικά τεστ μεταξύ της μεθόδου DESED και της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης όπου η τελευταία αποτυγχάνει. Στο τελευταίο **κεφάλαιο-5**

που αποτελεί τον επίλογο, παραθέτουμε τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας μας.

1.10 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] D. Wehner, High-Resolution Radar, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [2] Ν. Μαλαχίας και Γ. Σάγος, Αρχές Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου, Παπασωτηρίου, 1η Έκδοση, 1998.
- [3] R. van der Heiden, Aircraft Recognition with Radar Range Profiles, PhD. Dissertation, Universiteit van Amsterdam, 1998.
- [4] M. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw-Hill, 1st Edition, 2005.
- [5] V. Chen and H. Ling, Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis, Artech House, 1st Edition, 2002.
- [6] J. S Son, G. Thomas and B. C Flores, Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation, Artech House, 2001.
- [7] J. P Hardange, Inverse Synthetic Aperture Radars. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar, Neuilly Sur Siene, France: AGARD NATO, 1992.
- [8] E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, G. Boultadakis, and P. Frangos, "A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization", Electronics and Electrical Engineering Journal, T121 Signal Technology, No. 4 (110), pp.125-130, Apr. 2011.
- [9] E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, and P. Frangos, "Combination of range alignment technique with autofocusing post-processing algorithm for ISAR image optimization", International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'11), Sofia, Bulgaria, Oct. 2011.
- [10] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, G. Boultadakis, G. Kalognomos and P. Frangos, "Two-dimensional ISAR Model and Image Reconstruction with Stepped Frequency Modulated Signal", IET Signal Processing, Vol. 2 (3), pp. 277-290, Sept. 2008.
- [11] M. Martorella, F. Berizzi and B. Haywood, " Contrast maximization based technique for 2-D ISAR autofocusing", IEE Proc. Radar Sonar Navig., Vol. 152, No. 4, Aug. 2005.
- [12] M. Martorella- University of Pisa, "ISAR Geometry and Signal Modeling"
- [13] A. Karakasiliotis, and P. Frangos, "Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates," Proc. 5th International Symposium on Communications, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2006), Patras, Greece, July 2006.

- [14] A. Karakasiliotis, and P. Frangos, "Comparison of Several Spectral Estimation Methods for Application to ISAR Imaging," Proc. RTO SET 080 International Symposium on 'Target Identification and Recognition using RF Systems', Oslo, Norway, 11-13 October 2004.
- [15] S. DeGraaf, "SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 7 (5), pp.729-761, May 1998.
- [16] E. Corral, G. Thomas, and B. Flores, "Effects of using superresolution techniques in ISAR imagery", Proc. CCECE 2002, Vol. 1, pp. 353-357, 2002.
- [17] P. Stoica, and Y. Selen, "Model-order selection: a review of information criterion rules", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 21 (4), pp. 36-47, July 2004.
- [18] E. D Kallitsis, A. V Karakasiliotis and P. V Frangos, "Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging: A Novel Fine Range Profile Alignment Method for Air-Target Slant Range Rotational Motion Compensation", Journal of Applied Electromagnetism (JAE / accepted for publication).

Κεφάλαιο 2

***ΚΛΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ
ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΑΝΤΑΡ
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ***

2.1 Εισαγωγή στην αντιστάθμιση κίνησης

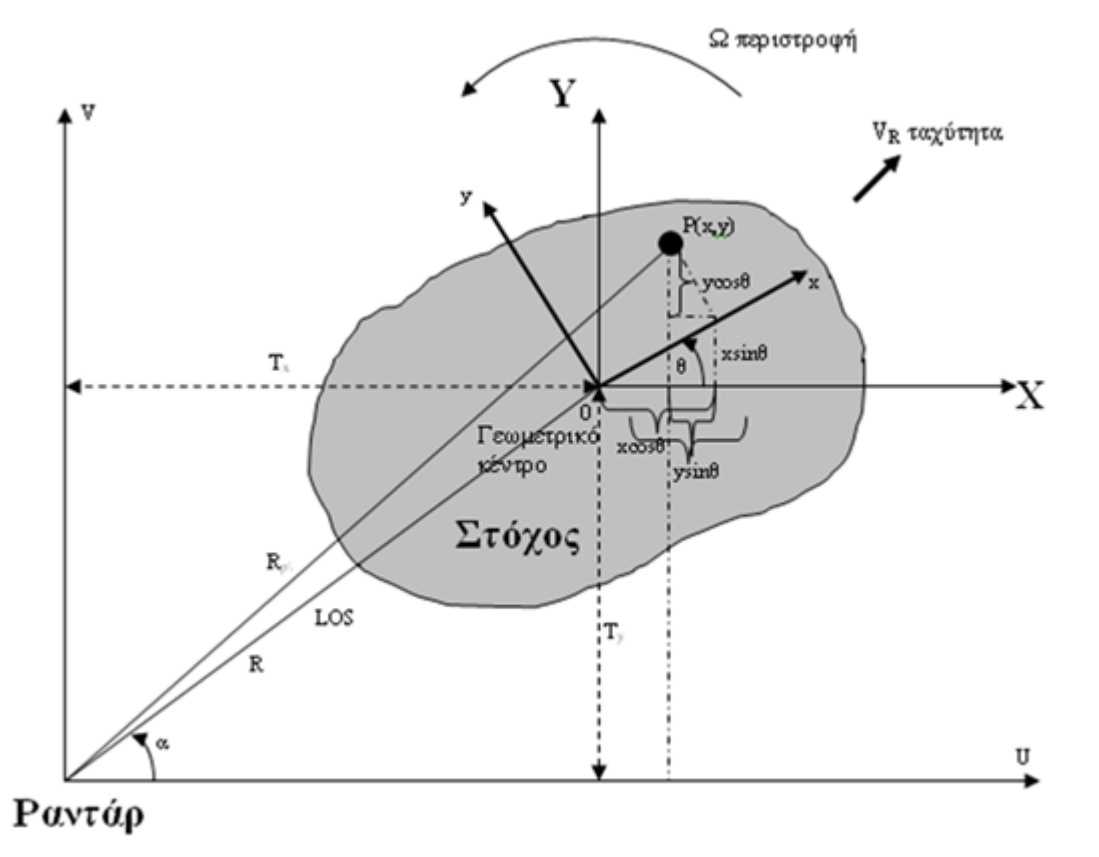
Ο σκοπός της αντιστάθμισης κίνησης είναι να εκτιμήσει και να διορθώσει την οποιαδήποτε άγνωστη και ανεπιθύμητη κίνηση του στόχου, για να προτείνουμε μια λύση για το θόλωμα της εικόνας του στόχου. Αυτό όμως αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία. Η κύρια δυσκολία είναι ότι η επεξεργασία ISAR είναι μια τυφλή διαδικασία. Κανένας δεν γνωρίζει για τις παραμέτρους κίνησης του στόχου. Έτσι μόνο οι αλγόριθμοι αντιστάθμισης κίνησης προτείνουν βέλτιστες λύσεις οι οποίες δεν είναι πάντα επιτυχείς. Το φαινόμενο της αντιστάθμισης κίνησης και οι έρευνες έχουν εξαντληθεί τον ίδιο χρόνο με τις δραστηριότητες που αφορούν την απεικόνιση ISAR, νωρίς το 1980 [1], [2], [3]. Η έρευνα στους αλγόριθμους αντιστάθμισης κίνησης είναι ακόμη σε αυξανόμενη δραστηριότητα [4]. Οι ερευνητές ασχολήθηκαν τα πρώτα χρόνια με την αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης [2]. Έπειτα οι εκτεινόμενες τεχνολογικές ευκαιρίες και οι γρήγοροι επεξεργαστές τους επέτρεψαν να κάνουν μεγάλη αναζήτηση και εισηγήθηκαν διάφορα είδη αλγόριθμων αντιστάθμισης της περιστροφικής κίνησης.

Οι μέθοδοι για την αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης επιτυγχάνονται σε δύο στάδια [5]: την ευθυγράμμιση του κελιού απόστασης (range bin alignment) και την ρύθμιση φάσης (phase adjustment). Για το πρώτο στάδιο πολλές μέθοδοι έχουν βρεθεί στην βιβλιογραφία, τέτοιες όπως η προσέγγιση ιχνηλασίας της κορυφής (peak tracking approach), η μέθοδος της συσχέτισης της περιβάλλουσας (the envelope correlation method) [2], [6], [7], η προσέγγιση της γενικής ευθυγράμμισης απόστασης (the global range alignment) [8] ή τεχνική που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας (minimum-entropy based technique). Για το δεύτερο στάδιο αναφορικά με την ρύθμιση φάσης η βιβλιογραφία μας παρέχει φημισμένες μεθόδους τέτοιες όπως την επεξεργασία του επικρατέστερου σημείου (prominent point processing) [9], αυτοεστίαση της κλίσης φάσης (PGA-phase gradient autofocus) [10], ελαχιστοποίηση της εντροπίας (entropy minimization) [5] που αποτελεί και την βασική έρευνα του διδακτορικού μου (Κεφάλαιο 3), ή μεγιστοποίηση της εντροπίας (contrast maximization) [11].

Εμείς σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε σε βάθος τα φαινόμενα της μετατοπιστικής και περιστροφικής κίνησης του στόχου πάνω στην διαδικασία παραγωγής της εικόνας ISAR. Αυτές οι συζητήσεις θα συνδεθούν με την ανάγκη της αντιστάθμισης κίνησης. Έπειτα θα περιγράψουμε την μαθηματική ανάλυση της αντιστάθμισης κίνησης σε δισδιάστατη εικόνα ISAR. Στην συνέχεια θα μιλήσουμε για την κανονική αντιστάθμιση κίνησης καθώς και για τα είδη αλγόριθμων αντιστάθμισης κίνησης.

2.2 Μαθηματική ανάλυση της αντιστάθμισης κίνησης σε δισδιάστατη απεικόνιση ISAR

Για να παράγουμε μια καθαρή εικόνα ραντάρ πρέπει να εφαρμοσθούν οι αλγόριθμοι αντιστάθμισης κίνησης. Σκοπός της αντιστάθμισης κίνησης είναι να προεπεξεργασθούμε τα δεδομένα ώστε ο σχηματισμός εικόνας με συμβατικό Fourier να μπορεί να εφαρμοσθεί για να λάβουμε μια καλά εστιασμένη εικόνα ραντάρ. Για να ερμηνεύσουμε καλύτερα το φαινόμενο της αντιστάθμισης κίνησης στόχου χρησιμοποιούμε το παρακάτω Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. Γεωμετρία απεικόνισης ραντάρ ενός στόχου

Η απόσταση μπορεί να εκφραστεί από την αρχική απόσταση του στόχου R_0 την αρχική ταχύτητα V_R την αρχική ακτινική επιτάχυνση $a_R = \frac{dV_R}{dt}$ και άλλους όρους υψηλότερης τάξης, η δε γωνία περιστροφής μπορεί να εκφραστεί από τον αρχικό προσανατολισμό της γωνίας θ_0 σε σχέση με τις συντεταγμένες (X, Y, Z) τον αρχικό ρυθμό γωνιακής περιστροφής Ω την αρχική γωνιακή επιτάχυνση $\gamma = \frac{d\Omega}{dt}$ και άλλους όρους υψηλότερης τάξης [4].

$$R(t) = R_0 + V_R t + \frac{1}{2} \alpha_R t^2 + \dots \quad (2.1)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \Omega t + \frac{1}{2} \gamma t^2 + \dots \quad (2.2)$$

Έπειτα η απόσταση από το ραντάρ προς τον σημειακό σκεδαστή p γίνεται

$$R_p(t) = R(t) + x \cos[\theta(t) - \alpha] - y \sin[\theta(t) - \alpha] \quad (2.3)$$

και η βασική ζώνη του επιστρεφόμενου σήματος από τον σημειακό σκεδαστή p είναι μια συνάρτηση του $R_t = R(t)$ και $\theta_t = \theta(t)$:

$$s_p(t) = p(x, y, z) \exp\left\{j2\pi f_0 \frac{2R_p(t)}{c}\right\} = \rho(x, y, z) \exp\{j\Phi R_{pt}\} \quad (2.4)$$

όπου R_{pt} είναι μια συντομογραφία του $R_p(t)$, $\rho(x, y, z)$ είναι η συνάρτηση ανακλαστικότητας του σημειακού σκεδαστή P στο (x, y, z) και c είναι η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος διάδοσης. Η φάση του σήματος βασικής ζώνης είναι

$$\Phi(R_{pt}) = 2\pi f_0 \frac{R_p(t)}{c} \quad (2.5)$$

Λαμβάνοντας την χρονική παράγωγο της φάσης η ολίσθηση συχνότητας Doppler από την κίνηση του στόχου είναι κατά προσέγγιση

$$\begin{aligned} f_D &= \frac{2f_0}{c} \frac{d}{dt} R_p(t) \\ &= \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} [-x\Omega t \sin(\theta_0 + \Omega t - \alpha) - y\Omega \cos(\theta_0 + \Omega t - \alpha)] \\ &= \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} \{-x\Omega [\sin(\theta_0 - \alpha)\cos\Omega t + \cos(\theta_0 - \alpha)\sin\Omega t] \\ &\quad - y\Omega [\cos(\theta_0 - \alpha)\cos\Omega t - \sin(\theta_0 - \alpha)\sin\Omega t]\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

όπου χρησιμοποιούμε μόνο τους μηδενικούς και πρώτης τάξης όρους στην (2.1) και (2.2). Για δεδομένο ρυθμό περιστροφής και συμφασικό χρόνο

επεξεργασίας t εάν $\Omega^2 t^2 \ll 1$ και $\Omega^3 t^3 \ll \Omega t$ όπου για αυτό τον λόγο
 $\cos \Omega t = 1 - \Omega^2 t^2 / 2 + \dots \cong 1$ και $\sin \Omega t = \Omega t - \Omega^3 t^3 / 6 + \dots \cong \Omega t$ τότε έχουμε

$$\begin{aligned}
 f_D &\cong \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} \{-x\Omega[\sin(\theta_0 - \alpha) + \cos(\theta_0 - \alpha)\Omega t] \\
 &\quad - y\Omega[\cos(\theta_0 - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)\Omega t]\} \\
 &= \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} \{-[x \sin(\theta_0 - \alpha) + y \cos(\theta_0 - \alpha)]\Omega \\
 &\quad - [x \cos(\theta_0 - \alpha) - y \sin(\theta_0 - \alpha)]\Omega^2 t\} = f_{D_{Trans}} + f_{D_{Rot}}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

όπου η ολισθήση συχνότητας που προκαλείται από την μετατοπιστική κίνηση είναι

$$f_{D_{Trans}} = \frac{2f_0}{c} V_R \tag{2.8}$$

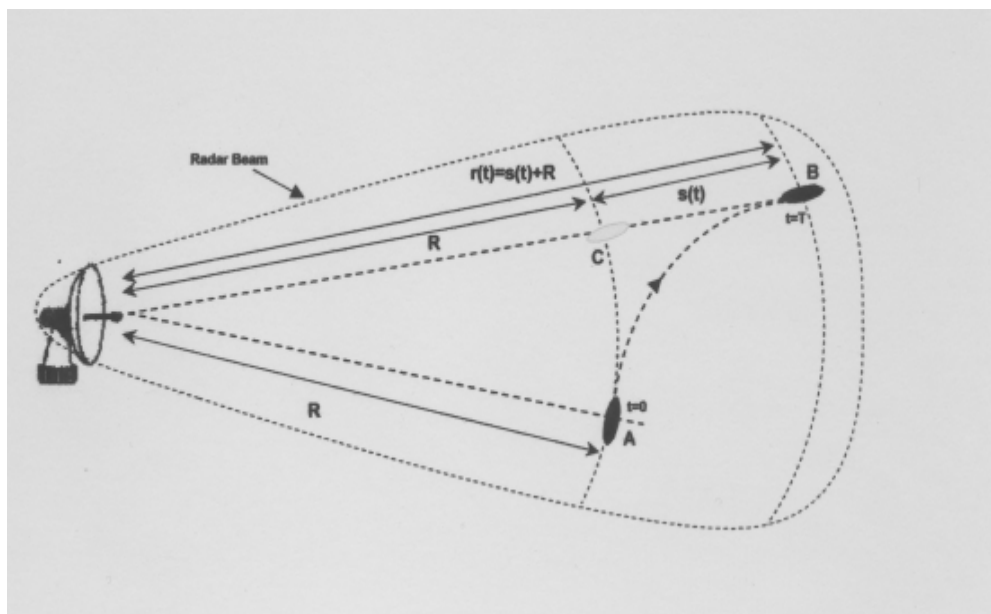
και αυτή που προκαλείται από την περιστροφική κίνηση είναι

$$\begin{aligned}
 f_{D_{Rot}} &= \frac{2f_0}{c} \{-[x \sin(\theta_0 - \alpha) + y \cos(\theta_0 - \alpha)]\Omega \\
 &\quad - [x \cos(\theta_0 - \alpha) - y \sin(\theta_0 - \alpha)]\Omega^2 t\}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (2.9) προέρχονται από τα γραμμικά και διγραμμικά μέρη της συνάρτησης φάσης αντίστοιχα. Μόνο ο πρώτος όρος από την σχέση (2.9) χρειάζεται για την απεικόνιση ISAR για να παραχθεί το συνθετικό άνοιγμα. Η μετατοπιστική ολισθήση της συχνότητας Doppler που φαίνεται από την σχέση (2.8) είναι σταθερή για όλους τους σκεδαστές πάνω στο στόχο και παράγει μια ομοιόμορφη (όχι διαφορική) ολισθήση Doppler. Αυτή η κίνηση δεν συνεισφέρει στην ανάλυση κατά διόπτευση και φυσικά στην απεικόνιση ISAR. Δυστυχώς αυτό το είδος της μετατοπιστικής κίνησης δημιουργεί το φαινόμενο Range-Walk [12]. Το Range-Walk αναφέρεται σε πολλές βιβλιογραφικές αναφορές ως κακή ρύθμιση της απόστασης (Range-Misalignment). Μετατοπιστική αντιστάθμιση κίνησης ονομάζουμε την εξάλειψη της σχετικής συνιστώσας φάσης από την φάση των

ληφθέντων σημάτων αφού υποθέσουμε τις παραμέτρους της μετατοπιστικής κίνησης. Ο όρος αντιστάθμισης της ακτινικής συνιστώσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά. Το διγραμμικό μέρος της ολίσθησης συχνότητας Doppler λόγω περιστροφικής κίνησης είναι μια συνάρτηση του χρόνου όπως φαίνεται από την σχέση (2.9). Άρα θα πρέπει να γίνει αντιστάθμιση εξαρτώμενη από την ισχύ του ρυθμού γωνιακής περιστροφής Ω ακόμα και αν έχει ήδη γίνει η αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης. Συνεπώς με δεδομένο τον γωνιακό ρυθμό περιστροφής την φέρουσα συχνότητα και την θέση των σκεδαστών (x, y, z) εάν το $\frac{2f_0}{c} [x \cos(\theta_0 - \alpha) - y \sin(\theta_0 - \alpha)] \Omega^2$ δεν μπορεί να αμεληθεί τότε η ολίσθηση συχνότητας Doppler λόγω περιστροφικής κίνησης είναι χρονικά μεταβαλλόμενη ακόμα και αν ο ρυθμός γωνιακής περιστροφής Ω είναι σταθερός.

Η κίνηση των στόχων θα μπορούσε να γενικευτεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2.



Σχήμα 2-2. Στόχος με γενική κίνηση

Η τυπική τροχιά φαίνεται από την εστιγμένη γραμμή μεταξύ των σημείων A και B. Το T αναπαριστά τον συμφασικό χρόνο ολοκλήρωσης (CPI). Το σημείο A είναι η θέση του στόχου στον χρόνο έναρξης $t=0$ επεξεργασίας της

εικόνας. Β είναι το σημείο που φθάνει ο στόχος στο τέλος του συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας $t = T$. Έπειτα η κίνηση του στόχου θα μπορούσε να αναλυθεί σε τρία μέρη: α) Την κυκλική κίνηση του στόχου γύρω από το ραντάρ σε σταθερή απόσταση R . β) Την μετατοπιστική κίνηση του στόχου κατά μήκος της γραμμής οπτικής επαφής (LOS) και γ) Την περιστροφική κίνηση γύρω από το σημείο αναφοράς [13].

Βασιζόμενοι στο επιστρεφόμενο σήμα από τον μονό σημειακό σκεδαστή το επιστρεφόμενο σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως το ολοκλήρωμα των επιστρεφόμενων σημάτων από όλους τους σκεδαστές του στόχου:

$$s_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, z) \exp\left\{-j2\pi f_0 \frac{2R_p(t)}{c}\right\} dx dy dz \quad (2.10)$$

$$\text{for } 2R_p(t)/c \leq t \leq T_{PRI} + 2R_p(t)/c$$

όπου T_{PRI} είναι το PRI του εκπεμπόμενου σήματος. Για στόχο που έχει μετατοπιστική και περιστροφική κίνηση και υποθέτοντας για απλούστευση ότι η αζιμουθιακή γωνία α του στόχου είναι μηδενική η απόσταση του σημειακού σκεδαστή στο $(x, y, z = 0)$ σύστημα συντεταγμένων του στόχου μπορεί να ξαναγραφτεί ως

$$s_R(t) = \exp\left\{-j4\pi f_0 R(t)/c\right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, z) \exp\left\{-j2\pi [xf_x(t) - yf_y(t)]\right\} dx dy dz \quad (2.11)$$

$$\text{for } 2R_p(t)/c \leq t \leq T_{PRI} + 2R_p(t)/c$$

όπου οι συνιστώσες της χωρικής συχνότητας προσδιορίζονται από

$$f_x(t) = \frac{2f_0}{c} \cos \theta(t) \quad (2.12)$$

και

$$f_y(t) = \frac{2f_0}{c} \sin \theta(t) \quad (2.13)$$

Από την (2.11) γνωρίζουμε ότι αν η αρχική απόσταση R_0 του στόχου είναι γνωστή και η ταχύτητα V_R και η επιτάχυνση α_R της κίνησης του στόχου είναι επίσης γνωστά μέσω ολόκληρου του συμφασικού διαστήματος ολοκλήρωσης τότε ο εξωτερικός όρος φάσης της κίνησης $\exp\{-j4\pi f_0 R(t)/c\}$ μπορεί να απαλειφθεί πολλαπλασιάζοντας το $\exp\{j4\pi f_0 R(t)/c\}$ σε αμφότερες τις πλευρές της (2.11). Έτσι η πυκνότητα ανακλαστικότητας $\rho(x, y, z)$ του στόχου μπορεί απλά να ληφθεί λαμβάνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της αντισταθμισμένης φάσης του σήματος βασικής ζώνης $s_R(t)\exp\{j4\pi f_0 R(t)/c\}$. Η διαδικασία εκτίμησης της κίνησης του στόχου και η απαλειφή του εξωτερικού όρου φάσης ονομάζεται ιχνηλασία απόστασης (range tracking). Είναι το θεμελιώδες βήμα της διαδικασίας της κανονικής αντιστάθμισης κίνησης (motion compensation) που επίσης ονομάζεται και συνηθισμένη αντιστάθμιση κίνησης (coarse motion compensation). Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του στόχου. Με σκοπό να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλα τον μετασχηματισμό Fourier πρέπει να ικανοποιούνται προκαθορισμένες συνθήκες. Κατά την διάρκεια του συμφασικού χρόνου ολοκλήρωσης της απεικόνισης οι σκεδαστές πρέπει να παραμείνουν στα κελιά απόστασης (range-cells) και οι ολισθήσεις συχνότητας Doppler πρέπει να είναι σταθερές. Εάν οι σκεδαστές μετακινηθούν έξω από τα κελιά τους ή οι ολισθήσεις συχνότητας είναι χρονικά μεταβαλλόμενες τότε η εικόνα που ανακατασκευάζεται χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier καθίσταται θολή. Μόνο με την διαδικασία της ιχνηλασίας απόστασης και χωρίς την εφαρμογή οποιασδήποτε αντιστάθμισης φάσης μπορεί οι ολισθήσεις συχνότητας Doppler να είναι ακόμα χρονικά μεταβαλλόμενες. Έτσι η εξαιρετική αντιστάθμιση κίνησης που ονομάζεται και ιχνηλασία Doppler (Doppler-tracking) θα μπορούσε να εφαρμοσθεί για να γίνει η αντιστάθμιση φάσης και, για αυτό τον λόγο, οι ολισθήσεις Doppler είναι σταθερές. Η

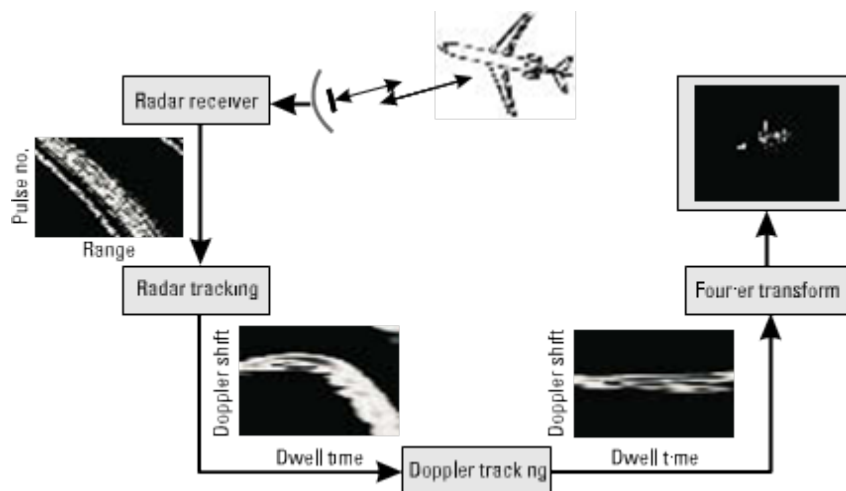
ιχνηλασία της απόστασης και η ιχνηλασία Doppler είναι οι βάσεις της κανονικής αντιστάθμισης κίνησης.

2.3 Κλασικός τρόπος αντιστάθμισης κίνησης

Για να παράγουμε μια καθαρή εικόνα ραντάρ πρέπει να εφαρμοσθούν οι αλγόριθμοι αντιστάθμισης κίνησης. Σκοπός της αντιστάθμισης κίνησης είναι να προεπεξεργασθούμε τα δεδομένα ώστε ο σχηματισμός εικόνας με συμβατικό Fourier να μπορεί να εφαρμοσθεί για να λάβουμε μια καλά εστιασμένη εικόνα ραντάρ. Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο εδάφιο για να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλα τον μετασχηματισμό Fourier που βασίζεται στον σχηματισμό εικόνας οι ακόλουθες συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται κατά την διάρκεια του συμφασικού χρόνου επεξεργασίας της εικόνας: (1) οι σκεδαστές του στόχου πρέπει να μη μετακινούνται μέσα στα κελιά απόστασης και (2) οι ολισθήσεις συχνότητας Doppler πρέπει να είναι σταθερές. Εάν οι σκεδαστές ολισθαίνουν έξω από τα κελιά τους ή οι ολισθήσεις συχνότητας Doppler είναι χρονικά μεταβαλλόμενες το φάσμα Doppler που λαμβάνεται από τον μετασχηματισμό Fourier γίνεται κηλιδωμένο και η εικόνα του ραντάρ καθίσταται θολή. Η κανονική αντιστάθμιση κίνησης περιλαμβάνει την ιχνηλασία απόστασης (range-tracking) με εφαρμογή της ευθυγράμμισης απόστασης (range-bin alignment) [14] και της ιχνηλασίας Doppler (Doppler tracking) με εφαρμογή της διόρθωσης φάσης ή αντιστάθμισης [15], [16]. Η ιχνηλασία απόστασης διατηρεί τους σκεδαστές στα κελιά απόστασης. Η ιχνηλασία Doppler καθιστά τις ολισθήσεις Doppler σταθερές όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2-3. Συνεπώς μετά την αντιστάθμιση κίνησης όλοι οι σκεδαστές του στόχου εμφανίζονται να είναι μετακινούμενοι με σταθερή ταχύτητα (που οφείλεται στην σταθερή συχνότητα ολισθησης Doppler) κατά μήκος ενός κύκλου (που οφείλεται στην σταθερή απόσταση). Η ιχνηλασία απόστασης ή η διαδικασία ευθυγράμμισης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης η οποία βρίσκει τα μη ευθυγραμμισμένα κελιά απόστασης σε σχέση με το προφίλ απόστασης αναφοράς και έπειτα πραγματοποιείται η ευθυγράμμιση απόστασης για όλα τα προφίλ απόστασης.

Η ιχνηλασία Doppler πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την μέθοδο αντιστάθμισης φάσης. Η διαδικασία αντιστάθμισης φάσης συνήθως περιλαμβάνει τρία βήματα: (1) έρευνα για ένα ή περισσότερα κελιά απόστασης αναφοράς χρησιμοποιώντας τα κριτήρια τέτοια όπως η ελάχιστη διακύμανση, (2) παίρνοντας τον συζυγή μιγαδικό της φάσης των κελιών απόστασης αναφοράς, και (3) κάνοντας την διόρθωση φάσης για όλα τα κελιά απόστασης αναφοράς χρησιμοποιώντας τον συζυγή μιγαδικό. Το Σχήμα 2-3 επεξηγεί το διάγραμμα της κανονικής αντιστάθμισης κίνησης και δείχνει τα αποτελέσματα της ιχνηλασίας απόστασης και της ιχνηλασίας Doppler. Εάν ο στόχος κινείται ομαλά, η κανονική αντιστάθμιση κίνησης είναι αρκετά καλή για να παραχθεί καθαρή εικόνα του στόχου χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier. Ωστόσο όταν ο στόχος παρουσιάζει σύνθετη κίνηση τέτοια όπως περιστροφή επιτάχυνση ή ελιγμό η κανονική αντιστάθμιση κίνησης δεν είναι αρκετή για να παραχθεί μια αποδεκτή εικόνα για εξέταση και ανάλυση. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται περισσότεροι εξελιγμένοι αλγόριθμοι για την αντιστάθμιση των κινήσεων των ξεχωριστών σκεδαστών τέτοιοι όπως του polar reformatting και άλλων πιο πολύπλοκων αλγορίθμων. Κάθε σκεδαστής μπορεί να παραμείνει στο κελί του και η συχνότητα ολίσθησης Doppler γίνεται πιο σταθερή. Έπειτα ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί κατάλληλα να εφαρμοσθεί για να ανακατασκευασθεί η καθαρή εικόνα του στόχου [17]. Η πολική επαναδιαμόρφωση (polar reformatting) η οποία μπορεί να διορθώσει την περιστροφική κίνηση για ξεχωριστούς σκεδαστές απαιτεί την εκ νέου δειγματοληψία των δεδομένων έτσι ώστε τα σημεία του δείγματος πάνω στο πλέγμα της πολικής δειγματοληψίας να συμμορφώνονται προς τα επιθυμητά σημεία δείγματος πάνω στο ορθογώνιο πλέγμα δειγματοληψίας. Επιπλέον για να πραγματοποιήσουμε την πολική επαναδιαμόρφωση απαιτούνται μερικές αρχικές κινηματικές παράμετροι του στόχου. Εάν η εξελιγμένη αντιστάθμιση κίνησης δεν είναι επαρκής οι ξεχωριστοί σκεδαστές μπορεί να ολισθήσουν στα κελιά απόστασης και οι ολισθήσεις συχνότητας Doppler μπορεί να είναι χρονικά μεταβαλλόμενες. Η προκύπτουσα εικόνα θα είναι θολωμένη αν εφαρμοσθεί ο συμβατικός μετασχηματισμός Fourier. Ωστόσο ο περιορισμός του μετασχηματισμού Fourier μπορεί να καταστρατηγηθεί αν αντικατασταθεί με τον μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας. Εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς της

ολίσθησης συχνότητας Doppler μια αποδοτική μέθοδος για να λύσει το πρόβλημα της κηλίδωσης του φάσματος συχνοτήτων Fourier άρα και της θόλωσης εικόνας είναι η εφαρμογή μετασχηματισμού χρόνου-συχνότητας υψηλής ανάλυσης στην επεξεργασία Doppler. Με αυτό τον τρόπο η θόλωση της εικόνας που δημιουργείται από τις χρονικά μεταβαλλόμενες ολισθήσεις συχνότητας Doppler μπορεί να μετριαστεί χωρίς την εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων αντιστάθμισης κίνησης [18].



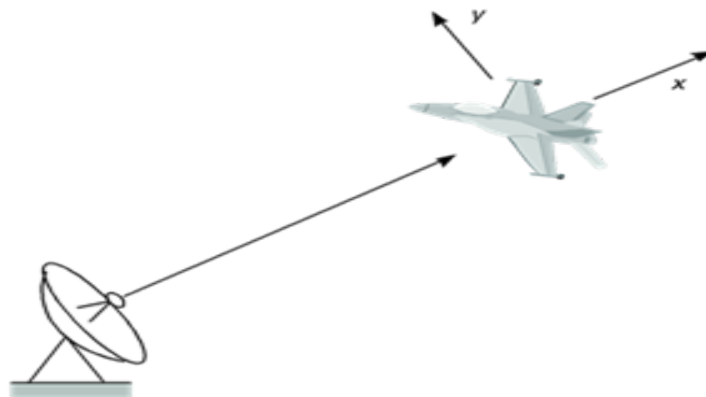
Σχήμα 2-3. Διάγραμμα κανονικής αντιστάθμισης κίνησης

2.4 Αλγόριθμοι αντιστάθμισης

Το ραντάρ ανάστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR) είναι μια τεχνική ραντάρ ώστε να λάβουμε εικόνα υψηλής ανάλυσης από κινούμενο στόχο. Χρησιμοποιείται εκπεμπόμενο σήμα μεγάλου εύρους ζώνης για να λάβουμε υψηλή ανάλυση απόστασης, ενώ η υψηλή ανάλυση κατά διόπτευση εξαρτάται από την μεγάλη μεταβολή της γωνίας θέασης του στόχου κατά την διάρκεια του συμφασικού χρόνου ολοκλήρωσης (CPI).

Στον πραγματικό κόσμο συλλογής δεδομένων ISAR ο στόχος που είναι να απεικονισθεί συνήθως εμπλέκεται σε πολύπλοκους ελιγμούς που συνδυάζουν μετατοπιστικές και περιστροφικές κινήσεις (βλέπε Σχήμα 2-4), εκτός και αν ένας καλός αλγόριθμος αντιστάθμισης κίνησης εκπληρωθεί.

Οι εικόνες ISAR συνήθως θολώνουν εξαιτίας των συνιστωσών κίνησης του στόχου. Η κίνηση του στόχου αναλύεται στην μετατοπιστική συνιστώσα (translational component) και στην περιστροφική συνιστώσα (rotational component) [19], [4]. Η μετατοπιστική συνιστώσα παραπέρα αναλύεται σε ακτινική και εφαπτομενική συνιστώσα ενώ η περιστροφική κίνηση έχει τρεις συνιστώσες θέσης: ολίσθηση (yaw), πρόνευση (pitch) και περιστροφή (roll). Η ακτινική συνιστώσα της μετατοπιστικής κίνησης (δηλαδή η συνιστώσα κατά μήκος της γραμμής οπτικής επαφής-LOS) είναι ανεπιθύμητη επειδή δεν εισάγει μεταβολή της γωνίας θέασης του στόχου, δηλαδή δεν παράγει κλίση Doppler μέσω των σκεδαστών που είναι τοποθετημένοι μέσα στο ίδιο κελί απόστασης, με αποτέλεσμα αυτή η συνιστώσα να δημιουργεί μεγάλο θόλωμα στις εικόνες ISAR. Το υπόλοιπο από τις συνιστώσες κίνησης μπορεί να παράγει την επιθυμητή κλίση doppler μέσω των σκεδαστών και ως εκ τούτου να λαμβάνεται η αμφίδρομη πληροφορία. Είναι αληθές ότι η περιστροφική κίνηση (και η εφαπτομενική συνιστώσα της μετατοπιστικής κίνησης) μπορεί να παράγει φαινόμενα θόλωσης πάνω στις εικόνες [1], που ονομάζεται μετακίνηση μέσω των κελιών ανάλυσης (MTRC-Migration Through Resolution Cell). Αυτά τα φαινόμενα έχουν μικρότερου μεγέθους σημασία σε σύγκριση με το μεγάλο θόλωμα που παράγεται από την ακτινική συνιστώσα της μετατοπιστικής συνιστώσας η οποία πάντα πρέπει να αντισταθμίζεται .



Σχήμα 2-4. Σύνθετη κίνηση στόχου ISAR ως συνδυασμός μετατοπιστικών και περιστροφικών κινήσεων σε σχέση με το ραντάρ

Σοβαρό δε θόλωμα μπορεί να προκύψει στην σχηματισμένη εικόνα ISAR από τον μετασχηματισμό Fourier ο οποίος υποθέτει ότι όλοι οι σκεδαστές στο κελί απόστασης συμπεριφέρονται με γραμμική φάση μέσω διαφορετικών

παλμών. Ο αλγόριθμος αντιστάθμισης κίνησης τυπικά αποτελείται από δύο μέρη, την ιχνηλασία απόστασης και την ιχνηλασία Doppler. Ανάμεσα από όλους τους υφιστάμενους αλγόριθμους αντιστάθμισης κίνησης ο τρόπος με τον οποίο η ευθυγράμμιση απόστασης πραγματοποιείται είναι ένα αμερόληπτο κριτήριο. Αυτό πραγματοποιείται με ιχνηλασία της κίνησης του σημείου αναφοράς (παρόμοιο με εμφανή κορυφή ή του κέντρου μάζης του προφίλ απόστασης) μέσω πολλαπλών παλμών και προσαρμογή του σε πολυώνυμο χαμηλής τάξης [2]. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας κακής ποιότητας (τραχείας) ευθυγράμμισης απόστασης (coarse range alignment) επιτρέπει στον σημειακό σκεδαστή να είναι τακτοποιημένος μέσα στο ίδιο bin απόστασης δια μέσου όλων των παλμών. Ωστόσο η ακρίβεια αυτής της ευθυγράμμισης περιορίζεται από την κατά μήκος ανάλυση απόστασης (range resolution) που είναι τυπικά δεκάδες εκατοστόμετρα. Δεν είναι αρκετό να υπερνικήσουμε τα σφάλματα φάσης που μετρούνται αναφορικά με το μήκος κύματος λειτουργίας του ραντάρ που τυπικά είναι λίγα εκατοστόμετρα.

Συνεπώς η ιχνηλασία Doppler πρέπει να πραγματοποιηθεί για την ευθυγράμμιση της φάσης. Υπάρχουν διάφορα πλάνα για να πραγματοποιήσουμε την ιχνηλασία Doppler που περιλαμβάνει την προσέγγιση του υπο-ανοίγματος (sub-aperture approach) [15], [20], την προσέγγιση ιχνηλασίας του κέντρου μάζης της κατά πλάτος απόστασης (cross-range centroid tracking approach) [21] και την τεχνική PGA (phase gradient autofocus). Αυτές οι μέθοδοι θεωρούν τις ολισθήσεις συχνότητας Doppler του στόχου συνολικά και εφαρμόζουν το ίδιο διάνυσμα διόρθωσης σε όλους τους σκεδαστές της εικόνας. Αυτό είναι αποδοτικό όταν η μετατοπιστική κίνηση είναι η επικρατέστερη. Όταν το συμφασικό διάστημα επεξεργασίας είναι μεγάλο ή όταν ο στόχος εμφανίζει μεγάλους ελιγμούς το σφάλμα φάσης που οφείλεται στην μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση είναι συχνά αμελητέο και πρέπει κατάλληλα να αντισταθμιστεί. Ένα χρήσιμο σχήμα για να πραγματοποιηθεί αυτή η λειτουργία είναι ο αλγόριθμος της πολλαπλής επικρατέστερης σημειακής επεξεργασίας (ppp-prominent point processing) [22], [23]. Η βασική ιδέα του αλγόριθμου της πολλαπλής προεξέχουσας σημειακής επεξεργασίας είναι η ανίχνευση ενός ή περισσότερων σημειακών σκεδαστών στην εικόνα με σκοπό τη εξαγωγή των παραμέτρων κίνησης. Αφού οι παράμετροι κίνησης είναι γνωστές η αντίσταθμιση αμφοτέρων των

μετατοπιστικών και περιστροφικών κινήσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί. Η κύρια πρόκληση στην εφαρμογή του αλγόριθμου της πολλαπλής προεξέχουσας σημειακής επεξεργασίας είναι η επιλογή των εμφανών σημειακών σκεδαστών οι οποίοι θα μπορούσαν να απομονωθούν καλά στα δικά τους αντίστοιχα κελιά απόστασης. Στην πράξη τέτοια είδη σημειακών σκεδαστών είναι δύσκολο να εντοπιστούν με ακρίβεια ή δεν είναι καθόλου διαθέσιμοι.

Ένας άλλος αλγόριθμος που έχει παρουσιαστεί πρόσφατα στην βιβλιογραφία είναι η ρύθμιση του υποακέραιου κελιού απόστασης (sub-integer range bin alignment) ο οποίος εγγυάται την αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης. Συγκεκριμένα βασίζεται πάνω στην κλασική μέθοδο συσχέτισης της περιβάλλουσας και την χρήση των προφίλ απόστασης.

Η προτεινόμενη μέθοδος κάνει χρήση των προφίλ αναφοράς με σκοπό να μετριάσουμε το φαινόμενο συσσώρευσης σφάλματος και τις επιπτώσεις από τον σπινθηρισμό του στόχου [24], τους τυπικούς περιορισμούς από τις προγενέστερες προσεγγίσεις για την ευθυγράμμιση του κελιού απόστασης τέτοιες όπως οι μέθοδοι για την ιχνηλασία της κορυφής και του κέντρου μάζας (the peak and centroid tracking methods).

Επιπλέον αυτή η τεχνική κάνει ευθυγράμμιση του υποακέραιου κελιού απόστασης που μας παρέχει πολύ καλή ρύθμιση του προφίλ απόστασης. Η προσέγγιση της ευθυγράμμισης του υποακέραιου κελιού απόστασης βασίζεται πάνω στο στάδιο βελτιστοποίησης που έχει προσεκτικά σχεδιαστεί με σκοπό την αποφυγή πιθανής σύγκλισης με τοπικό μέγιστο. Η μέθοδος είναι εύρωστη έναντι του θορύβου, επιστρεφόμενων ανακλάσεων (clutter) και σπινθηρισμού του στόχου (target scintillation). Επιπλέον κατάλληλα λύνει το πρόβλημα της συσσώρευσης σφάλματος. Η απόδοση της μεθόδου είναι όμοια με τις ισχύουσες μεθόδους προηγμένης τεχνολογίας τέτοιες όπως η προσέγγιση της γενικής ευθυγράμμισης της απόστασης (global range alignment approach) [25] και η τεχνική που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας (minimum entropy-based technique) [26], αν και παρέχει δυο καθαρά πλεονεκτήματα. Η μέθοδος κατάλληλα λύνει τις ακραίες καταστάσεις με τις μεγάλες ολισθήσεις απόστασης από παλμό σε παλμό (αντίθετα προς τον αλγόριθμο της γενικής ευθυγράμμισης απόστασης) και έχει επιπλέον την ικανότητα να παράγει πολύ καλές υποακέραιες ρυθμίσεις απόστασης μέσω

μιας ευρείας περιοχής αντισταθμίσεων (σε αντίθεση με την μέθοδο που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εντροπίας). Επιπλέον η προσεκτική σχεδίαση της μεθόδου έναντι του τοπικού μεγίστου την κάνει πολύ εύρωστη όπως φαίνεται εδώ για τα ελεγχόμενα εξομειωμένα παραδείγματα για τα οποία οι μέθοδοι προηγμένης τεχνολογίας έχουν προβλήματα σύγκλισης.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί την ετεροσυσχέτιση των προφίλ απόστασης με σκοπό να εκτιμήσει την κακή ευθυγράμμιση μεταξύ αυτών.

Η συσχέτιση δεν υπολογίζεται μεταξύ του παρόντος προφίλ απόστασης και του προηγούμενου που θα μπορούσε να προκαλέσει την παραγωγή του ανεπιθύμητου φαινομένου της συσσώρευσης σφάλματος. Αντιθέτως, η ετεροσυσχέτιση υπολογίζεται μεταξύ του παρόντος προφίλ απόστασης και ενός προφίλ αναφοράς σαν ένας συνδυασμός των προηγούμενων ευθυγραμμισμένων προφίλ απόστασης. Αυτό μειώνει το φαινόμενο της συσσώρευσης σφάλματος και παρέχει ευρωστία έναντι του θορύβου, εμποδίου (clutter) και σπινθηρισμού του στόχου. Επιπλέον η προτεινόμενη ευθυγράμμιση μεταξύ των παρόντων προφίλ απόστασης και των προφίλ αναφοράς μπορεί να είναι ένα κλάσμα του ενός κελιού απόστασης παρέχοντας την μέθοδο με την ικανότητα του υποακέραιου. Αυτή η καλή ευθυγράμμιση πραγματοποιείται μετά από τη σχεδίαση του σταδίου βελτιστοποίησης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δυνατότητα σύγκλισης με το τοπικό μέγιστο.

2.5 Μελέτη της μετατοπιστικής κίνησης για ISAR

2.5.1 Εισαγωγή

Η μετατοπιστική κίνηση του στόχου μπορεί να προκαλέσει δύο ανεπιθύμητα φαινόμενα τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια εστίασης της εικόνας του στόχου. Το πρώτο είναι ο βηματισμός απόστασης (range walk) και το δεύτερο είναι η απόκλιση απόστασης (range offset).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θεωρούμε ότι η μετατοπιστική κίνηση του στόχου έχει πραγματοποιηθεί και επομένως χρησιμοποιούμε την

ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση του στόχου όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο 4.

Επίσης περιγράφουμε λεπτομερώς την μαθηματική ανάλυση της μετατοπιστικής κίνησης για τον βηματισμό απόστασης (range walk) και την απόκλιση απόστασης (range offset), καθώς και την διόρθωση της μετατοπιστικής κίνησης για συνθετικά δεδομένα ISAR.

2.5.2 Αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης

Έστω σημειακός στόχος κινούμενος με σταθερή ταχύτητα v_t . Η απεικόνιση του στόχου γίνεται με την χρήση σειτ παλμών βηματικής συχνότητας και συγκεκριμένα με την χρήση N ριπών αποτελούμενων από M παλμούς εκπομπής συχνότητας f_0 έως f_{M-1} .

Η περίοδος μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών της κάθε ριπής είναι T_2 και η δειγματοληψία για την συχνότητα m της ριπής n γίνεται την χρονική στιγμή $t = S_{m,n}$. Η συνολική χρονική καθυστέρηση του στόχου μέσα στο παράθυρο απόστασης σε σχέση με την φάση της λήψης δίδεται από την ακόλουθη σχέση [12]:

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\psi(f, v_t))}{df} \quad (2.14)$$

Το μέρος της συνολικής αυτής καθυστέρησης που συσχετίζεται με την ταχύτητα του στόχου είναι η συνολική καθυστέρηση της σχέσης (2.14) μείον την καθυστέρηση λόγω της απόστασης R του στόχου από το ραντάρ, δηλαδή

$$\tau_v = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\psi(f, v_t))}{df} - \frac{2R}{c} \quad (2.15)$$

Κάνοντας την θεώρηση ότι κατά την διάρκεια μίας ριπής υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της φάσης της λήψης και της συχνότητας, υπολογίζουμε ότι η φάση της n -οστής ριπής θα είναι

$$\psi(f, v_t) = \frac{\psi_{M-1,n} - \psi_{0,n}}{(M-1)\Delta f} \quad (2.16)$$

Η φάση των δεδομένων ανάκλασης μίας ριπής την χρονική στιγμή δειγματοληψίας $S_{m,n} = (m + Mn)T_2 + T_{RX} + \frac{2R}{c}$ (ύστερα από n ριπές) θα είναι

$$\psi_{m,n} = -2\pi f_m \left(\frac{2R}{c} - \frac{2v_t}{c} S_{m,n} \right) = -2\pi f_m \left[\frac{2R}{c} - \frac{2v_t}{c} (m + Mn)T_p + \tau_{RX} + \frac{2R}{c} \right] \quad (2.17)$$

όπου T_{RX} η χρονική καθυστέρηση του δέκτη του ραντάρ. Θεωρώντας ότι $n \gg 1$ και παίρνοντας υπόψη ότι $f_m = f_0 + m\Delta f$ έχουμε από τις σχέσεις (2.16) και (2.17) ότι

$$\psi(f, v_t) = 2\pi f_m \left[\frac{2v_t}{c} \frac{f_0 T_p + \Delta f \left(\tau_{RX} + \frac{2R}{c} + MnT_p \right)}{\Delta f} - \frac{2R}{c} \right] \quad (2.18)$$

Από τις σχέσεις (2.15) και (2.18) έχουμε ότι η χρονική καθυστέρηση που σχετίζεται με την ταχύτητα του στόχου θα είναι

$$\tau_v = \frac{2v_t}{c\Delta f} \left[f_0 T_p + \Delta f \left(\tau_{RX} + \frac{2R}{c} + MnT_p \right) \right] \quad (2.19)$$

Για ευκρίνεια χρόνου καθυστέρησης $\Delta f = 1/(M\Delta f)$, η ολίσθηση απόστασης μετρούμενη σε κελιά απόστασης θα είναι

$$L = \frac{\tau_v}{\Delta t} = M\Delta f \tau_v = \frac{2Mv_t}{c} \left[f_0 T_p + \Delta f \left(\tau_{RX} + \frac{2R}{c} + MnT_p \right) \right] \quad (2.20)$$

Επειδή ενδιαφερόμαστε για την ολίσθηση τουλάχιστον ενός συνθετικού προφίλ απόστασης έχουμε ότι ισχύει

$$MnT_2 \gg T_{RX} + \frac{2R}{c} \quad (2.21)$$

οπότε η σχέση (2.20) γίνεται

$$L \approx -\frac{2MT_p}{c}(f_0 + MN\Delta f)v_i = -\left[\frac{2(MT_p)}{c}f_0 + \frac{2N(MT_p)M\Delta f}{c}\right]v_i \quad (2.22)$$

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος της σχέσης (2.22) καλείται αντιστάθμισμα απόστασης (range offset) και ο δεύτερος όρος απόκλιση απόστασης (range walk). Είναι προφανές ότι η μη διόρθωση της απόκλισης απόστασης θα προκαλέσει μετατόπιση της λήψης σκεδαστών σε γειτονικά κελιά απόστασης, μείωση της ευκρίνειας της κάθετης απόστασης και τελικά αλλοίωση της εικόνας του στόχου.

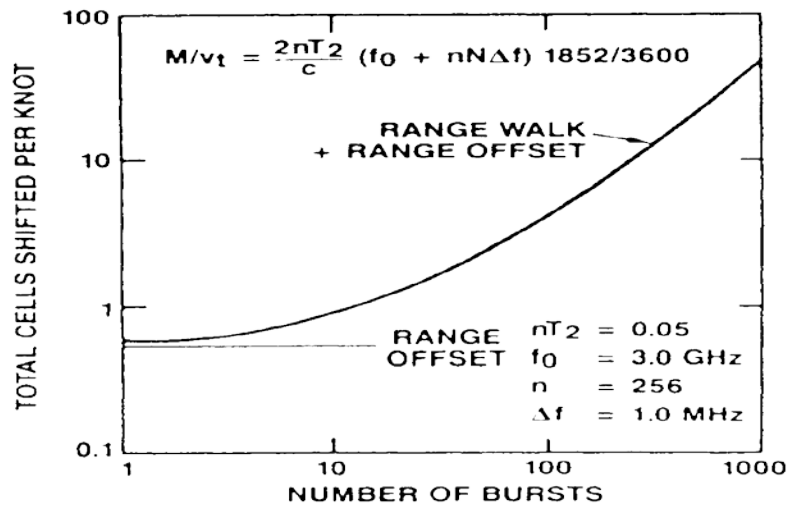
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα η αντιστάθμιση της μεταφορικής κίνησης του στόχου μπορεί να γίνει μέσω του πολλαπλασιασμού των δειγμάτων της λήψης.

$$U_{m,n} = Ae^{-i4\pi f_m R_{m,n}/c} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) e^{-i2\pi(xf_x(m,n) - yf_y(m,n))} dx dy = Ae^{-i4\pi f_m R_{m,n}/c} J_{m,n} \quad (2.23)$$

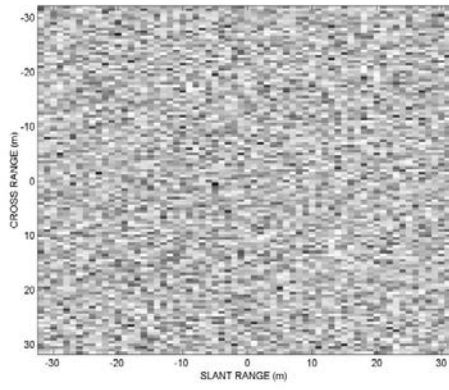
Το μέγεθος της σχέσης (2.23) αντιπροσωπεύει τα δεδομένα ανακλαστικότητας όταν γίνει η αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης του στόχου μέσω του πολλαπλασιασμού του $U_{m,n}$ με τον διορθωτικό όρο $g_{m,n} = e^{i4\pi f_m R_{m,n}/c}$ όπου $\tilde{R}_{m,n}$ είναι οι ιδανικές εκτιμήσεις της απόστασης. Στην περίπτωση επιχειρησιακών σεναρίων είναι προφανές ότι οι εκτιμήσεις της απόστασης δεν είναι σε καμία περίπτωση ιδανικές και συνεπώς απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων μεθόδων προκειμένου να επιτευχθεί η εκτίμηση της απόστασης και της ταχύτητας του στόχου σε σχέση με το ραντάρ και τελικά η αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης του στόχου. Τέτοιες μέθοδοι είναι η μέθοδος της ελάχιστης εντροπίας της εικόνας του στόχου [27], η μέθοδος της παράγωγης ριπής (Burst Derivative Approach) [28], η μέθοδος διαφοράς φάσης (Phase Difference Method) [29], η μέθοδος εκτίμησης παραμέτρων

κίνησης ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares Motion Parameter Estimation), [27], (Barshalom), συνδιασμένες μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας όπως η μέθοδος Short Time Fourier Transform – STFT [27] και άλλες.

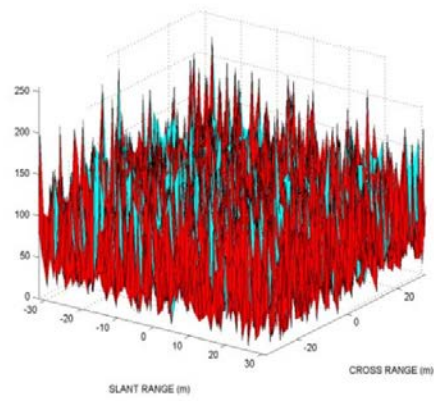
Στο Σχήμα (2-5) φαίνεται μια γραφική παράσταση της σχέσης (2.22) όπου έχουν χρησιμοποιηθεί παράμετροι μιας απεικόνισης ISAR με δεδομένα ανακλαστικότητας πραγματικού στόχου [12].



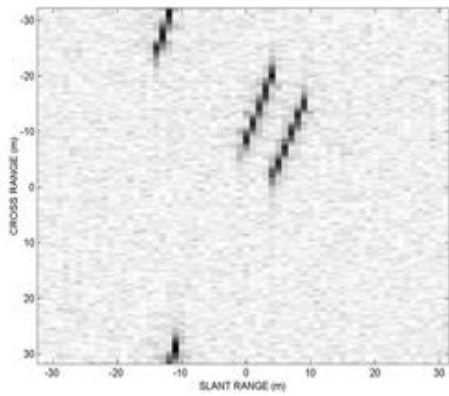
Σχήμα 2-5. Απόκλιση κελιών απόστασης λόγω μετατοπιστικής κίνησης στόχου



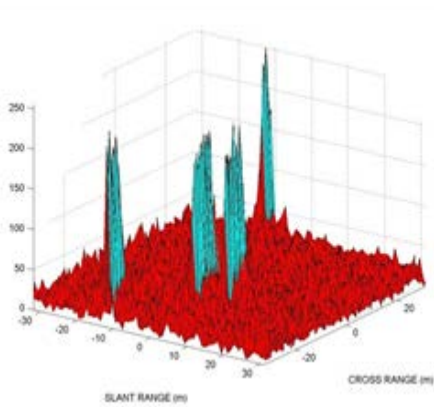
(a)



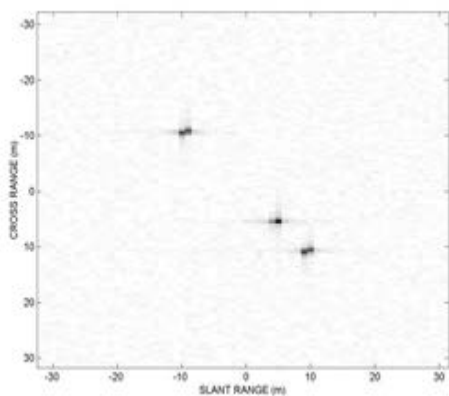
(b)



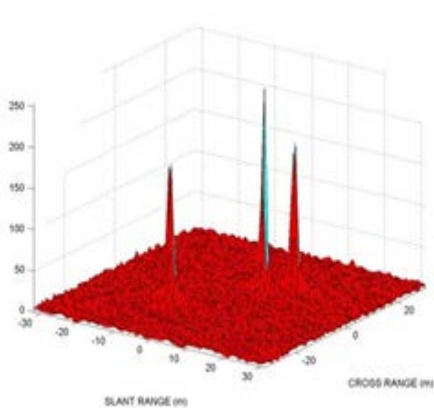
(c)



(d)



(e)



(f)

Σχήμα 2-6. Αντιστάθμιση μεταφορικής κίνησης τριών σημειακών στόχων

Στο Σχήμα (2-6) φαίνεται η απεικόνιση τριών σημειακών στόχων, οι οποίοι έχουν μετατοπιστική ταχύτητα $210m/sec$. Αρχικά απεικονίζεται η εικόνα του στόχου χωρίς αντιστάθμιση μετατοπιστικής κίνησης (μέθοδος εντροπίας εικόνας) και τέλος με πλήρη αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης.

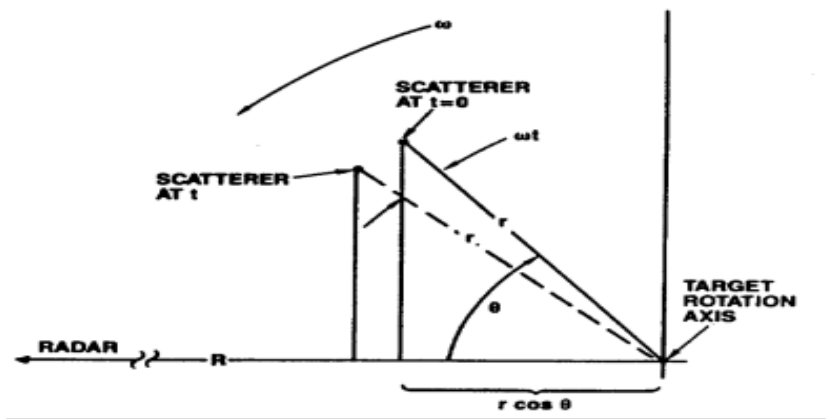
Επισημαίνεται ότι η αντιστάθμιση της κίνησης του στόχου στην περίπτωση χρήσης σετ παλμών βηματικής συχνότητας μπορεί να γίνει μετά την δειγματοληψία της λήψης του ραντάρ.

2.6 Αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης

2.6.1 Σκεδαστής περιστρεφόμενου στόχου

Η παραγόμενη από την απεικόνιση ISAR εικόνα ενός στόχου μπορεί να αλλοιωθεί και από την περιστροφή του στόχου αν αυτή η περιστροφή του στόχου είναι ο βασικός λόγος που επιτρέπει την απεικόνιση κατά την διάσταση της κάθετης απόστασης. Θεωρητικά η γωνία περιστροφής του στόχου κατά την διάρκεια του χρόνου που απαιτείται για την απεικόνιση, είναι αρκετά μικρή ώστε τόσο η συχνότητα Doppler που παράγεται από τους σκεδαστές του στόχου όσο και η μεταβολή της απόστασης των σκεδαστών κατά την διάρκεια του χρόνου παραγωγής της εικόνας να είναι μικρότερες από τις ευκρίνειες κάθετης απόστασης και απόστασης αντίστοιχα. Αυτό όμως είναι μια ιδανική κατάσταση η οποία δεν είναι πάντα εφικτή, κυρίως στην περίπτωση πραγματικών στόχων.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την μετατόπιση της συχνότητας Doppler που προκαλείται όταν ο σκεδαστής στο Σχήμα 2-7 περιστραφεί κατά γωνία ωt , όταν αρχικά βρίσκεται σε γωνία θ σε σχέση με τον άξονα οπτικής επαφής του ραντάρ και σε κάθετη απόσταση r από το κέντρο περιστροφής του στόχου.



Σχήμα 2-7. Σκεδαστής περιστρεφόμενου στόχου

Η φυσική περιστροφή του στόχου προκαλεί χρονική καθυστέρηση της λήψης από τον σκεδαστή. Η καθυστέρηση απόστασης (range delay) του σκεδαστή θα είναι

$$\tau(t) = \frac{2}{c} [R - v_t - r \cos(\omega t - \theta)] \quad (2.24)$$

Μετά την αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης του στόχου, η καθυστέρηση απόστασης θα γίνει

$$\tau(t) = \frac{2R}{c} - \frac{2r}{c} \cos(\omega t - \theta) \quad (2.25)$$

Η φάση λόγω καθυστέρησης $\tau(t)$ σε σχέση με τον εκπεμπόμενο παλμό θα είναι

$$\psi(t) = -2\pi f \tau(t) = -2\pi f \left[\frac{2R}{c} - \frac{2r}{c} \cos(\omega t - \theta) \right] \quad (2.26)$$

Η μετατόπιση της συχνότητας Doppler η οποία θα προκληθεί από τον σκεδαστή θα είναι

$$f_D(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (2.27)$$

η οποία με την χρήση της σχέσης (2.25) γίνεται

$$f_D(t) = -f \frac{2\omega r}{c} \sin(\omega t - \theta) \quad (2.28)$$

Όπως βλέπουμε η μετατόπιση συχνότητας Doppler είναι διαφορετική από αυτήν της σχέσης (2.28)

$$\delta f_D = \frac{2\omega \delta r_c f_0}{c} = \frac{2\omega \delta r_c}{\lambda} \quad (2.29)$$

όπου δf_D είναι ο διαχωρισμός των συχνοτήτων Doppler των σημάτων λήψης και δr_c ο διαχωρισμός κάθετης απόστασης για δύο σκεδαστές που βρίσκονται μέσα στο ίδιο κελί απόστασης. Η σχέση (2.29) προκύπτει από αυτήν της σχέσης (2.28) αν θεωρήσουμε ότι η αρχική γωνία θ είναι $\pi/2$, ότι η γωνία περιστροφής ωt είναι αρκετά μικρή και ότι ο ρυθμός αλλαγής της γωνίας θέασης ω είναι σταθερός.

Όπως είναι προφανές από τις σχέσεις (2.26) και (2.28), η φάση λήψης από τον σκεδαστή και κατά συνέπεια η μετατόπιση της συχνότητας Doppler εξαρτώνται από τον ρυθμό αλλαγής της γωνίας θέασης ωt μέσω μιας τριγωνομετρικής συνάρτησης. Αναπτύσσοντας την σχέση (2.26) γύρω από τον όρο $\omega t - \theta$ για αρχική γωνία θ ίση με το μηδέν έχουμε

$$\psi(t) = -2\pi f \left[\frac{2R}{c} - \frac{2r}{c} \left(1 - \frac{(\omega t)^2}{2!} \right) \right] = \frac{4\pi R}{\lambda} + \frac{4\pi r}{\lambda} - \frac{4\pi (\omega r)^2 t^2}{\lambda 2r} \quad (2.30)$$

Ο τρίτος όρος του αθροίσματος της σχέσης (2.30) είναι ο όρος που θα προκαλέσει την μείωση της ευκρίνειας της κάθετης απόστασης και πρέπει να

αντισταθμιστεί για να μη υπάρξει απώλεια της εστίασης της τελικής εικόνας του στόχου.

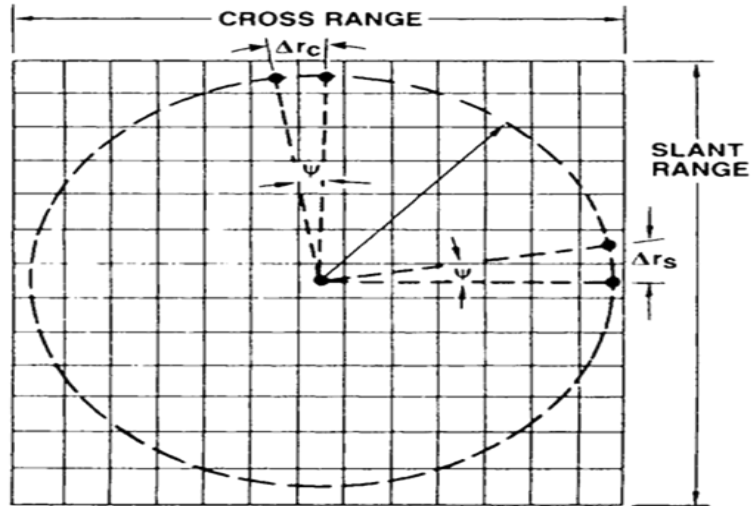
Επίσης η εικόνα του στόχου θα αλλοιωθεί όταν η γωνία ολοκλήρωσης ωt είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα την μετατόπιση σκεδαστών (cell migration) που είναι στα όρια του στόχου κατά τουλάχιστον ένα κελί απόστασης. Η αλλοίωση αυτή θα συμβεί και στις δύο διαστάσεις της απεικόνισης (απόσταση και κάθετη απόσταση). Αποδεικνύεται [12] ότι οι μετατοπίσεις της θέσης των σκεδαστών του στόχου μετρούμενη σε κελιά απόστασης κατά τις δύο διαστάσεις θα είναι

$$L_s \approx \frac{r}{\Delta r_s} \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\Delta r_c} \quad (2.31)$$

Το αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού θα είναι η θόλωση (blurring) της εικόνας στα άκρα της. Η μετατόπιση των σκεδαστών στον άξονα κάθετης απόστασης θολώνει την εικόνα στην διάσταση της κάθετης απόστασης σε όλες τις θέσεις της απόστασης (εκτός από την θέση της απόστασης όπου η μετατοπιστική ταχύτητα του στόχου είναι μηδέν). Αντίστοιχα η μετατόπιση των σκεδαστών στον άξονα απόστασης θα θολώνει την εικόνα στην διάσταση της απόστασης για όλες τις θέσεις κάθετης απόστασης (εκτός από την θέση κάθετης απόστασης που η συχνότητα Doppler είναι μηδέν). Το μόνο σημείο στο οποίο η εικόνα δεν θα είναι θολωμένη θα είναι το κέντρο περιστροφής του στόχου ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτό η θόλωση θα αυξάνεται.

2.6.2 Ακτίνα θόλωσης (Blur Radius) – Πολική επαναμορφοποίηση (Polar Reformatting)

Ένας τρόπος μέτρησης της θόλωσης της εικόνας είναι ο ορισμός της ακτίνας θόλωσης (blur radius). Ως ακτίνα θόλωσης ονομάζουμε την ακτινική απόσταση από το κέντρο περιστροφής του στόχου κατά ένα κελί απόστασης (στην διάσταση της απόστασης ή στην διάσταση της κάθετης απόστασης) κατά την διάρκεια της γωνίας ολοκλήρωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-8, η μετατόπιση θα είναι ίση με ένα κελί απόστασης όταν $r\psi = \Delta r_s$ ή όταν $r\psi = \Delta r_c$.



Σχήμα 2-8. Ακτίνα θόλωσης

Στην περίπτωση που έχουμε τετραγωνική ευκρίνεια (square resolution), δηλαδή όταν οι ευκρίνειες απόστασης και κάθετης απόστασης είναι ίσες ($\Delta r_s = \Delta r_c = \Delta r$), η γωνία περιστροφής από την σχέση (2.32) θα είναι η σχέση (2.33).

$$r \leq \frac{(\Delta r_c)^2}{\lambda} \quad (2.32)$$

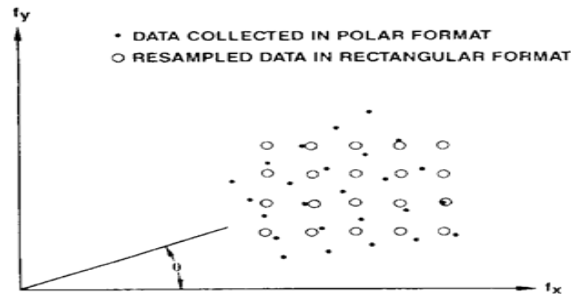
$$\psi = \frac{\lambda}{2\Delta r} \quad (2.33)$$

Η ακτίνα θόλωσης για μετατόπιση ενός κελιού απόστασης θα είναι λοιπόν

$$r = \frac{\Delta r}{\psi} = \frac{2(\Delta r)^2}{\lambda} \quad (2.34)$$

η οποία είναι ίδια με αυτήν που υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της σχέσης (2.32). Όπως έχει περιγραφεί στις προηγούμενες ενότητες, η δημιουργία της εικόνας του στόχου επιτυγχάνεται με την συλλογή μιγαδικών δεδομένων ανάκλασης σε ίσης απόστασης διακριτές συχνότητες και γωνίες θέασης. Η απεικόνιση ISAR μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μετασχηματισμός Fourier από τον χώρο των δεδομένων ανάκλασης του στόχου στο χώρο της

εικόνας του στόχου. Ο χώρος δεδομένων ανάκλασης ονομάζεται χώρος συχνοτήτων (frequency space) και μπορεί να προσεγγιστεί από το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων (f_x, f_y) στο Σχήμα 2-9 όταν οι γωνίες θέασης είναι μικρές.



Σχήμα 2-9. Σύστημα συντεταγμένων λήψης δεδομένων ανάκλασης

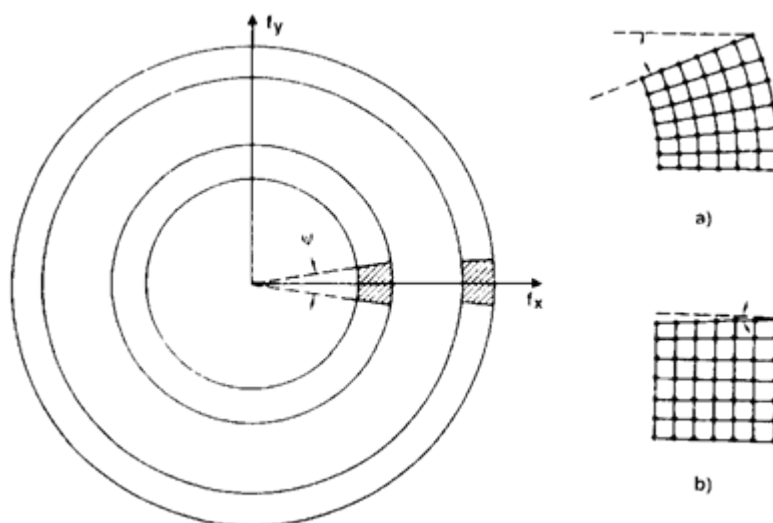
Οι άξονες του συστήματος αυτού ορίζονται από τις λεγόμενες χωρικές συχνότητες f_x και f_y ως εξής

$$f_x = \frac{2f}{c} \cos \theta \quad (2.35)$$

$$f_y = \frac{2f}{c} \sin \theta \quad (2.36)$$

Τα δεδομένα ανάκλασης συμβολίζονται στο Σχήμα 2-9 με τις μαύρες κουκίδες και όπως φαίνεται, η λήψη τους έχει σε πολικό σύστημα και συνεπώς δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα σε χωρική συχνότητα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί αλλοίωση της εικόνας του στόχου διότι ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) που πρόκειται να εκτελεστεί στα δεδομένα αυτά, προϋποθέτει ότι θα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων και όχι σε πολικό. Αν ο μετασχηματισμός εφαρμοστεί σε αυτά χωρίς διόρθωση, τότε θα έχουμε απώλεια εστίασης της εικόνας του στόχου. Μάλιστα η απώλεια της εστίασης θα είναι μεγαλύτερη καθώς μικραίνει η συχνότητα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-10 και προκύπτει από την σχέση (2.32) η επίτευξη συγκεκριμένης διακριτικής ικανότητας κάθετης απόστασης απαιτεί μεγαλύτερη γωνία ολοκλήρωσης στις χαμηλότερες συχνότητες (a)

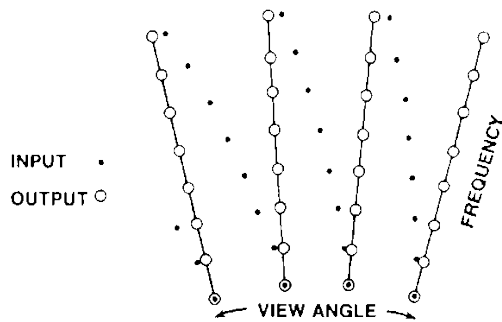
από ότι στις υψηλότερες (b) οπότε και μεγαλύτερη απόκλιση των δεδομένων λήψης από το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων του χώρου συχνοτήτων.



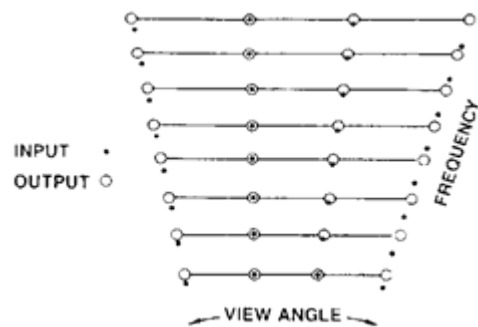
Σχήμα 2-10. Επίδραση της συχνότητας στην εστίαση της εικόνας του στόχου

Η διαδικασία αντιστάθμισης της περιστροφικής κίνησης του στόχου (Rotational Motion Compensation-RMC) που εκτελείται μετά την αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης-TMC), ονομάζεται διαδικασία πολικής επαναδιαμόρφωσης (Polar Reformatting) και αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα (θεωρούμε σταθερό ρυθμό περιστροφής).

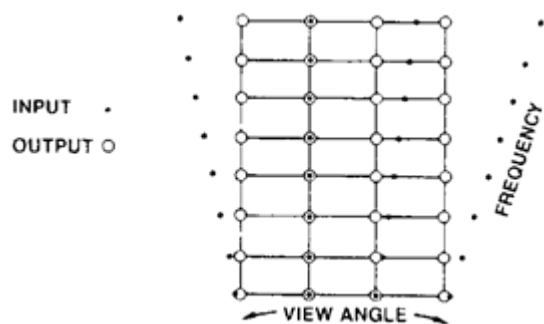
- 1) Επαναδειγματοληψία όλων των συχνοτήτων των δεδομένων ανάκλασης της κάθε ριπής σε ομοιόμορφα απέχουσες διακριτές γωνίες θέασης (Σχήμα 2-11).
- 2) Επαναδειγματοληψία με σκοπό την ευθυγράμμιση των δεδομένων ανάκλασης των διαφόρων γωνιών θέασης με τα αντίστοιχα τους σε συχνότητα της κεντρικής γωνίας θέασης (Σχήμα 2-12).
- 3) Επαναδειγματοληψία με σκοπό την τοποθέτηση των δεδομένων ανάκλασης σε κατευθύνσεις παράλληλες με αυτήν της κεντρικής γωνίας θέασης (Σχήμα 2-13).



Σχήμα 2-11. Πολική επαναδιαμόρφωση – βήμα 1



Σχήμα 2-12. Πολική επαναδιαμόρφωση – βήμα 2



Σχήμα 2-13. Πολική επαναδιαμόρφωση – βήμα 3

2.6.3 Ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση στόχου (Uniform Rotational Motion)

Όταν μελετάμε την κίνηση ενός στόχου ISAR χρησιμοποιούμε την έννοια της ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης κατά την διάρκεια της οποίας η

γωνιακή ταχύτητα του στόχου ω είναι σταθερή ενώ η γωνιακή επιτάχυνση α είναι μηδενική. Η ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση είναι αναγκαία για να πετύχουμε ικανοποιητική ανάλυση κατά διόπτευση. Στην περίπτωση της ομοιόμορφης περιστροφής του στόχου χρησιμοποιούμε την διαδικασία της πολικής επαναδιαμόρφωσης (polar-reformatting) για να εξουδετερώσουμε την παραμόρφωση που εισάγεται από την περιστροφή του στόχου (μετακίνηση κελιών κατά απόσταση η διόπτευση). Μπορούμε όμως να αποφύγουμε την πολική επαναδιαμόρφωση αν το μέγεθος του στόχου δεν υπερβαίνει το πρακτικό όριο της ακτίνας αμαύρωσης (Blur-Radius) [12].

Επίσης μεγάλη σημασία έχει και ο χρησιμοποιούμενος συμφασικός χρόνος ολοκλήρωσης (CPI). Δηλαδή στην απεικόνιση ISAR εάν το CPI δεν είναι πολύ μεγάλο οι σκεδαστές του στόχου δεν μετακινούνται από τα κελιά ανάλυσης και οι αντίστοιχες συχνότητες Doppler παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια του CPI. Σε αυτή την περίπτωση ο σταθερός αλγόριθμος RDA (Range-Doppler Algorithm) λαμβάνει εστιασμένες εικόνες. Ωστόσο αυτές οι εικόνες συνήθως δεν είναι επαρκείς για διαδοχικούς ATR (Automatic Target Recognition) αλγορίθμους επειδή έχουν υποβαθμισμένη την κατά διόπτευση ανάλυση σύμφωνα με την σχέση $p_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta}$ (ανάλυση κατά διόπτευση).

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η μεταβολή της γωνίας θέασης του στόχου $\Delta\theta$ είναι μικρή για αυτό το μικρό CPI. Αντίθετα, αν το CPI είναι μεγάλο οι σκεδαστές του στόχου μετακινούνται από τα κελιά ανάλυσης και οι ιστορίες Doppler είναι μιγαδικές συναρτήσεις. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος RDA παράγει θολωμένες εικόνες με μειωμένη την ποιότητα και τεχνικές αντιστάθμισης κίνησης συνήθως χρησιμοποιούνται για την βελτίωση των προϊόντων ISAR.

2.6.4 Μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση στόχου (Non Uniform Rotational Motion)

2.6.4.1 Εισαγωγή

Στο ISAR, το ραντάρ είναι σταθερό και οι στόχοι είναι σε μανουβράρισμα. Η κίνηση του στόχου σχετική με το ραντάρ μπορεί να αναλυθεί σε μετατοπιστική

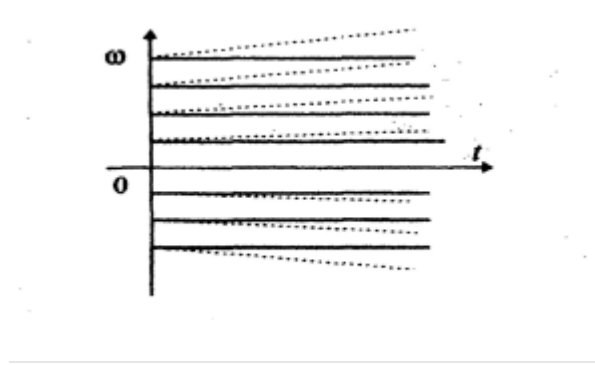
και περιστροφική κίνηση. Ενώ το δεύτερο μέρος είναι χρήσιμο για το ραντάρ απεικόνισης, το πρώτο μέρος είναι ανεπιθύμητο και συνεπώς πρέπει να αντισταθμιστεί. Αφού μόνο μια μικρή γωνία περιστροφής είναι αναγκαία για απεικόνιση, οι περιστροφές των στόχων συνήθως θεωρούνται ότι είναι ομοιόμορφες στην μικρή γωνία. Σε αυτή την περίπτωση η εικόνα στην κατά διόπτρευση απόσταση λαμβάνεται με διακριτό μετασχηματισμό Fourier. Ο Delisle, et. al. [30] υποθέτει ότι η περιστροφή του στόχου δεν είναι ομοιόμορφη αλλά με σταθερή γωνιακή επιτάχυνση a . Αυτή η υπόθεση χρησιμοποιείται μόνο για την συζήτηση της περιστροφικής κίνησης ενώ η εκτίμηση των παραμέτρων και η απεικόνιση ακόμη βασίζονται στον DFT. Ο Jain, et al. Θεωρεί την απεικόνιση στόχων με μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση. Η παραμόρφωση δε της εικόνας ISAR ενός στόχου είναι γνωστό ότι δημιουργείται από την μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση του στόχου κατά την διάρκεια σχηματισμού της εικόνας. Η συμβατική εξήγηση περιγράφει την παραμόρφωση της εικόνας ως ένα φαινόμενο παραμόρφωσης διγραμμικής φάσης. Αυτό το φαινόμενο παραμόρφωσης φάσης είναι σημαντικό μόνο όταν η εικόνα του στόχου ολοκληρώνεται μέσω μιας εκτεταμένης χρονικής περιόδου δηλαδή μέσω μίας μεγάλης γωνιακής περιστροφής από τον στόχο. Σε πολλές μετρούμενες ISAR εικόνες τέτοιες όπως από εν πτήση αεροσκάφος η παραμόρφωση είναι πολύ αυστηρή αλλά ο χρόνος ολοκλήρωσης της εικόνας είναι μόνο λίγα δευτερόλεπτα σε διάρκεια και η σχετική περιστροφική μετατόπιση του στόχου είναι μόνο λίγες μοίρες ως επί το πλείστον. Η αυστηρή παραμόρφωση αποδίδεται στο φαινόμενο παραμόρφωσης φάσης όπου η χρονικά μεταβαλλόμενη συχνότητα Doppler παρέχει τον μηχανισμό αμαύρωσης. Έχει δειχθεί ότι η διγραμμική παραμόρφωση φάσης μπορεί να θεωρηθεί ως μια ιδιαίτερη περίπτωση του φαινομένου διαμόρφωσης φάσης [31].

2.6.4.2 Μαθηματικό ανάλυση της μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης

Σύμφωνα με τον Delisle, et. al και τον Jain, et. al ολόκληρο το σήμα διαιρείται σε πολλά υποσυνθετικά ανοίγματα μέσω των οποίων οι

περιστροφές θεωρούνται ότι είναι σχεδόν ομοιόμορφες. Ο DFT εφαρμόζεται σε κάθε υποάνοιγμα και η τελική εικόνα συνθέτεται από τον συνδυασμό των διορθωμένων δεδομένων αυτών των ανοιγμάτων. Είναι διασαφηνισμένο ότι χρησιμοποιούνται βηματικές συχνότητες αντί της κλασικής μονής συχνότητας στο [32] για να προσεγγίσουμε την πραγματική μεταβολή της συχνότητας και να βελτιώσουμε την ποιότητα της εικόνας. Εδώ παρουσιάζουμε το επιταχυνόμενο περιστρεφόμενο μοντέλο αντί του ομοιόμορφου περιστρεφόμενου μοντέλου, το οποίο είναι ισοδύναμο με την πρώτη τάξης προσέγγιση αντί της μηδενικής τάξης προσέγγιση προς την μεταβολή συχνότητας. Αυτό το μοντέλο όχι μόνο προσαρμόζει ομοιόμορφα την επιταχυνόμενη περιστροφή αλλά έχει καλύτερη προσέγγιση προς την μεγαλύτερη σύνθετη κίνηση σε σύγκριση με το ομοιόμορφο περιστρεφόμενο μοντέλο.

Αν η μετατοπιστική κίνηση αντισταθμιστεί με ακρίβεια, ο στόχος μπορεί να φανεί σαν περιστρεφόμενος στόχος. Ο άξονας του περιστρεφόμενου στόχου είναι σταθερός σχετικά προς το ραντάρ και η συχνότητα Doppler του σκεδαστή στον άξονα είναι μηδέν. Ωστόσο οι καταστάσεις εκατέρωθεν των δύο πλευρών της γραμμής μηδενικής συχνότητας είναι τελείως διαφορετικές. Οι ταχύτητες των σκεδαστών προς το ραντάρ είναι ίσες προς την γωνιακή ταχύτητα πολλαπλασιασμένη με την κατά διόπτευση απόσταση των σκεδαστών προς την γραμμή. Στην περίπτωση της ομοιόμορφης περιστροφής οι συχνότητες Doppler των σκεδαστών είναι αμετάβλητες και οι τιμές είναι απευθείας ανάλογες προς την κατά διόπτευση απόσταση x_i προς τον άξονα. Αν η κίνηση του στόχου επιταχύνεται τότε οι ανακλάσεις στις δύο πλευρές είναι αμφοτέρως σήματα chirp. Οι δείκτες της γραμμικής διαμορφωμένης συχνότητας (LFM) είναι θετικοί για την δεξιόστροφο πλευρά των σκεδαστών και αρνητικοί για την άλλη πλευρά. Οι τιμές τους είναι επίσης ανάλογες προς την κατά διόπτευση απόσταση x_i . Ακολούθως χρησιμοποιούμε την κατανομή χρόνου-συχνότητας για να αναλύσουμε την μεταβολή της συχνότητας Doppler των περιστρεφόμενων στόχων.



Σχήμα 2-14. Κατανομή χρόνου συχνότητας των σκεδαστών κίνησης

Η κατανομή χρόνου-συχνότητας του κελιού απόστασης σε ομοιόμορφη περιστροφή (στερεές γραμμές) και σε επιταχυνόμενη περιστροφή (γραμμές με παύλες) φαίνονται στο Σχήμα 2-14. Αν η αρχική ταχύτητα και επιτάχυνση περιστροφής είναι ω_α και V_{ai} αντίστοιχα, τότε η στιγμιαία ταχύτητα V_{ai} του σκεδαστή με την κατά διόπτρευση συντεταγμένη x_i είναι:

$$V_{ai} = (\omega_\alpha + a_\alpha t) x_i \quad (2.37)$$

και η αντίστοιχη γωνιακή συχνότητα Doppler $\omega_i(t)$ είναι:

$$\omega_i(t) = \frac{4\pi V_{ai}(t)}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} x_i (\omega_\alpha + a_\alpha t) \quad (2.38)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος του ραντάρ. Όταν $a_\alpha = 0$, η εξίσωση (2-38) αναπαριστά την κατάσταση της ομοιόμορφης περιστροφής και η συχνότητα Doppler είναι αμετάβλητη. Οι στερεές γραμμές στο Σχήμα 2-14 δείχνουν την στιγμιαία συχνότητα Doppler.

Υποθέτουμε ότι η μιγαδική περιβάλλουσα του κάθε σκεδαστή είναι $s_i(t) (i=1,2,\dots,p)$, όπου p είναι ο αριθμός των σκεδαστών στο κελί απόστασης και η ανάκλαση εντός του κελιού απόστασης είναι:

$$s(t) = \sum_i^p a_i \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} x_i (\omega_\alpha t + a_\alpha t^2) \right] \quad (2.39)$$

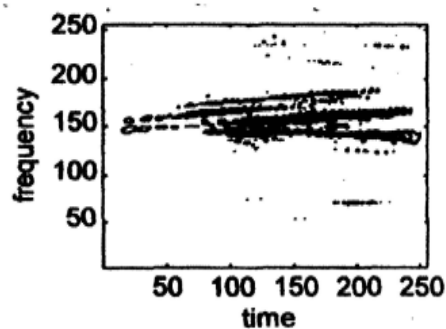
Η εξίσωση (2-39) είναι η έκφραση της ανάκλασης της επιταχυνόμενης περιστροφής, δηλαδή το άθροισμα των p - μιγαδικών σημάτων chirp. Όταν η περιστροφή είναι ομοιόμορφη, δηλαδή $a_a = 0$ η ανωτέρω εξίσωση γίνεται το άθροισμα των p - μιγαδικών ημιτονοειδών σημάτων. Αφού η ανάλυση είναι κρίσιμη για την απεικόνιση, χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Wigner-Ville (WVD) [33] στην δική μας προσέγγιση καθώς η ανάλυση του WVD για μονή LFM είναι η πιο υψηλή ανάμεσα όλων. Ο WVD του σήματος $s(t)$ ορίζεται ως:

$$W_s(t, \omega) = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.40)$$

Από το σήμα $s(t)$ πολλαπλών συνιστωσών που ορίζεται από την (2.39) έχουμε τον WVD αντικαθιστώντας το $s(t)$ από την (2.39) στην (2-40):

$$W_s(t, \omega) = \sum_{i=1}^p W_{s_i}(t, \omega) + \sum_{i,j=1; i \neq j}^p W_{s_i s_j}(t, \omega) \quad (2.41)$$

Ο πρώτος όρος της (2-41) δηλώνει τους auto-terms οι οποίοι αντιστοιχούν στην κατανομή του σχήματος 2-22 για άπειρο μήκος σήματος των πολλαπλών συνιστωσών $s_i(t)$, $i = 1, \dots, p$, ενώ οι auto-terms της WVD $W_{s_i}(t, \omega)$, $i = 1, \dots, p$ είναι συναρτήσεις Dirac οι οποίες εμφανίζονται ως ευθείες γραμμές του σχήματος 2-14. Για το πρακτικό πεπερασμένο μήκος κύματος η κατανομή θα διαχέεται στην συχνότητα. Ο δεύτερος όρος της (2-41) είναι οι έτεροι-όροι παρεμβολής. Η WVD των πραγματικών δεδομένων του κελιού απόστασης φαίνεται στο Σχήμα 2-15. Έχει τον χαρακτήρα γραμμικού chirp σήματος. Ο έτερος-όρος μπορεί να φανεί στο Σχήμα (2-15.)



Σχήμα 2-15. Μετασχηματισμός WVD πραγματικών δεδομένων ραντάρ (πλάνο κελιού απόστασης)

Έπειτα θα εφαρμόσουμε την κατανομή χρόνου-συχνότητας στην εικόνα ISAR και η κατανομή του μη έτερου-όρου δεν χρειάζεται πάντα. Για στόχο με ομοιόμορφη επιτάχυνση η συχνότητα Doppler των σκεδαστών είναι σχεδόν σήματα chirp. Καθώς οι συχνότητες Doppler των σκεδαστών του ομοιόμορφα περιστρεφόμενου στόχου είναι αμετάβλητες, αυτό μπορεί να εκφραστεί σαν μια ομάδα γραμμών παράλληλες προς τον άξονα χρόνου στο WVD πεδίο όπως οι στέρεες γραμμές που φαίνονται στο Σχήμα 2-14. Η συχνοτική περιθωριακή ολοκλήρωση του μετασχηματισμού WVD είναι το φάσμα ισχύος το οποίο ισούται με το τετράγωνο των modules του DFT. Ο DFT είναι κατάλληλος για την απεικόνιση της κατά διόπτευση απόστασης του στόχου με ομοιόμορφη περιστροφή. Αν η περιστροφή είναι σταθερή στην επιτάχυνση, οι κινήσεις των σκεδαστών μπορεί να εκφραστεί σαν μια ομάδα ευθύγραμμων γραμμών με μεταβαλλόμενη κλίση στο πεδίο χρόνου-συχνότητας (όπως οι γραμμές με παύλες στο Σχήμα 2-14). Σε αυτή την περίπτωση ο DFT (δηλαδή η συχνοτική περιθωριακή ολοκλήρωση) αμαυρώνει την εικόνα ως αποτέλεσμα της μεταβολής της συχνότητας Doppler των σκεδαστών. Όσο μακρινότεροι είναι οι σκεδαστές από τον άξονα τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της συχνότητας των. Είναι λογικό να βελτιώσουμε την μέθοδο απεικόνισης με ολοκλήρωση κατά μήκος γραμμών με διαφορετική κλίση αντί κατά μήκος του άξονα χρόνου. Αν έχει προσδιοριστεί η αρχική γωνιακή ταχύτητα ω_α και γωνιακή επιτάχυνση α_α του περιστρεφόμενου στόχου, τότε αρχική συχνότητα ω_0 και η μεταβολή συχνότητας m (η ο διαγώνιος ρυθμός της γραμμής στο

πεδίο χρόνου-συχνότητας) μπορεί να εκφραστεί από την σχέση (2.38) και να είναι:

$$\omega_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \omega_a x_i \quad (2.42)$$

$$m = \frac{4\pi}{\lambda} a_a x_i \quad (2.43)$$

Η σχέση μεταξύ της αρχικής συχνότητας και της μεταβολής συχνότητας m είναι

$$\frac{m}{\omega_0} = \frac{a_a}{\omega_a} \equiv c \quad (2.44)$$

όπου c είναι μια σταθερά η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από τον μετασχηματισμό WVD των πραγματικών σημάτων (όπως το Σχήμα 2-14). Η γενικευμένη περιθωριακή ολοκλήρωση με μεταβαλλόμενη κλίση κείται κατά μήκος της γραμμής $\omega = \omega_0 + mt = \omega_0(1 + ct)$ η οποία δείχνει ότι η κλίση της ολοκλήρωσης μπορεί να αλλάξει μεταβάλλοντας το ω_0 στον άξονα ω . Είναι εμφανές ότι η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιώντας την γενικευμένη περιθωριακή ολοκλήρωση κατά μήκος των γραμμών μεταβαλλόμενης κλίσης προσαρμόζει το σταθερά επιταχυνόμενο περιστρεφόμενο μοντέλο.

2.7 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] J. L Walker, "Range-Doppler Imaging of Rotating Objects", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-16, No.1, January 1980.
- [2] C. C Chen, H. C Andrews, "Target-Motion-Induced Radar Imaging", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-16, No.1, January 1980.
- [3] M. J Prickett, C. C Chen, "Principles of Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging", IEEE EASCON '80 Record, 1980.
- [4] V. Chen and H. Ling, Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis, Norwood, MA: Artech House, 2002.
- [5] X. Li, G. Liu and N. Jinlin, "Autofocusing of ISAR Images Based on Entropy Minimization", IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst., Vol. 35, No. 4 Oct. 1999.
- [6] G. Y Delisle and H. Wu, "Moving target imaging and trajectory computation using ISAR", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, No. 3, 1994.
- [7] J. M. Munoz-Ferreras and F. Perez-Martinez, "Extended envelope correlation for range-bin alignment in ISAR", in Proceedings of the 2007 IET International Conference on Radar Systems, Endiburg, UK, October 2007.
- [8] J. Wang and D. Kasilingam, "Global range alignment for ISAR", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 1, 2003.
- [9] B. D Steinberg, "Microwave imaging of aircraft", Proceedings of the IEEE, vol. 76, No. 12, 1988.
- [10] D. E Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, Jr., "Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, No.3, 1994.
- [11] M. Martorella, F. Berizzi and B. Haywood, " Contrast maximization based technique for 2-D ISAR autofocusing", IEE Proc. Radar Sonar Navig., Vol. 152, No. 4, Aug. 2005.
- [12] D. Wehner, High-Resolution Radar, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [13] T. Kucukkilic, "Isar Imaging and Motion Compensation", A thesis submitted to the gradient school of natural and applied sciences of Middle East Technical University, December 2006.
- [14] E. D. Kallitsis, A. V. Karakasiliotis, P. V. Frangos, "Combination of range alignment technique with autofocusing post-processing algorithm for ISAR image optimization", 6th International Conference on Communications,

- Electromagnetics and Medical Applications (CEMA11), Sofia, Boulgaria, 6-8/10/2011.
- [15] D. A Ausherman, et al, "Developments in Radar Imaging", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 20, No. 4, 1984.
 - [16] H. Wu, et al, " Translational Motion Compensation in ISAR Image Processing", IEEE Transaction Image Processing, Vol. 14, No. 11, 1995.
 - [17] A. W Rihaczek and S. J Hershkowitz, "Radar Resolution and Complex-Image Analysis", Norwood, MA: Artech House, 1996.
 - [18] V. C Chen and S. Quian, "Joint Time-Frequency Transform for Radar Range-Doppler Imaging, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 2, 1998.
 - [19] V. C Chen and W. J Miceli, "Simulation of ISAR imaging of moving targets", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navig, Vol. 148, No. 3, 2001.
 - [20] T. M Calloway and G. W Donohoe, "Subaperture Autofocus for Synthetic Aperture Radar", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-30, 1994.
 - [21] T. Itoh, H. Sueda and Y. Watanabe, "Motion Compensation for ISAR via Centroid Tracking", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-32, 1996.
 - [22] S. Werness, et al, "Moving Target Imaging Algorithm for SAR Data", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-26, 1990.
 - [23] W. G Carrara, R. S Goodman and R. M Majewski, Spotlight Symthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms, Norwood, MA: Artech House, 1995.
 - [24] V. C Chen and W. J Miceli, "Effect of Roll, Pitch and Yaw Motions on ISAR Imaging", SPIE Proc. On Radar Processing, Technology, and Applications, Vol. 3810, 1999.
 - [25] J. Wang and D. Kasilingam, "Global range alignment for ISAR", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 1, 2003.
 - [26] D. Zhu, L. Wang, Y. Yu, Q. Tao and Z. Zhu, "Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile", IEEE Geoscince and Remote Sensing Letters, Vol. 6, No. 2, 2009.
 - [27] J. S Son, G. Thomas and B. C Flores, Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation, Artech House, 2001.
 - [28] Bocker, R. P., and Jones, S. A., "ISAR Motion Compensation Using the Burst Derivative Measure as a Focal Quality Indicator," Internat. J. of Imaging and Technology, vol. 4, pp. 285-297, 1992.
 - [29] Son, J. S., Tarik S., and Flores, B. C., "Phase Difference Method for Target

- Motion Compensation of Stepped-Frequency ISAR Signature," *Proc. SPIE Radar Processing, Technology and Applications*, vol. 2845, pp. 163-174, 1996.
- [30] G. Y Delisle and H. Wu, "Moving target imaging and trajectory computation using ISAR", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 30, No. 3, 1994.
- [31] S. Wong, E. Riseborough and G. Duff, "A Numerical Model of ISAR Distortion and an Efficient Procedure for Restoring Distorted ISAR Images, RTO-MP-SET-080 Symposium on "Target Identification and Recognition Using RF Systems", Oslo, Norway, 2004.
- [32] A. Jain and I. Patal, "SAR/ISAR imaging of a nonuniformly rotating target", *IEEE Trans. AES*. Vol. 28, No. 1, 1992.
- [33] G. Boultadakis, L. Stergioulas, G. Kalognomos, A. Karakasiliotis and P. Frangos, "A Comparative Study of Bilinear Time–Frequency Transforms of ISAR Signals for Air Target Imaging", *Electronics and Electrical Engineering Journal*, T121 Signal Technology, No. 4 (92), April 2009.

Κεφάλαιο 3

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΥΤΟΕΣΤΙΑΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ
ΑΥΤΟΕΣΤΙΑΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ISAR ΜΕ ΤΗΝ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ**

3.1 Αυτοεστίαση εικόνας ISAR

3.1.1 Εισαγωγή

Επειδή ο στόχος είναι μη συνεργατικός η αντιστάθμιση της κίνησης πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς οποιαδήποτε εξωτερική βοήθεια. Μία τέτοια λειτουργία είναι γνωστή ως αυτοεστίαση της εικόνας. Στην πραγματικότητα όσο καλύτερα πραγματοποιείται αυτή η λειτουργία τόσο υψηλότερη είναι η εστίαση της εικόνας.

Πολλές τεχνικές έχουν προταθεί. Αυτές μπορεί να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: στις παραμετρικές και μη παραμετρικές τεχνικές. Οι παραμετρικές τεχνικές κάνουν χρήση του μοντέλου σήματος. Οι παράμετροι του μοντέλου σήματος πρέπει να εκτιμηθούν με σκοπό την πραγματοποίηση της αντιστάθμισης κίνησης. Οι μη παραμετρικές τεχνικές δεν χρησιμοποιούν το μοντέλο σήματος. Η χρήση των παραμετρικών ή μη παραμετρικών τεχνικών εξαρτάται από την ακρίβεια και το υπολογιστικό κόστος που απαιτούνται από την κατάλληλη εφαρμογή. Οι παραμετρικές τεχνικές περιλαμβάνουν την αυτοεστίαση που βασίζεται στην αντίθεση (Image Contrast Based Autofocus) [1] και την εντροπία της εικόνας (Image Entropy Based Autofocus) [1]. Οι μη παραμετρικές τεχνικές περιλαμβάνουν την επικρατέστερη σημειακή επεξεργασία (Prominent Point Processing) [1] (θερμή κηλίδα) και την αυτοεστίαση της κλίσης φάσης (Phase Gradient Autofocus) [1].

3.1.2 Τεχνικές αυτοεστίασης

3.1.2.1 Αυτοεστίαση με ICBA

Η εκπλήρωση της αυτοεστίασης που βασίζεται στην αντίθεση εικόνας (ICBA- Image Contrast Based Autofocusing) απαιτεί τον ορισμό του μοντέλου σήματος και το κριτήριο για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου

σήματος. Η ICBA βασίζεται στον ορισμό της πολυωνυμικής φάσης του σήματος και στον ορισμό της αντίθεσης εικόνας [1]-[2].

Ορίζοντας το μοντέλο σήματος είναι δυνατό να εκτιμήσουμε την συνιστώσα της φάσης του σήματος που συνδέεται με την ακτινική κίνηση του κέντρου φάσης. Η εκτίμηση μια τέτοιας συνιστώσας φάσης σήματος ισοδυναμεί με την εκτίμηση του κέντρου φάσης της ακτινικής κίνησης, ως εκ τούτου υπάρχει η φυσική έννοια εκτίμησης του κέντρου φάσης της ακτινικής κίνησης του ενιαίου σημείου που ανήκει στον στόχο. Η μεγιστοποίηση της αντίθεσης της εικόνας χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ακτινικής κίνησης. Το ληφθέν σήμα αποσυνέλιξης (συνεχούς χρόνου, συνεχούς στόχου) είναι

$$S'_R(f,t) = W(f,t) \exp \left[-j \frac{4\pi f R_0(t)}{c} \right] \cdot \iint \xi(x_1, x_2) \exp \{ -j2\pi [X_1 x_1 + X_2 x_2] \} dx_1 dx_2 \quad (3.1)$$

όπου
$$R_0(t) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^N a_k t^k \quad (3.2)$$

Από την σχέση (3.2) το $R_0(t)$ είναι όρος ολίσθησης ενώ ο όρος $a_k t^k$ συμβολίζει τις παραμέτρους εστίασης (παράμετροι ακτινικής κίνησης). Η φυσική έννοια είναι ότι ο όρος a_1 συμβολίζει την ακτινική ταχύτητα του κέντρου φάσης ενώ ο όρος a_2 συμβολίζει την ακτινική επιτάχυνση του κέντρου φάσης. Η υπόθεση δε που κάνουμε είναι ότι το επίπεδο της εικόνας πρέπει να παραμείνει αμετάβλητο κατά την διάρκεια του χρόνου ολοκλήρωσης. Ο όρος a_0 προκαλεί ολίσθηση κατά μήκος των συντεταγμένων απόστασης της εικόνας και δεν επηρεάζει την εστίαση της εικόνας.

Ας υποθέσουμε ότι το $S''_R(f,t)$ αντισταθμίζεται μέσω της $R'_0(t)$ όπου

$$R'_0(t) = \sum_{k=1}^N a_k t^k \quad (3.3)$$

Επομένως έχουμε

$$\begin{aligned}
S''_R(f, t) &= W[f, t] \iint \xi(x_1, x_2) \exp\{-j2\pi[X_1x_1X_2x_2]\} dx_1dx_2 \exp\left[-j\frac{4\pi f a_0}{c}\right] \\
&= I_c(\tau, \nu) = \underset{\substack{f \rightarrow \tau \\ t \rightarrow \nu}}{FT^{-2}} \{S''_R(f, t)\} = T_{obs} B \sum_{k=1}^K \sin c[B\tau] e^{-j2\pi f_0 \tau} \\
&= \otimes \otimes \xi\left(\frac{c}{2}\tau, \frac{\nu}{2f_0\Omega}\right) \otimes \otimes \delta(\nu) \delta\left(\tau - \frac{2a_0}{c}\right)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Οι παράμετροι εστίασης προκαλούν μη εστίαση της εικόνας. Όταν το αποδιαμορφωμένο σήμα αντισταθμιστεί μέσω του όρου ανακριβούς φάσης

$$\ddot{R}(t) = \sum_{k=1}^N \ddot{a}_k t^k \tag{3.5}$$

τότε η (3.5) διατηρεί κάποια υπόλοιπα της ακτινικής κίνησης. Συνεπώς η ανακατασκευασμένη εικόνα θολώνει από την επίδραση του υπολοιπούμενου όρου φάσης.

$$\begin{aligned}
S''_R(f, t) &= W[f, t] \iint \xi(x_1, x_2) \exp\{-j2\pi[X_1x_1 + X_2x_2]\} dx_1dx_2 \\
&\quad \sum_{k=1}^N \exp\left[-j\frac{4\pi f \tilde{a}_k t^k}{c}\right]
\end{aligned} \tag{3.6}$$

οπου $\tilde{a}_k = a_k \hat{a}_k$ είναι τα υπολοιπόμενα των παραμέτρων εστίασης.

Η ανακατασκευασμένη εικόνα είναι

$$\begin{aligned}
I_c(\tau, \nu) &= T_{obs} B \sum_{k=1}^N \sin c[T_{obs} \nu] \sin c[B\tau] e^{-j2\pi f_0 \tau} \\
&\quad \otimes \otimes \xi\left(\frac{c}{2}\tau, \frac{\nu}{2f_0\Omega}\right) \otimes \otimes FT^{-2} \left[\sum_{k=1}^N \exp\left[-j\frac{4\pi f \tilde{a}_k t^k}{c}\right] \right]
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Με σκοπό να μεγιστοποιήσουμε την εστίαση της εικόνας οι υπολοιπόμενες παράμετροι εστίασης (σφάλματα εκτίμησης) πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

Βελτιστοποιημένες τεχνικές εκτίμησης μπορεί να παρέχουν μια ακριβή εκτίμηση των παραμέτρων εστίασης και συνεπώς μια ελαχιστοποίηση των

υπολοιπόμενων παραμέτρων εστίασης. Επειδή η εστίαση της εικόνας σχετίζεται με τις υπολοιπόμενες παραμέτρους εστίασης, είναι εύκολο να ορίσουμε μια νέα παράμετρο που να παρέχει την μέτρηση της εστίασης εικόνας.

Η σχέση που δίνει την αντίθεση εικόνας είναι:

$$IC(a) = \frac{\sqrt{A\left\{\left[I^2(\tau, \nu; a) - A\{I^2(\tau, \nu; a)\}\right]^2\right\}}}{A\{I^2(\tau, \nu; a)\}} \quad (3.8)$$

όπου $a = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ είναι η ακτινική ταχύτητα $A\{\cdot\}$ είναι μέσος χωρικός τελεστής και $I(r, \nu; a)$ είναι η ένταση της εικόνας ISAR.

Ας είναι $i = (\tau, \nu; \tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ η απόλυτη τιμή της σύνθετης εικόνας που λαμβάνουμε με αντιστάθμιση του ληφθέντος σήματος με χρήση των δυο αρχικών τιμών $(\tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$. Η αντίθεση της εικόνας ορίζεται ως ακολούθως

$$IC(\tilde{\beta}, \tilde{\gamma}) = \frac{\sqrt{A\left\{\left[i(\tau, \nu; \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}) - A\{i(\tau, \nu; \tilde{\beta}, \tilde{\gamma})\}\right]^2\right\}}}{A\{i(\tau, \nu; \tilde{\beta}, \tilde{\gamma})\}} \quad (3.9)$$

όπου $A(\bullet)$ αναπαριστά την μέση χωρική εικόνα μέσω των συντεταγμένων (τ, ν) . Η συνάρτηση $IC(\tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ αναπαριστά την κανονικοποιημένη αποδοτική ισχύ της έντασης της εικόνας $i = (\tau, \nu; \tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ και δίνει μια μέτρηση της εστίασης της εικόνας.

Εξάγωντας τον ορισμό της αντίθεσης εικόνας (IC) και την ιδιότητα του σε σχέση με την εστίαση εικόνας, μπορούμε να παράγουμε μια τεχνική εστίασης.

Το κριτήριο είναι να βρούμε το διάνυσμα παραμέτρων εστίασης που μεγιστοποιεί το IC.

$$\begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{a} \end{pmatrix} = \arg\left(\max_a [IC(a)]\right) \quad (3.10)$$

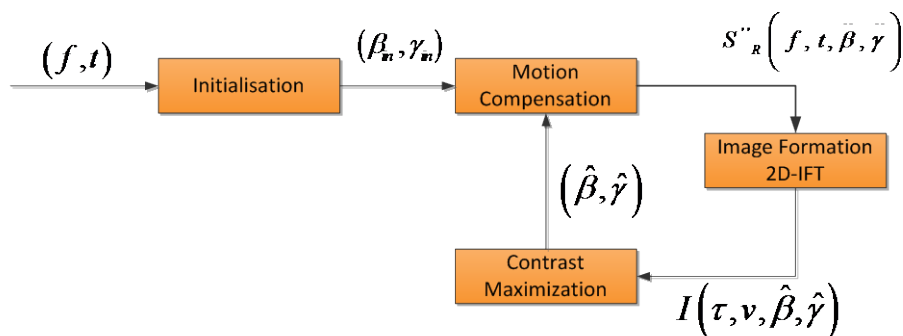
Επίσης η τελική εκτίμηση των παραμέτρων εστίασης β και γ λαμβάνεται με μεγιστοποίηση της αντίθεσης. Άρα το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να επιλύσουμε

$$(\hat{\beta}, \hat{\gamma}) = \arg \left(\max_{\tilde{\beta}, \tilde{\gamma}} [IC(\tilde{\beta}, \tilde{\gamma})] \right) \quad (3.11)$$

Η λύση δεν είναι μοναδική και μια λύση κλειστού τύπου του γενικού μεγίστου δεν μπορεί να βρεθεί οπότε μια αριθμητική τεχνική θα πρέπει να εφαρμοσθεί. Είναι αναγκαίο να αναλύσουμε την συνάτηση κόστους για την αντίθεση εικόνας με σκοπό να εφαρμόσουμε τις αποδοτικές τεχνικές βελτιστοποίησης.

$$\left(\bar{\beta}, \bar{\gamma} \right) = \arg \left(\max_{\beta^{\%}, \gamma^{\%}} [c(\beta^{\%}, \gamma^{\%})] \right) \quad (3.12)$$

Κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης όπως η Steepest Descend, Newton ή Nelder-Mead μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της βέλτιστης λύσης αν γίνει μια καλή εσωτερική έρευνα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον αλγόριθμο IBCA.



Σχήμα 3-1. Διάγραμμα αλγορίθμου IBCA

Το κριτήριο για να σταματήσουν οι επαναλήψεις είναι όταν η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δυο συνεχόμενων επαναλήψεων είναι μικρότερη απ' ότι η δεδομένη ποσότητα.

Η εκτίμηση του β δίνεται από την σχέση

$$\hat{\beta}^{(in)} = tg\left(\hat{\varphi}\right) \quad (3.13)$$

Η δε φάση δίδεται από την σχέση

$$\hat{\varphi} = \arg\left\{\max_{\varphi}\left[RT_{S_R}(\tau, \varphi)\right]\right\} - \frac{\pi}{2} \quad (3.14)$$

Η εκτίμηση του γ^{in} λαμβάνεται με μια εξαντλητική γραμμική έρευνα μέσω της μεταβλητής $\tilde{\gamma}$ της μέγιστης αντίθεσης εικόνας σε ένα προκαθορισμένο διάστημα.

$$\hat{\gamma}^{(in)} = \arg\left(\max_{\tilde{\gamma}}\left[IC\left(\hat{\beta}^{(in)}, \tilde{\gamma}\right)\right]\right) \quad \text{με το} \quad \hat{\gamma}_{\min}^{(in)} \leq \tilde{\gamma} \leq \tilde{\gamma}_{\max} \quad (3.15)$$

3.1.2.2 Αυτοεστίαση με ελαχιστοποίηση εντροπίας (Minimum Entropy Autofocusing, MEA)

Η ίδια λογική που χρησιμοποιήθηκε για την αυτοεστίαση με ICBA μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εδώ αλλάζοντας την συνάρτηση κόστους.

Η εντροπία της εικόνας δίνεται από την σχέση [1]

$$IE(\alpha) = -\int \int \ln(\bar{I}(\tau, \nu; \alpha)) \bar{I}(\tau, \nu; \alpha) d\tau d\nu \quad (3.16)$$

$$\text{όπου} \quad \bar{I}(\tau, \nu; \alpha) = I^2(\tau, \nu, \alpha) / A(I^2(\tau, \nu; \alpha)) \quad (3.17)$$

και A είναι ο μέσος χωρικός τελεστής. Οι παράμετροι εστίαση λαμβάνονται με λύση του ισοδύναμου προβλήματος βελτιστοποίησης.

$$\left(\ddot{\alpha}\right) = \arg\left(\min_{\alpha} [IE(\alpha)]\right) \quad (3.18)$$

3.2 Μη παραμετρικές τεχνικές αυτοεστίασης

3.2.1 Επικρατέστερο σημείο επεξεργασίας (Point Prominent Processing, PPP)

Οι βασικές ιδέες για αυτή την τεχνική λαμβάνονται με ψάξιμο σε δύο άλλες ερευνητικές περιοχές που είναι η εκτίμηση καθυστέρησης και η προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης [1]

Βήμα 1: Κατά προσέγγιση ρύθμιση του κελιού απόστασης

Μία κατά προσέγγιση ευθυγράμμιση του κελιού απόστασης μπορεί να ληφθεί μέσω ετεροσυσχέτισης. Στην πραγματικότητα υποθέτοντας ότι τα προφίλ απόστασης δεν μεταβάλλονται τόσο πολύ μεταξύ δύο συνεχόμενων σαρώσεων, η καθυστέρηση και ως εκ τούτου η ολίσθηση απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σαρώσεων μπορεί να μετρηθεί και να αντισταθμιστεί μέσω της ετεροσυσχέτισης. Μία τέτοια λειτουργία επαναλαμβάνεται μέσω όλων των προφίλ απόστασης.

$$\Delta\tau_{i,i+1} = \arg\left\{\max_n \left[\int \left| \tilde{S}_R'(\tau, i) \right| \left| \tilde{S}_R^*(\tau + n, i + 1) \right| d\tau \right] \right\} \quad (3.19)$$

όπου $\tilde{S}_R'(\tau, i)$ είναι το i -στό προφίλ απόστασης και $\tilde{S}_R^*(\tau + n, i + 1)$ είναι ο μιγαδικός συζυγής του $(i+1)$ -στο προφίλ απόστασης. Η κυκλική ολίσθηση απόστασης είναι

$$\tilde{S}_R'(\tau, i + 1) = \tilde{S}_R^*(\tau - \Delta\tau_{i,i+1}, i + 1) \quad (3.20)$$

Βήμα 2: Σύζευξη φάσης

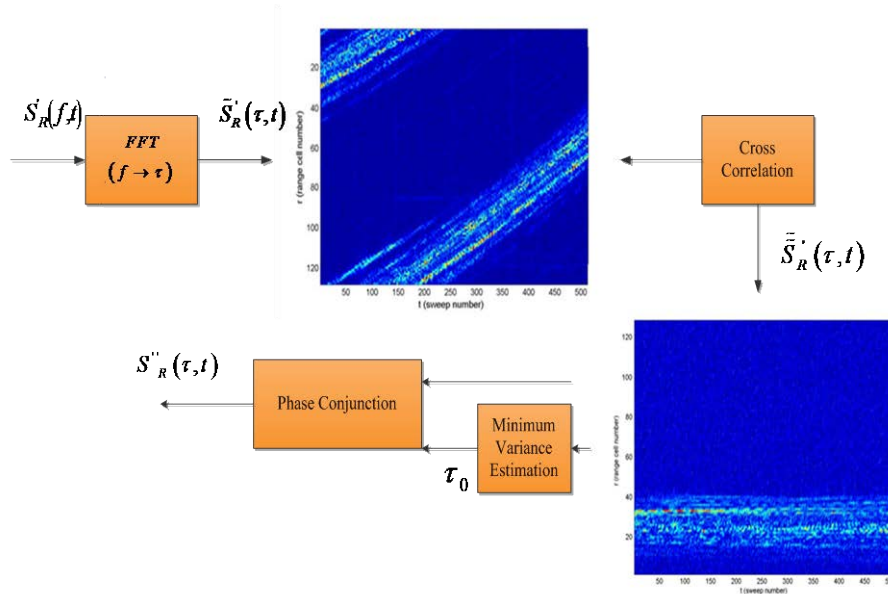
Η σύζευξη φάσης αναπαριστά μια βελτίωση της ευθυγράμμισης του κελιού απόστασης. Στην πραγματικότητα με σκοπό να λάβουμε μια ικανοποιητική αντιστάθμιση κίνησης είναι αναγκαίο να ευθυγραμμίσουμε το κελί απόστασης με μια ακρίβεια συγκρίσιμη με το ένα δέκατο του μήκους κύματος του ραντάρ. Επειδή η κατά προσέγγιση ευθυγράμμιση απόστασης δεν μπορεί να φτάσει σε μια ακρίβεια καλύτερη από την ανάλυση του κελιού απόστασης θα πρέπει να γίνει μια βελτίωση.

Κατ' αρχήν θα πρέπει να βρεθούν τα περισσότερα ακίνητα κελιά απόστασης. Μια τέτοια επιλογή πραγματοποιείται με μέτρηση της διακύμανσης πλάτους επιλέγοντας το κελί απόστασης με την ελάχιστη διακύμανση.

Η ιστορία φάσης σχετική με το επιλεγόμενο κελί απόστασης αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται για να αντισταθμιστούν οι ιστορίες φάσης όλων των κελιών απόστασης (σύζευξη φάσης).

$$S_R''(\tau, t) = \tilde{S}_R^i(\tau, t) \exp[-j\varphi_0(t)] \quad -T_{obs}/2 < t < +T_{obs}/2 \quad (3.21)$$

όπου $\varphi_0(t)$ είναι η ιστορία φάσης της ελάχιστης διακύμανσης του κελιού απόστασης. Ένας τέτοιος αλγόριθμος ονομάζεται PPP επειδή συχνά η ελάχιστη διακύμανση του κελιού απόστασης δίδεται από τον επικρατέστερο σκεδαστή.



Σχήμα 3-2. Διάγραμμα αλγορίθμου PPP

3.2.2 Αλγόριθμος κλίσης φάσης (PGA)

Ο αλγόριθμος PGA είναι μια άλλη τεχνική που είναι σε θέση να εκτελέσει μια ρύθμιση φάσης. Ο περιορισμός που παρέχεται από τον αλγόριθμο PPP σχετικά με το γεγονός ότι ο σταθερός επικρατέστερος σκεδαστής απαιτείται να είναι μέσα στην περιοχή, εδώ ξεπερνιέται.

Στην πραγματικότητα ο αλγόριθμος PGA πραγματοποιεί μια βελτίωση στην εκτίμηση φάσης θεωρώντας ολόκληρη την περιοχή.

Ο αλγόριθμος PGA απευθείας λαμβάνεται από την μέγιστη εκτίμηση πιθανότητας (MLE). Ας επιτρέψουμε στα ευθυγραμμισμένα κελιά απόστασης να αναπαρίστανται από το σήμα διακριτού χρόνου [1]

$$\tilde{S}'_R(k,n) = S_C(k,n) \exp[j\varphi_\varepsilon(n)] \quad (3.22)$$

όπου $\varphi_\varepsilon(t)$ είναι η υπολοιπόμενη φάση που είναι να αντισταθμιστεί και $S_C(\tau,t)$ είναι το τέλεια ευθυγραμμισμένο σήμα. Είναι αξιο παρατήρησης ότι η υπολοιπόμενη φάση υποτίθεται ότι είναι ίδια για κάθε κελί απόστασης k .

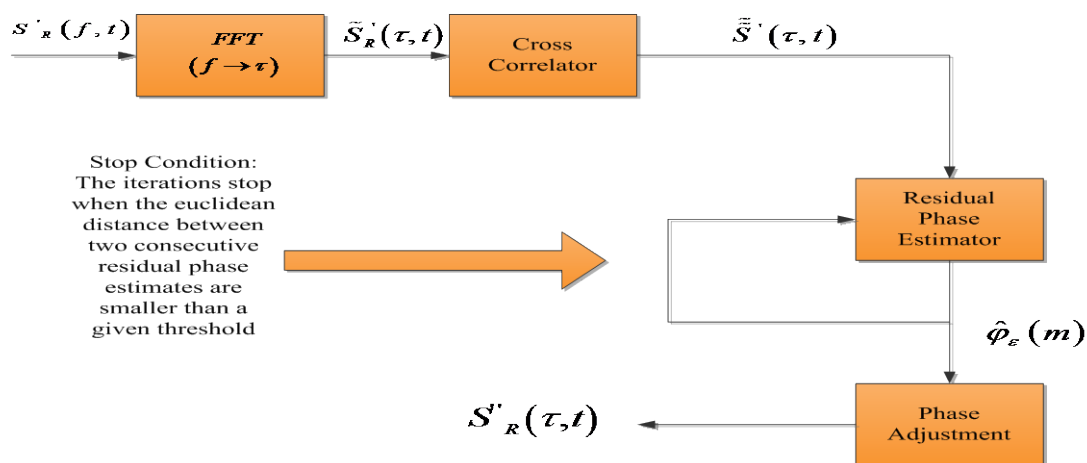
Η ρύθμιση φάσης μπορεί να ληφθεί με εκτίμηση της υπολοιπόμενης φάσης

$\varphi_\varepsilon(t)$. Η υπολοιπόμενη εκτίμηση φάσης λαμβάνεται μέσω του αθροίσματος των εκτιμήσεων διαφοράς φάσης. Ο υπολειμματικός εκτιμητής φάσης περιγράφεται από την σχέση

$$\begin{aligned}\ddot{\varphi}_\varepsilon(n) &= \sum_{i=2}^n \Delta\varphi(i) \\ \ddot{\varphi}_\varepsilon(1) &= 0\end{aligned}\quad (3.23)$$

όπου
$$\Delta\varphi(n) = \angle \sum_{k=1}^K \tilde{S}'_R(k, n-1) \quad (3.24)$$

Ο υπολογισμός της γωνίας του αθροίσματος της συνεισφοράς όλων των κελιών απόστασης είναι περισσότερο εύρωστη σε σχέση με το θόρυβο. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα απευθείας παράγεται από την θεωρία της μέγιστης εκτίμησης πιθανότητας.



Σχήμα 3-3. Διάγραμμα αλγορίθμου PG

3.3 Εντροπία εικόνας - ορισμός της εντροπίας

Ας είναι x μια πραγματική τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) $p(x)$. Η κατά τον Shannon [3] εντροπία x ορίζεται ως ακολούθως

$$S = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln p(x) dx \quad (3.25)$$

Ακολουθώντας το ορισμό της εντροπίας του Shannon ο Pun [4] όρισε την εντροπία της εικόνας ως

$$S = - \sum_0^{MN-1} P_k \ln P_k; \quad P_k = z_k = z_k / z \quad (3.26)$$

όπου z_k είναι η συχνότητα της γκρίζας στάθμης k σε μια εικόνα. Το z ορίζεται ως

$$z = \sum_0^{MN-1} P_k \quad (3.27)$$

Έτσι το p_k είναι μια συνάρτηση της έντασης του pixel σε μια εικόνα. Η κατανομή της έντασης του pixel είναι ανόλογη με τον βαθμό εστίασης της εικόνας. Σε αυτό το περιβάλλον η εντροπία είναι μια μέτρηση της πιθανοκρατικής αβεβαιότητας της πληροφορίας. Η αβεβαιότητα αυξάνει καθώς η εικόνα γίνεται περισσότερο θολωμένη και μειώνεται καθώς η εικόνα γίνεται περισσότερο εστιασμένη. Υποθέτουμε ότι η τυχαία μεταβλητή είναι κανονικά κατανομημένη. Αν το x είναι να αναπαραστήσει την θέση του τυχαίως κινόμενου σωματιδίου τότε το p_x είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτής της θέσης. Είναι εύκολο να δείξουμε ότι η εντροπία δίνεται από την σχέση

$$S = \ln(\sigma\sqrt{2\pi\varepsilon}) \quad (3.28)$$

Παρατηρούμε ότι η εντροπία του x είναι ανάλογη προς την τυπική απόκλιση σ . Μια μικρή τιμή του σ σημαίνει ότι η πιθανότητα εύρεσης του σωματιδίου είναι μεγάλη σε ένα σχετικά στενό διάστημα και η εντροπία θα είναι μικρή. Μια αύξηση στην τυπική απόκλιση αποδίδει μεγαλύτερη τιμή εντροπίας που υποδηλώνει ότι το σωματίδιο μπορεί να βρεθεί σε θέση με μικρότερη ακρίβεια. Η έννοια της εντροπίας έχει εφαρμοσθεί στην αντιστάθμιση κίνησης της εικόνας του στόχου που λαμβάνεται μέσω του

ISAR. Στην ουσία η εντροπία της εικόνας θεωρείται σαν μια μέτρηση της ποιότητας της εικόνας του στόχου. Ο στόχος υποτίθεται ότι είναι μια συλλογή από κινούμενους σημειακούς σκεδαστές οι οποίοι ανακλούν το ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο κύμα ενώ βυθίζονται εντός της δέσμης του ραντάρ. Χρησιμοποιώντας δείγματα της συνάρτησης μεταφοράς ανάκλασης, οι θέσεις αυτών των σκεδαστών μπορεί να βρεθούν με επεξεργασία Fourier ώστε να κατασκευασθεί μια καθαρή εικόνα στόχου. Στην πράξη η ενέργεια που σκεδάζεται από δεδομένο σημειακό σκεδαστή δεν εντοπίζεται αλλά διαχέεται μέσω των κελιών ανάλυσης (resolution cells) οφειλόμενο στην κίνηση του στόχου. Διαισθητικά θεωρούμε την κατανομή ισχύος σαν μια συνάρτηση πυκνότητας της εικόνας. Η αντιστάθμιση με ανεπάρκεια φάσης αντιστοιχεί σε υψηλή τυπική απόκλιση στην ακρίβεια απόστασης καταλήγοντας σε υψηλή εντροπία. Συνεπώς η εικόνα βρίσκεται σε ανεστίαστη κατάσταση. Μεγαλύτερη εντροπία σημαίνει μικρότερη ακρίβεια της εικόνας, ενώ μικρότερη εντροπία υπονοεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Καθώς η κίνηση του στόχου έχει αντισταθμιστεί με τις βελτιωμένες εκτιμήσεις των παραμέτρων κίνησης η εντροπία μειώνεται στο ελάχιστο. Η εξίσωση (3.26) ξαναγράφεται ως

$$S = -\sum \sum I_{n,m} \ln I_{n,m} \quad (3.29)$$

όπου
$$I_{n,m} = \tilde{D}_{n,m} / \sum \sum \tilde{D}_{n,m} \quad (3.30)$$

και $\tilde{D}_{n,m}$ είναι η διατομή ενός ξεχωριστού στοιχείου εικόνας του ραντάρ υψηλής ευκρίνειας που δίνεται από τις σχέσεις

$$D(n,m) = 1/N \sum_{k=0}^{N-1} h(k,m) e^{(-i2\pi kn/N)} \quad (3.31)$$

με
$$h(k,m) = 1/M \sum_{j=0}^{M-1} H(k,j) e^{(i2\pi mj/M)} \quad (3.32)$$

όπου N ο αριθμός των ριπών (bursts) (σειρές του πίνακα $M \times N$) και

$$D(n,m) = 1/NM \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} H(k,j) e^{(i2\pi mj/M)} e^{(-i2\pi kn/N)} \quad (3.33)$$

με $n = 0, 1, \dots, N-1$ $m = 0, 1, \dots, M-1$. Παρατηρούμε ότι $\tilde{D}(n, m)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της αντισταθμισμένης συνάρτησης πυκνότητας ανακλαστικότητας $\tilde{H}_{n, m}$. Επίσης η σχέση (3.33) εκφράζει σε συμπαγή μορφή τον μετασχηματισμό Fourier που προκύπτει από τις σχέσεις 3.31 και 3.32. Μια μεταβολή της σχέσης (3.29) δίνεται από ένα εκθετικό κέρδος πληροφορίας [5]

$$S = \sum \sum I_{n, m} \exp(1 - I_{n, m}) \quad (3.34)$$

Αυτή η έκφραση να είναι λιγότερο ευαίσθητη στον θόρυβο. Η αιχμηρότητα της εικόνας εξαρτάται από τις εκτιμήσεις των κινηματικών παραμέτρων του στόχου. Η διαδικασία της αντιστάθμισης επαναλαμβάνεται για διαφορετικά σέτ εκτιμήσεων ταχύτητας και επιτάχυνσης μέχρις ότου βρεθεί μια λύση στην μετατοπιστική κίνηση ώστε να αποδοθεί μια γενική ελάχιστη τιμή εντροπίας. Επισημαίνουμε ότι αυτή η μέθοδος είναι υπολογιστικά δαπανηρή επειδή απαιτεί δισδιάστατο διακριτό μετασχηματισμό Fourier για κάθε εικόνα που παράγεται, και η διαδικασία παραγωγής εικόνας συνεχίζεται μέχρις ότου επιτύχουμε μία γενική ελάχιστη τιμή εντροπίας.

3.4 Ενδείκτες εστιακής ποιότητας

Η αντιστάθμιση κίνησης στο ISAR απαιτεί την γνώση της στιγμιαίας απόστασης του στόχου εντός ενός παραθύρου απόστασης. Αν και ο μετασχηματισμός Fourier είναι το σταθερό εργαλείο που χρησιμοποιείται στο ISAR για την μέτρηση του range-walk υψηλής ευκρίνειας [6] οι τροποποιημένες διαδικασίες που βασίζονται πάνω στον προσαρμοστικό μετασχηματισμό στο κοινό πεδίο χρόνου-συχνότητας (adaptive joint time – frequency) [7] ή στην επεξεργασία chirp-z [8] που έχει προταθεί για την βελτίωση της μέτρησης της ευκρίνειας απόστασης. Αυτές οι διαδικασίες συνήθως μετρούν την σχετική απόσταση του επικρατέστερου σκεδαστή με ιχνηλασία της κορυφής της περιβάλλουσας, [9, 10] του κέντρου μάζης της κάθετης απόστασης (cross-range) [11] ή τις ολισθήσεις συχνότητας Doppler

[7]. Αφού η στιγμιαία απόσταση του στόχου έχει υπολογισθεί θα πρέπει να προσδιορισθούν οι παράμετροι κίνησης του στόχου μέσω του ενδείκτη εστιακής ποιότητας. Αυτές οι παράμετροι πρέπει έπειτα να χρησιμοποιηθούν για την αντιστάθμιση της υπογραφής του στόχου ISAR. Η υπογραφή της αντισταθμισμένης κίνησης διαδοχικά επεξεργάζεται εντός της εστιασμένης ISAR εικόνας. Οι ενδείκτες εστιακής ποιότητας που προτείνονται στην βιβλιογραφία περιλαμβάνουν την εντροπία εικόνας [12, 13], την παραγόμενη ριπή (burst derivative) [14, 15], την διαφορά φάσης [16,17], και την βελτιστοποίηση της αντίθεσης της εικόνας [18]. Η εντροπία της εικόνας που είναι μια μέτρηση του βαθμού εστίασης της εικόνας χρησιμοποιείται σαν ενδείκτης εστιακής ποιότητας αναφοράς. Αν και η προσέγγιση του ενδείκτη εντροπίας είναι ένας αποδεδειγμένος και αποδοτικός τρόπος για την εστίαση της εικόνας, είναι μια δαπανηρή πρόταση επειδή απαιτεί την ανάλυση των κύριων σκεδαστών του στόχου σε διαμήκη και κάθετη απόσταση (range-doppler) μέσω διακριτού δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier. Η χρήση της παραγόμενης ριπής παρουσιάζεται ως μια αποδοτική εναλλακτική πρόταση επειδή αποκλείει την ανάγκη επεξεργασίας με μετασχηματισμό Fourier. Ωστόσο ο ενδείκτης παραγόμενης ριπής απαιτεί μια προαγόμενη ερευνητική μέθοδο για τον εντοπισμό της θέσης του γενικού ελάχιστου μέσω των πολλών τοπικών ελαχίστων στο χώρο έρευνας. Έτσι η χρήση ενός βελτιωμένου ενδείκτη εστιακής ποιότητας που βασίζεται πάνω στην πληροφορία της κλίσης φάσης [19] έχει πρόσφατα προταθεί. Ένας βέλτιστος ενδείκτης εστιακής ποιότητας θα μπορούσε να χαρακτηρίζεται από ένα γενικό ελάχιστο και όχι από τοπικά ελάχιστα έτσι ώστε να αποφύγουμε την επεξεργασία Fourier.

Η εντροπία επίσης δίνεται και από την σχέση [20]:

$$H = - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \bar{P}_s(k,n) \ln(P_s(k,n)) \quad (3.35)$$

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

$$\bar{P}_s(k, n) = \frac{|\tilde{S}(k, n)|^2}{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M |\tilde{S}(k, n)|^2} \quad (3.36)$$

και

$$\tilde{S}(k, n) = \sum_{p=1}^N \tilde{S}(p, n) e^{-j2\pi \frac{kp}{j}} \quad (3.37)$$

όπου $k = 1, \dots, N$ και $j = 1, \dots, M$.

3.5 Συγκρίσεις

Κάθε μια από τις τεχνικές αυτοεστίασης ISAR που αναφέρονται εδώ έχουν υπέρ και κατά. Επειδή η τελική χρήση του ISAR είναι η ταξινόμηση των στόχων η αναγνώριση, η επιλογή της καλύτερης τεχνικής σχετίζεται με την πραγματοποίηση του συστήματος αυτόματης αναγνώρισης των στόχων.

Ωστόσο είναι δυνατό να αξιολογήσουμε τις επιδόσεις των τεχνικών αυτοεστίασης ορίζοντας παραμέτρους που ενεργούν ως δείκτες απόδοσης.

Η σύγκριση της ανάλυσης προτείνεται να βασίζεται πάνω στα εξής κριτήρια.

- οπτική ανάλυση
- αντίθεση εικόνας
- κορυφή εικόνας
- υπολογιστικό κόστος

3.6 Προτεινόμενος αλγόριθμος αυτόματης αυτοεστίασης δισδιάστατου στόχου ISAR

3.6.1 Εισαγωγή

Το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR) είναι μια πασίγνωστη τεχνική για την ανακατασκευή εικόνας υψηλής ανάλυσης ενός

στόχου. Παλμοί υψηλού εύρους ζώνης εκπέμπονται, ενώ οι ανακλάσεις του στόχου λαμβάνονται σε διαφορετικές γωνίες θέασης και επεξεργάζονται συμφασικά για να σχηματισθεί η εικόνα του στόχου. Ένα από τα θεμελιώδη βήματα της τεχνικής ISAR είναι η εστίαση της εικόνας ή αντιστάθμιση κίνησης [21-25], [2], [20-26-27].

Στον πραγματικό σεναρίων απεικόνισης απεικόνισης ISAR, ο στόχος που είναι να απεικονισθεί συχνά εμπλέκεται σε πολύπλοκους ελιγμούς και η κίνηση του στόχου μπορεί να διαιρεθεί σε μετατοπιστική και περιστροφική κίνηση. Η περιστροφική κίνηση συνεισφέρει στην απεικόνιση, ενώ η μετατοπιστική κίνηση εισάγει ανεπιθύμητη παραμόρφωση φάσης, η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους κίνησης του στόχου [22-23]. Η ομοιόμορφη περιστροφή είναι αναγκαία για την επίτευξη αποτελεσματικής ανάλυσης στην κάθετη απόσταση (cross-range), ενώ η μη ομοιόμορφη περιστροφή (γωνιακή επιτάχυνση ή επιβράδυνση) μπορεί σημαντικά να υποβαθμίσει την αποκτηθείσα ποιότητα της εικόνας ISAR.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος που αναπτύσσεται στην παρούσα παράγραφο έχει βασισθεί στην κλασική τεχνική απόστασης και Doppler [21], [22] έτσι όπως περιγράφεται στην εργασία A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization (Kallitsis, Karakasiliotis, Boultsadakis and Frangos, 2011). Στην περίπτωση ομοιόμορφης περιστροφής του στόχου η διαδικασία της πολικής επαναδιαμόρφωσης συνήθως χρησιμοποιείται [21] για να εξουδετερωθεί η παραμόρφωση που εισάγεται από την περιστροφή του στόχου (μετακίνηση στην διαμήκη ή κατά διόπτρευση απόσταση). Αυτή η διαδικασία μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί για την αντιστάθμιση της μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης, αλλά απαιτεί την γνώση των παραμέτρων κίνησης του στόχου (επαναληπτική έρευνα για την γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση) καθώς και των υπολογιστικά εντατικών διαδικασιών παρεμβολής.

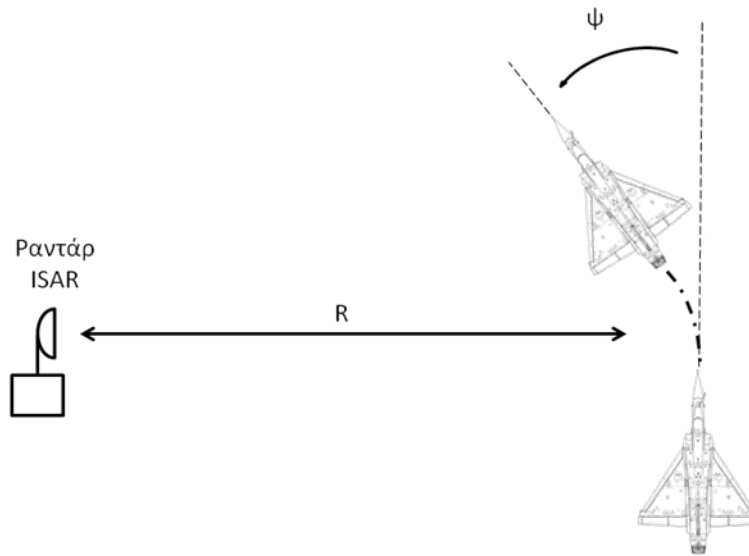
Σε αυτή την έρευνα, η αυτοεστίαση σχετίζεται με τις μετεπεξεργασμένες τεχνικές απεικόνισης ISAR, οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας ISAR προτού εφαρμοστούν οι διαδικασίες αναγνώρισης και ταξινόμησης στόχου. Συνήθως, η αυτοεστίαση βασίζεται στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης της εντροπίας [23, 25], το οποίο υιοθετείται στην παρούσα έρευνα.

Εναλλακτικά, η αυτοεστίαση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της μεγιστοποίησης της εντροπίας [2].

Στην δική μας μελέτη, συγκεντρωνόμαστε στην βελτίωση της ποιότητας της δισδιάστατης εικόνας ISAR μέσω της μετεπεξεργασμένης μεθοδολογίας που αντισταθμίζει την μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση [27], και υποθέτουμε ότι το μέγεθος του στόχου δεν υπερβαίνει το πρακτικό όριο της ακτίνας αμαύρωσης (Blur Radius) [21]. Έτσι η πολική επαναδιαμόρφωση (polar-reformatting) μπορεί να αποφευχθεί για την περίπτωση της ομοιόμορφης περιστροφής. Στην περίπτωση της μη ομοιόμορφης περιστροφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4 (σταθερή γωνιακή επιτάχυνση), εμείς προτείνουμε ένα καινοτόμο ευριστικό αλγόριθμο αυτοεστίασης για να αντισταθμίσουμε την αμαύρωση της εικόνας ISAR. Βασίζεται σε μια αποδεκτή περιοχή τιμών εντροπίας εικόνας, ώστε να αμελεί τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες ISAR χαμηλής ποιότητας και να χρησιμοποιεί μόνο τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες ISAR ανώτερης ποιότητας. Αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ικανότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου ώστε να παραχθούν καλές εστιασμένες εικόνες ISAR, με σχεδόν βέλτιστες τιμές εντροπίας.

Η εντροπία της εικόνας είναι μια μέτρηση του βαθμού αξιοπιστίας της εικόνας, σε σχέση με την εστίαση της εικόνας και την συνολική ανάλυση.

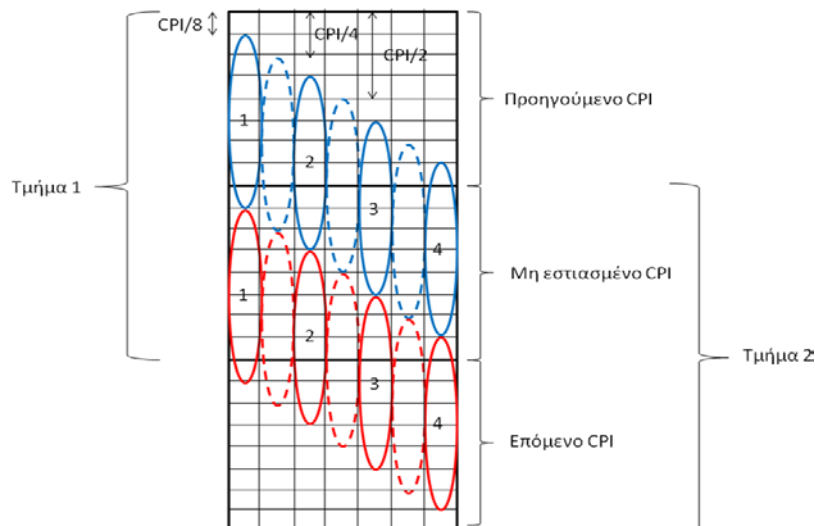
Η εντροπία H της κανονικοποιημένης ισχύος της εικόνας ISAR μπορεί να υπολογιστεί [20], και στην περίπτωση που υπερβαίνει ένα κατώφλι εντροπίας H_{thr} θα εφαρμόζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται ώστε να αντικατασταθεί το μέρος του ληφθέντος σήματος που έχει επηρεαστεί από την γωνιακή επιτάχυνση του στόχου. Αεροπορικοί στόχοι με (πιθανή) ταχεία περιστροφική κίνηση (fast maneuvering), οι οποίοι παρουσιάζουν μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση εντός της χρονικής περιόδου του ενός συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI), συνθέτουν το τυπικό σενάριο απεικόνισης ISAR που εξετάζουμε σε αυτή την μελέτη.



Σχήμα 3-4. Μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση στόχου

3.6.2 Μεθοδολογία του αλγορίθμου

Το διάγραμμα του Σχήματος 3-5 απεικονίζει την μεθοδολογία του προτεινόμενου αλγορίθμου αυτοεστίασης. Αυτή η αλγοριθμική διαδικασία εν συντομία την ονομάζουμε αυτοεστίαση του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocusing), αφού βασίζεται στην διαίρεση και συνένωση των πινάκων με ακατέργαστα δεδομένα των δύο συνεχόμενων συμφασικών διαστημάτων επεξεργασίας.



Σχήμα 3-5. Μεθοδολογία προτεινόμενου αλγορίθμου

Αρχικά, το χρονικό διάστημα που ο στόχος υφίσταται περιστροφική κίνηση με γωνιακή επιτάχυνση ονομάζεται μη-εστιασμένο συμφασικό 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 τα συνενούμενα μέρη του προηγούμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας και του μη-εστιασμένου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας, ενώ το δεύτερο τμήμα περιέχει τα συνενούμενα τμήματα του μη-εστιασμένου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας και του επόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (“επόμενο” CPI στο Σχήμα 3-5).

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocusing), αποτελείται από ένα μεταβλητό αριθμό βαθμίδων (N_{stages}) που σχετίζονται με το βάθος διαχωρισμού (δηλαδή με τον αριθμό των υπό-τμημάτων που δύναται να διαιρεθεί το CPI) ως ένα κλάσμα του CPI. Για να μειώσουμε την υπολογιστική πολυπλοκότητα επιλέγουμε το CPI να διαιρείται σε τμήματα δύναμης του δύο, αυξάνοντας τον διαιρέτη του CPI με ένα συντελεστή του δύο από βαθμίδα σε βαθμίδα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αριθμός των ριπών (bursts) συνήθως επιλέγεται να είναι δύναμη του δύο, η απομόνωση των ακατέργαστων δεδομένων και ο διαχωρισμός τους μπορεί να απλοποιηθεί. Επιπλέον είναι άξιο παρατήρησης ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στα δεδομένα της ιστορίας του προφίλ απόστασης αντί των ακατέργαστων δεδομένων εκτός από τα σενάρια ISAR για τα οποία είναι αναγκαία η αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης και πραγματοποιείται στα δεδομένα της ιστορίας του προφίλ απόστασης. (δηλαδή τραχεία αντιστάθμιση απόστασης). Διασώζοντας τον πρώτο μετασχηματισμό Fourier στην κλασική απεικόνιση απόστασης-Doppler (RDA-Algorithm) σημαντικά μειώνεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου.

Στο Σχήμα 3-5 απεικονίζεται γραφικά η μεθοδολογία του διαχωρισμού και της συνένωσης της τρίτης βαθμίδας ($CPI/8$) του αλγόριθμου διαχωρισμού του συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας. Η κύρια ιδέα είναι η ίδια για όλες τις βαθμίδες του αλγόριθμου ($CPI/2, CPI/4, κλπ$). Ο κάθετος άξονας του

σχήματος 3-5 περιέχει τον δείκτη για τις ριπές (άξονας αργού χρόνου) και ο οριζόντιος άξονας περιέχει τον δείκτη για τις συχνότητες (άξονας γρήγορου χρόνου). Τα μπλέ και κόκκινα ελλειψοειδή δείχνουν αντίστοιχα τους δυνατούς συνδυασμούς των δεδομένων του τμήματος 1 και τμήματος 2. Ο όρος συνδυασμός αναφέρεται στην συνένωση των μερών των δεδομένων των δύο συνεχόμενων CPI's. Γενικά τα δύο μέρη των δεδομένων που είναι να συνδυαστούν έχουν διαφορετικά μεγέθη σε αντιστοιχία με τον αριθμό των ριπών με εξαίρεση την βαθμίδα $CPI/2$. Τα διακεκομμένα ελλειψοειδή δηλώνουν εκείνους τους συνδυασμούς δεδομένων οι οποίοι ήδη έχουν εξεταστεί στις προηγούμενες βαθμίδες διαχωρισμού του συμφασικού χρόνου ολοκλήρωσης και αποκλείονται για μια ικανοποιητική απόδοση του αλγόριθμου. Ο αριθμός, των δυνατών συνδυασμών ανά τμήμα για το i -οστό στάδιο διαχωρισμού της βαθμίδας του CPI, που μπορούμε να πάρουμε είναι:

$$N_{i,comb} = 2^{i-1} \quad (i = 1, \dots, N_{stages}) \quad (3.38)$$

Στις δικές μας προσομοιώσεις θέτουμε τον αριθμό των βαθμίδων να είναι $N_{stages} = 4$ καταλήγοντας σε ένα συνολικό αριθμό από 30 εξεταζόμενους συνδυασμούς δεδομένων. Παρακάτω εξηγούμε πιο αναλυτικά τον αλγόριθμο.

Αρχικά, υπολογίζουμε την εντροπία των CPI και όταν εντοπίσουμε κάποιο CPI 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 δεδομένων (με διάρκεια ίση με ένα CPI), σχηματίζεται μια ISAR εικόνα μέσω του διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier και υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή εντροπίας [20]. Σε κάθε βαθμίδα διαχωρισμού του CPI ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί είτε να επιλέξει την ISAR εικόνα με την ελάχιστη τιμή εντροπίας η την πρώτη εικόνα καταλήγοντας σε μια τιμή εντροπίας εντός μιας αποδεκτής περιοχής. Φυσικά θέτοντας μια κατάλληλη περιοχή αποδεκτών τιμών εντροπίας για την εικόνα ISAR, ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει σε μια αρχική βαθμίδα διαχωρισμού του CPI εξοικονομώντας υπολογιστικό χρόνο ενώ ακόμη ικανοποιούνται τα κριτήρια για την εστίαση της εικόνας ISAR.

3.7 Προσδιορισμός των κατωφλίων εντροπίας

Με σκοπό να προσδιορίσουμε τις κατάλληλες τιμές για το κατώφλι εντροπίας H_{thr} όπως επίσης και τα χαμηλότερα (H_{low}) και τα υψηλότερα (H_{upp}) όρια για την αποδεκτή περιοχή εντροπίας, εκτελούμε διάφορες προσομοιώσεις Monte-Carlo για να ποσοτικοποιήσουμε την μεταβολή της εντροπίας της εικόνας σε σχέση με τον σηματοθορυβικό λόγο (SNR) και την γωνιακή επιτάχυνση. Στις δικές μας αριθμητικές προσομοιώσεις, μπορούμε επίσης να ποσοτικοποιήσουμε την μεταβολή της εντροπίας σε σχέση με τον

δείκτη του CPI, δηλαδή την μεταβολή της γωνίας θέασης. Λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις εξαρτήσεις της εντροπίας της εικόνας ISAR για την περίπτωση των συνθετικών δεδομένων ραντάρ θεωρούμε ότι είναι το πρώτο βήμα προς την αυτοματοποίηση του προτεινόμενου αλγόριθμου αυτοεστίασης για την εφαρμογή στο πεδίο των πραγματικών δεδομένων.

Κατωτέρω παραθέτουμε τους πίνακες που δημιουργήθηκαν από τα αποτελέσματα των πολλαπλών δοκιμών της μεθόδου Monte-Carlo προκειμένου να εξαχθούν τα όρια της εντροπίας εικόνας.

Πίνακας 3-1. Τιμές μέγιστης εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,508074	7,761525	7,762709	7,75236	7,750268	7,751513	7,756616	7,764995	7,755017	7,751476
2	7,14631	7,416044	7,427817	7,412443	7,402321	7,406529	7,405987	7,410049	7,396159	7,410481
4	6,804698	7,055331	7,07488	7,032443	7,025751	7,040177	7,053849	7,053753	7,015805	7,025607
6	6,50652	6,745692	6,732784	6,697518	6,683078	6,687172	6,737552	6,713877	6,658745	6,675691
8	6,267334	6,469425	6,450923	6,405448	6,378965	6,397085	6,462978	6,428208	6,366504	6,383461
10	6,084098	6,25565	6,23056	6,175997	6,14629	6,16055	6,246255	6,199035	6,132436	6,149798
12	5,955254	6,099078	6,064238	5,999784	5,965749	5,979247	6,088759	6,030895	5,956041	5,970861
15	5,827034	5,942001	5,896134	5,826318	5,78978	5,805856	5,926906	5,861534	5,77839	5,795409
20	5,72606	5,815448	5,761442	5,684142	5,642886	5,658462	5,798576	5,722025	5,631364	5,647532
30	5,675782	5,753145	5,694388	5,613429	5,56938	5,5833	5,732284	5,652003	5,556543	5,573021

Πίνακας 3-2. Τιμές ελάχιστης εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,432342	7,674419	7,691005	7,68627	7,670827	7,686413	7,67983	7,69021	7,677391	7,685273
2	7,079943	7,335134	7,348972	7,340491	7,328517	7,342901	7,328479	7,336766	7,314067	7,326933
4	6,750968	6,999795	7,009074	6,974591	6,953245	6,977936	6,997763	6,989058	6,948299	6,972778
6	6,464934	6,69525	6,685361	6,648993	6,628364	6,637561	6,679213	6,663267	6,62134	6,631227
8	6,226807	6,426521	6,412693	6,367587	6,339039	6,352942	6,423808	6,390529	6,334631	6,349272
10	6,05559	6,227848	6,200361	6,143772	6,116714	6,130016	6,216953	6,170379	6,103103	6,118774
12	5,928845	6,076423	6,041029	5,976016	5,946113	5,953926	6,064991	6,009973	5,932801	5,9509
15	5,810723	5,928105	5,883465	5,814085	5,775729	5,791301	5,914027	5,845981	5,763694	5,777883
20	5,71698	5,808462	5,754335	5,678574	5,636732	5,651208	5,790544	5,716006	5,624994	5,64113
30	5,673117	5,750985	5,691941	5,611526	5,566957	5,581772	5,730117	5,64986	5,554922	5,571212

Πίνακας 3-3. Τιμές τυπικής απόκλισης εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,014409	0,016512	0,012977	0,012698	0,015171	0,014992	0,016718	0,0145	0,015818	0,013737
2	0,013312	0,013925	0,01361	0,015021	0,014104	0,013016	0,01546	0,016029	0,014072	0,014551
4	0,011787	0,010384	0,012858	0,013353	0,014515	0,01302	0,012588	0,011973	0,013255	0,012976
6	0,009296	0,010975	0,009856	0,010099	0,010331	0,010444	0,011332	0,010263	0,00921	0,009563
8	0,007826	0,00835	0,007999	0,006852	0,008292	0,008497	0,007701	0,008588	0,007319	0,007928
10	0,005387	0,006683	0,005771	0,00663	0,006396	0,005634	0,005615	0,005799	0,005912	0,005992
12	0,004761	0,005144	0,00464	0,004703	0,003936	0,004276	0,004786	0,00482	0,004651	0,004403
15	0,003064	0,002999	0,003103	0,002573	0,002994	0,002899	0,002907	0,00291	0,002737	0,003242
20	0,001665	0,001582	0,001593	0,001266	0,001177	0,001319	0,001512	0,001339	0,001232	0,001333
30	0,000552	0,00045	0,000493	0,000362	0,00039	0,000349	0,000507	0,000413	0,000302	0,000333

Πίνακας 3-4. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,470064	7,715163	7,729574	7,721882	7,712063	7,722580	7,713776	7,722684	7,708090	7,715270
2	7,112583	7,377133	7,390537	7,372684	7,362073	7,374256	7,369510	7,375371	7,353050	7,366038
4	6,773348	7,030328	7,035969	7,008240	6,996231	7,009725	7,025291	7,020558	6,985572	6,996170
6	6,483307	6,717660	6,709441	6,671906	6,651172	6,667847	6,708384	6,688314	6,640596	6,655414
8	6,249342	6,449191	6,431592	6,386573	6,360576	6,375109	6,441405	6,409853	6,349664	6,365270
10	6,072153	6,241949	6,214378	6,159001	6,130143	6,144829	6,232444	6,186212	6,117388	6,134287
12	5,943567	6,087889	6,052202	5,989183	5,955547	5,970928	6,076414	6,019998	5,944429	5,959424
15	5,819255	5,934684	5,889632	5,820523	5,781976	5,797249	5,921151	5,854367	5,770684	5,786185
20	5,721578	5,812039	5,757943	5,681694	5,639533	5,654747	5,794643	5,719296	5,627735	5,644174
30	5,674096	5,751988	5,693050	5,612578	5,567858	5,582483	5,731281	5,650935	5,555633	5,572221

Πίνακας 3-5. Τιμές max of max, min of min και minmax difference

max_of_max	min_of_min	minmax_diff
7,764995247	7,432342176	0,332653071
7,427817432	7,079942983	0,347874449
7,074879614	6,750968346	0,323911268
6,745691721	6,464933680	0,280758041
6,469424681	6,226806958	0,242617723
6,255649895	6,055589992	0,200059903
6,099078347	5,928844899	0,170233448
5,942001006	5,763694399	0,178306607
5,815448472	5,624993932	0,190454540
5,753144540	5,554922473	0,198222067

Πίνακας 3-6. Τιμές max mean difference=upper deviation

SNR [dB]	max_mean_diff = upp_dev									
0	0,038010	0,046363	0,033135	0,030478	0,038204	0,028933	0,042840	0,042312	0,046926	0,036207
2	0,033727	0,038911	0,037280	0,039758	0,040248	0,032273	0,036477	0,034678	0,043109	0,044444
4	0,031349	0,025003	0,038911	0,024203	0,029520	0,030452	0,028558	0,033194	0,030233	0,029437
6	0,023213	0,028031	0,023343	0,025611	0,031906	0,019324	0,029169	0,025563	0,018149	0,020277
8	0,017992	0,020233	0,019331	0,018874	0,018389	0,021976	0,021573	0,018356	0,016840	0,018191
10	0,011946	0,013701	0,016181	0,016996	0,016146	0,015721	0,013812	0,012823	0,015048	0,015511
12	0,011688	0,011190	0,012036	0,010601	0,010201	0,008319	0,012345	0,010897	0,011612	0,011437
15	0,007779	0,007317	0,006502	0,005795	0,007804	0,008607	0,005755	0,007167	0,007706	0,009223
20	0,004481	0,003409	0,003499	0,002448	0,003353	0,003716	0,003933	0,002728	0,003628	0,003358
30	0,001686	0,001157	0,001337	0,000852	0,001522	0,000817	0,001003	0,001068	0,000911	0,000800

Πίνακας 3-7. Τιμές mean upper deviation, mean std και upper ratio factor

mean_upp_dev	mean_std	upp_ratio_factor
0,038341	0,014753210	2,598804613
0,038091	0,014309986	2,661817408
0,030086	0,012671043	2,374389570
0,024459	0,010136841	2,412860067
0,019175	0,007935372	2,416452853
0,014789	0,005981724	2,472284838
0,011033	0,004611985	2,392147649
0,007366	0,002942757	2,502930942
0,003455	0,001401859	2,464887314
0,001115	0,000415050	2,686663798

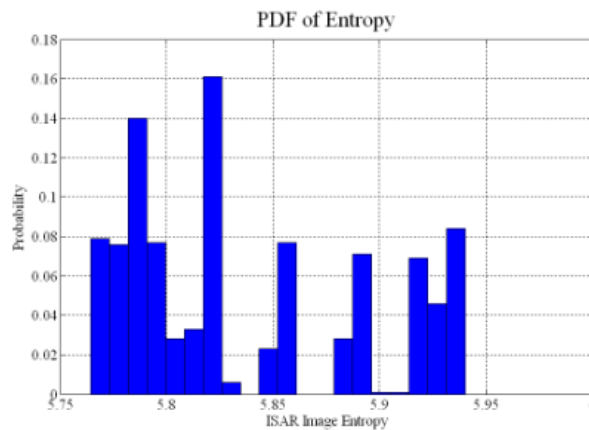
Πίνακας 3-8. Τιμές mean min difference=low deviation

SNR [dB]	mean_min_diff = low_dev									
0	0,037721	0,040744	0,038569	0,035611	0,041237	0,036167	0,033947	0,032473	0,030700	0,029996
2	0,032640	0,041999	0,041565	0,032193	0,033556	0,031355	0,041031	0,038605	0,038982	0,039104
4	0,022380	0,030534	0,026895	0,033649	0,042986	0,031790	0,027528	0,031501	0,037273	0,023392
6	0,018373	0,022411	0,024080	0,022914	0,022808	0,030287	0,029171	0,025047	0,019256	0,024187
8	0,022535	0,022670	0,018899	0,018986	0,021537	0,022166	0,017598	0,019323	0,015034	0,015998
10	0,016563	0,014101	0,014017	0,015229	0,013429	0,014813	0,015491	0,015832	0,014285	0,015514
12	0,014722	0,011465	0,011173	0,013167	0,009434	0,017002	0,011422	0,010025	0,011629	0,008524
15	0,008532	0,006579	0,006167	0,006438	0,006248	0,005949	0,007125	0,008386	0,006989	0,008302
20	0,004598	0,003577	0,003608	0,003120	0,002801	0,003538	0,004099	0,003291	0,002741	0,003045
30	0,000980	0,001003	0,001110	0,001052	0,000901	0,000711	0,001164	0,001075	0,000710	0,001009

Πίνακας 3-9. Τιμές mean low deviation και low ratio factor

mean_low_dev	low_ratio_factor
0,035717	2,420933670
0,037103	2,592810973
0,030793	2,430168263
0,023853	2,353127140
0,019475	2,454160967
0,014927	2,495487808
0,011856	2,570762813
0,007071	2,403017856
0,003442	2,455212144
0,000971	2,340629270

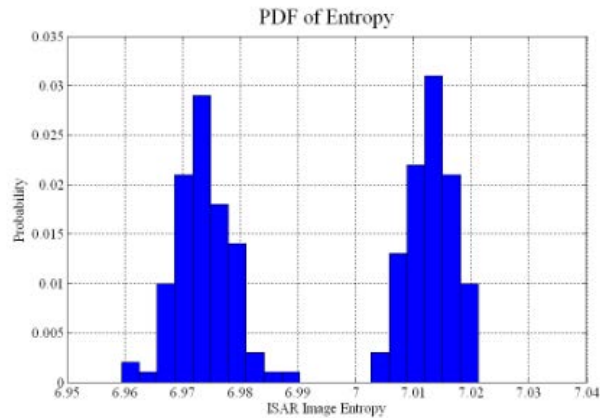
Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (Probability Distribution Function-PDF) της εντροπίας της εικόνας για ομοιόμορφη περιστροφή του στόχου και για $SNR = 15db$ φαίνεται στο Σχήμα 3-6. Αυτό το γράφημα έχει προκύψει από 100 δοκιμές Monte-Carlo.



Σχήμα 3-6. Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας ομοιόμορφης κίνησης

Το γράφημα του Σχήματος 3-6 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. Ο γωνιακός τομέας που εξετάζεται είναι κατά προσέγγιση 18.3° που αντιστοιχεί στα 10 CPI's.

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (probability distribution function - PDF) της εντροπίας για μη-ομοιόμορφη κίνηση του στόχου για $SNR = 15db$ φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Για αυτή την περίπτωση η γωνιακή επιτάχυνση καθορίζεται να είναι $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$



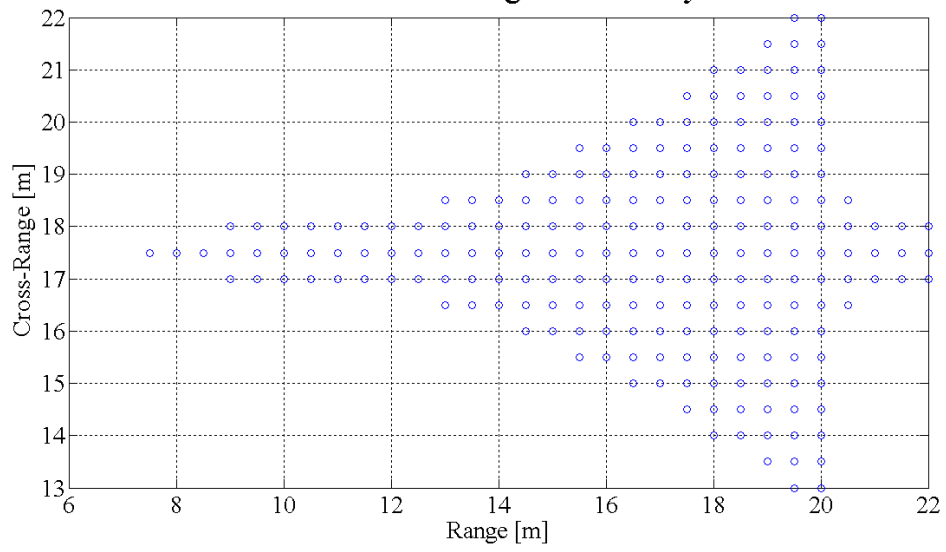
Σχήμα 3-7. Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας μη ομοιόμορφης κίνησης

Στο γράφημα του σχήματος 3-7 το οποίο έχει προκύψει από 100 δοκιμές Monte-Carlo φαίνεται ότι οι τιμές της εντροπίας για την μη ομοιόμορφη κίνηση είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές της ομοιόμορφης κίνησης του Σχήματος 3-6. Το κατάλληλο κατώφλι εντροπίας του στόχου, H_{thr} (με σίγουρο διάστημα εμπιστοσύνης) από το οποίο είναι δυνατόν να καθορισθεί αν η κίνηση είναι ομοιόμορφη ή μη, δύναται να παίρνει την τιμή 6.

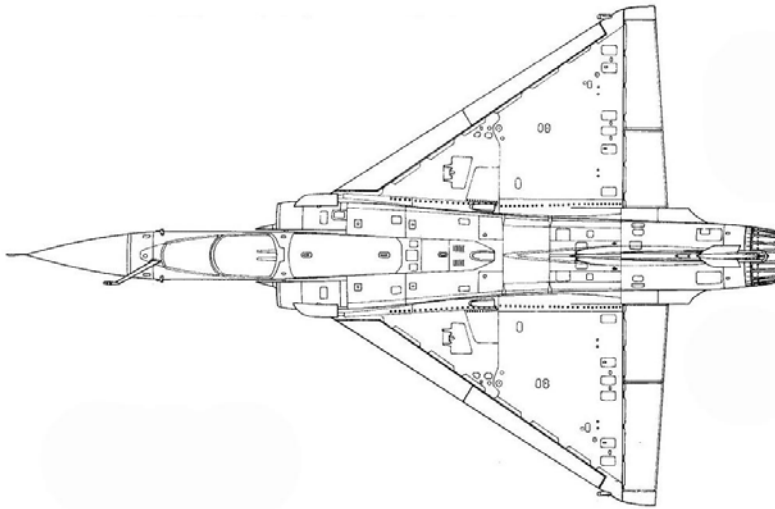
3.8 Αριθμητικά αποτελέσματα

Η προσομοιωμένη γεωμετρία του στόχου φαίνεται στο Σχήμα 3-8 ενώ στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η απεικόνιση του πραγματικού στόχου. Είναι το μοντέλο σημειακού σκεδαστή ενός πολεμικού αεροσκάφους Mirage 2000C που αποτελείται από 208 σκεδαστές με μήκος 14.5m και εκπέτασμα φτερών 9.0m. Οι παράμετροι του ραντάρ και της κίνησης του στόχου για τις δικές μας αριθμητικές προσομοιώσεις περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3-10

Simulated Target Geometry



Σχήμα 3-8. Γεωμετρία προσομοιωμένου στόχου Mirage 2000 C



Σχήμα 3-9. Απεικόνιση πραγματικού στόχου

Πίνακας 3-10. Παράμετροι προσομοίωσης ραντάρ ISAR

Παράμετροι	Τιμές
Αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]
Διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση, Δr_s	0,46875 [m]
Διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση, 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]

Τα οπισθοσκεδαζόμενα δεδομένα του ραντάρ $x(m,n)$ προσομοιώνονται μέσω του ακόλουθου τύπου

$$x(m,n) = \sum_{k=1}^d s_k \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_m (x_k \cos \theta_n - y_k \sin \theta_n) \right] + u(m,n) \quad (3.39)$$

Εδώ d είναι ο αριθμός των σκεδαστών, s_k η ένταση σκέδασης του k -ίστο σημειακού σκεδαστή, (x_k, y_k) οι καρτεσιανές συντεταγμένες του k -ίστο σημειακού σκεδαστή σε σχέση με την θέση του ραντάρ, m ο δείκτης βηματικής συχνότητας ($m = 1, \dots, M$), n ο δείκτης ριπών (bursts) ($n = 1, \dots, N \cdot N_{CPI}$) για ένα αριθμό προσομοιωμένων CPI's (N_{CPI}), N ο αριθμός των ριπών κατά την διάρκεια του ενός CPI, $u(m,n)$ δισδιάστατη επιπρόσθετη γκαουσιανή συνιστώσα θορύβου.

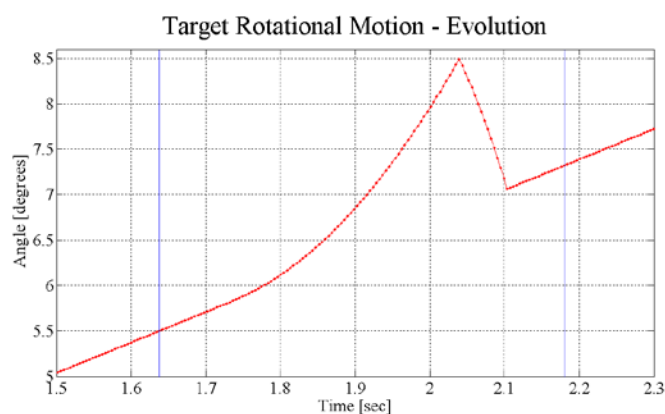
Η γωνία θέασης του στόχου στην στιγμή του αργού χρόνου t_n προσομοιώνεται ως εξής :

$$\theta_n = \begin{cases} \theta_0 + \omega t_n + \frac{1}{2} \gamma (t_n - t_{start})^2, & \text{πρώτη οδοσφ(οι) γωνιακή επιταχυνση} \\ \theta_0 + \omega t_n, & \text{αλλο} \end{cases} \quad (3.40)$$

Εδώ θ_0 είναι η αρχική γωνία θέασης του στόχου που υποτίθεται ότι βρίσκεται σε απόσταση 10 Km, ω η σταθερή γωνιακή ταχύτητα, γ η γωνιακή επιτάχυνση που μεταβάλλεται σε κάθε περίοδο, t_{start} η χρονική στιγμή (σαν ένα πολλαπλάσιο της διάρκειας της ριπής) στην οποία μια περίοδος γωνιακής επιτάχυνσης αρχίζει.

Στις δικές μας αριθμητικές προσομοιώσεις, η σχέση (3.39) παρέχει τα ακατέργαστα δεδομένα του σήματος λήψης που ανακλάται από τον στόχο και που εισάγονται στους πίνακες των N_{CPI} υποθέτοντας ομοιόμορφη κίνηση, εκτός από το τέταρτο και όγδοο CPI που τέθηκε δραστική γωνιακή επιτάχυνση στον στόχο προκειμένου να εισαχθεί παραμόρφωση στην εικόνα. Η γωνιακή επιτάχυνση εισάχθηκε μέσω της σχέσης (3.40) στο τέταρτο και όγδοο CPI επηρεάζοντας τους αντίστοιχους πίνακες με τα ακατέργαστα δεδομένα.

Η προσομοίωση του προφίλ της περιστροφικής κίνησης φαίνεται στο Σχήμα 3-10, έτσι όπως εστιάστηκε στο τέταρτο CPI του οποίου οι χρονικές στιγμές έναρξης και λήξης σημειώνονται με μπλέ κάθετες γραμμές. Ο χρόνος έχει δείκτη σε μονάδες διάρκειας ριπής (αργός-χρόνος). Η γωνιακή μεταβολή μεταξύ των περιόδων ομοιόμορφης και μη ομοιόμορφης περιστροφής εξομαλύνονται εφαρμόζοντας ένα φίλτρο μεγέθους $N/8$. Το ίδιο προφίλ στόχου προσομοιώθηκε και στο όγδοο CPI.



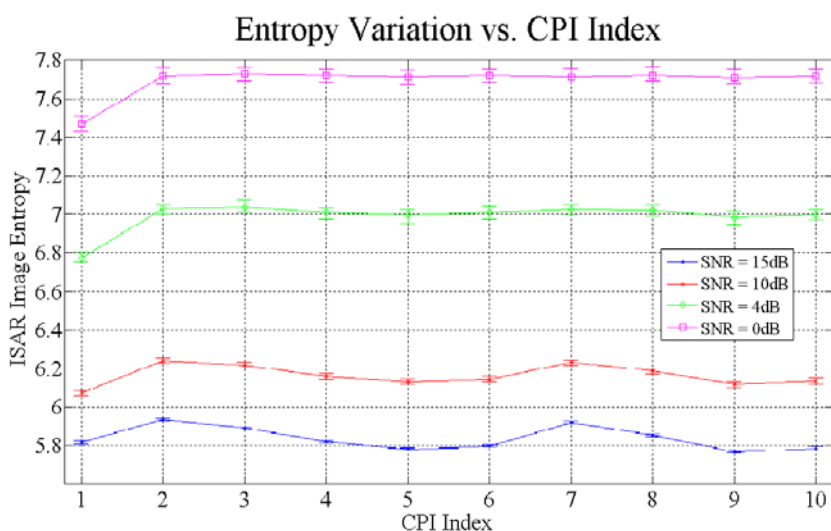
Σχήμα 3-10. Προσομοίωση στόχου με γωνιακή επιτάχυνση (περιοχή 4^{ου} CPI)

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.

Στο σενάριο προσομοίωσης, οι εικόνες ISAR για 10 CPI's ανακατασκευάζονται μέσω της τεχνικής απόστασης-Doppler και υπολογίζονται οι τιμές της εντροπίας των εικόνων με κανονικοποιημένη ισχύ [20]. Για κάθε CPI με τιμή εντροπίας μεγαλύτερη από το κατώφλι ($H > H_{thr}$) χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος αυτοεστίασης με διαχωρισμό του συμφασικού χρόνου ολοκλήρωσης (CPI) καταλήγοντας σε εστιασμένη εικόνα με ελάχιστη εντροπία μέσω ενός αριθμού πιθανών συνδυασμών δεδομένων.

Η μεταβολή της εντροπίας της εικόνας σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο SNR και την γωνιακή επιτάχυνση γ χαρακτηρίζεται μέσω 100 προσομοιώσεων Monte-Carlo που πραγματοποιούνται αμοιόρως για την ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte-Carlo για την μεταβολή της εντροπίας της εικόνας σε σχέση με το δείκτη CPI και το SNR φαίνονται στο Σχήμα 3-11. Ο γωνιακός τομέας που ανιχνεύεται είναι κατά προσέγγιση 18.3° με $\theta_0 = 0$.



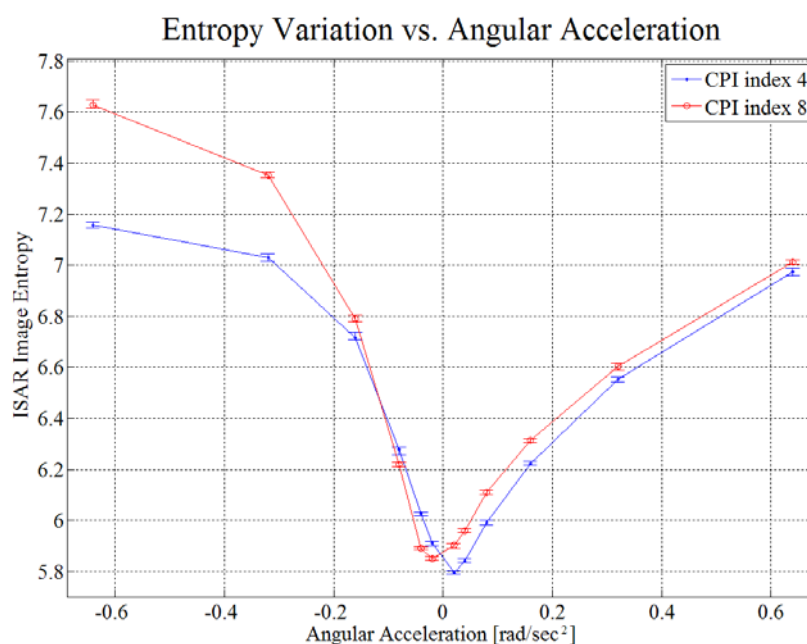
Σχήμα 3-11. Εντροπία σε σχέση με τον δείκτη CPI και το SNR

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11 για ομοιόμορφη περιστροφή με γωνιακή ταχύτητα $\omega = 0.0586 [rad/sec]$ παρατηρείται ισχυρή εξάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου για την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της

εντροπίας της εικόνας, ενώ η επίδραση της μεταβολής του δείκτη CPI είναι πιο εμφανής για υψηλές στάθμες SNR .

Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι η εντροπία είναι αυξημένη όταν ο σηματοθορυβικός λόγος είναι μικρός και μικραίνει η εντροπία καθώς ο ίδιος σηματοθορυβικός θόρυβος αυξάνει.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte-Carlo για την μεταβολή της εντροπίας έναντι της γωνιακής επιτάχυνσης φαίνονται στο Σχήμα 3-12.



Σχήμα 3-12. Μεταβολή της εντροπίας σε σχέση με την γωνιακή επιτάχυνση

Για την μη ομοιόμορφη περιστροφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-12 η γωνιακή επιτάχυνση γ μεταβάλλεται στην περιοχή $[-0.64, 0.64]$ rad/sec^2 για $SNR = 15db$ και για δύο συγκεκριμένους δείκτες CPI (περίοδοι γωνιακής επιτάχυνσης).

Τα χαμηλότερα και υψηλότερα όρια για την αποδεκτή περιοχή εντροπίας (σαν μια συνθήκη παρεμπόδισης για την προτεινόμενη μεθοδολογία αυτοεστίασης) μπορούμε να τα προσδιορίσουμε από την στατιστική ανάλυση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων Monte-carlo. Για σταθερή γωνιακή ταχύτητα ορίζουμε την συνάρτηση εντροπίας της εικόνας ISAR σε σχέση με τον δείκτη CPI (n_{CPI}), SNR και γ ως $H(n_{CPI}, SNR, \gamma)$. Τα όρια της εντροπίας που εγγυώνται την εστίαση της εικόνας ISAR υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$H_{low} = \min_{n_{CPI}} \left\{ \min_{SNR} \{ H(n_{CPI}, SNR, \gamma = 0) \} \right\} - 2 \cdot \overline{\sigma_H} \quad (3.41)$$

$$H_{upp} = \max_{n_{CPI}} \left\{ \max_{SNR} \{ H(n_{CPI}, SNR, \gamma = 0) \} \right\} + 2 \cdot \overline{\sigma_H} \quad (3.42)$$

Εδώ $\min_{n_{CPI}} \{x\}$ η ελάχιστη τιμή του x μέσω του δείκτη CPI, $\min_{SNR} \{x\}$ η ελάχιστη τιμή του x μέσω όλων των δοκιμών Monte-Carlo για ένα ιδιαίτερο SNR , $\overline{\sigma_H}$ η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης της εντροπίας της εικόνας, μέσω του δείκτη CPI, για $\gamma = 0$, $2 \cdot \overline{\sigma_H}$ το επιλεγόμενο περιθώριο ασφάλειας για δύο όρια εντροπίας. Το κατώφλι εντροπίας H_{thr} μπορεί αυθαίρετα να επιλεγεί στην περιοχή

$$H_{upp} < H_{thr} \leq \min_{n_{CPI}} \left\{ \min_{SNR} \{ H(n_{CPI}, SNR, \gamma) \} \right\} - 2 \cdot \overline{\sigma_{H,\gamma}} \quad (3.43)$$

Εδώ $\overline{\sigma_{H,\gamma}}$ η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης της εντροπίας εικόνας μέσω του δείκτη CPI για την προσομοιωμένη τιμή της γωνιακής επιτάχυνσης γ .

Στον Πίνακα 3-11 αναφέρονται οι επιλεγμένες τιμές των ορίων της εντροπίας και το κατώφλι της εντροπίας που έχουν εξαχθεί από τον Πίνακα 3-5.

Πίνακας 3-11. Όρια και κατώφλι εντροπίας

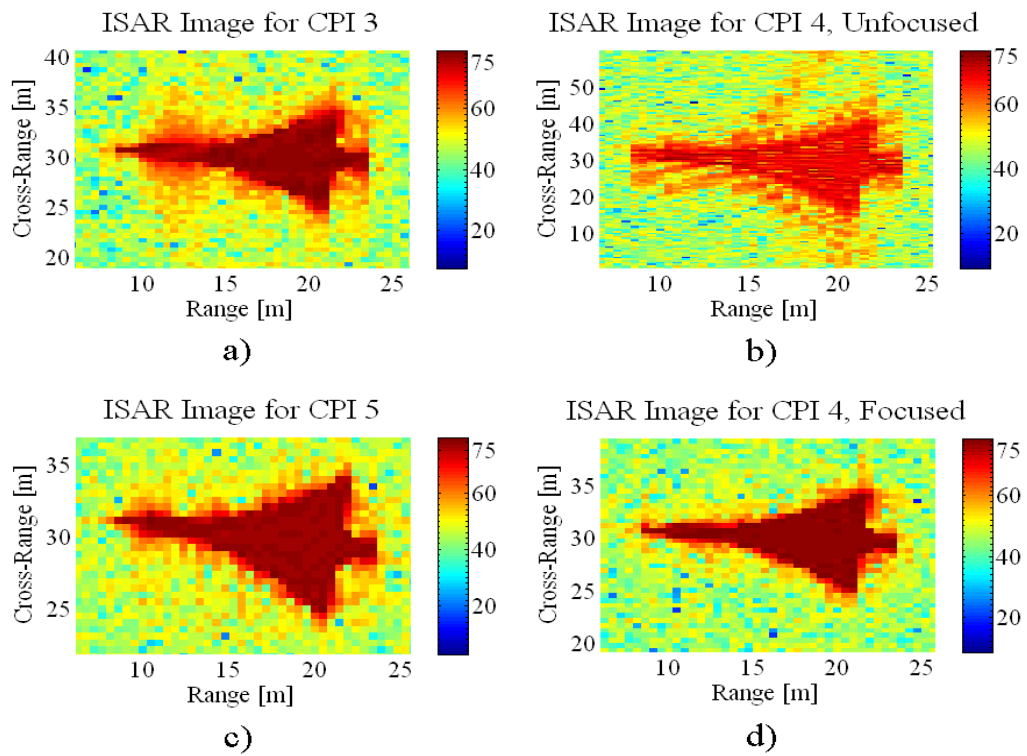
Παράμετροι Αλγορίθμου	Τιμές
Κάτω όριο εντροπίας, H_{low}	5,7586
Άνω όριο εντροπίας, H_{upp}	5,9460
Κατώφλι εντροπίας, H_{thr}	6,0000

Στα Σχήματα 3-13 και 3-14 παρουσιάζονται οι ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για σηματοθορυβικό λόγο ίσο με $15db$ και γωνιακή επιτάχυνση γ ίση με $0.64 rad/sec^2$ για το 4° και 8° CPI. Μια κοινή ομάδα εικόνων περιλαμβάνεται σε αμφότερα τα σχήματα: το προηγούμενο CPI, το μη εστιασμένο CPI, το επόμενο CPI και το μη εστιασμένο CPI μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου αυτοεστίασης του διαχωρισμένου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, παρατηρούμε ότι η προτεινόμενη διαδικασία αυτοεστίασης εξαλείφει το σημαντικό θόλωμα της εικόνας ISAR (Σχήμα 3-13,b και Σχήμα 3-14,b).

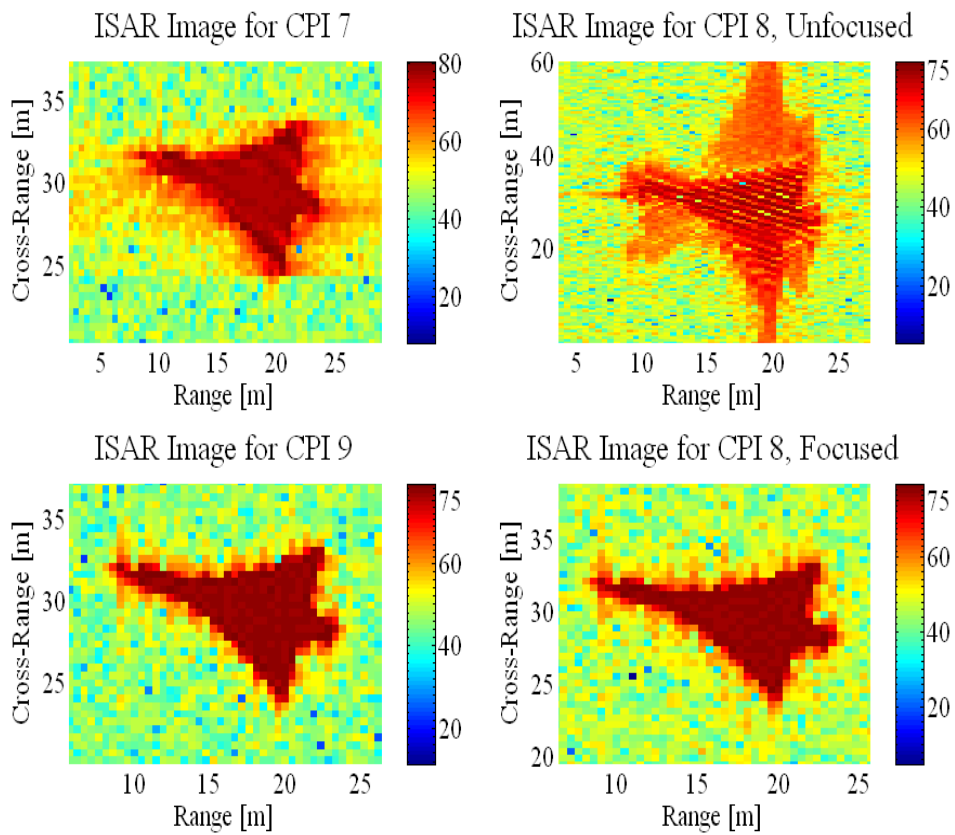
Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR περιλαμβάνονται στο ακόλουθο Πίνακα 5-3. Η βελτίωση της εστίασης καθίσταται έγκυρη μέσω αυτών των αποτελεσμάτων. Είναι αξιοσημείωτο ότι ο αλγόριθμος φτάνει τον βέλτιστο συνδυασμό (ελάχιστη εντροπία) σε διαφορετικές βαθμίδες του διαχωριζόμενου CPI για κάθε μη εστιασμένο CPI λόγω της μεταβολής της γωνίας θέασης στην ποιότητα της εικόνας.

Πίνακας 3-12. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR

No1-No2		
Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 rd CPI	5.8814	
4 th CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.9807	
5 th CPI	5.7726	
4 th CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7696	βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 1
7 th CPI	5.9072	
8 th CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.0197	
9 th CPI	5.7563	
8 th CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7621	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8



Σχήμα 3-13. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες Νο1



Σχήμα 3-14. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες Νο2

3.9 Περαιτέρω προσομοιώσεις

3.9.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζουμε μετά από εξαντλητική έρευνα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω του matlab που αφορούν δυο τύπους στόχων, το Mirage 2000 και το Boeing 727. Για κάθε στόχο εξετάζουμε τρεις περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo, για 100 δοκιμές με τα 10 CPI, και για τιμές $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$ και γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ προσδιορίζουμε τα όρια της εντροπίας. Το διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης ως ποσοστό του CPI είναι [0.35 0.75]. Εξετάζουμε την συμπεριφορά του αλγορίθμου σε πρωιμότερο στάδιο, δηλαδή μικραίνοντας τον αλγόριθμο ψάχνουμε για λύσεις στο συγκεκριμένο διάστημα που είναι μικρότερο του CPI/2

Στην δεύτερη περίπτωση με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo, για 100 δοκιμές με τα 10 CPI, και για τιμές $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$ και γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ προσδιορίζουμε τα νέα όρια της εντροπίας. Το διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης ως ποσοστό του CPI είναι [0.5 0.7]. Εδώ μικραίνοντας τον αλγόριθμο ψάχνουμε για λύσεις στο συγκεκριμένο διάστημα που είναι μικρότερο του CPI/4.

Στην Τρίτη περίπτωση με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo, για 100 δοκιμές με τα 10 CPI, και για τιμές $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$ και επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ προσδιορίζουμε τα νέα όρια της εντροπίας. Το διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης ως ποσοστό του CPI είναι [0.2 0.8].

3.9.2 Mirage 2000, περίπτωση 1

Με τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR = 0 \text{ dB}$, $SNR = 15 \text{ dB}$, $SNR = 30 \text{ dB}$, γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχω με την μέθοδο της επαναληπτικής διαδικασίας Monte-Carlo για 100 δοκιμές με τα 10 CPI τους παρακάτω πίνακες για τον προσδιορισμό των ορίων εντροπίας.

Πίνακας 3-13. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,467679	7,716671	7,731928	7,722815	7,715477	7,725756	7,712387	7,724565	7,709809	7,720263
15	5,819311	5,934627	5,888737	5,820894	5,782542	5,797233	5,920357	5,854041	5,77019	5,786833
30	5,673999	5,75185	5,693011	5,612591	5,567859	5,58255	5,731277	5,650943	5,555625	5,572229

Πίνακας 3-14. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,504098	7,754337	7,782695	7,757855	7,753789	7,76083	7,748257	7,756784	7,73633	7,753487
15	5,828199	5,944752	5,895523	5,827037	5,790459	5,803762	5,928468	5,859881	5,777307	5,796978
30	5,675364	5,75315	5,694051	5,613554	5,568807	5,583649	5,73247	5,652284	5,556398	5,57303

Πίνακας 3-15. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,421855	7,681589	7,690921	7,686663	7,652921	7,690792	7,677387	7,696779	7,674407	7,689183
15	5,811439	5,928965	5,880857	5,812429	5,775945	5,788468	5,913292	5,845268	5,764971	5,780255
30	5,67287	5,751031	5,691326	5,611651	5,566952	5,581792	5,729847	5,649934	5,554977	5,571218

Πίνακας 3-16. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

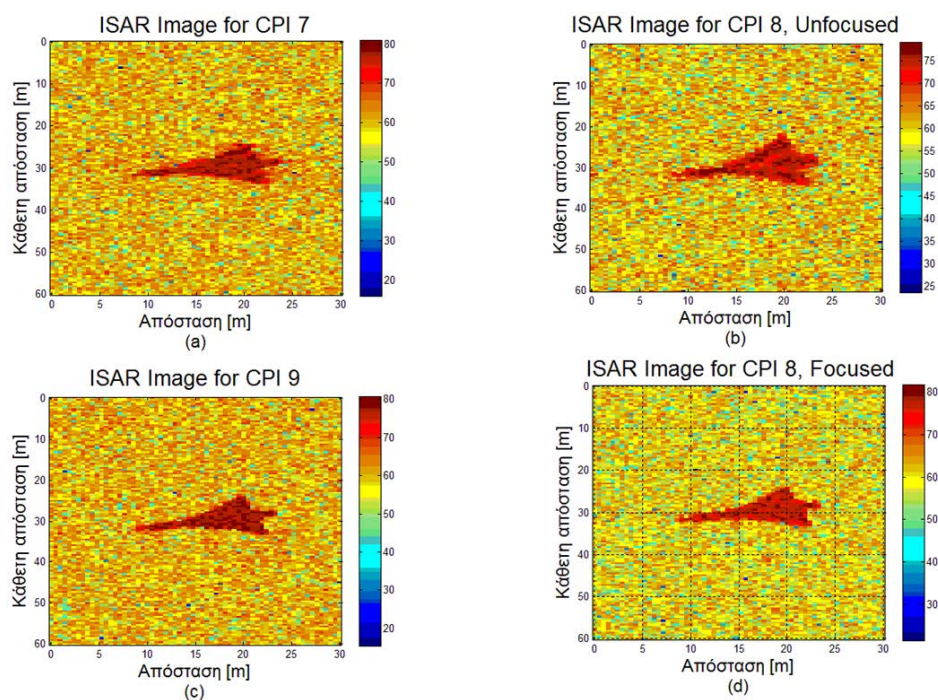
SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,016595	0,013784	0,015354	0,016199	0,016489	0,014932	0,016002	0,013686	0,013514	0,013985
15	0,003067	0,002996	0,002749	0,003063	0,002934	0,002918	0,003081	0,002694	0,002762	0,003031
30	0,000487	0,000457	0,000451	0,000337	0,000372	0,000322	0,000457	0,000433	0,000307	0,000351

Πίνακας 3-17. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου ορίου εντροπίας και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR

SNR [db]	Μέγιστο όριο εντροπίας	Ελάχιστο όριο εντροπίας	Τυπική απόκλιση
0	7,782695	7,421855	0,015054
15	5,944752	5,764971	0,002929
30	5,75315	5,554977	0,000397

Στη συνέχεια εξετάζουμε τα κατωτέρω ενδεχόμενα :

1. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ dB}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-15 τις ανακατασκευασμένες ISAR-εικόνες-1 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ dB}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Το κατώφλι της εντροπίας το τοποθετούμε λίγο παραπάνω από την τιμή της μέγιστης εντροπίας δηλαδή $E_{Thr} = 7.8$. Επίσης εφαρμόζουμε windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το [4 8] είναι οι δείκτες CPI όπου εφαρμόζεται η γωνιακή επιτάχυνση. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-1 υπάρχουν στον Πίνακα 3-18.

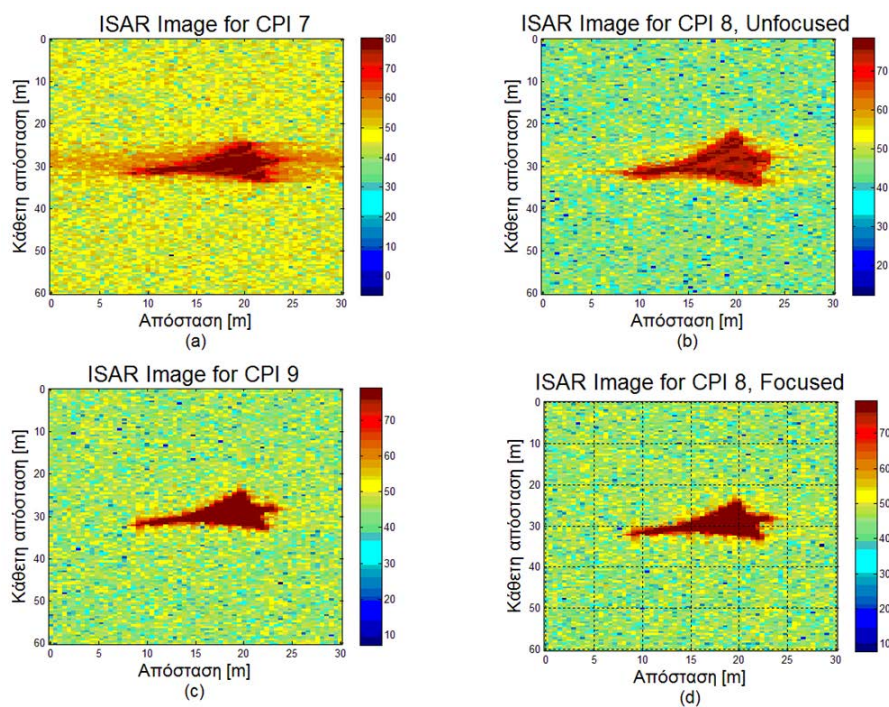


Σχήμα 3-15. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-1

Πίνακας 3-18. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-1

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^o CPI	7.7351	
8 ^o CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.964	
9 ^o CPI	7.7194	
8 ^o CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.7047	Βαθμίδα 2, τμήμα 2, συνδυασμός 2

2. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-16 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-2 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-2 υπάρχουν στον Πίνακα 3-19.

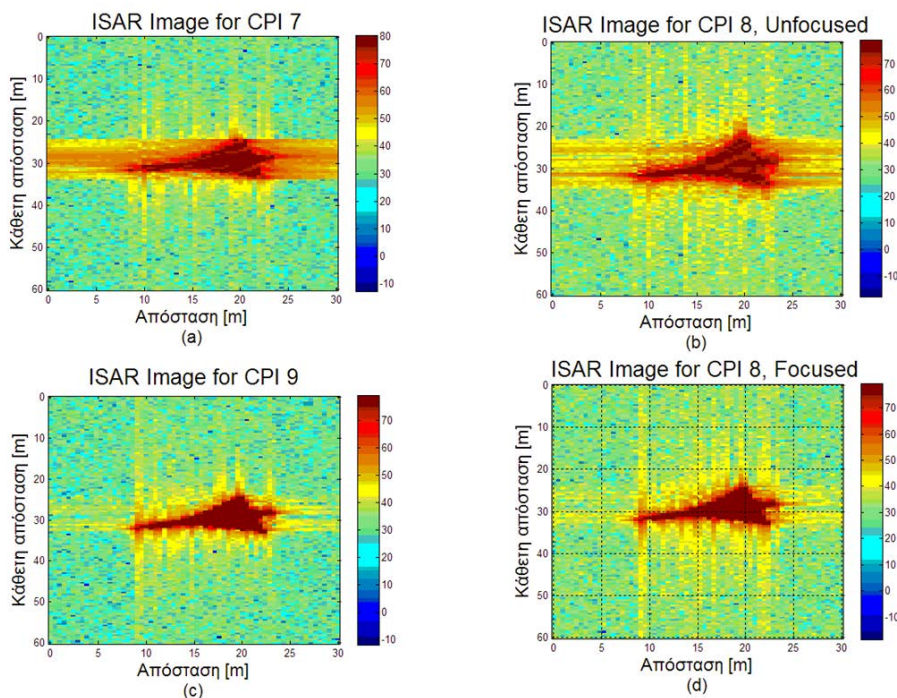


Σχήμα 3-16. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-2

Πίνακας 3-19. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-2

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.9196	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.1429	
9 ^ο CPI	5.778	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7856	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

3. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-17 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-3 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-3 υπάρχουν στον Πίνακα 3-20.

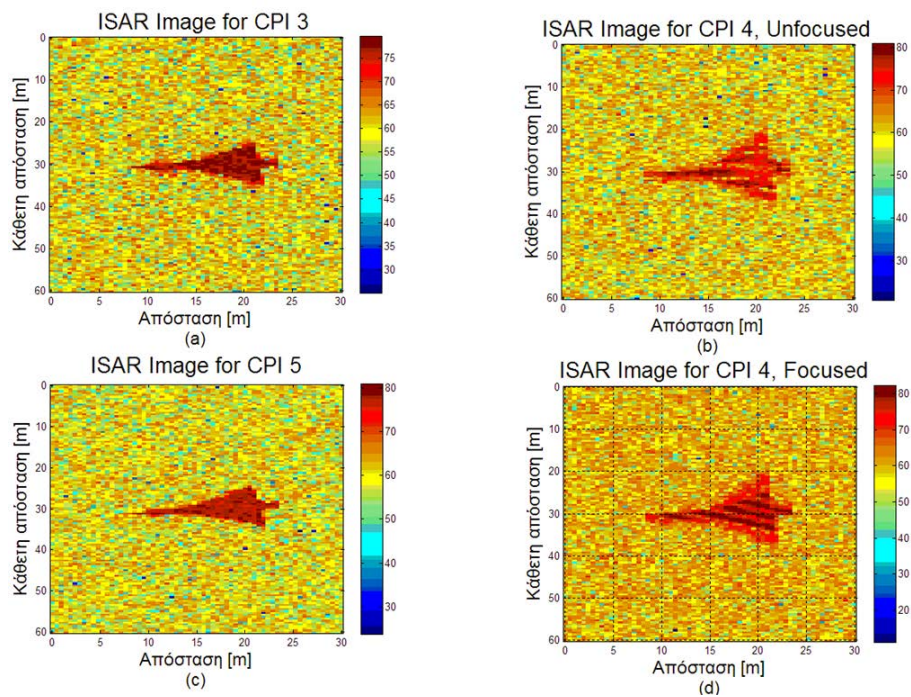


Σχήμα 3-17. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-3

Πίνακας 3-20. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-3

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.7316	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.906	
9 ^ο CPI	5.5554	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5631	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

4. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-18 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-4 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-4 υπάρχουν στον Πίνακα 3-21.

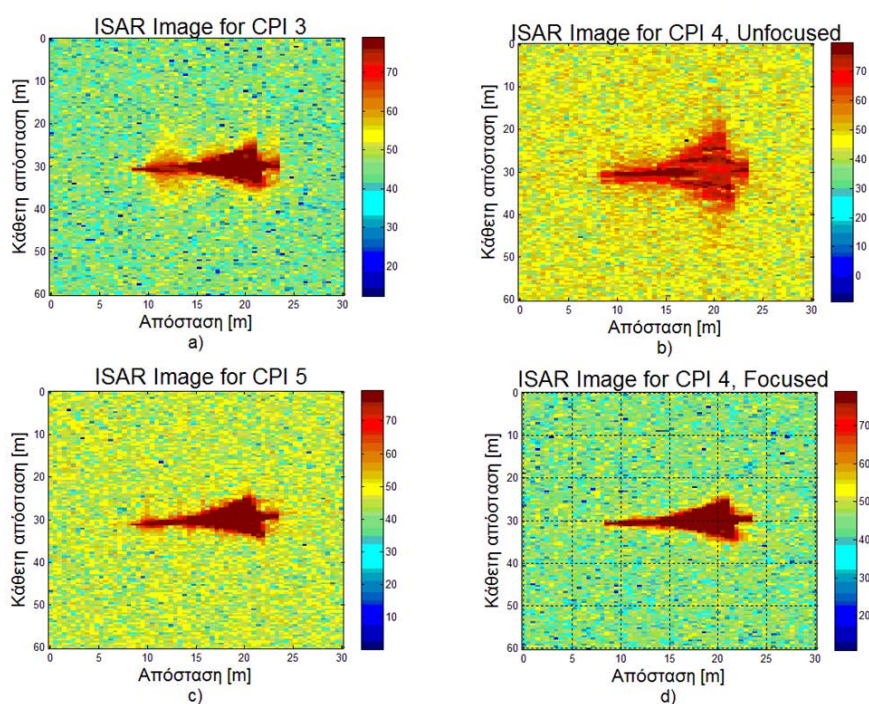


Σχήμα 3-18. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-4

Πίνακας 3-21. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-4

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	7.704	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.863	
5 ^ο CPI	7.6843	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.4527	Βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 2

5. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-19 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-5 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-5 υπάρχουν στον Πίνακα 3-22

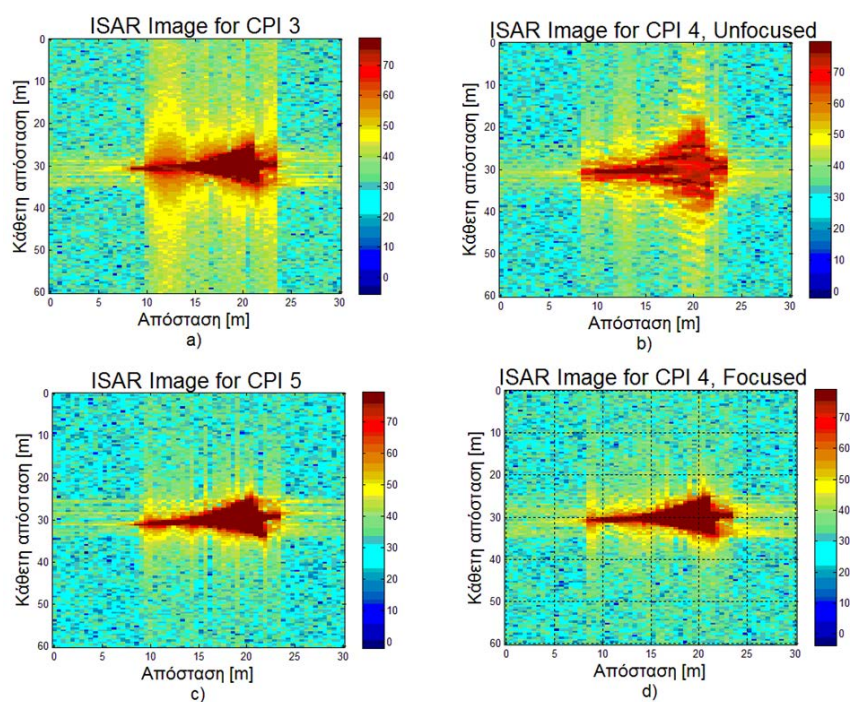


Σχήμα 3-19. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-5

Πίνακας 3-22. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-5

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3° CPI	5.8835	
4° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.1048	
5° CPI	5.7726	
4° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7594	Βαθμίδα 4, τμήμα 1, συνδυασμός 2

6. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-20 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-6 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-6 υπάρχουν στον Πίνακα 3-23.

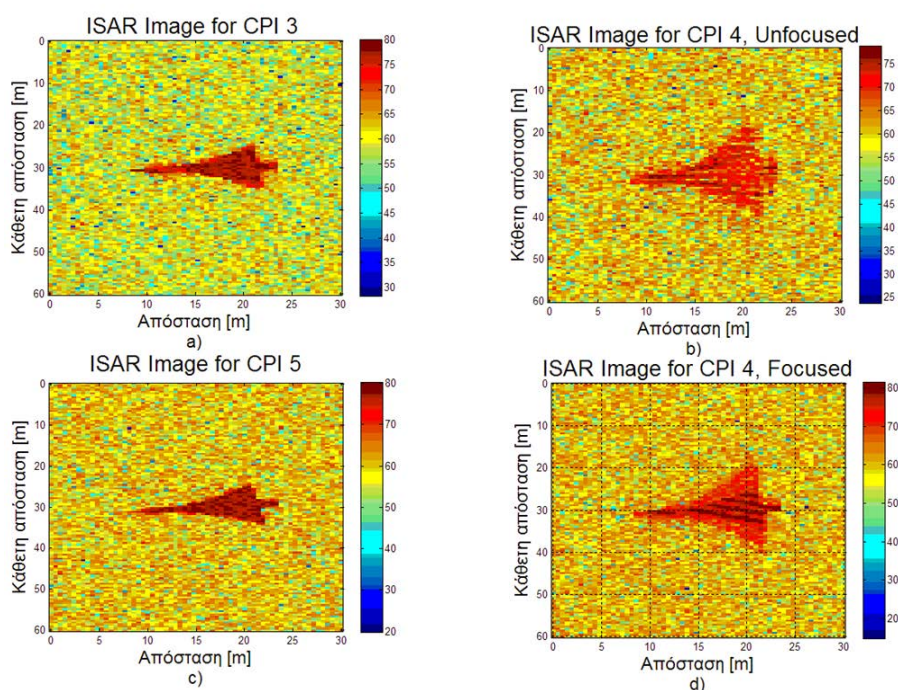


Σχήμα 3-20. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-6

Πίνακας 3-23. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-6

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.6926	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.8917	
5 ^ο CPI	5.5675	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5621	Βαθμίδα 4, τμήμα 1, συνδυασμός 4

7. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-21 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-7 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-7 υπάρχουν στον Πίνακα 3-24.

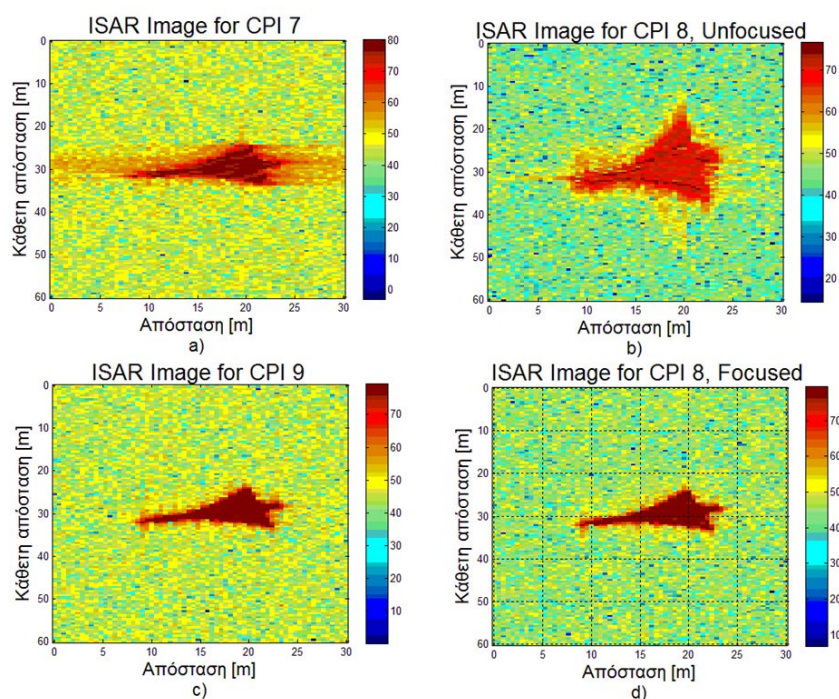


Σχήμα 3-21. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-7

Πίνακας 3-24. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-7

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	7.703	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.1453	
5 ^ο CPI	7.6515	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.6122	Βαθμίδα 3, τμήμα 1, συνδυασμός 3

8. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-22 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-8 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-8 υπάρχουν στον Πίνακα 3-25.

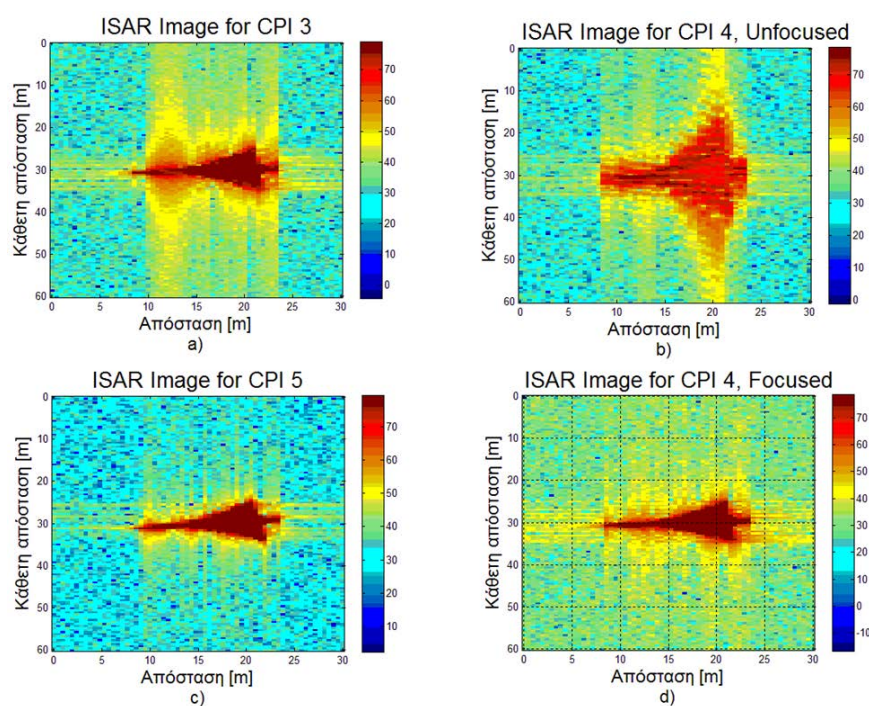


Σχήμα 3-22. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-8

Πίνακας 3-25. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-8

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.9082	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.6819	
9 ^ο CPI	5.7558	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7634	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

9. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-23 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-9 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-17. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-9 υπάρχουν στον Πίνακα 3-26.



Σχήμα 3-23. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-9

Πίνακας 3-26. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-9

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.6924	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.3531	
5 ^ο CPI	5.5667	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5589	Βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 1

3.9.3 Mirage 2000, περίπτωση 2

Με τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR = 0 \text{ dB}$, $SNR = 15 \text{ dB}$, $SNR = 30 \text{ dB}$, γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχω με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo για 100 δοκιμές με τα 10 CPI τους παρακάτω πίνακες για τον προσδιορισμό των ορίων εντροπίας.

Πίνακας 3-27. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,469068	7,720261	7,72953	7,718146	7,715554	7,726673	7,708614	7,721542	7,706379	7,718425
15	5,81914	5,934543	5,889151	5,820225	5,781965	5,797338	5,920869	5,854324	5,770826	5,78663
30	5,674082	5,751845	5,693079	5,612598	5,56778	5,582523	5,731331	5,651014	5,555688	5,572138

Πίνακας 3-28. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,512841	7,763856	7,765181	7,761837	7,767319	7,77085	7,746981	7,756564	7,738761	7,747514
15	5,8263	5,943483	5,895475	5,829697	5,787778	5,80449	5,929788	5,862676	5,776937	5,792617
30	5,675981	5,752834	5,694344	5,613669	5,568663	5,583305	5,732544	5,652028	5,556446	5,573147

Πίνακας 3-29. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,438277	7,682232	7,690378	7,672317	7,675719	7,68782	7,664548	7,689475	7,67395	7,684783
15	5,812887	5,927516	5,88152	5,815989	5,775081	5,78985	5,913662	5,847832	5,764644	5,78122
30	5,672805	5,750773	5,69183	5,611486	5,566833	5,581645	5,729941	5,650196	5,554487	5,571139

Πίνακας 3-30. Τυπική απόκλιση για διάφορες τιμές του SNR

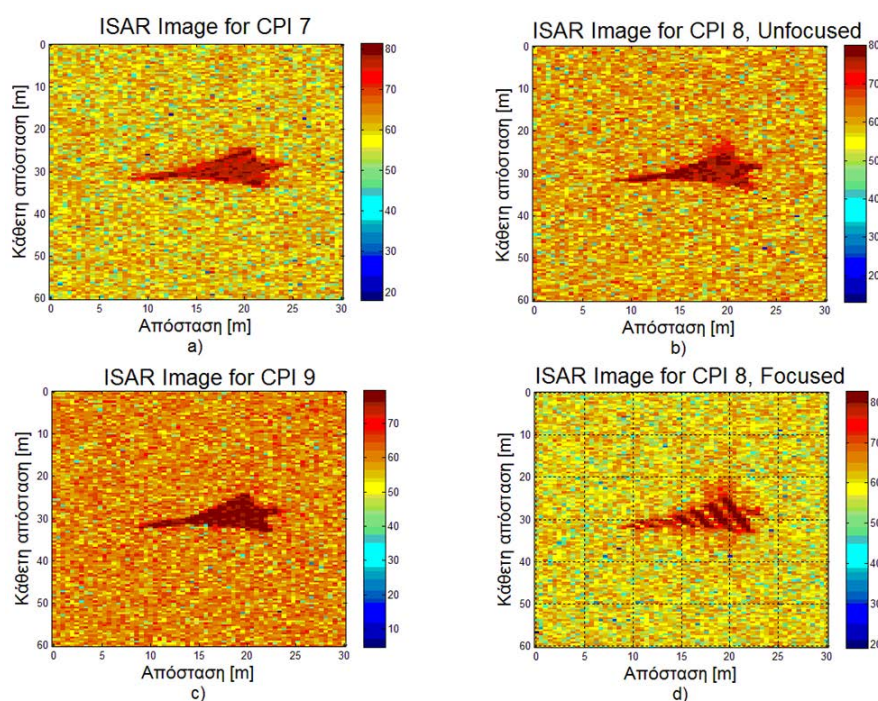
SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,014074	0,017501	0,014993	0,016953	0,017627	0,015515	0,016085	0,014448	0,014185	0,012978
15	0,003115	0,00348	0,002872	0,002609	0,002578	0,002873	0,002966	0,002823	0,002811	0,002561
30	0,000534	0,000506	0,000446	0,000371	0,000387	0,000347	0,000457	0,00041	0,000315	0,000393

Πίνακας 3-31. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου ορίου εντροπίας και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR

SNR [db]	Μέγιστο όριο εντροπίας	Ελάχιστο όριο εντροπίας	Τυπική απόκλιση
0	7,77085	7,438277	0,015436
15	5,943483	5,764644	0,002869
30	5,752834	5,554487	0,000417

Τώρα εξετάζουμε τα εξής ενδεχόμενα:

1. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-24 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-10 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Αφαιρούμε την εξομάλυνση (smoothing) για να δούμε την επίδραση στην εντροπία και το τρέξιμο του αλγορίθμου. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-10 υπάρχουν στον Πίνακα 3-32.

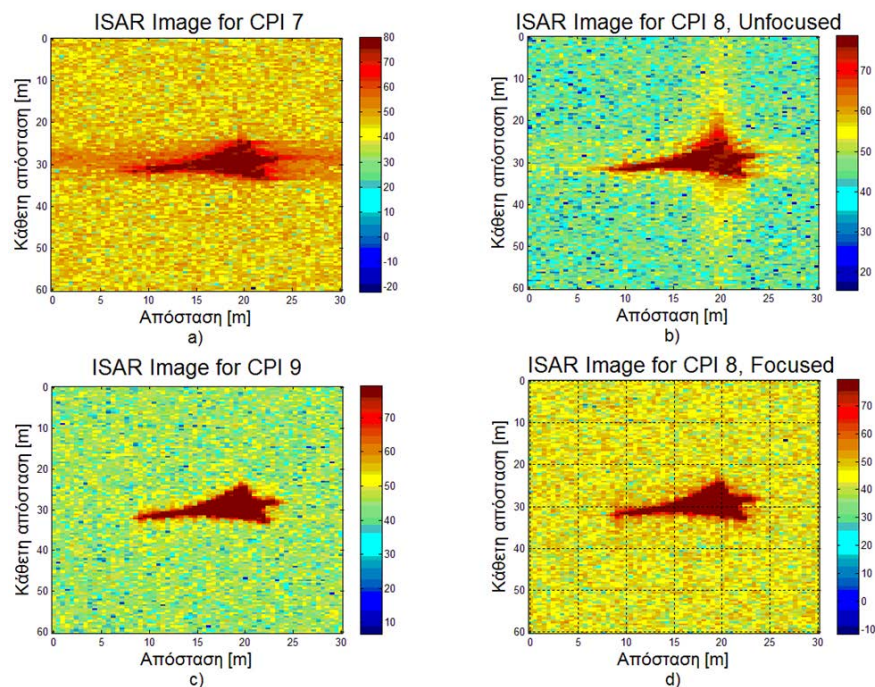


Σχήμα 3-24. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-10

Πίνακας 3-32. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-10

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.6899	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8161	
9 ^ο CPI	7.7015	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.4159	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 3

2. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-25 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-11 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Αφαιρούμε την εξομάλυνση (smoothing) για να δούμε την επίδραση στην εντροπία και το τρέξιμο του αλγορίθμου Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-11 υπάρχουν στον Πίνακα 3-33.



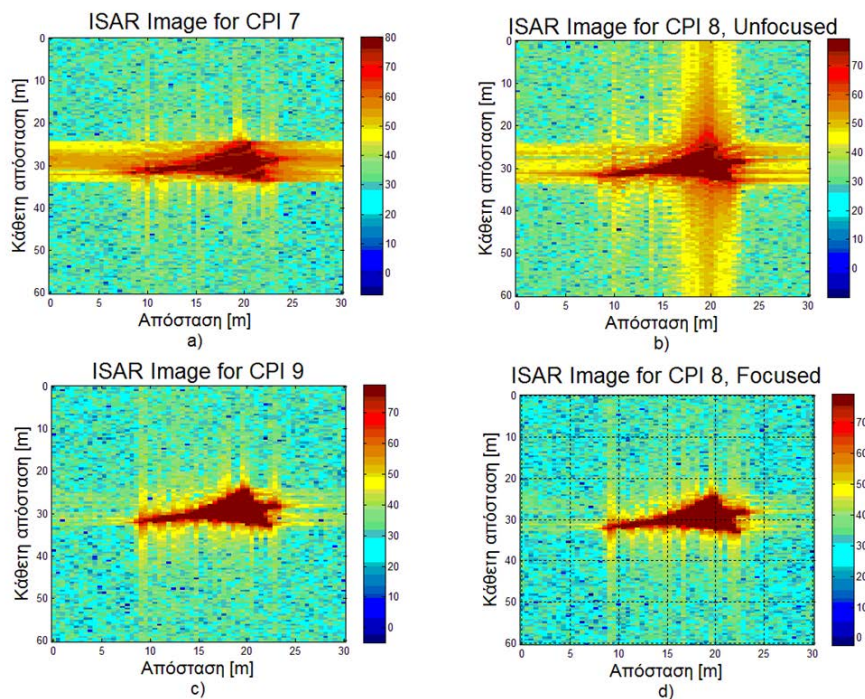
Σχήμα 3-25. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-11

Πίνακας 3-33. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-11

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.9201	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.0319	
9 ^ο CPI	5.7678	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7735	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

3. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-26 τις ανακατασκευασμένες

ISAR εικόνες-12 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30\text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Αφαιρούμε την εξομάλυνση (smoothing) για να δούμε την επίδραση στην εντροπία και το τρέξιμο του αλγορίθμου. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-12 υπάρχουν στον Πίνακα 3-34.



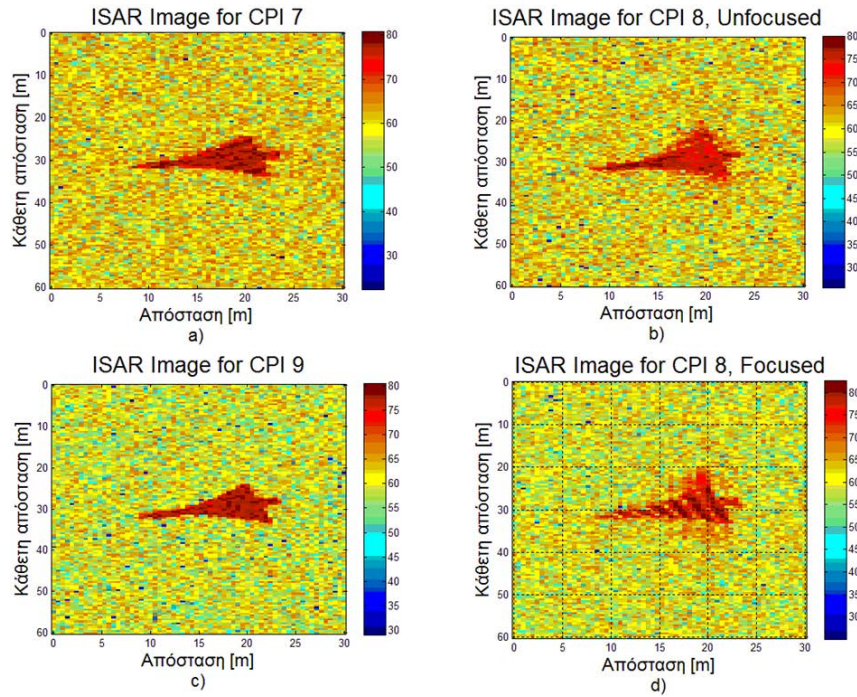
Σχήμα 3-26. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-12

Πίνακας 3-34. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-12

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.7313	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.8306	
9° CPI	5.5556	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5633	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

4. Για $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0\text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-27 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-13 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης

και μετά την αυτοεστίαση. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-13 υπάρχουν στον Πίνακα 3-35.



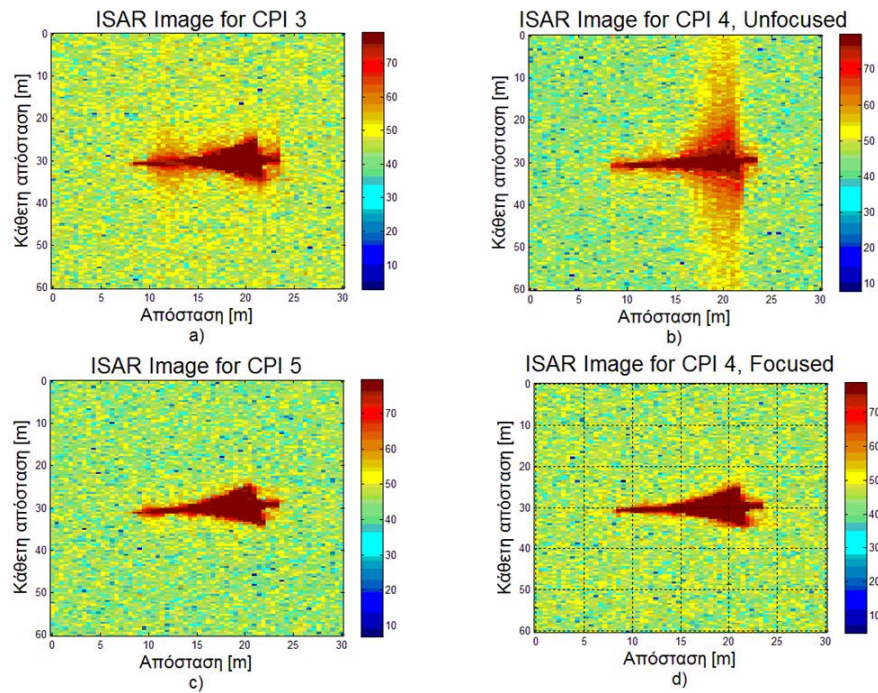
Σχήμα 3-27. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-13

Πίνακας 3-35. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-13

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	7.7257	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9057	
9° CPI	7.7142	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.5999	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 3

5. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-28 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-14 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31.

Αφαιρούμε την εξομάλυνση (smoothing) για να δούμε την επίδραση στην εντροπία και το τρέξιμο του αλγορίθμου. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-14 υπάρχουν στον Πίνακα 3-36.



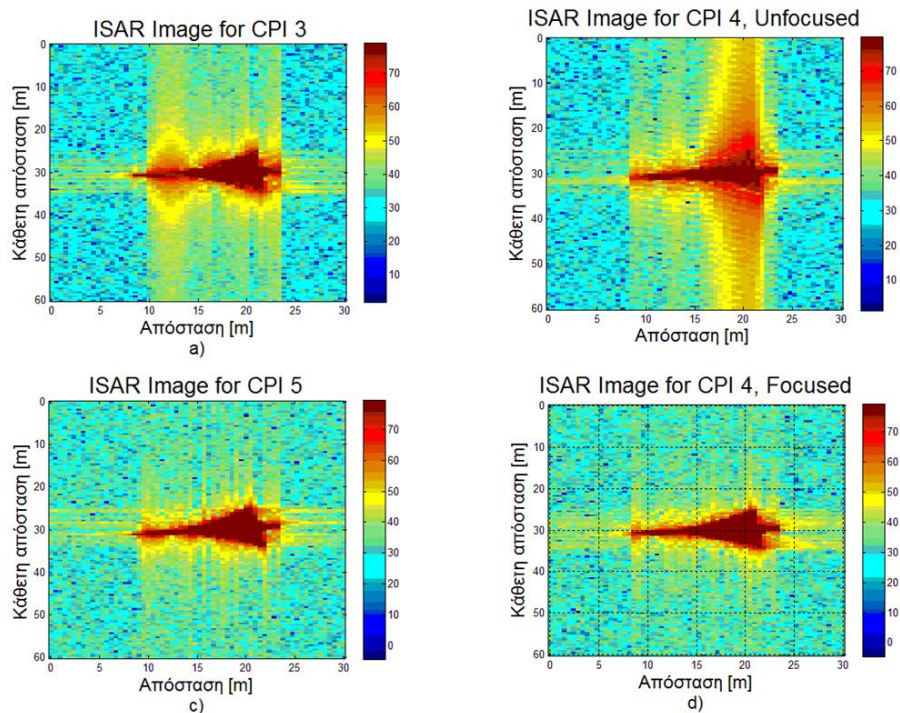
Σχήμα 3-28. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-14

Πίνακας 3-36. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-14

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.8875	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.0717	
5 ^ο CPI	5.7834	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7617	Βαθμίδα 4, τμήμα 1, συνδυασμός 2

6. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-29 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-15 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Αφαιρούμε την εξομάλυνση (smoothing) για να δούμε την επίδραση στην

εντροπία και το τρέξιμο του αλγορίθμου. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-15 υπάρχουν στον Πίνακα 3-37.



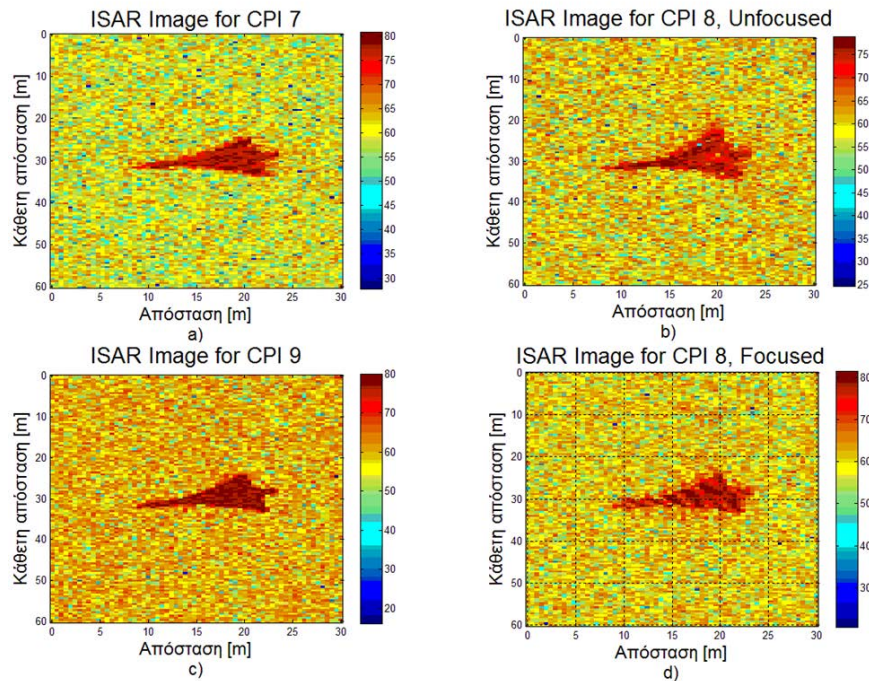
Σχήμα 3-29. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-15

Πίνακας 3-37. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-15

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.6928	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.9042	
5 ^ο CPI	5.5674	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5583	Βαθμίδα 4, τμήμα 1, συνδυασμός 2

7. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-30 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-16 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.9$. Οι

τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-16 υπάρχουν στον Πίνακα 3-38.

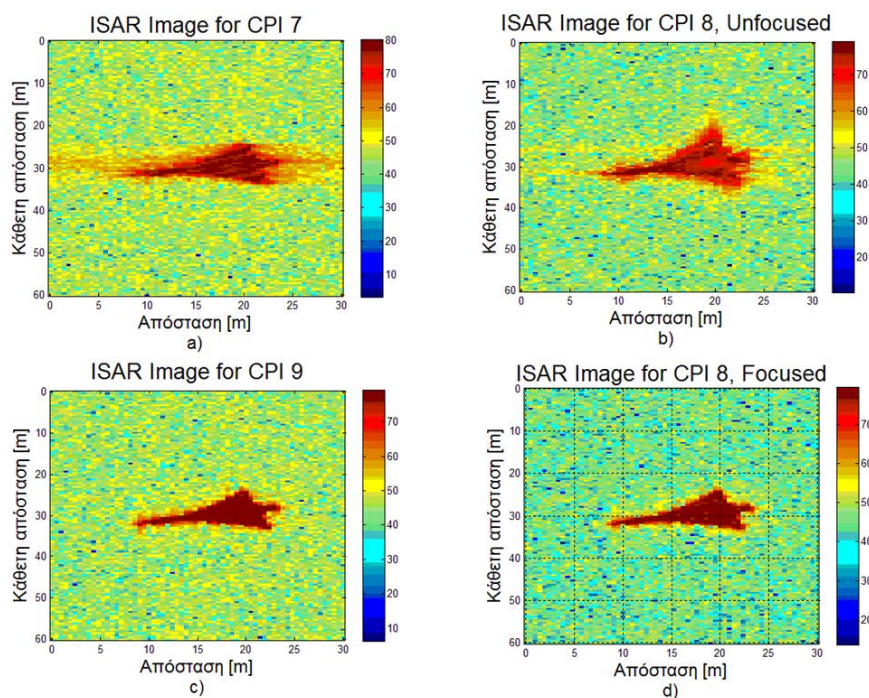


Σχήμα 3-30. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-16

Πίνακας 3-38. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-16

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.6929	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9605	
9 ^ο CPI	7.6955	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.6674	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 3

8. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-31 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-17 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-17 υπάρχουν στον Πίνακα 3-39.

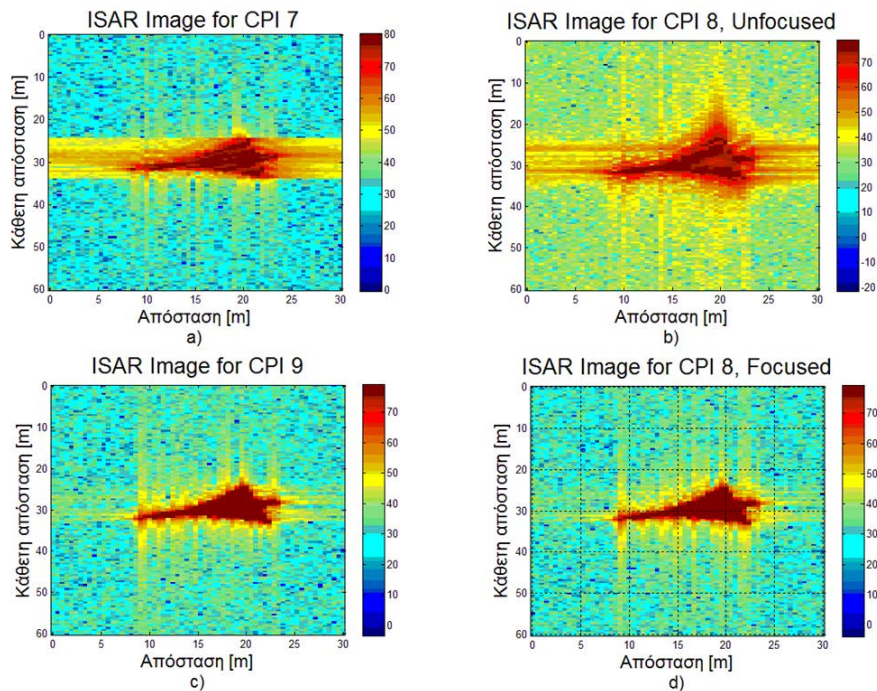


Σχήμα 3-31. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-17

Πίνακας 3-39. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-17

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.9179	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.1462	
9 ^ο CPI	5.7734	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7775	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

9. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-32 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-18 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-31. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-18 υπάρχουν στον Πίνακα 3-40.



Σχήμα 3-32. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-18

Πίνακας 3-40. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-18

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.731	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.9104	
9° CPI	5.5556	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5635	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

3.9.4 Mirage 2000, περίπτωση 3

Με τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$, γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης $[0.2\ 0.8]$ ως ποσοστό του CPI, έχω με την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου Monte-Carlo για 100 δοκιμές με τα 10 CPI τους παρακάτω πίνακες για τον προσδιορισμό των ορίων εντροπίας.

Πίνακας 3-41. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,468621	7,714324	7,730429	7,721587	7,714554	7,725116	7,711658	7,72065	7,707954	7,717069
15	5,819927	5,934821	5,88929	5,820427	5,782359	5,79781	5,920556	5,85477	5,770772	5,786397
30	5,67409	5,751991	5,693016	5,612599	5,56777	5,582546	5,731211	5,650963	5,555656	5,572158

Πίνακας 3-42. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,505891	7,755945	7,769961	7,765836	7,760196	7,764435	7,753285	7,767821	7,748412	7,759826
15	5,827141	5,941401	5,895503	5,82924	5,788613	5,805624	5,928594	5,861662	5,778272	5,793185
30	5,675148	5,753365	5,694048	5,613662	5,568547	5,583179	5,732663	5,651746	5,556423	5,573006

Πίνακας 3-43. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,429736	7,680418	7,699854	7,678802	7,682864	7,690933	7,673076	7,686086	7,670131	7,674637
15	5,812182	5,925618	5,881191	5,814201	5,773128	5,791232	5,913322	5,848352	5,764032	5,777452
30	5,672942	5,750833	5,691672	5,611676	5,566929	5,581825	5,730176	5,650107	5,554507	5,571002

Πίνακας 3-44. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,015183	0,013214	0,014714	0,0148	0,015465	0,014272	0,016464	0,01463	0,015426	0,017105
15	0,003483	0,002988	0,002907	0,002878	0,002606	0,002878	0,00324	0,002782	0,00271	0,002632
30	0,000506	0,00058	0,000481	0,00042	0,000356	0,000319	0,000514	0,000359	0,000369	0,000378

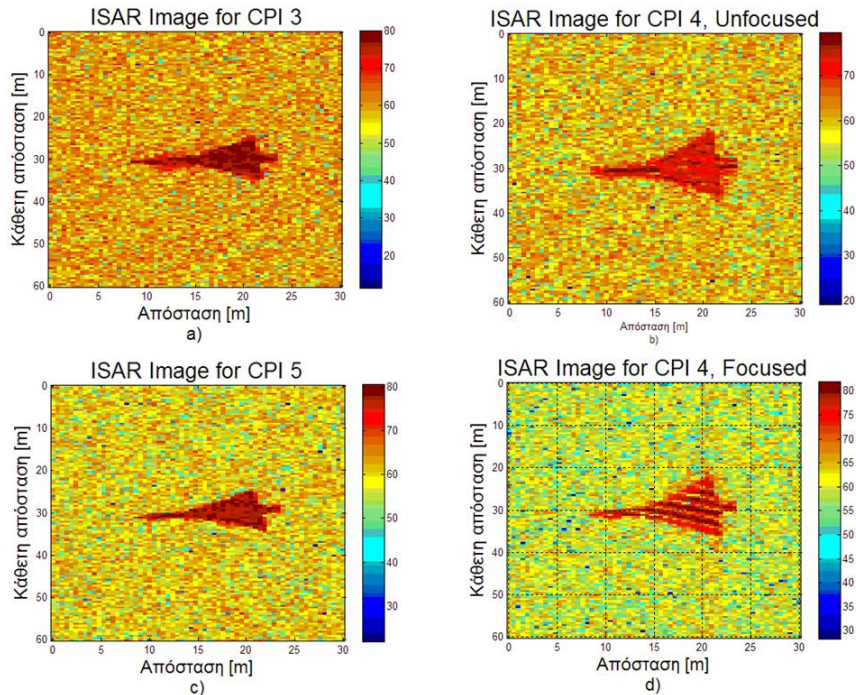
Πίνακας 3-45. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου ορίου εντροπίας και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR

SNR [db]	Μέγιστο όριο εντροπίας	Ελάχιστο όριο εντροπίας	Τυπική απόκλιση
0	7,769961	7,429736	0,015127
15	5,941401	5,764032	0,00291
30	5,753365	5,554507	0,000428

Τώρα εξετάζουμε τα εξής ενδεχόμενα:

1. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-33 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-19 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή

windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-19 υπάρχουν στον Πίνακα 3-46.



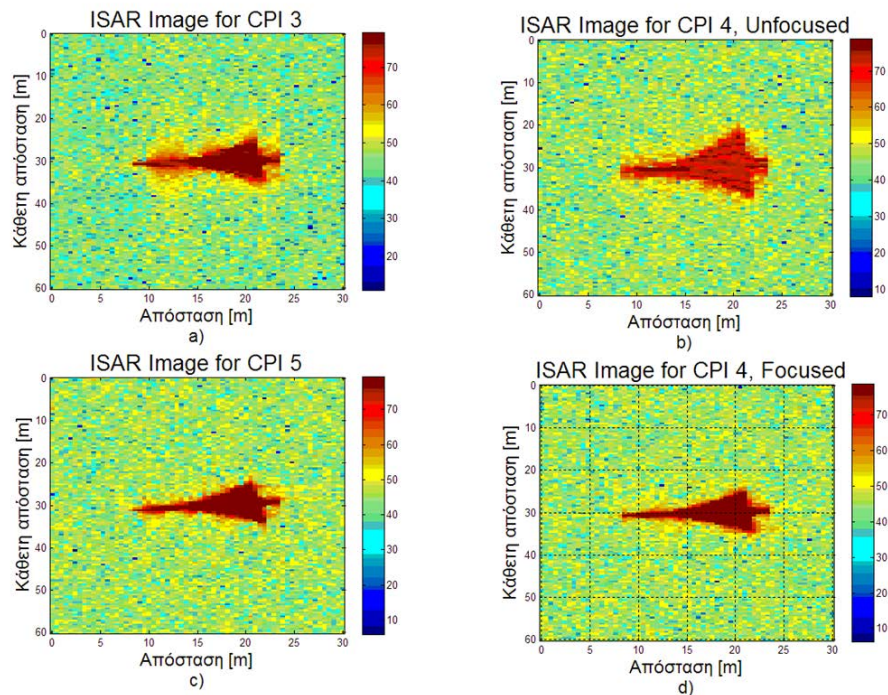
Σχήμα 3-33. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-19

Πίνακας 3-46. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-19

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	7.6733	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9799	
5 ^ο CPI	7.6619	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.5287	Βαθμίδα 4, τμήμα 1, συνδυασμός 7

2. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-34 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-20 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας

$E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-20 υπάρχουν στον Πίνακα 3-47.



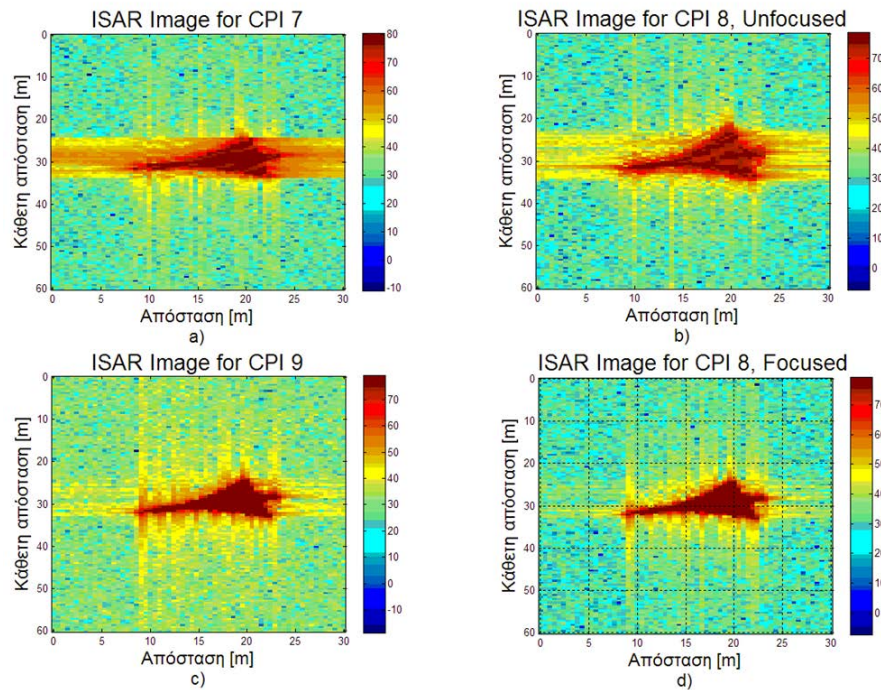
Σχήμα 3-34. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-20

Πίνακας 3-47. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-20

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.8808	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.1991	
5 ^ο CPI	5.7717	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7637	Βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 1

3. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-35 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-21 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας

$E_{Thr} = 5.8$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-21 υπάρχουν στον Πίνακα 3-48.



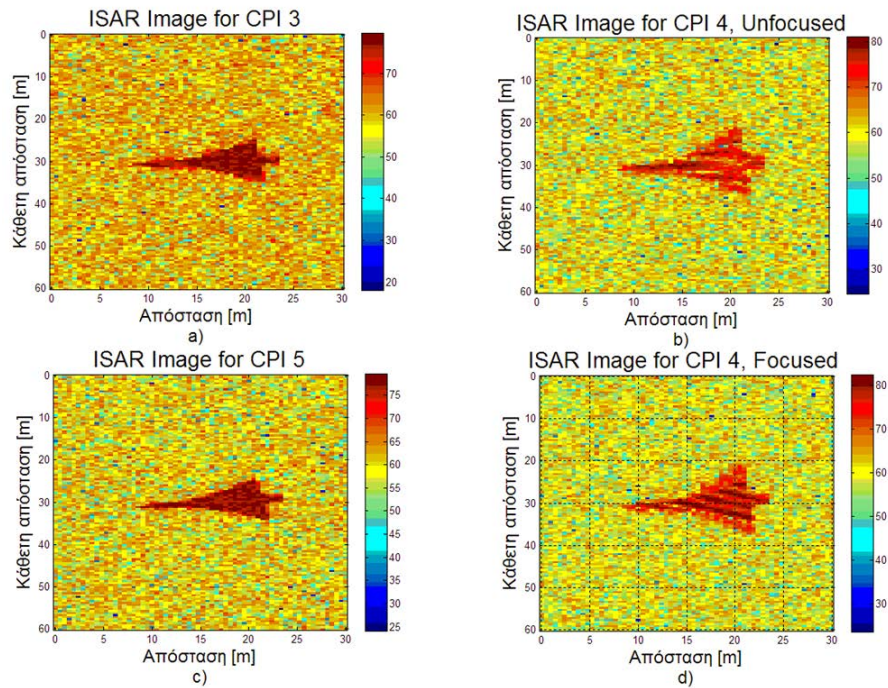
Σχήμα 3-35. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-21

Πίνακας 3-48. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-21

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.7314	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.9061	
9 ^ο CPI	5.5555	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5636	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

4. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-36 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-22 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$ Οι

τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-22 υπάρχουν στον Πίνακα 3-49.



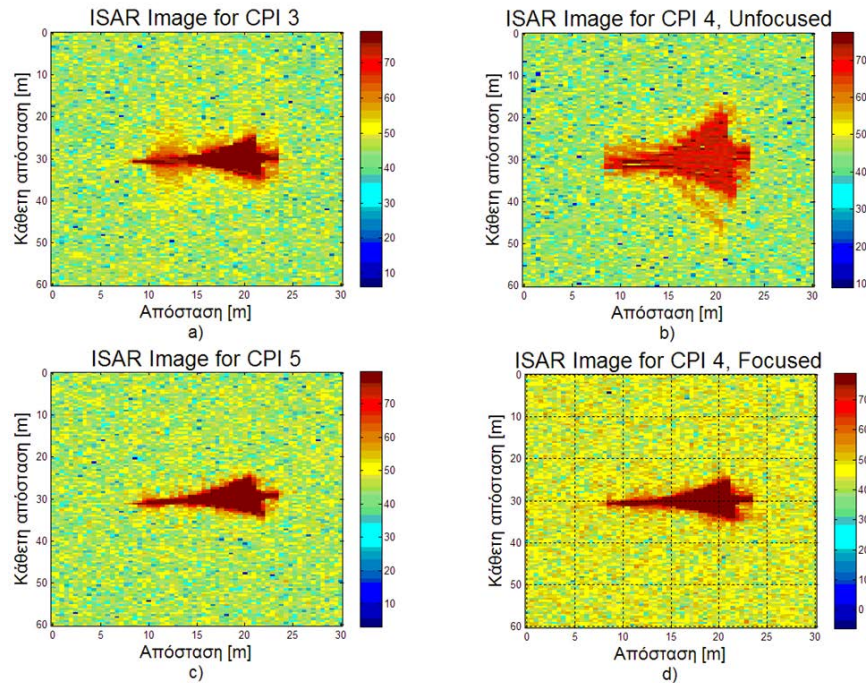
Σχήμα 3-36. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-22

Πίνακας 3-49. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-22

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	7.6943	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8799	
5 ^ο CPI	7.6831	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.4565	Βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 2

5. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-37 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-23 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας

$E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-23 υπάρχουν στον Πίνακα 3-50.

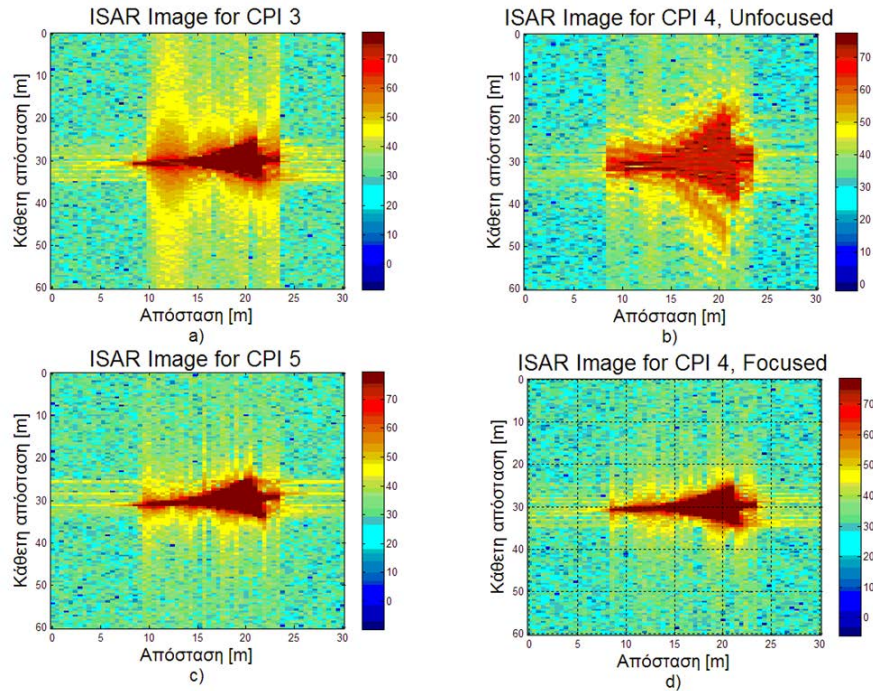


Σχήμα 3-37. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-23

Πίνακας 3-50. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-23

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.8772	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.5544	
5 ^ο CPI	5.7805	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7617	Βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 1

6. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-38 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-24 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-24 υπάρχουν στον Πίνακα 3-51

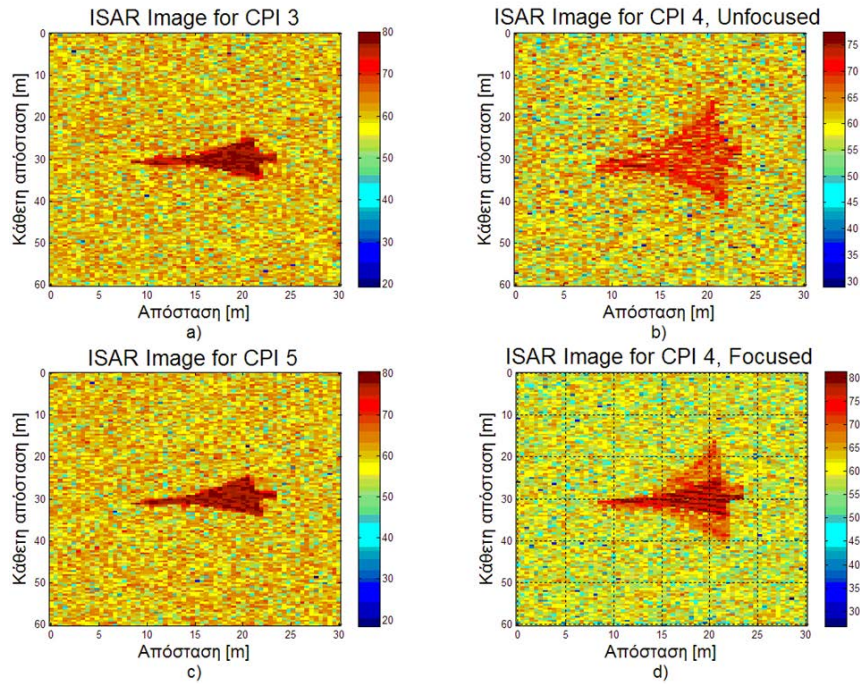


Σχήμα 3-38. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-24

Πίνακας 3-51. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-24

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	5.6921	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.3098	
5 ^ο CPI	5.5666	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5613	Βαθμίδα 2, τμήμα 1, συνδυασμός 1

7. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-39 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-25 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 7.8$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-25 υπάρχουν στον Πίνακα 3-52.

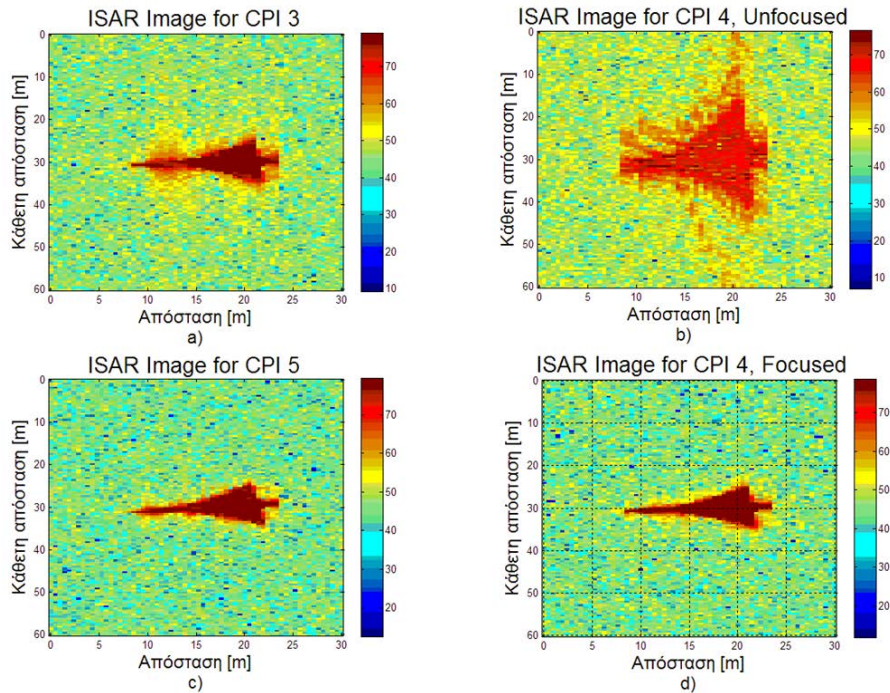


Σχήμα 3-39. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-25

Πίνακας 3-52. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-25

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3 ^ο CPI	7.6833	
4 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.338	
5 ^ο CPI	7.6544	
4 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.6379	Βαθμίδα 4, τμήμα 1, συνδυασμός 5

8. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-40 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-26 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 6.0$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-26 υπάρχουν στον Πίνακα 3-53.

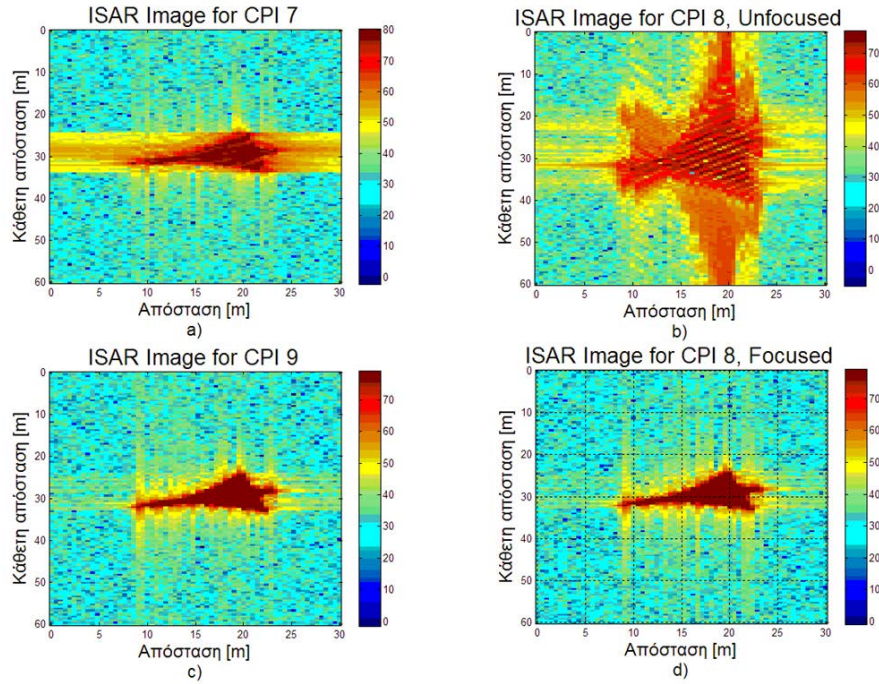


Σχήμα 3-40. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-26

Πίνακας 3-53. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-26

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
3° CPI	5.8753	
4° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.9519	
5° CPI	5.7712	
4° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.7632	Βαθμίδα 3, τμήμα 1, συνδυασμός 1

9. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-41 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-27 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-45. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.8$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-27 υπάρχουν στον Πίνακα 3-54.



Σχήμα 3-41. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-27

Πίνακας 3-54. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-27

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.7312	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.8083	
9 ^ο CPI	5.5549	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.5628	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

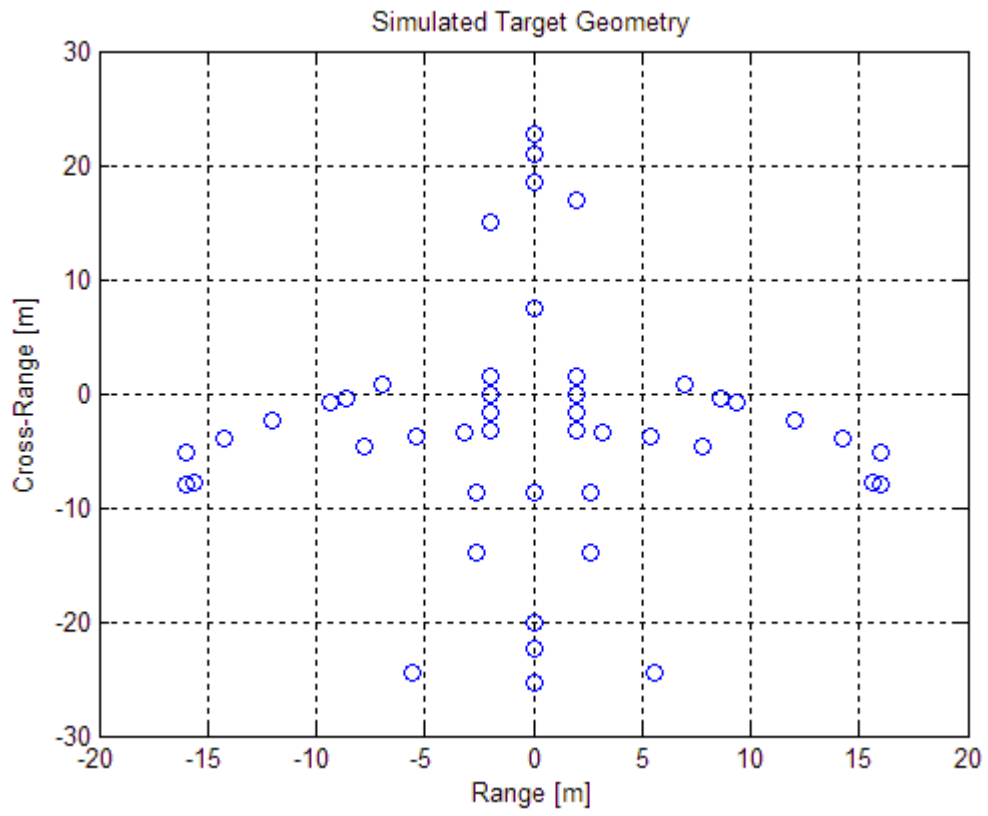
3.9.5 Προσομοίωση με Boeing 727

3.9.5.1 Εισαγωγή

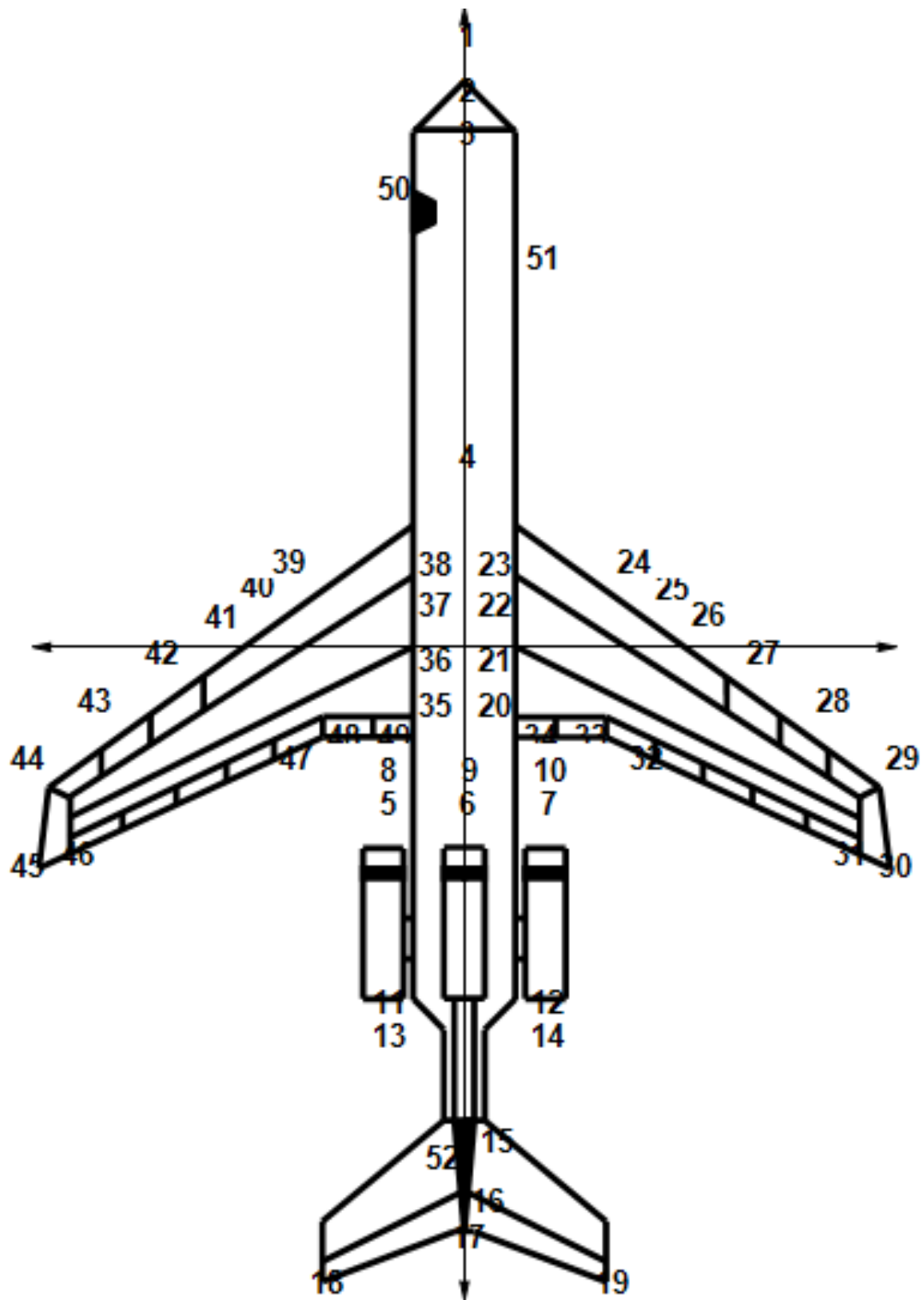
Προσομοιώνουμε μέσω του προγράμματος matlab αεροπορικό στόχο τύπου Boeing 727 με 52 σκεδαστές, λιγότερους από τον στόχο Mirage 2000 όπου είχαμε χρησιμοποιήσει 208 σκεδαστές. Εξετάζουμε εξαντλητικά τις τρεις περιπτώσεις με τα ίδια κριτήρια όπως και με τον προηγούμενο στόχο προκειμένου να δούμε πως συμπεριφέρεται ο αλγόριθμος αυτοεστίασης. Στο Σχήμα 3-42 φαίνεται η προσομοιωμένη γεωμετρία του στόχου ενώ στο Σχήμα 3-43 φαίνεται η απεικόνιση του πραγματικού στόχου. Είναι το μοντέλο

σημειακού σκεδαστή ενός επιβατικού αεροσκάφους Boeing 727 που αποτελείται από 52 σκεδαστές με μήκος 40.59m και εκπέτασμα πτερύγων 32.92m. Στον Πίνακα 3-55 απεικονίζεται η παρουσίαση της θέσης των 52 σκεδαστών στον χώρο, ενώ οι παράμετροι του ραντάρ και της κίνησης του στόχου για τις δικές μας αριθμητικές προσομοιώσεις περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3-56. Για τον συγκεκριμένο στόχο παρατηρούμε ότι επειδή υπάρχουν σκεδαστές σε οριζόντια η κάθετη απόσταση εντός των 0.4m, και τέσσερις μάλιστα από αυτούς πολύ κοντά ανά δύο στις άκρες των πτερύγων, αναμένουμε να μη φαίνονται καλά στην εικόνα ISAR. Παρατηρούμε ότι θέτοντας σηματοθορυβικό λόγο $SNR = 100 \text{ dB}$ με την υπάρχουσα αναμπίβολη απόσταση $R_u = 30m$ είναι αναμενόμενο να μη χωράει στο παράθυρο ο στόχος και να δημιουργείται αναδίπλωση του στόχου στην απόσταση.

Έγινε λοιπόν διόρθωση στο matlab του κέντρου του στόχου σε $targetcenter=targetpos+[-8.6,0,0]$ (αφού έχουμε κάνει αντιστροφή των αξόνων x_i, y_i) ώστε να μικρύνει η απόσταση κέντρου-μύτης στόχου στην κάθετη απόσταση (φανταστικό κέντρο περιστροφής), και αλλάζουμε τις παραμέτρους της ανάλυσης απόστασης σε $M = 2 * 64 = 128$ και $R_{ext} = 15 + 10 = 25m$, οπότε το $DR_s = 0.3937m$. Με αυτό τον τρόπο χωράει στο παράθυρο ο στόχος και για τα δέκα $CPIs$.



Σχήμα 3-42. Γεωμετρία προσομοιωμένου στόχου Boeing 727



Σχήμα 3-43. Απεικόνιση πραγματικού στόχου

Πίνακας 3-55. Παρουσίαση της θέσης των 52 σκεδαστών στον χώρο

Aircraft feature	Scatterer number	Position (metres)			Relative amplitude	Occlusion function	Scattering Function
		X	Y	Z			
Nose tip	1	22.8	0	0	2	Wedge(180,20)	Isotropic
Radar dish	2	21.0	0	0	100	Wedge(180,110)	cos2x_x2(0,10,10)
Cockpit bulkhead	3	18.5	0	0	100	Wedge(180,110)	cos2x_x2(0,10,10)
Antenna (top)	4	7.4	0	2.8	0.2	None	Isotropic
Portside engine intake	5	-8.6	2.6	2	100	Wedge(-140,130)	cos2x_x2(0,10,10)
Central engine intake	6	-8.6	0	3.6	100	Wedge(180,90)	cos2x_x2(0,10,10)
Starboard engine intake	7	-8.6	-2.6	2	100	Wedge(140,130)	cos2x_x2(0,10,10)
Portside engine intake	8	-8.6	2.6	2	2	Wedge(-45,135)	Isotropic
Central engine intake	9	-8.6	0	3.6	2	Wedge(0,90)	Isotropic
Starboard engine intake	10	-8.6	-2.6	2	2	Wedge(45,135)	Isotropic
Portside engine exhaust	11	-14	2.6	2	4	Wedge(-45,135)	cos2x_x2(180,10,15)
Starboard engine exhaust	12	-14	-2.6	2	4	Wedge(45,135)	cos2x_x2(180,10,15)
Portside engine exhaust	13	-14	2.6	2	1	Wedge(-135,135)	Isotropic
Starboard engine exhaust	14	-14	-2.6	2	1	Wedge(135,135)	Isotropic
Main engine exhaust	15	-20	0	1	7	Wedge(0,90)	cos2x_x2(180,45)
Tail tip	16	-22.4	0	5.6	1.5	Wedge(0,110)	Isotropic
Tail tip	17	-25.4	0	6.6	5	Wedge(25,45)	Isotropic
Port tail tip	18	-24.4	5.6	6.6	0.2	Wedge(25,45)	Isotropic
Starboard tail tip	19	-24.4	-5.6	6.6	0.2	Wedge(25,45)	Isotropic
Wing root	20	-3.2	-2.0	-1.6	5	Wedge(75,115)	Isotropic
Wing root	21	-1.6	-2.0	-1.6	5	Wedge(75,115)	Isotropic
Wing root	22	0	-2.0	-1.6	100	Wedge(75,115)	Isotropic
Fuselage (specular)	23	1.5	-2.0	-1.6	5	Wedge(90,160)	cos2x_x2(270,5,15)
Control surface gap	24	0.8	-7.0	0	1.5	Wedge(75,105)	Isotropic
Antenna	25	-0.4	-8.6	0	1.5	Wedge(65,95)	Isotropic
Control surface gap	26	-0.8	-9.4	0	1.5	Wedge(70,100)	Isotropic
Control surface gap	27	-2.4	-12.0	0	1.5	Wedge(65,95)	Isotropic
Control surface gap	28	-4.0	-14.2	0	1.5	Wedge(60,90)	Isotropic
Control surface gap	29	-5.2	-16.0	0	1.5	Wedge(50,80)	Isotropic
Antenna	30	-8.0	-16.0	0	2	Wedge(10,125)	Isotropic
Antenna	31	-7.8	-15.6	0	2	Wedge(10,125)	Isotropic
Antenna	32	-4.6	-7.8	0	1	Wedge(35,125)	Isotropic
Wing fairing	33	-3.8	-5.4	-1.4	1.5	Wedge(90,100)	Isotropic
Wing fairing	34	-3.4	-3.2	-1.4	1	Wedge(90,110)	Isotropic
Wing root	35	-3.2	2.0	-1.6	5	Wedge(-75,115)	Isotropic
Wing root	36	-1.6	2.0	-1.6	5	Wedge(-75,115)	Isotropic
Wing root	37	0	2.0	-1.6	5	Wedge(-75,115)	Isotropic
Fuselage (specular)	38	1.5	2.0	-1.6	100	Wedge(-90,160)	cos2x_x2(90,5,15)
Control surface gap	39	0.8	7.0	0	1.5	Wedge(-75,105)	Isotropic
Antenna	40	-0.4	8.6	0	1.5	Wedge(-65,95)	Isotropic
Control surface gap	41	-0.8	9.4	0	1.5	Wedge(-70,100)	Isotropic
Control surface gap	42	-2.4	12.0	0	1.5	Wedge(-65,95)	Isotropic
Control surface gap	43	-4.0	14.2	0	1.5	Wedge(-60,90)	Isotropic
Control surface gap	44	-5.2	16.0	0	1.5	Wedge(-50,80)	Isotropic
Antenna	45	-8.0	16.0	0	2	Wedge(-10,125)	Isotropic
Antenna	46	-7.8	15.6	0	2	Wedge(-10,125)	Isotropic
Antenna	47	-4.6	7.8	0	1	Wedge(-35,125)	Isotropic
Wing fairing	48	-3.8	5.4	-1.4	1.5	Wedge(-90,100)	Isotropic
Wing fairing	49	-3.4	3.2	-1.4	1	Wedge(-90,100)	Isotropic
Passenger door (port)	50	17.0	2	1	1	Wedge(270,100)	Isotropic
Passenger door (starboard)	51	15.0	-2	1	1	Wedge(90,100)	Isotropic
Main engine exhaust	52	-20	0	1	2	Wedge(0,180)	Isotropic

Πίνακας 3-56. Παράμετροι προσομοίωσης ραντάρ ISAR

Παράμετροι	Τιμές
Αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]
Διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση, Δr_s	0,3937 [m]
Διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση, Δr_c	0,47244 [m]
Εύρος ζώνης ραντάρ, B	320 [MHz]
Πλήθος συχνοτήτων, M	128
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]

3.9.5.2 Boeing 727, περίπτωση 1

Με τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR = 0 \text{ dB}$, $SNR = 15 \text{ dB}$, $SNR = 30 \text{ dB}$, γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχω με την μέθοδο της επαναληπτικής διαδικασίας Monte-Carlo για 100 δοκιμές με τα 10 CPI τους παρακάτω πίνακες για τον προσδιορισμό των ορίων εντροπίας.

Πίνακας 3-57. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,915769	7,937542	7,943674	7,969176	7,929194	7,917389	7,986054	7,952682	7,896485	7,953691
15	5,678885	5,698012	5,739899	5,760808	5,696863	5,682428	5,802573	5,739965	5,618339	5,763057
30	5,474175	5,490941	5,53724	5,555595	5,492426	5,477053	5,600508	5,536378	5,409107	5,563124

Πίνακας 3-58. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,963998	7,965567	7,996053	8,008618	7,965463	7,965084	8,031326	7,983827	7,937459	7,987562
15	5,688465	5,708641	5,746964	5,768439	5,708187	5,691532	5,81333	5,750165	5,629851	5,775061
30	5,475968	5,492874	5,53849	5,557521	5,494489	5,478582	5,603036	5,538534	5,410882	5,564718

Πίνακας 3-59. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,856528	7,908451	7,907937	7,939211	7,897107	7,878788	7,9436	7,911159	7,856019	7,907418
15	5,669014	5,689477	5,728358	5,749028	5,685205	5,672559	5,794758	5,729979	5,61068	5,75072
30	5,472654	5,489374	5,535643	5,554044	5,490618	5,47568	5,598692	5,53453	5,407217	5,561599

Πίνακας 3-60. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

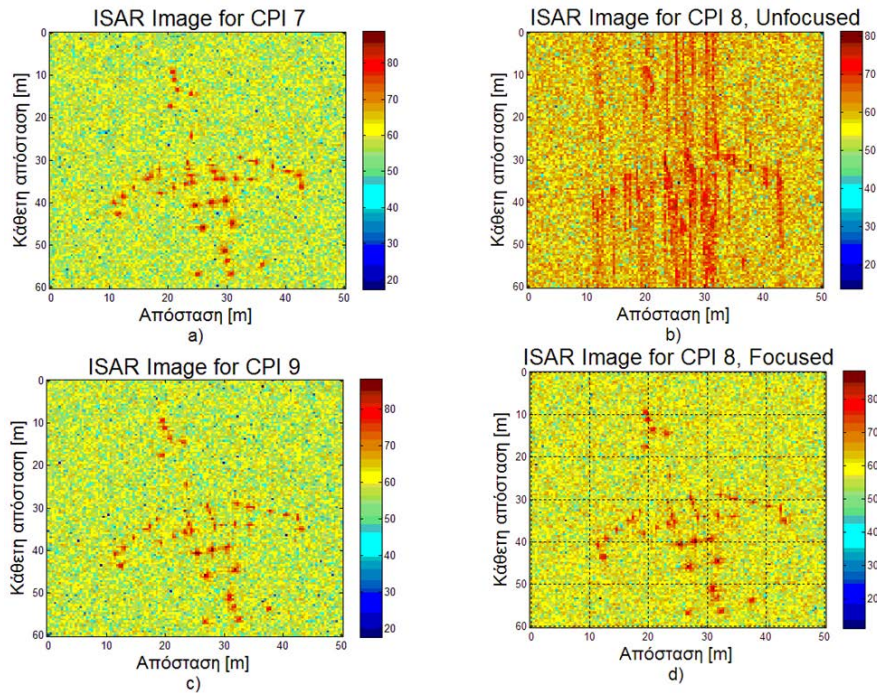
SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,015756	0,013349	0,015336	0,01394	0,014603	0,015384	0,016967	0,015021	0,016205	0,014258
15	0,004118	0,00397	0,004072	0,003536	0,004505	0,003791	0,004103	0,003896	0,004154	0,004277
30	0,000732	0,000669	0,000586	0,00068	0,000807	0,00072	0,000773	0,000723	0,000718	0,000692

Πίνακας 3-61. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου ορίου εντροπίας και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR

SNR [db]	Μέγιστο όριο εντροπίας	Ελάχιστο όριο εντροπίας	Τυπική απόκλιση
0	8,031326	7,856019	0,015082
15	5,81333	5,61068	0,004042
30	5,603036	5,407217	0,00071

Τώρα εξετάζουμε τα εξής ενδεχόμενα:

1. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-44 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-28 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-28 υπάρχουν στον Πίνακα 3-62.

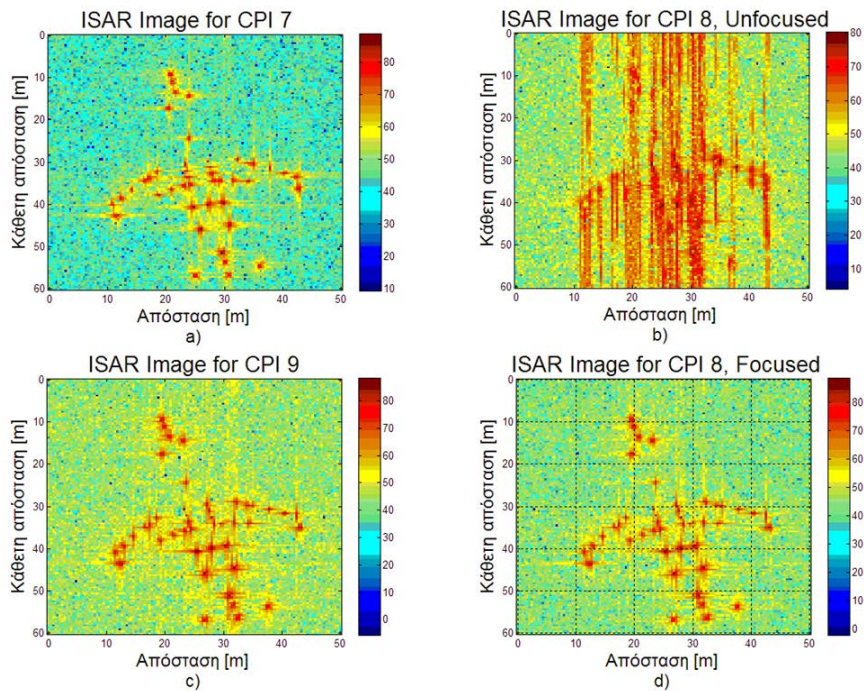


Σχήμα 3-44. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-28

Πίνακας 3-62. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-28

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	8.0134	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.8759	
9 ^ο CPI	7.8803	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.883	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

2. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-45 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-29 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-29 υπάρχουν στον Πίνακα 3-63.

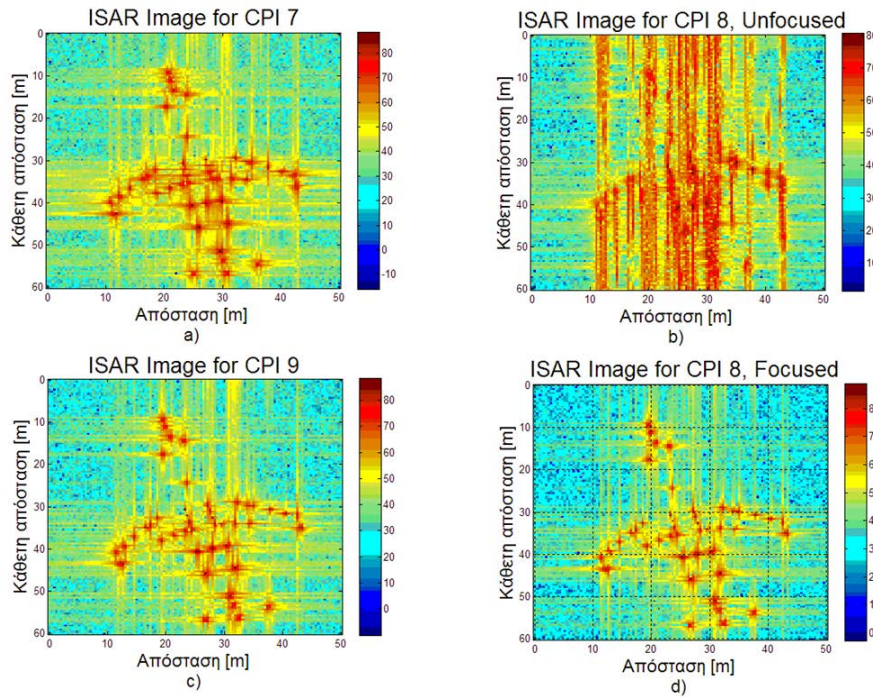


Σχήμα 3-45. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-29

Πίνακας 3-63. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-29

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.8043	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9411	
9 ^ο CPI	5.6163	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6151	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

3. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-46 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-30 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-30 υπάρχουν στον Πίνακα 3-64.

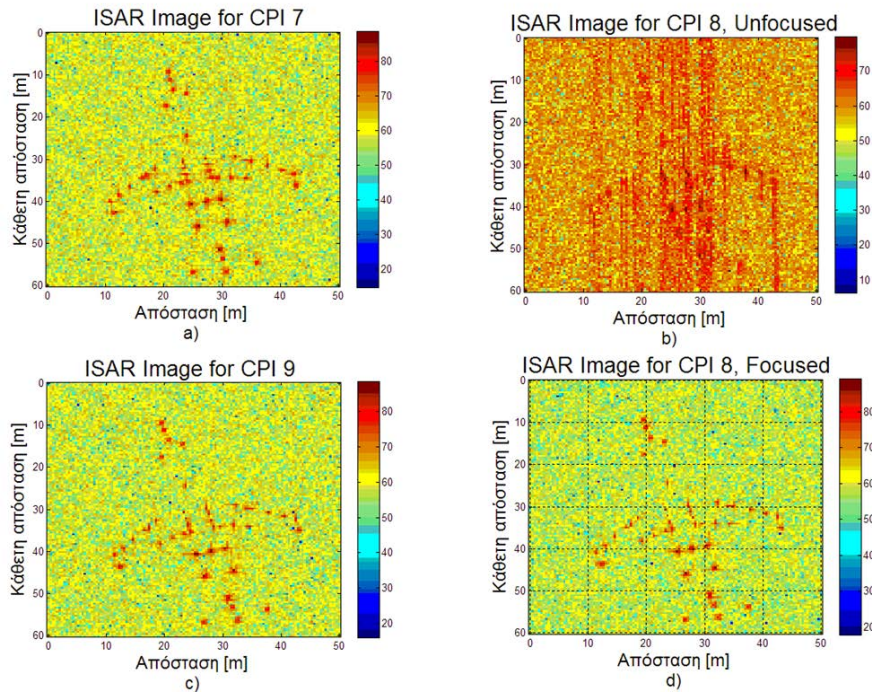


Σχήμα 3-46. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-30

Πίνακας 3-64. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-30

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.6017	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8417	
9° CPI	5.4093	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4143	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

4. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-47 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-31 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-31 υπάρχουν στον Πίνακα 3-65.

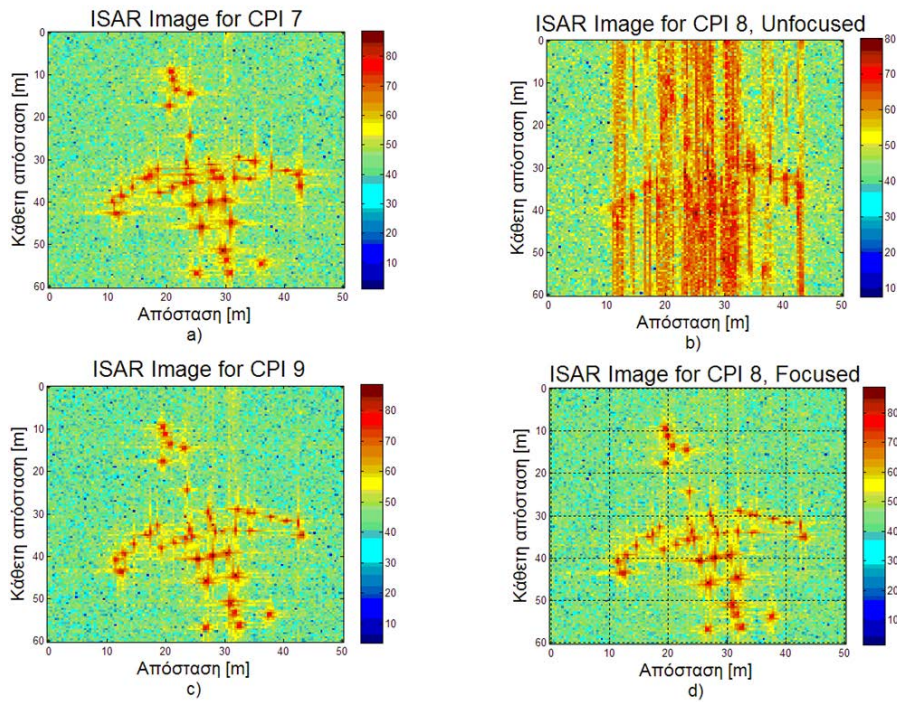


Σχήμα 3-47. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-31

Πίνακας 3-65. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-31

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.9831	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.9397	
9 ^ο CPI	7.8817	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8823	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

5. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-48 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-32 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-32 υπάρχουν στον Πίνακα 3-66.

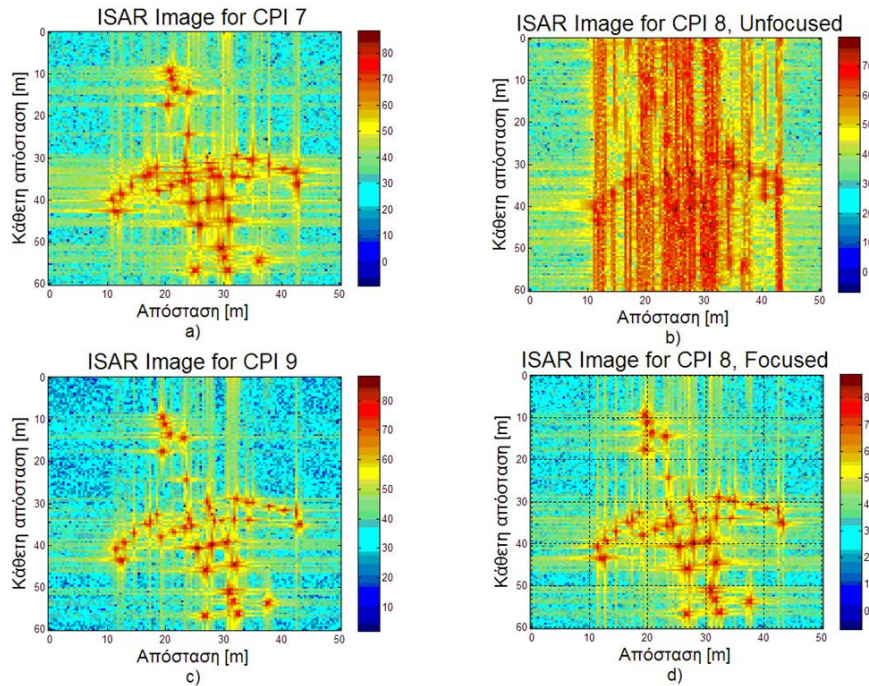


Σχήμα 3-48. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-32

Πίνακας 3-66. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-32

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.7996	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.1096	
9 ^ο CPI	5.6166	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6116	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

6. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-49 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-33 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-33 υπάρχουν στον Πίνακα 3-67.

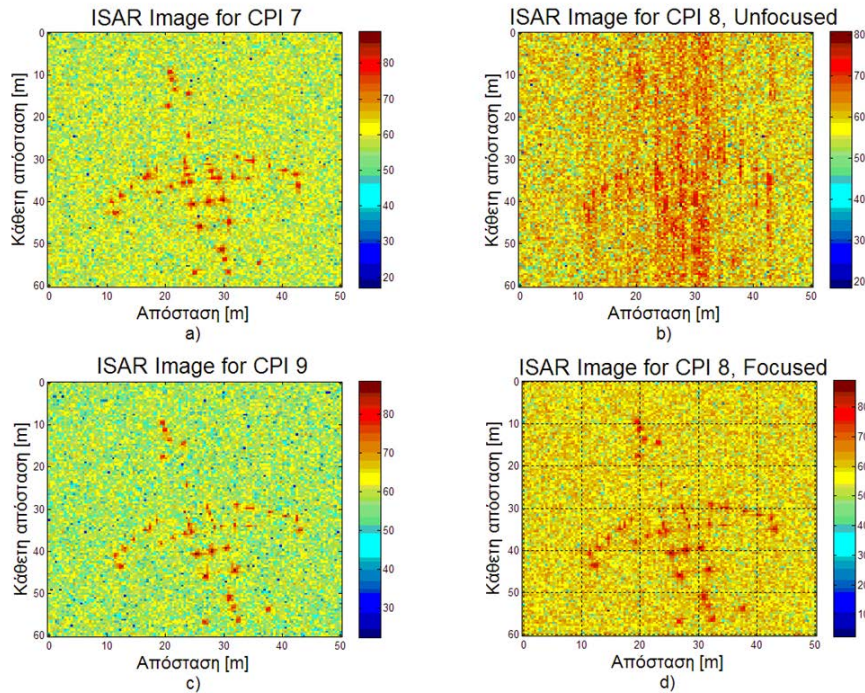


Σχήμα 3-49. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-33

Πίνακας 3-67. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-33

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.6002	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.0157	
9 ^ο CPI	5.4096	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4158	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

7. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-50 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-34 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-34 υπάρχουν στον Πίνακα 3-68.

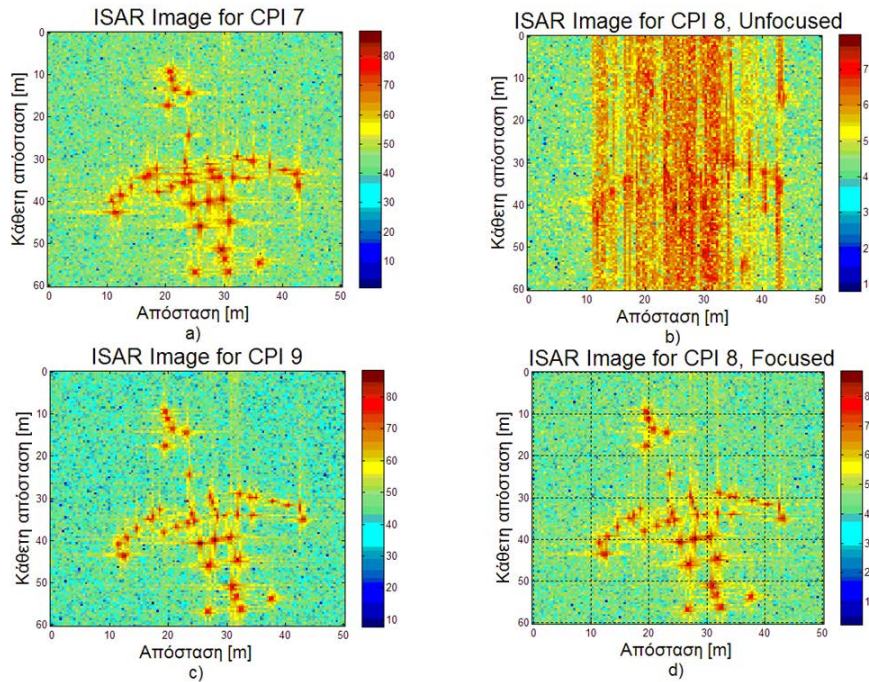


Σχήμα 3-50. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-34

Πίνακας 3-68. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-34

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.9869	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.963	
9 ^ο CPI	7.9011	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9005	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

8. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-51 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-35 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-35 υπάρχουν στον Πίνακα 3-69.

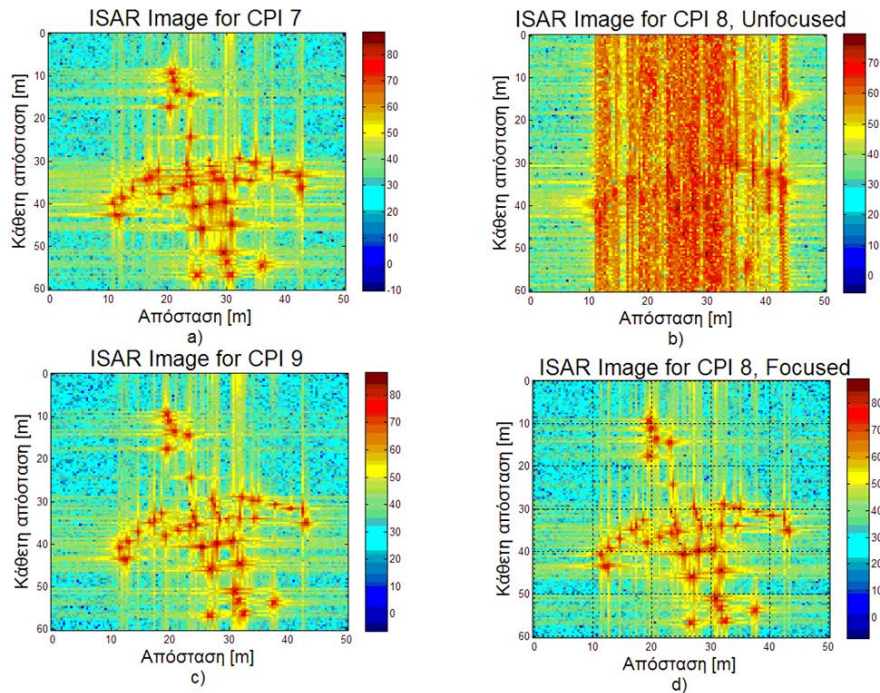


Σχήμα 3-51. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-35

Πίνακας 3-69. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-35

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.8032	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.2682	
9 ^ο CPI	5.6166	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6161	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 4

9. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.2 0.8] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-52 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-36 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-61. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-36 υπάρχουν στον Πίνακα 3-70.



Σχήμα 3-52. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-36

Πίνακας 3-70. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-36

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.5996	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.1872	
9 ^ο CPI	5.41	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4149	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

3.9.5.3 Boeing 727, περίπτωση 2

Με τιμές σηματοθρομβικού λόγου $SNR = 0 \text{ dB}$, $SNR = 15 \text{ dB}$, $SNR = 30 \text{ dB}$, γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75,] ως ποσοστό του CPI, έχω με την μέθοδο της επαναληπτικής διαδικασίας Monte-Carlo για 100 δοκιμές με τα 10 CPI τους παρακάτω πίνακες για τον προσδιορισμό των ορίων εντροπίας.

Πίνακας 3-71. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,917262	7,934479	7,945513	7,969917	7,929056	7,91797	7,98443	7,951217	7,897825	7,954997
15	5,67884	5,69815	5,740034	5,760642	5,697432	5,681282	5,803333	5,739281	5,617766	5,763539
30	5,474205	5,491072	5,537326	5,555512	5,492541	5,477102	5,600326	5,536418	5,40932	5,563083

Πίνακας 3-72. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,957765	7,983338	7,992216	8,007515	7,973157	7,962006	8,016243	7,98642	7,929413	8,015497
15	5,687177	5,706633	5,749802	5,77105	5,706751	5,690022	5,811055	5,75308	5,626426	5,7745
30	5,476593	5,492961	5,539406	5,557641	5,493974	5,479135	5,60179	5,538464	5,410946	5,564537

Πίνακας 3-73. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,87423	7,883765	7,900777	7,926579	7,887769	7,883414	7,94868	7,918779	7,858882	7,921878
15	5,668877	5,689851	5,73139	5,748988	5,68871	5,67181	5,795397	5,727353	5,60557	5,751851
30	5,472627	5,489654	5,53589	5,553798	5,491286	5,475078	5,598403	5,534067	5,407466	5,561711

Πίνακας 3-74. Τυπική απόκλιση εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,015035	0,016353	0,01627	0,016491	0,017569	0,017151	0,014766	0,014866	0,015691	0,016318
15	0,003802	0,004027	0,003571	0,004138	0,003645	0,003837	0,003413	0,004196	0,003851	0,004069
30	0,000642	0,000734	0,000735	0,000679	0,000621	0,000719	0,000671	0,000751	0,00073	0,000658

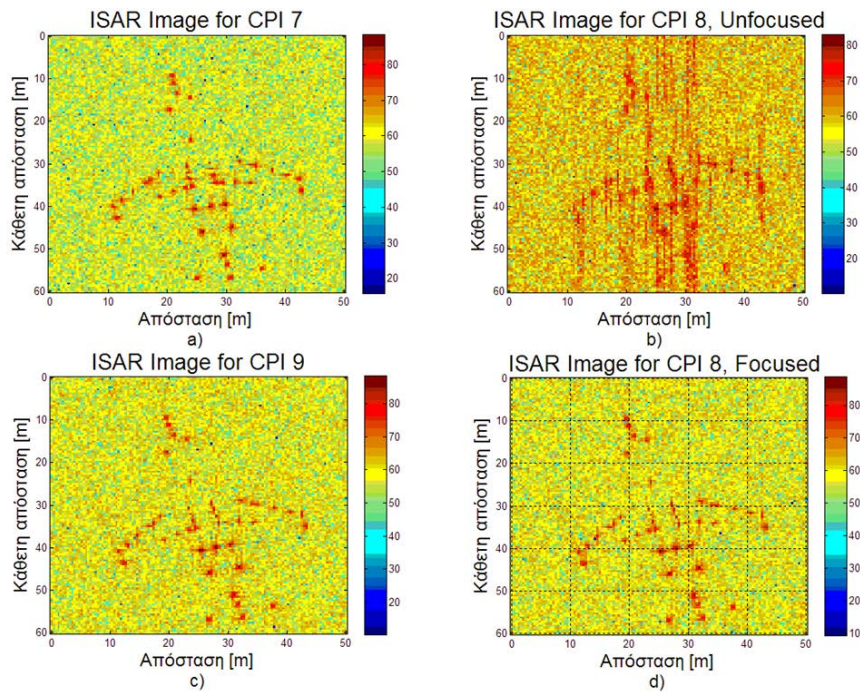
Πίνακας 3-75. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου ορίου εντροπίας και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR

SNR [db]	Μέγιστο όριο εντροπίας	Ελάχιστο όριο εντροπίας	Τυπική απόκλιση
0	8,016243	7,858882	0,016051
15	5,811055	5,60557	0,003855
30	5,60179	5,407466	0,000694

Τώρα εξετάζουμε τα εξής ενδεχόμενα:

1. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-53 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-37 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης.

Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-37 υπάρχουν στον Πίνακα 3-76.



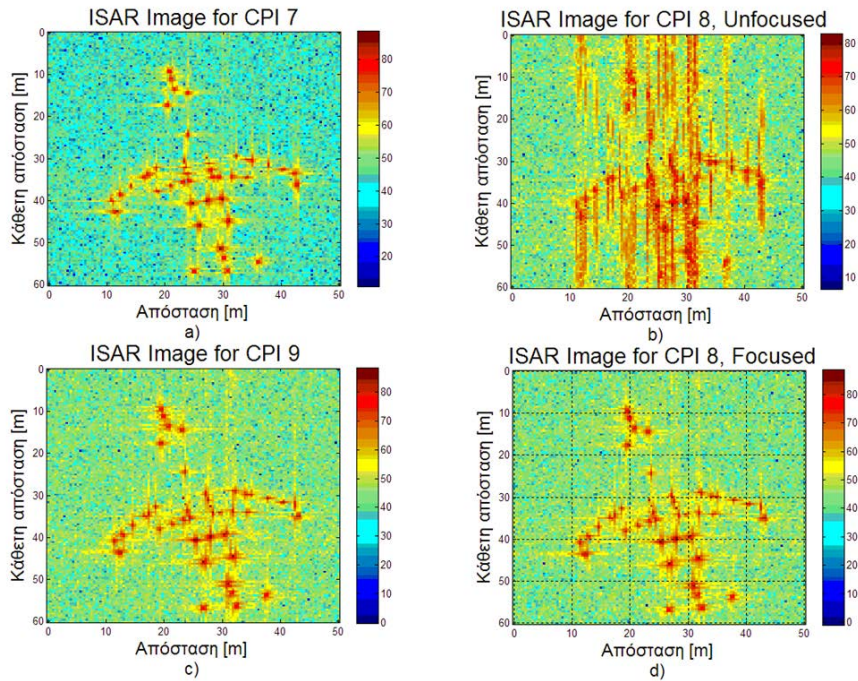
Σχήμα 3-53. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-37

Πίνακας 3- 76. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-37

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.9962	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.6823	
9 ^ο CPI	7.8934	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8921	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

2. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-54 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-38 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης.

Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-38 υπάρχουν στον Πίνακα 3-77.



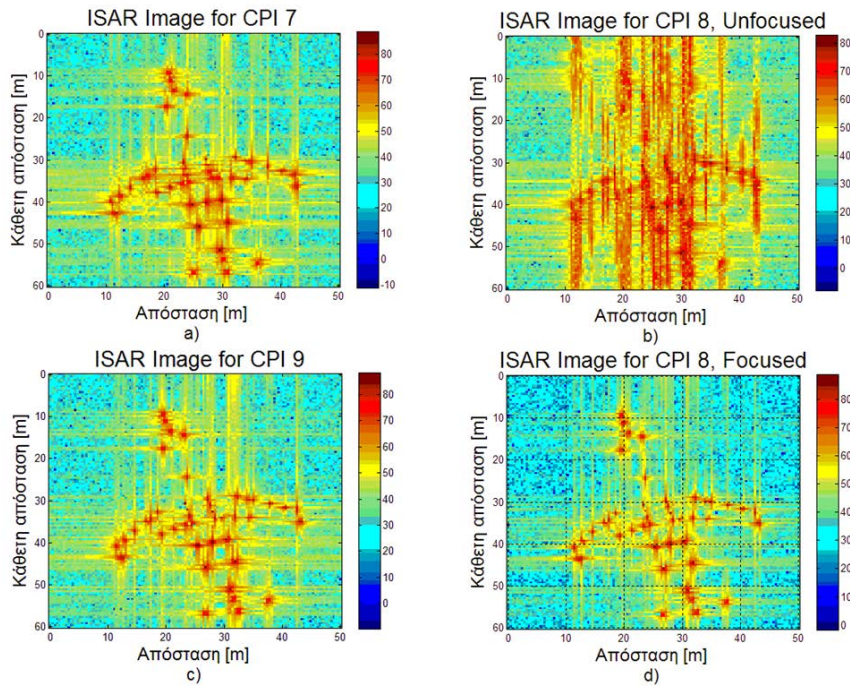
Σχήμα 3-54. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-38

Πίνακας 3-77. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-38

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.8085	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.4665	
9° CPI	5.6206	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6144	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

3. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-55 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-39 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής

πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-39 υπάρχουν στον Πίνακα 3-78.



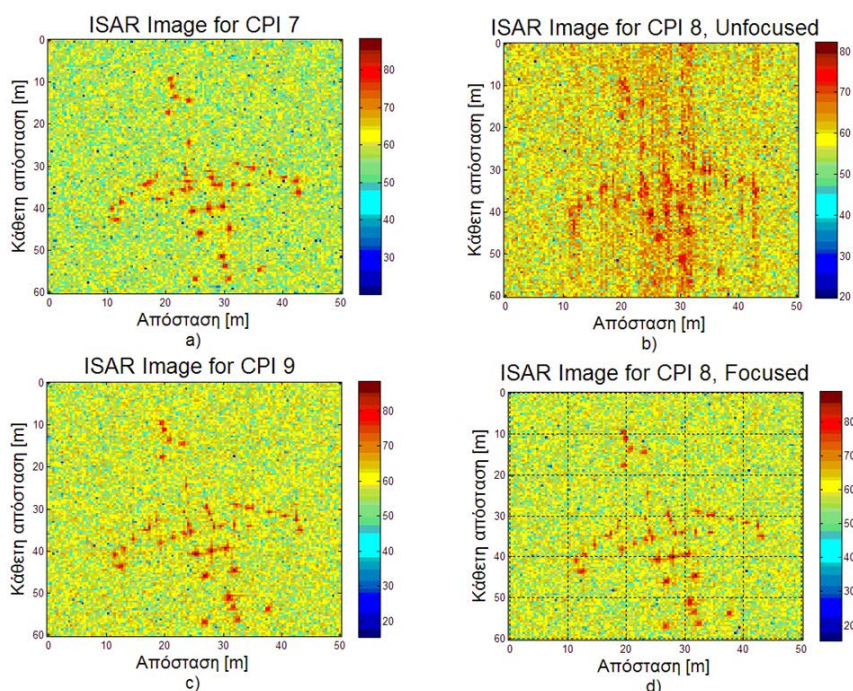
Σχήμα 3-55. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-39

Πίνακας 3-78. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-39

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.6019	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.3425	
9 ^ο CPI	5.4104	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4151	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

4. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-56 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-40 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά

την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-40 υπάρχουν στον Πίνακα 3-79.



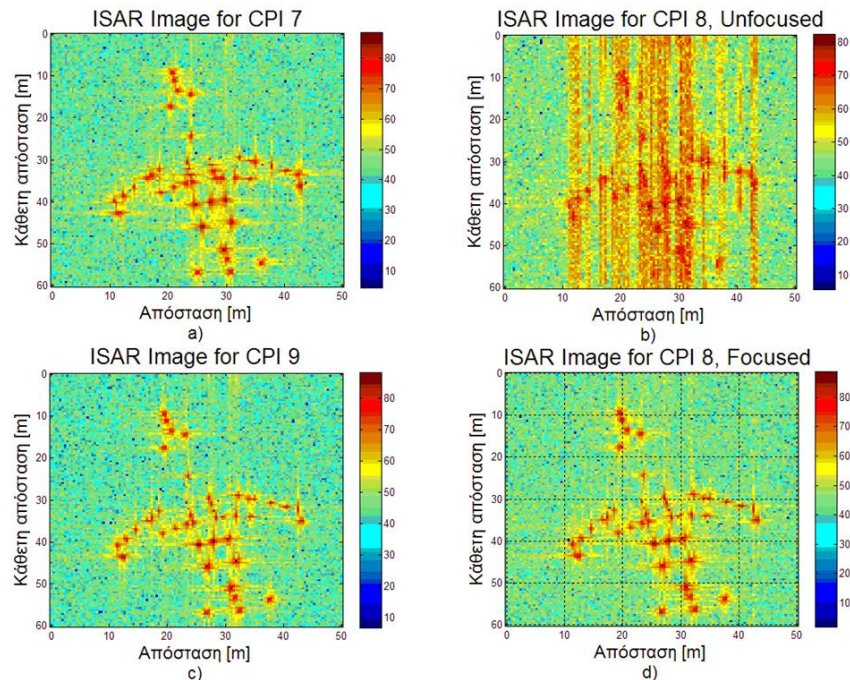
Σχήμα 3-56. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-40

Πίνακας 3-79. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-40

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.9617	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.8021	
9 ^ο CPI	7.896	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8897	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

5. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-57 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-41 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας

$E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-41 υπάρχουν στον Πίνακα 3-80.

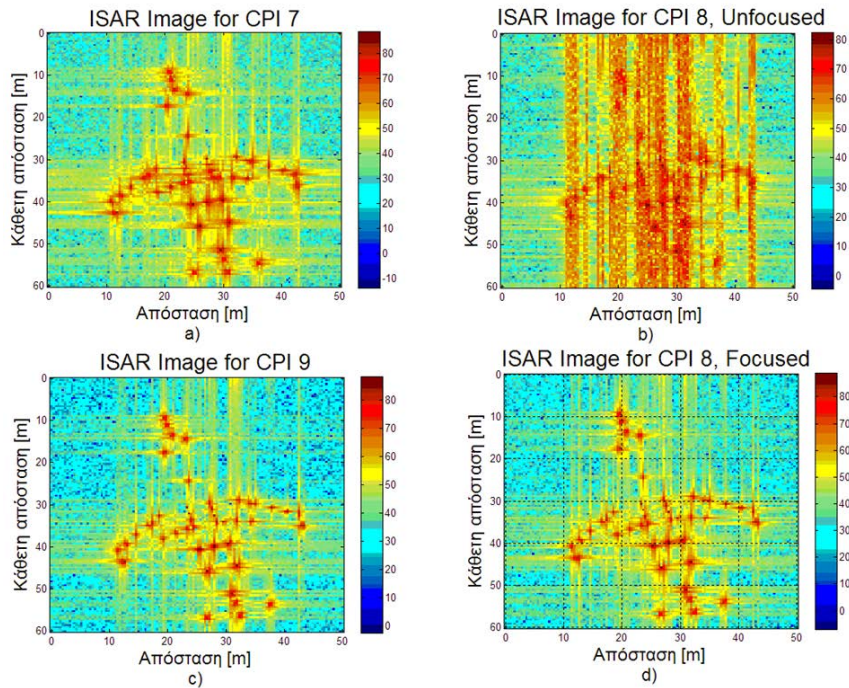


Σχήμα 3-57. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-41

Πίνακας 3-80. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-41

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.7961	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.7736	
9° CPI	5.6163	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6083	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

6. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-58 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-42 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-42 υπάρχουν στον Πίνακα 3-81.

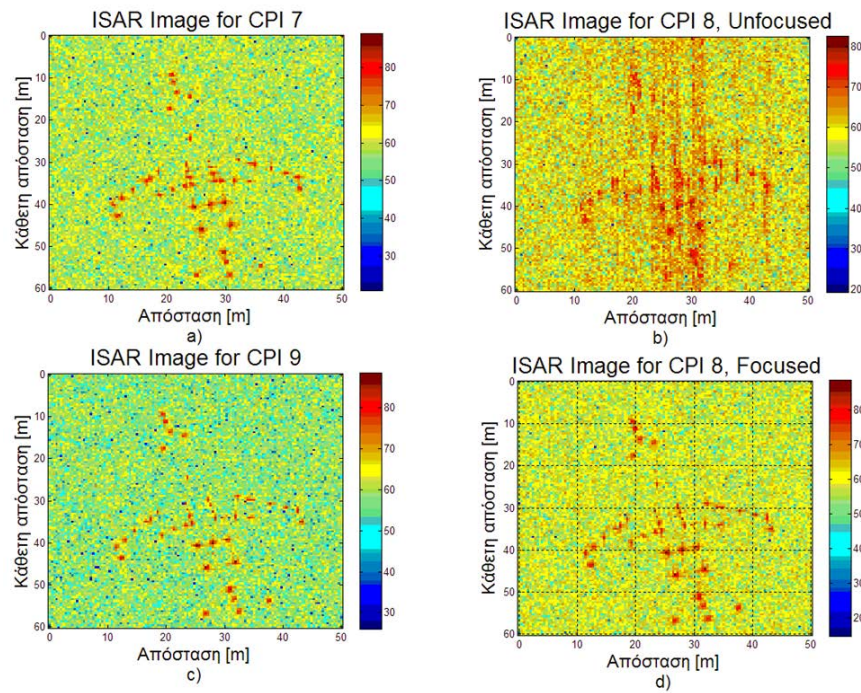


Σχήμα 3-58. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-42

Πίνακας 3-81. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-42

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.6006	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.6724	
9 ^ο CPI	5.409	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4153	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

7. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-59 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-43 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-43 υπάρχουν στον Πίνακα 3-82.

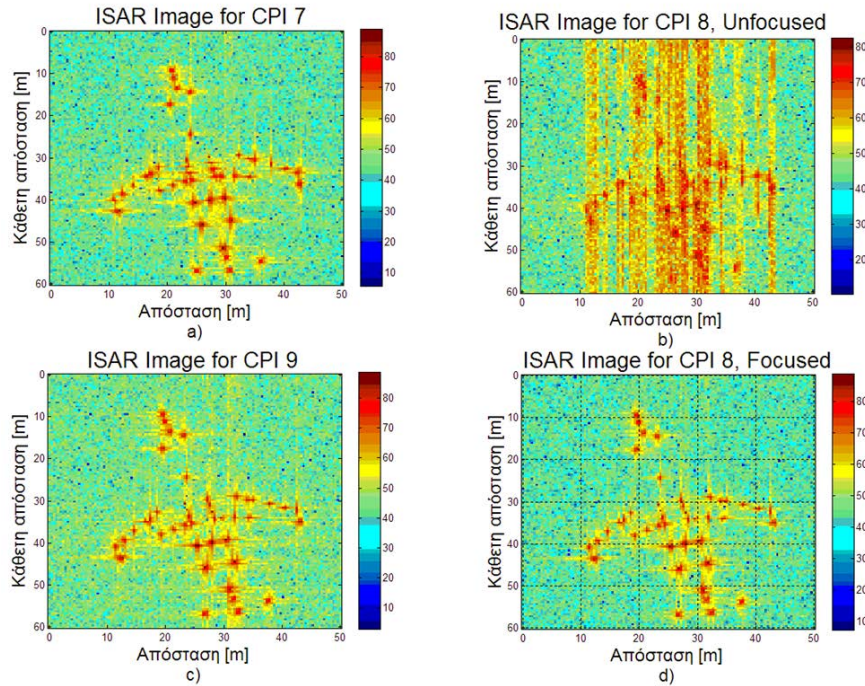


Σχήμα 3-59. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-43

Πίνακας 3-82. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-43

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.9841	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.7973	
9 ^ο CPI	7.8794	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8816	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

8. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-60 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-44 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-44 υπάρχουν στον Πίνακα 3-83.

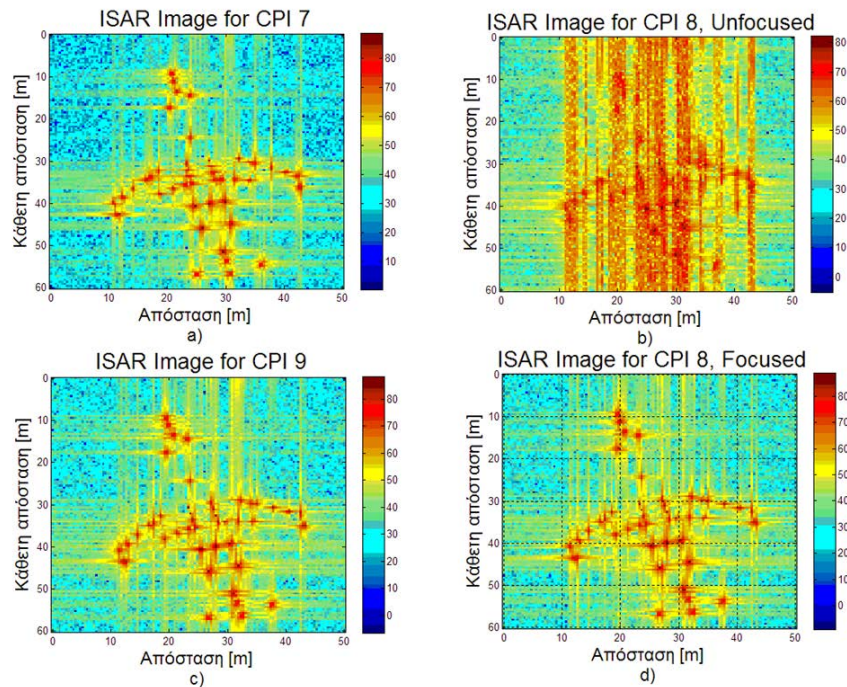


Σχήμα 3-60. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-44

Πίνακας 3-83. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-44

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.8008	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.7803	
9 ^ο CPI	5.616	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6066	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

9. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.35 0.75] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-61 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-45 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-75. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-45 υπάρχουν στον Πίνακα 3-84.



Σχήμα 3-61. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-45

Πίνακας 3-84. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-45

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.5997	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.6748	
9 ^ο CPI	5.4098	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.416	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

3.9.5.4 Boeing 727, περίπτωση 3

Με τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR = 0\text{ dB}$, $SNR = 15\text{ dB}$, $SNR = 30\text{ dB}$, γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.32\text{ rad/sec}^2$, $\gamma = 0.64\text{ rad/sec}^2$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης $[0.5\ 0.7]$ ως ποσοστό του CPI, έχω με την μέθοδο της επαναληπτικής διαδικασίας Monte-Carlo για 100 δοκιμές με τα 10 CPI τους παρακάτω πίνακες για τον προσδιορισμό των ορίων εντροπίας.

Πίνακας 3-85. Μέση τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,914835	7,933861	7,946461	7,970865	7,932582	7,920023	7,984401	7,952531	7,897838	7,953999
15	5,679237	5,698329	5,740364	5,760969	5,697617	5,680977	5,804071	5,739924	5,618062	5,763947
30	5,474243	5,490824	5,537378	5,555704	5,492478	5,477081	5,600453	5,536394	5,409087	5,563056

Πίνακας 3-86. Μέγιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,965088	7,969997	7,992415	8,011136	7,964728	7,958872	8,02029	7,996161	7,943987	7,987874
15	5,688333	5,709051	5,749037	5,773395	5,705826	5,692722	5,81228	5,753485	5,627206	5,773862
30	5,475784	5,492637	5,538613	5,557656	5,494226	5,47882	5,602444	5,538014	5,410959	5,564656

Πίνακας 3-87. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	7,878965	7,891515	7,907813	7,928278	7,898869	7,878662	7,948088	7,915149	7,865842	7,913658
15	5,671084	5,687556	5,72764	5,752676	5,689838	5,669678	5,795899	5,727522	5,609538	5,753432
30	5,472313	5,48913	5,535575	5,553741	5,491013	5,475295	5,598683	5,533891	5,407566	5,561391

Πίνακας 3-88. Ελάχιστη τιμή εντροπίας για διάφορες τιμές του SNR

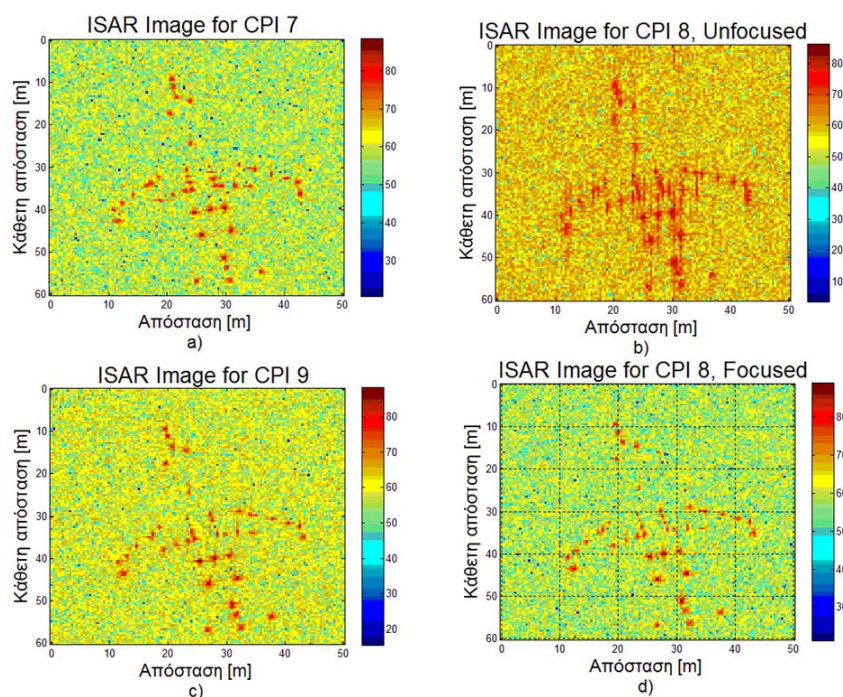
SNR [dB]	CPI 1	CPI 2	CPI 3	CPI 4	CPI 5	CPI 6	CPI 7	CPI 8	CPI 9	CPI 10
0	0,014917	0,014726	0,015711	0,016535	0,014388	0,016197	0,015071	0,017889	0,015611	0,014122
15	0,00353	0,004206	0,0042	0,004064	0,003581	0,004441	0,003653	0,004209	0,00399	0,003764
30	0,000699	0,000742	0,000635	0,000795	0,000716	0,000624	0,000647	0,000678	0,00072	0,000711

Πίνακας 3-89. Τιμές μέγιστου, ελάχιστου ορίου εντροπίας και τυπικής απόκλισης για διάφορες τιμές του SNR

SNR [db]	Μέγιστο όριο εντροπίας	Ελάχιστο όριο εντροπίας	Τυπική απόκλιση
0	8,02029	7,865842	0,015517
15	5,81228	5,609538	0,003964
30	5,602444	5,407566	0,000697

Τώρα εξετάζουμε τα εξής ενδεχόμενα:

1. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-62 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-46 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$. Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-46 υπάρχουν στον Πίνακα 3-90.

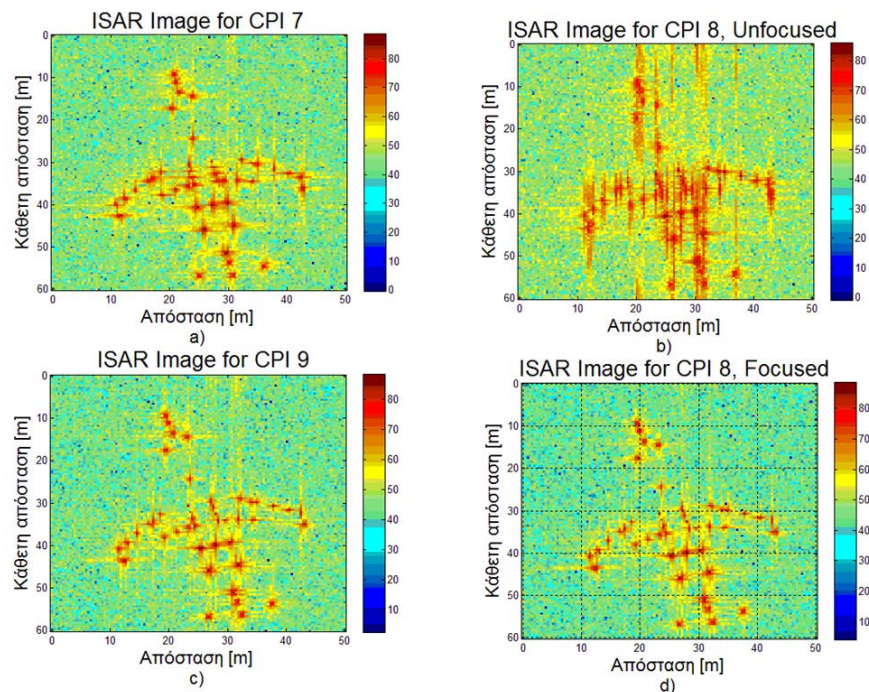


Σχήμα 3-62. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-46

Πίνακας 3-90. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-46

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^o CPI	8.0139	
8 ^o CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.3917	
9 ^o CPI	7.9121	
8 ^o CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9082	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 7

2. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-63 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-47 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-47 υπάρχουν στον Πίνακα 3-91.

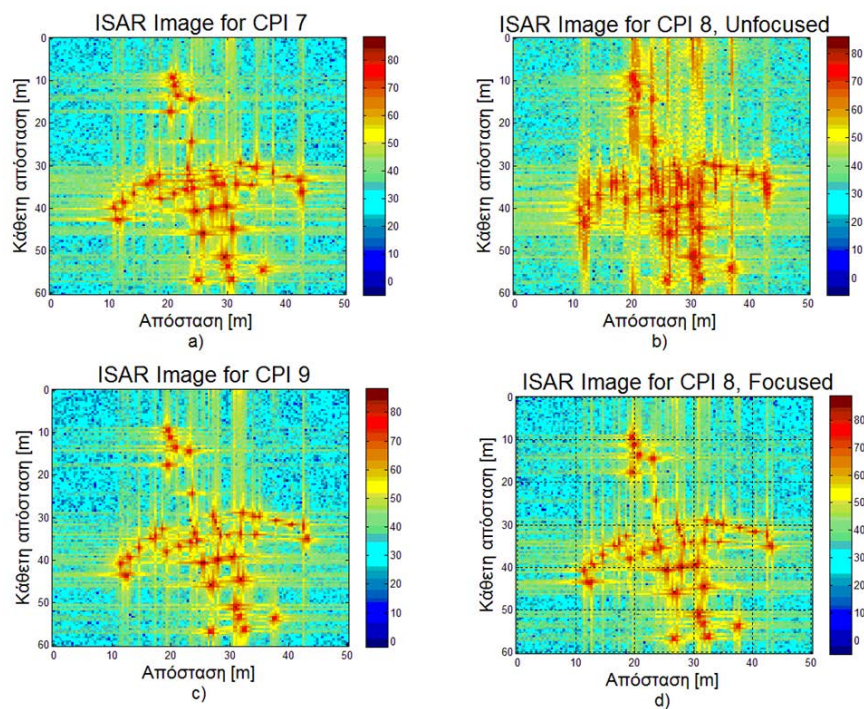


Σχήμα 3-63. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-47

Πίνακας 3-91. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-47

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.7989	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.723	
9 ^ο CPI	5.6212	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6169	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

3. Για $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-64 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-48 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-48 υπάρχουν στον Πίνακα 3-92.

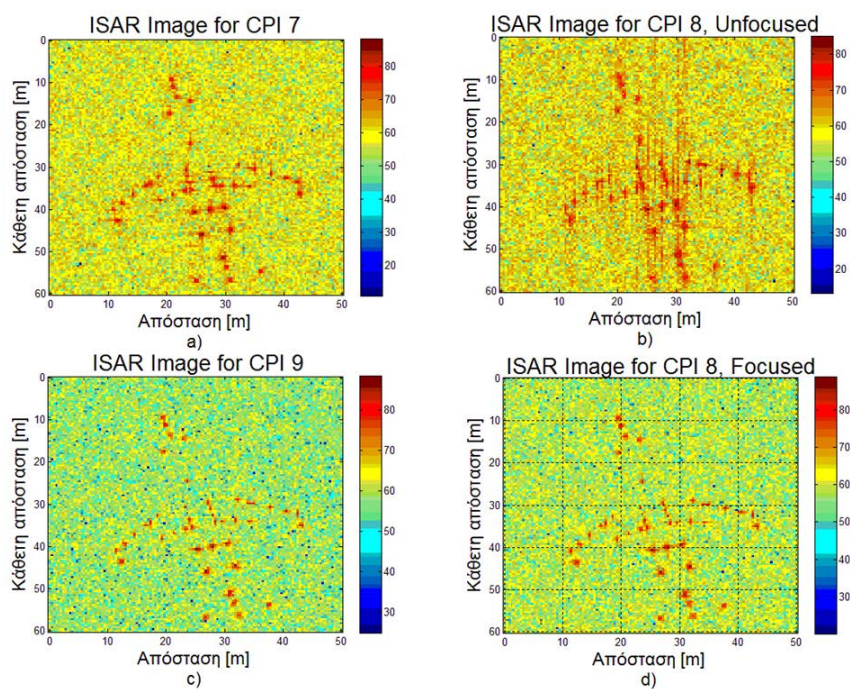


Σχήμα 3-64. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-48

Πίνακας 3-92. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-48

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.6006	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.5571	
9 ^ο CPI	5.4091	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4152	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

4. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-65 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-49 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-49 υπάρχουν στον Πίνακα 3-93.

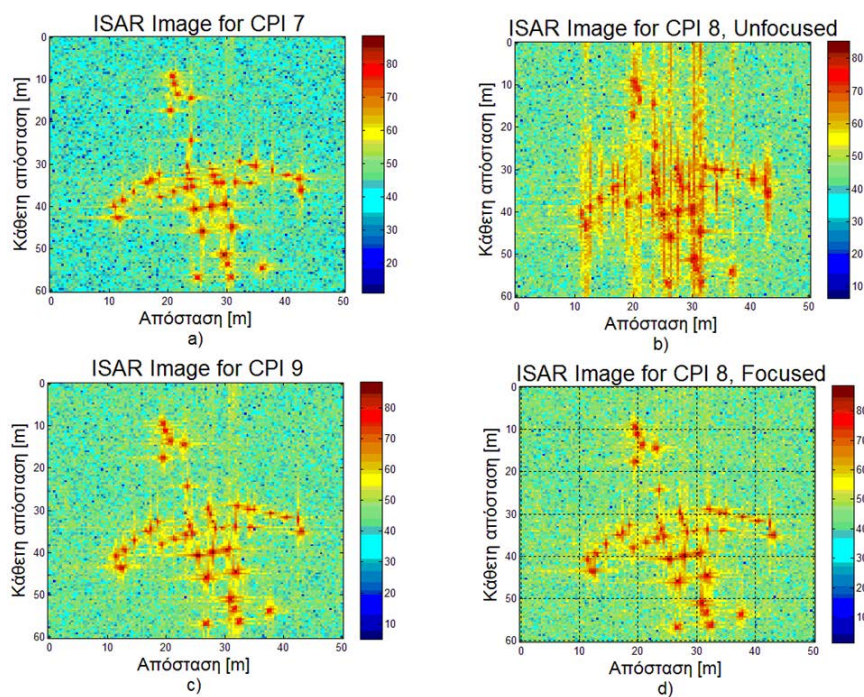


Σχήμα 3-65. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-49

Πίνακας 3-93. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-49

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	7.9854	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.4442	
9 ^ο CPI	7.9289	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.9219	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

5. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-66 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-50 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-50 υπάρχουν στον Πίνακα 3-94.

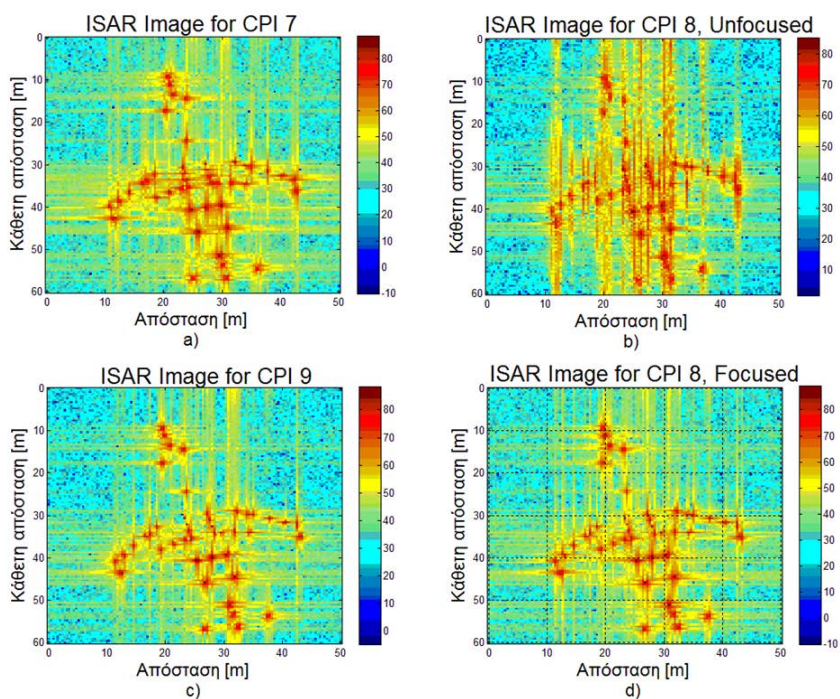


Σχήμα 3-66. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-50

Πίνακας 3-94. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-50

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.8004	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.928	
9° CPI	5.6171	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6121	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

6. Για $\gamma = 0.32 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-67 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-51 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-51 υπάρχουν στον Πίνακα 3-95.

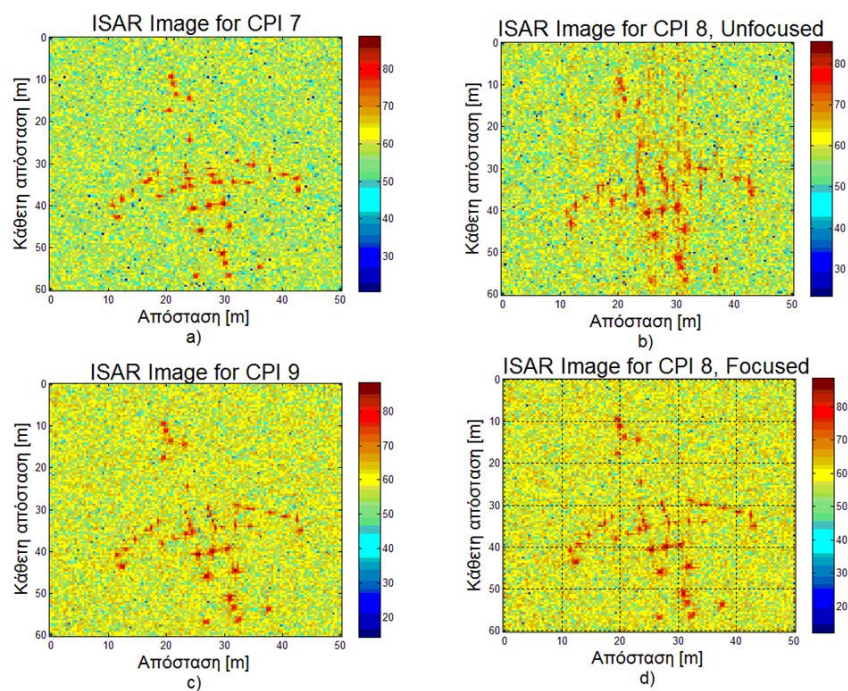


Σχήμα 3-67. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-51

Πίνακας 3-95. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-51

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.6013	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.778	
9° CPI	5.4093	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4144	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

7. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 0 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-68 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-52 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 0 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 8.1$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-52 υπάρχουν στον Πίνακα 3-96.

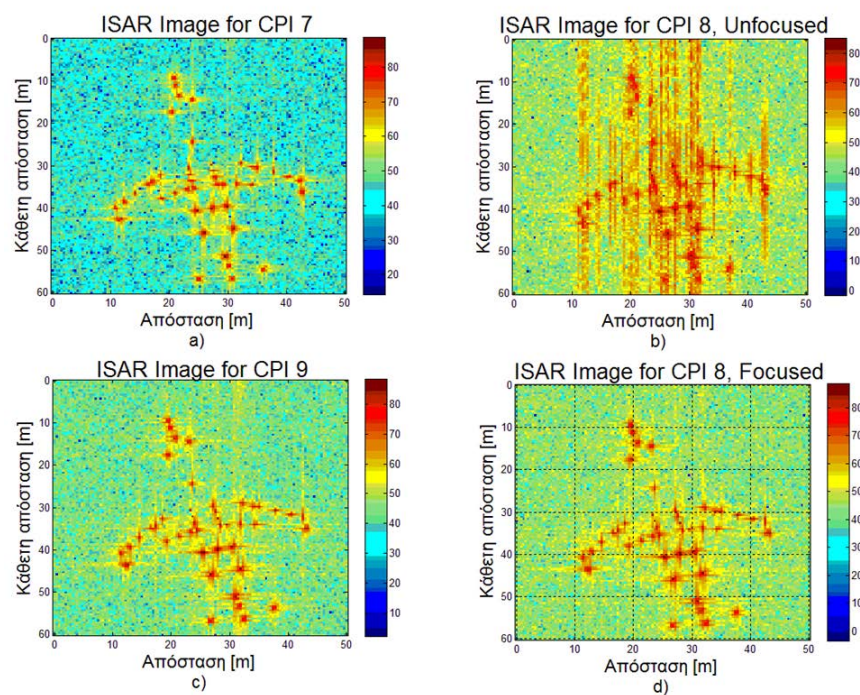


Σχήμα 3-68. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-52

Πίνακας 3-96. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-52

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	7.9938	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	8.5287	
9° CPI	7.8776	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.8853	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

8. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 15 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-69 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-53 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 15 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.9$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-53 υπάρχουν στον Πίνακα 3-97.

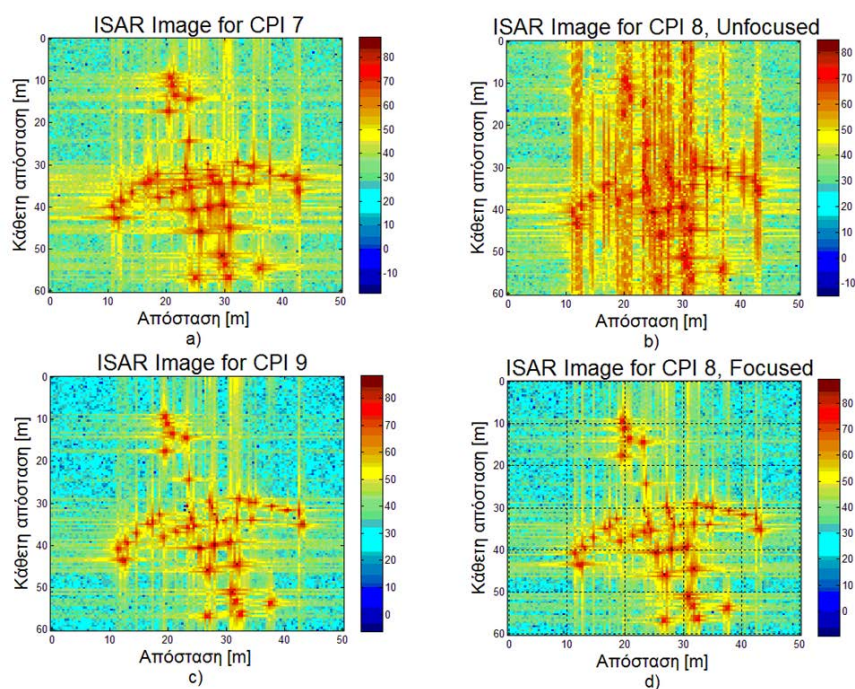


Σχήμα 3-69. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-53

Πίνακας 3-97. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-53

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7 ^ο CPI	5.8034	
8 ^ο CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	7.097	
9 ^ο CPI	5.618	
8 ^ο CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.6162	Βαθμίδα 4, τμήμα 2, συνδυασμός 8

9. Για $\gamma = 0.64 \text{ rad/sec}^2$ $SNR = 30 \text{ db}$ και διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης [0.5 0.7] ως ποσοστό του CPI, έχουμε στο Σχήμα 3-70 τις ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-54 πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Τα όρια της εντροπίας για $SNR = 30 \text{ db}$ υπάρχουν στον Πίνακα 3-89. Εφαρμογή windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης. Το κατώφλι της εντροπίας $E_{Thr} = 5.7$ Οι τιμές της εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-54 υπάρχουν στον Πίνακα 3-98.



Σχήμα 3-70. Ανακατασκευασμένες ISAR εικόνες-54

Πίνακας 3-98. Τιμές εντροπίας για τις παρουσιαζόμενες εικόνες ISAR-54

Περίπτωση εικόνας ISAR	Εντροπία	Συνδυασμός Ελάχιστης Εντροπίας
7° CPI	5.5996	
8° CPI, ΜΗ-ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	6.9543	
9° CPI	5.41	
8° CPI, ΕΣΤΙΑΣΜΕΝΗ	5.4151	Βαθμίδα 3, τμήμα 2, συνδυασμός 4

3.10 Συμπεράσματα

Σε αυτή την έρευνα αναπτύσσεται μια μέθοδος αυτοεστίασης για αεροπορικούς στόχους με (πιθανή) ταχεία περιστροφική κίνηση (fast maneuvering). Η ταχεία περιστροφική κίνηση αντισταθμίζεται μέσω του προτεινόμενου αλγόριθμου αυτοεστίασης και η υπολογιστική πολυπλοκότητα της διαδικασίας της πολικής επαναδιαμόρφωσης μπορεί να αποφευχθεί. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί είτε στα μη επεξεργασμένα δεδομένα ή στα δεδομένα ιστορίας του προφίλ απόστασης, που εξαρτάται από τις άλλες διαδικασίες αντιστάθμισης κίνησης που πραγματοποιούνται στον δέκτη του ραντάρ. Με ένα δυναμικά βέλτιστο τρόπο που βασίζεται στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης της εντροπίας ο προτεινόμενος αλγόριθμος παραλείπει τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες ISAR με κατώτερη ποιότητα και χρησιμοποιεί μόνο τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες ISAR με ανώτερη ποιότητα. Τα προσομοιωμένα παραδείγματα επιβεβαιώνουν την προσαρμοστικότητα της διαδικασίας αυτοεστίασης στις διαφορετικές συνθήκες απεικόνισης ISAR. Επί πλέον η μεταβολή της εντροπίας σε σχέση με την γωνία θέασης, τον σηματοθορυβικό λόγο και τις παραμέτρους περιστροφικής κίνησης ποσοτικοποιείται. Αυτό θεωρούμε ότι είναι το πρώτο βήμα προς την αυτοματοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου αυτοεστίασης για την εφαρμογή του στο πεδίο των πραγματικών δεδομένων.

Περαιτέρω, με την εξαντλητική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στους δύο τύπους στόχων, στο Mirage 2000 και στο Boeing 727, και στις τρεις υπό εξέταση περιπτώσεις με τα κριτήρια που θέσαμε, διαπιστώσαμε ότι η περιστροφική κίνηση αντισταθμίζεται με τον αλγόριθμο αυτοεστίασης με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ καλές τιμές εντροπίας. Σημαντική παρατήρηση είναι η διαπίστωση ότι στην δεύτερη περίπτωση για το Mirage 2000 και συγκεκριμένα στο διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης $[0.5 \ 0.7]$ ως ποσοστό του CPI, με τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR = 0 \text{ dB}$, $SNR = 15 \text{ dB}$, $SNR = 30 \text{ dB}$ και τιμή γωνιακής επιτάχυνσης $\gamma = 0.16 \text{ rad/sec}^2$, αφαιρούμε την εξομάλυνση (smoothing) για να δούμε την επίδραση στην εντροπία και το τρέξιμο του αλγορίθμου. Αυτό δεν συμβαίνει για τον στόχο του Boeing 727 με τους 52 σκεδαστές στο ίδιο διάστημα γωνιακής επιτάχυνσης $[0.5 \ 0.7]$ και για τις ίδιες

τιμές σηματοθορυβικού λόγου και γωνιακής επιτάχυνσης. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις και για τους δυο στόχους εφαρμόζουμε το windowing για να εξομαλύνουμε τις μεταβολές της περιστροφής πριν και μετά την περίοδο γωνιακής επιτάχυνσης.

3.11 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] M. Martorella- University of Pisa, "ISAR Geometry and Signal Modeling"
- [2] M. Martorella, F. Berizzi and B. Haywood, "Contrast maximization based technique for 2-D ISAR autofocusing", IEE Proc. Radar Sonar Navig., Vol. 152, No. 4, pp. 253-262, Aug. 2005.
- [3] Shannon, C. E., "A Mathematical Theory of Communications", Bell Syst. Tech. J., Vol. 27, July 1948, pp. 379-423.
- [4] Pun, T., "A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram", Signal Processing, Vol. 2, 1980, pp. 223-237.
- [5] Nikhil, P.R., and P.K. Sankar, "Entropy: A New Definition and Its Applications", IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, Vol. 21, No. 5, Sept. 1991, pp. 1260-1270.
- [6] D. Wehner, High-Resolution Radar, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [7] Wang, Y., Ling, and V. C. Chen, "ISAR Motion Compensation via Adaptive Joint Time-Frequency Technique", IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 2, Apr. 1998, pp. 670-677.
- [8] Martinez, A., Parameter Estimation Theory for Synthetic High Resolution Radar, Master's thesis, Uni. Of Texas at El Paso, July 1998.
- [9] Chen, C. C., and H. C. Andrews, "Target-Motion-Induced Radar Imaging", IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, Vol. AES-16, No. 1, Jan. 1980.
- [10] Wu, H., et al., "Translational Motion Compensation in ISAR Image Processing", IEEE Trans. On Image Processing, Vol. 4, No. 11, Nov. 1995, pp. 1561-1571.
- [11] Itoh, T., H. Sueda, and Y. Watanabe, "Motion Compensation for ISAR via Centroid Tracking", IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, Vol. 32, No. 3, July 1996, pp. 1191-1197.
- [12] Flores, B. C., S. D. Cabrera, and A. Martinez, "Advances in Automatic Estimation and Compensation of Target Kinematics for Improved Radar Imaging ", Proc. SPIE Automatic Object Recognition, Vol. 2234, 1994, pp. 49-56.
- [13] Flores, B. c., Robust Methods for the Motion Compensation of Inverse Synthetic Aperture Radar Imagery, Ph.D. Diss., Arizona State Univ., Tempe, Aug. 1990.
- [14] Bocker, R.P., and S. A. Jones, "ISAR Motion Compensation Using the Burst Derivative Measure as a Focal Quality Indicator", Internat. J. of Imaging and Technology, Vol. 4, 1992, pp. 285-297.

- [15] Flores, B. C., J. S. Son, and A. Martinez, "Motion Compensation of ISAR Imagery via the Burst Derivative Measure", Proc. SPIE Radar/Ladar Processing and Applications, Vol. 2562, 1995, pp. 125-136.
- [16] Son, J. S., S. Tariq, and B. C Flores, "Phase Difference Method for Target Motion Compensation of Stepped-Frequency ISAR Signature", Proc. SPIE Radar Processing, Technology, and Applications, Vol. 2845, 1996, pp. 163-174.
- [17] Berizzi, F., and G. Corsini, "Autofocusing of Inverse Synthetic Aperture Radar Images Using Contrast Optimization", IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, Vol. 32, No. 3, July 1996.
- [18] Son, J. S., C. Flores, and S. Tariq, "An Efficient Target Motion Compensation Method for Stepped-Frequency ISAR Signatures", Proc. SPIE Radar Processing, Technology, and Applications II, Vol.3161, 1997, pp. 20-28.
- [19] Son, J. S., and B. C. Flores, "ISAR Range Measurement via Complex Analysis and its Application to Motion Compensation" Proc. SPIE Radar Processing, Technology, and Applications III, 3462, pp. 44-51.
- [20] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, P. Frangos, G. Bouladakis and G. Kalognomos, "Two-dimensional ISAR model and image reconstruction with stepped frequency-modulated signal", IET Signal Processing, Vol. 2, No. 3, Sept. 2008.
- [21] D. Wehner, High-Resolution Radar, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [22] V. Chen and H. Ling, Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis, Norwood, MA: Artech House, 2002.
- [23] Li Xi, Liu Guosi and Jinlin Ni, "Autofocusing of ISAR Images Based on Entropy Minimization", IEEE Trans. Aerospace Electronics Systems, Vol. 35, No. 4, 1999, pp. 1240-1252.
- [24] Bouladakis G. E., Kalognomos G. K., Karakasiliotis A. V., and Frangos P.V. "A Comparative Study of Bilinear Time-Frequency Transforms of ISAR Signals for Air Target Imaging", Electronics and Electrical Engineering Journal, Kaunas: Technologija, 2009, No. 4 (92), p.p 87-92.
- [25] Lazarov A., Minchev C. "ISAR Signal Modeling and Image Reconstuction with Entropy Minimization Autofocusing", Proc. DASC. Portland, USA, 2006 P. 3E5-1-3E5-11.
- [26] Kalognomos G. K., Bouladakis G. E., Karakasiliotis A. V., and Frangos P. V. "Performance Analysis of a Parameterized APES (PAPES) Spectrum Estimation Method for ISAR Applications", Electronics and Electrical Journal, Kaunas: Technologija, 2010, No. 3 (99), p.p 43-48.

- [27] Kallitsis E., Boultadakis G., Karakasiliotis A., Tseremoglou I., Stergiannis E., Hristakis H., Grigoratou E., Vagianou A., and Frangos P. "An Autofocusing Algorithm for post-processing ISAR imaging Based on Image Entropy Minimization", CEMA 10 International Conference, Athens, Greece, 7-9 Oct. 2010.

Κεφάλαιο 4

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ
ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (DEcimative
Spectrum Estimation by factor D /
ΜΕΘΟΔΟΣ DESED) ΣΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ
SRRC (SLANT RANGE ROTATIONAL
COMPENSATION)**

4.1 Μονοδιάστατη εκτίμηση παραμέτρων ραντάρ με χρήση μεθόδων υψηλής φασματικής ανάλυσης

4.1.1 Εισαγωγή

Στις εφαρμογές αναγνώρισης και ταξινόμησης στόχων ραντάρ, οι εικόνες ISAR πρέπει να διαθέτουν υψηλή ανάλυση (απεικόνιση υψηλής ανάλυσης), ώστε να επιτρέπουν τη λήψη αποφάσεων ως προς την κατηγορία και τον τύπο του υπό εξέταση στόχου. Ένα σημαντικό βήμα στην απεικόνιση ISAR είναι η υλοποίηση αλγορίθμων φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης. Πράγματι, είναι ευρέως γνωστό ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η κλασσική επεξεργασία των διδιάστατων, μη επεξεργασμένων δεδομένων ραντάρ μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier δεν επαρκεί για τη δημιουργία εικόνων υψηλής ανάλυσης. Για αυτό το λόγο, διάφορες τεχνικές φασματικής εκτίμησης, παραμετρικές και μη, εφαρμόζονται ώστε να βελτιώσουν την ανάλυση τόσο των μονοδιάστατων όσο και των διδιάστατων εικόνων στόχων ραντάρ (προφίλ απόστασης και εικόνες ISAR αντίστοιχα).

Μονοδιάστατες εικόνες ραντάρ ενός στόχου μπορούν να παραχθούν εφαρμόζοντας τεχνικές φασματικής εκτίμησης στα δεδομένα που έχουμε από το στόχο στο πεδίο της συχνότητας, και έχει αποδειχθεί ότι οι προκύπτουσες εικόνες έχουν καλύτερη ανάλυση από εκείνες που προέρχονται από τις τεχνικές που βασίζονται στο μετασχηματισμό Fourier. Στη βιβλιογραφία, συναντάμε μεθόδους απεικόνισης που περιλαμβάνουν μονοδιάστατες τεχνικές φασματικής ανάλυσης για την παραγωγή των προφίλ απόστασης, και επεκτείνονται στις δύο διαστάσεις μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier. Ο μετασχηματισμός αυτός μετατρέπει τα δεδομένα από το στόχο στο πεδίο της γωνίας σε δεδομένα στο πεδίο της συχνότητας Doppler. Οι υβριδικές μέθοδοι δισδιάστατης απεικόνισης ραντάρ εφαρμόζουν πρώτα έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier στα δεδομένα του πεδίου συχνότητας (κατεύθυνση σκόπευσης ή απόστασης), και στη συνέχεια, μία τεχνική φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης για να μετασχηματίσει τα δεδομένα του πεδίου γωνίας (κατεύθυνση κάθετης απόστασης). Επιπρόσθετα, μονοδιάστατες μέθοδοι φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης μπορούν να εφαρμοστούν

στα δεδομένα του πεδίου συχνότητας, και κατόπιν, η υπέρθεση των παραγόμενων μονοδιάστατων εικόνων (ή «υπογραφών») ραντάρ σε διαφορετικές γωνίες σχηματίζει την επιθυμητή δισδιάστατη εικόνα. Όλες αυτές οι αναφορές βιβλιογραφικής φύσεως είναι, λίγο έως πολύ, η ιστορία της δισδιάστατης απεικόνισης ραντάρ με βάση την φασματική εκτίμηση πριν από την εισαγωγή των διδιάστατων επεκτάσεων των μονοδιάστατων μεθόδων φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης [1]. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, μεγάλο μέρος των ερευνητικών προσπαθειών έχει αφιερωθεί σε αυτό το συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο και αρκετές μεθοδολογίες απεικόνισης ISAR έχουν προταθεί [2, 3].

Η εκτίμηση παραμέτρων είναι ένα θεμελιώδες πεδίο της επεξεργασίας σήματος. Οι δύο βασικές μεθοδολογίες που ακολουθούνται για την εκτίμηση παραμέτρων είναι: (i) η εκτίμηση με βάση τη θεωρία του Bayes, η οποία στηρίζεται στην εκ των προτέρων γνώση για το υπό εξέταση σήμα (συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας των υπό εκτίμηση παραμέτρων), και (ii) η εκτίμηση μέγιστης πιθανότητας, η οποία μεγιστοποιεί μία συνάρτηση πιθανότητας που εξαρτάται από τις παραμέτρους του σήματος. Διάφοροι αλγόριθμοι που βασίζονται στην ανάλυση μοναδικών τιμών (Singular Value Decomposition, SVD) έχουν προταθεί για την επίλυση του προβλήματος εκτίμησης παραμέτρων [1]. Με την πρόσφατη πρόοδο των ψηφιακών επεξεργαστών σήματος και των προσωπικών υπολογιστών, η μετρίου μεγέθους ανάλυση μοναδικών τιμών (για διάσταση τετραγωνικού πίνακα της τάξης του 50-70) καθίσταται εφικτή τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε προγραμματιστικό επίπεδο, καθώς διάφορες υπολογιστικά αποδοτικές υλοποιήσεις είναι διαθέσιμες. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρων που περιλαμβάνουν την ανάλυση μοναδικών τιμών είναι ιδιαίτερα ελκυστικές, καθώς επιδεικνύουν πολύ καλή ακρίβεια εκτίμησης κατά αναλογία με το υπολογιστικό τους κόστος.

Η απεικόνιση ραντάρ υψηλής ανάλυσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μεθόδων φασματικής εκτίμησης [2], [3]. Οι παραμετρικές μέθοδοι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς χρησιμοποιούν ένα παραμετρικό μοντέλο για την ακριβή περιγραφή του υπό φασματική ανάλυση τμήματος του σήματος ραντάρ. Ένα διάνυμα παραμέτρων πρέπει να εκτιμηθεί πριν από τον υπολογισμό του φασματικού περιεχομένου του σήματος. Έτσι, η εκτίμηση

παραμέτρων είναι στενά συνδεδεμένη με την απεικόνιση ραντάρ, και αποτελεί το πρωταρχικό βήμα της όλης διαδικασίας.

Η βασιζόμενη στην υποδειγματοληψία σήματος φασματική εκτίμηση αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο της επεξεργασίας σήματος [4]–[6], σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους που έχουν προταθεί πριν από αρκετές δεκαετίες. Η υποδειγματοληψία βελτιώνει τη δυνατότητα ανάλυσης μίας μεθόδου εκτίμησης συχνότητας, δεδομένου ότι η υποδειγματοληπτημένη ακολουθία είναι αντιπροσωπευτική του αρχικού σήματος. Στην αναφορά [5], αποδεικνύεται ότι δύο μέθοδοι υποχώρου υψηλής ανάλυσης, συγκεκριμένα οι μέθοδοι MUSIC και ESPRIT, παρέχουν πιο ακριβείς εκτιμήσεις συχνότητας όταν εφαρμόζεται υποδειγματοληψία των δεδομένων. Επιπρόσθετα, στην αναφορά [4], σημειώνεται ότι αυτές οι μέθοδοι θέτουν έναν περιορισμό στην τάξη του μοντέλου του υπό εξέταση σήματος σε σχέση με τον παράγοντα υποδειγματοληψίας, με αποτέλεσμα τη μειωμένη αποδοτικότητά τους στην περίπτωση ενός υπερεκτιμημένου μοντέλου (με τάξη μεγαλύτερη από του σήματος).

Στο κεφάλαιο αυτό που αφορά τον καινοτόμο αλγόριθμο της ακριβούς ευθυγράμμισης των προφίλ απόστασης κατά την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διάσταση, με εφαρμογή στο ραντάρ απεικόνισης ISAR, προτείνουμε τη χρήση μίας μεθόδου φασματικής εκτίμησης με υποδειγματοληψία σήματος, συγκεκριμένα τη μέθοδο DESED (DEcimated Spectrum Estimation by factor D) [4], για την ακριβή εκτίμηση των θέσεων της οριζοντίου απόστασης των κέντρων σκέδασης ενός αεροπορικού στόχου.

4.2 Μέθοδος DESED (DEcimated Spectrum Estimation by factor D)

Η μέθοδος DESED εφαρμόζει υποδειγματοληψία σήματος και ανάλυση μοναδικών τιμών, αξιοποιεί όλα τα διαθέσιμα δεδομένα, και δεν επιβάλλει κάποιο περιορισμό στον παράγοντα υποδειγματοληψίας και στην τάξη του μοντέλου σήματος. Οι συχνότητες, οι παράγοντες απόσβεσης και τα μιγαδικά πλάτη του γενικού μοντέλου σήματος με αποσβεννόμενους εκθετικούς όρους (DE, damped exponentials) μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της μεθόδου

DESED. Στην περίπτωση δεδομένων σκέδασης μέσω ραντάρ, οι ακτινικές θέσεις (ή αποστάσεις), οι παράμετροι γεωμετρίας και οι εντάσεις σκέδασης των σημειακών σκεδαστών του υπό εξέταση στόχου μπορούν αντιστοίχως να εξαχθούν μέσω μαθηματικών εκφράσεων που συνδέουν τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα σήματος (DE και GTD).

Οι επιδόσεις της μεθόδου DESED, τόσο για καλά διαχωρισμένες θέσεις σκεδαστών όσο και για πολύ κοντινούς σκεδαστές, είναι αρκετά καλύτερες από εκείνες των δύο άλλων μεθόδων υψηλής ανάλυσης [9, 10]. Η μεγάλη ακρίβεια της μεθόδου DESED στην εκτίμηση των θέσεων των σκεδαστών ενός στόχου (π.χ. ενός πολεμικού αεροσκάφους) είναι πολύ σημαντική για εφαρμογές αναγνώρισης/ταυτοποίησης στόχων ραντάρ.

4.2.1 Μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου DESED

Η φασματική εκτίμηση με υποδειγματοληψία σήματος κατά έναν παράγοντα D (DEcimate Spectrum Estimation by factor D , DESED) πρωτοπαρουσιάζεται στην αναφορά [4]. Οι συχνότητες και οι παράγοντες απόσβεσης εκτιμώνται είτε μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (LS, least squares) είτε μέσω της συνολικής μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (TLS, total least squares). Οι μαθηματικές λεπτομέρειες της δεύτερης μεθόδου αναλύονται στην αναφορά [9]. Η εκτίμηση των πλατών πραγματοποιείται επίσης στα πλαίσια της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, αντικαθιστώντας τις εκτιμώμενες συχνότητες και τους εκτιμώμενους παράγοντες απόσβεσης στην εξίσωση του μοντέλου DE (χωρίς την προσθήκη θορύβου).

Η μέθοδος DESED υποθέτει ότι το υπό φασματική ανάλυση σήμα περιγράφεται μέσω του γενικού μοντέλου αποσβεννόμενων εκθετικών όρων

$$\begin{aligned}
 s(n) &= \sum_{i=1}^p (a_i e^{j\phi_i}) \cdot e^{(-d_i + j 2\pi f_i) n} \\
 &= \sum_{i=1}^p g_i \cdot z_i^n, \quad n=0, 1, \dots, N-1
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

όπου p είναι η τάξη του μοντέλου, ως a_i , ϕ_i , d_i και f_i συμβολίζουμε το πλάτος, τη φάση, τον παράγοντα απόσβεσης και τη συχνότητα του i -οστού μιγαδικού ημιτόνου, και N είναι ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος.

Η εξίσωση (4.1) περιγράφει το υπό εξέταση σήμα χωρίς προσθετικό θόρυβο μέτρησης. Παρόλα αυτά, σε πραγματικές εφαρμογές υπάρχει πάντα ο θόρυβος μέτρησης που προστίθεται στα δεδομένα, ο οποίος συνήθως υποτίθεται λευκός γκαουσιανός.

Τα αλγοριθμικά βήματα της μεθόδου DESED ελαχίστων τετραγώνων είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1: Υπολογισμός του πίνακα Hankel S από τα N δείγματα του εξεταζόμενου σήματος $s(n)$, μέσω της εξίσωσης (4.1). Ο πίνακας Hankel σχηματίζεται ως εξής

$$S = \begin{pmatrix} s(0) & s(1) & \dots & s(M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(L-1) & s(L) & \dots & s(N-1) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Βήμα 2: Σχηματισμός των υποδειγματοληπτημένων εκδοχών του πίνακα Hankel, $S_{\downarrow D}$ διαγράφοντας τις πάνω D σειρές του S , και $S_{\uparrow D}$ διαγράφοντας τις κάτω D σειρές του S .

Βήμα 3: Ανάλυση μοναδικών τιμών του πίνακα $S_{\uparrow D}$, με αποτέλεσμα $S_{\uparrow D} = U_{\uparrow D} \Sigma_{\uparrow D} V_{\uparrow D}^H$, και περικοπή αυτού σε τάξη p , διατηρώντας μόνο τις p μεγαλύτερες μοναδικές τιμές στον πίνακα $\Sigma_{\uparrow D}$ και μόνο τις πρώτες p στήλες των πινάκων $U_{\uparrow D}$ και $V_{\uparrow D}$. Ο προκύπτων πίνακας δίνεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης

$$S_{\uparrow D}^{trunc} = U_{\uparrow D}^{trunc} \Sigma_{\uparrow D}^{trunc} \left(V_{\uparrow D}^{trunc} \right)^H \quad (4.3)$$

Βήμα 4: Υπολογισμός της «περικομμένης» (μέσω της ανάλυσης

μοναδικών τιμών) λύσης της εξίσωσης $X \cdot S_{\uparrow D} = S_{\downarrow D}$ στο πλαίσιο της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, όπου X είναι ένας πίνακας με τάξη $(L-D)$ που υπολογίζεται ως εξής

$$X = S_{\downarrow D} \cdot (S_{\uparrow D}^{trunc})^\dagger \quad (4.4)$$

όπου με A^\dagger συμβολίζουμε τον ψευδο-αντίστροφο ενός πίνακα A .

Βήμα 5: Εκτίμηση των συχνοτήτων f_i και των παραγόντων απόσβεσης d_i ($i=1, \dots, p$) μέσω των p μεγαλύτερων ιδιοτιμών του πίνακα X , οι οποίες είναι ίσες με τις υποδειγματοληπτημένες εκτιμήσεις των πόλων του μοντέλου σήματος z_i^D [4]. Σημειώνουμε ότι μέσω της εξίσωσης (4.1) οι πόλοι του μοντέλου σήματος δίνονται από τον τύπο $z_i = e^{(-d_i + j2\pi f_i)}$.

Βήμα 6: Εκτίμηση των πλατών a_i και των φάσεων ϕ_i ($i=1, \dots, p$) μέσω της εύρεσης της λύσης ελαχίστων τετραγώνων της εξίσωσης (4.1), αντικαθιστώντας σε αυτήν τις εκτιμήσεις των συχνοτήτων και των παραγόντων απόσβεσης από το προηγούμενο βήμα.

Οι μόνοι περιορισμοί της μεθόδου DESED σχετίζονται με τις διαστάσεις του πίνακα Hankel και των υποδειγματοληπτημένων εκδοχών του. Αυτοί είναι οι ακόλουθοι

$$p \leq L - D \leq M \quad (4.5)$$

$$L + M - 1 \equiv N \quad (4.6)$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι η μέθοδος DESED δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσο πιο τετραγωνικοί είναι οι υποδειγματοληπτημένοι πίνακες Hankel ($L - D \approx M$).

4.3 Καινοτόμος μέθοδος ακριβούς ευθυγράμμισης απόστασης (μέθοδος SRRC-Slant Range Rotational Compensation)

4.3.1 Περίληψη

Προτείνουμε την χρήση μεθόδου φασματικής εκτίμησης με υψηλή ανάλυση (μέθοδος DESED) για να εκτιμήσουμε με μεγάλη ακρίβεια τις θέσεις στην οριζόντια διεύθυνση (slant-range) των κέντρων σκέδασης του στόχου. Βασιζόμενοι πάνω σε αυτές τις εκτιμήσεις, αναπτύσσουμε μια καινοτόμο μέθοδο αντιστάθμισης της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση. Η προτεινόμενη φασματική εκτίμηση με υποδειγματοληψία σήματος που βασίζεται στην τεχνική SRRC πραγματοποιεί ακριβή ευθυγράμμιση απόστασης, σε αντιστοιχία με την κλασματική διόρθωση του κελιού απόστασης, και αποτελεί το πρώτο βήμα προς την σημαντική αποθόλωση της τελικής εικόνας ISAR.

4.3.2 Εισαγωγή

Το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος είναι μια τεχνική ραντάρ για να λάβουμε εικόνα υψηλής ανάλυσης ενός κινούμενου στόχου. Συνήθως, η εκπεμπόμενη κυματομορφή ευρείας ζώνης χρησιμοποιείται για να λάβουμε υψηλή ανάλυση στην οριζόντια διεύθυνση (range), ενώ η ανάλυση στην κάθετη απόσταση (cross-range) εξαρτάται από την μεταβολή της γωνίας θέασης κατά την διάρκεια του συμφασικού χρόνου ολοκλήρωσης (CPI) [1]. Η κλασσική υπόθεση της σχετικά μικρής μεταβολής της γωνίας θέασης κατά την διάρκεια του CPI ακυρώνεται για μικρούς ταχέως κινούμενους στόχους με ελιγμούς (π.χ πολεμικά αεροσκάφη) [2].

Στο τρέχων σενάριο του ραντάρ υψηλής ανάλυσης απόστασης και του μη συνεργατικού στόχου, οι παράμετροι της περιστροφικής κίνησης του στόχου είναι άγνωστες και η μετακίνηση μέσω των κελιών ανάλυσης (MTRC) είναι

εμφανής στις λαμβανόμενες εικόνες ISAR, στην οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση [1-4]. Η κίνηση του στόχου μπορεί να διαιρεθεί σε μια μετατοπιστική συνιστώσα και σε μια περιστροφική συνιστώσα [2]. Η πρώτη επιπλέον αναλύεται σε μια ακτινική και μια εφαπτομενική συνιστώσα, ενώ η δεύτερη έχει τρεις συνιστώσες θέσης: εκτροπής (yaw), κλίσης (pitch) και κύλισης (roll). Αφ' ενός η ακτινική συνιστώσα της μετατοπιστικής κίνησης (δηλαδή, η συνιστώσα κατά μήκος της γραμμής οπτικής επαφής (LOS)) είναι ανεπιθύμητη, επειδή δεν εισάγει την μεταβολή της γωνίας θέασης του στόχου, δηλαδή δεν παράγει την κλίση Doppler μεταξύ των σκεδαστών του στόχου που είναι τοποθετημένοι στο ίδιο κελί απόστασης. Επιπλέον, αυτή η συνιστώσα δημιουργεί σημαντικό θόλωμα στις εικόνες ISAR.

Αφ'ετέρου το υπόλοιπο των συνιστωσών κίνησης μπορεί να παράγει την επιθυμητή κλίση μεταξύ των σκεδαστών, ως εκ τούτου λαμβάνοντας δισδιάστατη πληροφορία. Είναι αληθές ότι η περιστροφική κίνηση (και η εφαπτομενική συνιστώσα της μετατοπιστικής κίνησης), μπορεί επίσης να παράγουν φαινόμενα θόλωσης πάνω στην εικόνα (MTRC), αλλά αυτά είναι μικρότερης σπουδαιότητας συγκρινόμενα με την θόλωση που δημιουργείται από την ακτινική συνιστώσα της μετατοπιστικής κίνησης, η οποία πρέπει πάντοτε να είναι αντισταθμισμένη [3]. Οι Κλασικές μέθοδοι για την αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης [1], [2] κυρίως ακολουθούν δύο βήματα: (1) την ιχνηλασία απόστασης (συνηθισμένη ευθυγράμμιση απόστασης) και την ιχνηλασία Doppler (ακριβής διόρθωση φάσης σε σχέση με τον διακεκριμένο σκεδαστή). Η ιχνηλασία απόστασης μπορεί να κρατήσει τους σκεδαστές στα κελιά τους, ενώ η ιχνηλασία Doppler διατηρεί την ολίσθηση συχνότητας Doppler του κάθε σκεδαστή σταθερή κατά την διάρκεια του CPI.

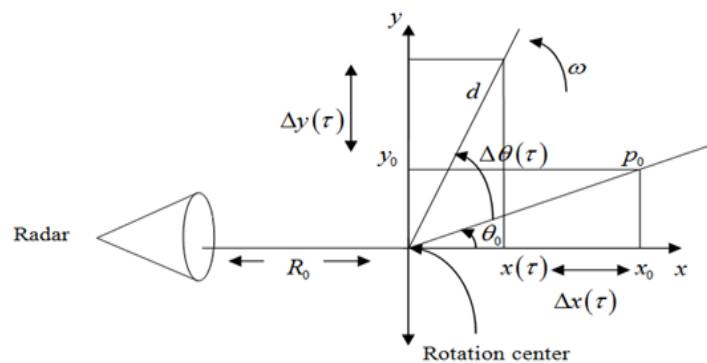
Η ιχνηλασία απόστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης η οποία βρίσκει τα μετατοπισμένα κελιά απόστασης σε σχέση με το προφίλ απόστασης αναφοράς και έπειτα πραγματοποιεί την ευθυγράμμιση απόστασης για όλα τα άλλα προφίλ απόστασης. Η ετεροσυσχέτιση επιτρέπει την ακέραια διόρθωση του κελιού απόστασης, αλλά δεν έχει την δυνατότητα αντιστάθμισης των μετατοπίσεων που είναι μικρότερες από την ανάλυση στη οριζόντια απόσταση. Ακόμη και αν το zero-padding πραγματοποιηθεί πριν ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT)

εφαρμοστεί στα παραγόμενα προφίλ απόστασης, η ετεροσυσχέτιση που βασίζεται στην μέθοδο ευθυγράμμισης της απόστασης μπορεί μόνο να εκτιμήσει με περισσότερη ακρίβεια την μέση μετακίνηση του στόχου στην οριζόντια απόσταση ως σύνολο και όχι την μετακίνηση του κάθε σκεδαστή ξεχωριστά. Αφ' ετέρου, η ιχνηλασία Doppler πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας αντιστάθμισης φάσης, που συνήθως περιλαμβάνει τρία βήματα: (1) το ψάξιμο ενός ή περισσότερων κελιών απόστασης αναφοράς χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο τέτοιο όπως η ελάχιστη διακύμανση, (2) παίρνοντας την συζυγή μιγαδική φάση στα κελιά απόστασης αναφοράς, και (3) κάνοντας διόρθωση της φάσης για όλα τα κελιά απόστασης χρησιμοποιώντας την συζυγή μιγαδική φάση.

Σ' αυτή την έρευνα, αναπτύσσουμε μια καινοτόμο μέθοδο ακριβούς ευθυγράμμισης απόστασης όπου μπορούμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια να αντισταθμίσουμε τις διαφορετικές μετακινήσεις των ξεχωριστών σκεδαστών στην οριζόντια απόσταση ενός κινούμενου στόχου. Στην παράγραφο 4.3.3, αρχίζουμε με την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος ISAR, απλά εξετάζοντας τα φαινόμενα μετακίνησης λόγω της περιστροφικής κίνησης (μετακίνηση στην οριζόντια και κάθετη απόσταση). Η παράγραφος 4.3.4 παρουσιάζει την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης απόστασης που βασίζεται στις εκτιμήσεις θέσης της απόστασης που παράγονται με εφαρμογή της μεθόδου φασματικής εκτίμησης με υπερανάλυση, που ονομάζεται DESED [5], πάνω στα μη επεξεργασμένα δεδομένα ISAR. Αυτές οι εκτιμήσεις απόστασης εφαρμόζονται στα μη επεξεργασμένα δεδομένα ως όροι αντιστάθμισης φάσης, ξεχωριστά για κάθε σκεδαστή, και τα λαμβανόμενα ανά σκεδαστή προφίλ απόστασης συνδυάζονται μαζί για να παραχθούν τα λεπτομερή ευθυγραμμισμένα συνολικά προφίλ απόστασης. Στην παράγραφο 4.3.5, παρουσιάζουμε τα καρποφόρα αποτελέσματα προσομοίωσης από τα συνθετικά δεδομένα ISAR τόσο για ομοιόμορφη όσο και για μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση. Τα συγκριτικά τεστ μεταξύ της μεθόδου DESED και της ετεροσυσχέτισης, για την 1^η περίπτωση (δοκιμή-1, δοκιμή-2), καθώς και για την 2^η περίπτωση (σχόλιο) εξάγονται στην παράγραφο 4.3.6 επισημαίνοντας την καινοτομία και εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου. Στην παράγραφο 4.3.7 εξάγονται τα συμπεράσματα.

4.3.3 Μαθηματική περιγραφή

Το σχήμα 4-1 δείχνει την θέση ενός περιστρεφόμενου σκεδαστή στην αρχική στιγμή (p_0) και στην αργή χρονική στιγμή τ . Η αντιστάθμιση της μετατοπιστικής κίνησης υποτίθεται ότι έχει ολοκληρωθεί και τα είδωλα της εικόνας που εισάγονται από την περιστροφική κίνηση έχουν αντισταθμιστεί. Συνεπώς, το κέντρο περιστροφής δεν μεταβάλλει την θέση του κατά την διάρκεια του CPI. R_0 είναι η απόσταση από το ραντάρ προς το κέντρο περιστροφής. Οι ακόλουθοι υπολογισμοί διαιρούν την μετακίνηση μέσω των κελιών ανάλυσης (MTRC) σε μετακίνηση στην οριζόντια και κάθετη απόσταση [6].



Σχήμα 4-1. Σενάριο με περιστρεφόμενο σκεδαστή

$\Delta x(\tau)$ είναι η μετατόπιση της οριζόντιας απόστασης του σκεδαστή λόγω της προκαλούμενης περιστροφής και έχει την έκφραση $\Delta x(\tau) = x(\tau) - x_0$, όπου $x(\tau) = d \cos(\theta_0 + \Delta\theta(\tau))$ και $x_0 = d \cos(\theta_0)$. Επομένως έχουμε την εξής μαθηματική έκφραση

$$\Delta x(\tau) = d [\cos(\theta_0) \cos(\Delta\theta(\tau)) - \sin(\theta_0) \sin(\Delta\theta(\tau)) - \cos(\theta_0)] \quad (4.7)$$

Υποθέτοντας ότι η γωνία $\Delta\theta(\tau)$ δεν είναι πολύ μεγάλη, οι ακόλουθες προσεγγίσεις της σειράς Taylor είναι εφαρμόσιμες.

$$\begin{aligned}\sin(\Delta\theta(\tau)) &\approx \Delta\theta(\tau) \\ \cos(\Delta\theta(\tau)) &\approx 1 - \frac{(\Delta\theta(\tau))^2}{2!}\end{aligned}\quad (4.8)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον όρο δεύτερης τάξης, η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την μετατόπιση

$$\begin{aligned}\Delta x(\tau) &= -d \cos(\theta_0) \frac{(\Delta\theta(\tau))^2}{2} - d \sin(\theta_0) \Delta\theta(\tau) \\ &= -y_0 \Delta\theta(\tau) - x_0 \frac{(\Delta\theta(\tau))^2}{2}\end{aligned}\quad (4.9)$$

Σε σχέση με την κάθετη απόσταση, η φάση του ληφθέντος σήματος για τον περιστρεφόμενο σκεδαστή στην στιγμή τ είναι

$$\varphi(\tau) = \frac{4\pi}{\lambda} R(\tau) \quad (4.10)$$

όπου, λ είναι το μήκος κύματος και $R(\tau)$ είναι η απόσταση από το ραντάρ προς τον σκεδαστή. Αφού $R_0 \gg d$, η απόσταση $R(\tau)$ μπορεί να προσεγγιστεί ως

$$R(\tau) = R_0 + x(\tau) \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}\text{όπου } x(\tau) &= d \cos(\theta_0 + \Delta\theta(\tau)) \\ &= d [\cos(\theta_0) \cos(\Delta\theta(\tau)) - \sin(\theta_0) \sin(\Delta\theta(\tau))] \\ &= x_0 \cos(\Delta\theta(\tau)) - y_0 \sin(\Delta\theta(\tau))\end{aligned}\quad (4.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις της εξίσωσης (4.8), χωρίς

να αγνοήσουμε τον όρο $x_0 \frac{(\Delta\theta(\tau))^2}{2}$, παράγουμε την έκφραση για την φάση που σχετίζεται με την μετατόπιση στην κάθετη απόσταση

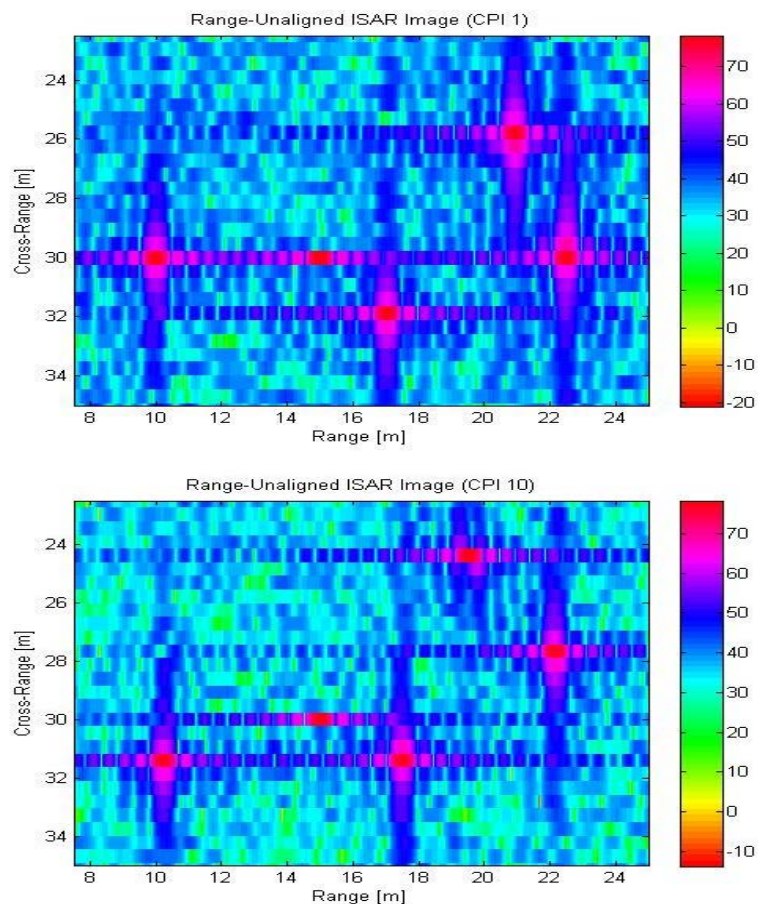
$$\varphi(r) = \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0 + x_0 - y_0 \Delta\theta(\tau) - x_0 \frac{(\Delta\theta(\tau))^2}{2} \right] \quad (4.13)$$

Ο αλγόριθμος SRRC (αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια απόσταση) διορθώνει την μετατόπιση στην οριζόντια απόσταση που επιφέρεται από την περιστροφική κίνηση, όπως εκφράζεται στην εξίσωση (4.9). Η συνεισφορά της οριζόντιας και κάθετης απόστασης στην μετατόπιση της απόστασης των λαμβανόμενων εικόνων ISAR γίνεται εμφανής μέσω του ακόλουθου σχήματος.

Η απλή γεωμετρία του στόχου με πέντε σκεδαστές εξετάζεται σε αυτή την έρευνα ως απόδειξη της έννοιας για την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης της απόστασης. Λαμβάνοντας μια πιο προσεκτική ματιά στις ISAR εικόνες του Σχήματος 4-2, είναι εμφανής η σημαντική μετατόπιση των σκεδαστών στα πτερύγια του στόχου ($|y_0| > 0$), ενώ οι σκεδαστές στην άτρακτο του στόχου εμφανίζουν αρκετά μικρή ολίσθηση απόστασης, χωρίς να γίνει λόγος της μηδενικής ολίσθησης για το κέντρο περιστροφής. Η εξίσωση (4.9) παρέχει πολύτιμη βαθιά γνώση στην αναμενόμενη μετατόπιση απόστασης του κάθε σκεδαστή.

Από την άλλη μεριά, ο αλγόριθμος CRRC (αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης στην κάθετη απόσταση) αντισταθμίζει τον τελευταίο όρο της εξίσωσης (4.13) που συνδέεται με το θόλωμα της εικόνας ISAR. Σε αυτή την έρευνα, προϋποτίθεται ότι οι όροι φάσης της εξίσωσης (4.13) που σχετίζονται με την σταθερή απόσταση αφαιρούνται μέσω της τεχνικής της

αντιστάθμισης της μετατοπιστικής κίνησης [1], [3]. Η μελλοντική έρευνητική προσπάθεια προσανατολίζεται προς μια καινοτόμο μέθοδο ενόψει του συνδυασμού με την προτεινόμενη μέθοδο [7], [8].



Σχήμα 4-2. Μετατόπιση απόστασης στην οριζόντια απόσταση που επιφέρεται από την ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση

4.3.4 Προτεινόμενη μέθοδος ευθυγράμμισης απόστασης

Οι τεχνικές φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης ή συχνότητας έχουν μελετηθεί εκτενώς κατά την διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών από την κοινότητα επεξεργασίας σήματος. Μεταξύ των εφαρμογών τους το ραντάρ απεικόνισης υπήρξε ένα πολύ σημαντικό επίτευγμα [9]-[11]. Οι μέθοδοι φασματικής εκτίμησης με υποδιπλασιασμό σήματος έχουν προσελκύσει το

ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της ίδιας της βελτίωσης της ανάλυσης συχνοτήτων τους, που πραγματοποιείται μέσω του υποδιπλασιασμού σήματος της αλληλουχίας δεδομένων κάτω από την φασματική ανάλυση.

Στο [5], η χρήση της τεχνικής εκτίμησης συχνότητας με υποδιπλασιασμό σήματος, που ονομάζεται DESED, προτείνεται για την εκτίμηση των θέσεων της απόστασης των σκεδαστών του στόχου. Ανήκοντας σε μια ευρεία τάξη μεθόδων παραμετρικής φασματικής εκτίμησης, η DESED εφαρμόζεται για μια συγκεκριμένη τάξη, ίση με τον αριθμό των διακεκριμένων σκεδαστών, και για ένα συγκεκριμένο συντελεστή υποδιπλασιασμού (D), που προσδιορίζεται εμπειρικά σε σχέση με το διαθέσιμο μήκος δεδομένων.

Σε αυτή την έρευνα, εφαρμόζουμε την DESED σε δισδιάστατα μη επεξεργασμένα συνθετικά δεδομένα, τα οποία παράγονται από το πρόγραμμα matlab προσομιώνοντας την κλασσική γεωμετρία ISAR με τον περιστρεφόμενο στόχο αποτελούμενο από συγκεκριμένο αριθμό σημειακών σκεδαστών. Με σκοπό να παράγουμε σταθερές εκτιμήσεις απόστασης από την DESED, χρειαζόμαστε να παρέχουμε την μέθοδο με σωστή τάξη μοντέλου (το μοντέλο σήματος θεωρείται ότι είναι το άθροισμα των αποσβενύμενων εκθετών). Η επιλογή τάξης είναι μη επουσιώδης στόχος στην παραμετρική φασματική ανάλυση [12]. Για εφαρμογή ραντάρ απεικόνισης, μια μέθοδος εξαγωγής των κέντρων σκέδασης [13], [14] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσουμε με ακρίβεια την τάξη του μοντέλου για την εφαρμοζόμενη τεχνική φασματικής εκτίμησης, δίνοντας χρήσιμη πληροφορία για τις αρχικές θέσεις απόστασης των κέντρων σκέδασης. Για σκοπούς προσομοίωσης στην παρούσα μελέτη, ένας συνηθισμένος αλγόριθμος έρευνας κορυφής βρίσκει τις αρχικές θέσεις απόστασης, που βασίζονται στα πρώτα λίγα προφίλ απόστασης. Εναλλακτικά, έχουμε χρησιμοποιήσει τις εκτιμήσεις απόστασης της DESED που υπολογίζονται κατά μέσο όρο μέσω των πρώτων λίγων bursts. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το κέντρο περιστροφής του στόχου θα παρουσιάζεται πάντα στο κέντρο του αναμφίβολου παραθύρου απόστασης, μπορούμε να υπολογίσουμε τις αρχικές θέσεις απόστασης χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις DESED.

Αναλυτική μαθηματική περιγραφή της μεθόδου DESED παρέχεται στο [5]. Οι εκτιμήσεις συχνότητας που βασίζονται στην DESED μεταφράζονται σε

εκτιμήσεις απόστασης συσχετίζοντας το μοντέλο σήματος ISAR με το κλασσικό μοντέλο των αποσβενύμενων εκθετών. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, αξιοποιούμε την ακρίβεια της DESED και την ευρωστία στον θόρυβο και χρησιμοποιούμε τις λαμβανόμενες εκτιμήσεις απόστασης για να υπολογίσουμε την μετατόπιση μεταξύ των προφίλ απόστασης. Κάθε ριπή (burst) με μη επεξεργασμένα δεδομένα αναλύεται μέσω της DESED. Οι εκτιμήσεις απόστασης για τη πρώτη ριπή χρησιμεύουν ως εκτιμήσεις αναφοράς για τον υπολογισμό της μετατόπισης απόστασης του κάθε σκεδαστή από ριπή σε ριπή (αργός χρόνος). Υπολογίζοντας τις εκτιμήσεις απόστασης για τις πρώτες λίγες ριπές (είναι ένας εναλλακτικός αποδοτικός τρόπος να παράγουμε τις εκτιμήσεις αναφοράς στην περίπτωση χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-2 και εξηγείται μέσω της εξίσωσης (4-9), κάθε σκεδαστής συμπεριφέρεται διαφορετικά σε σχέση με την μετατόπιση στην οριζόντια και κάθετη απόσταση κατά την διάρκεια του χρόνου ολοκλήρωσης της απεικόνισης (ένα ή περισσότερα CPIs). Για τον απλό στόχο που εξετάζουμε σε αυτή την έρευνα, παρατηρούμε στο σχήμα 4-2 ότι οι δύο σκεδαστές των πτερυγίων κινούνται έκαστος προς την οριζόντια απόσταση καθώς ο στόχος περιστρέφεται αριστερόστροφα. Αυτή η πολύ σημαντική λεπτομέρεια χάνεται από τις κλασσικές τεχνικές ευθυγράμμισης απόστασης αναφερόμενοι στην μετατόπιση της οριζόντιας απόστασης που επιφέρεται από την μετατοπιστική κίνηση.

Καθ' όλην όλην την διάρκεια αυτής της έρευνας ονομάζουμε το ποσό της μετατόπισης της απόστασης σε σχέση με τις εκτιμήσεις απόστασης αναφοράς ως κανονικοποιημένη μετατόπιση απόστασης. Αυτό το ποσό διαφέρει για κάθε σκεδαστή και εκφράζεται ως ένας ακέραιος αριθμός των κελιών απόστασης με ακρίβεια. Μια μονάδα κελιού απόστασης με ακρίβεια (one fine range bin unit) είναι ένα κλάσμα της ανάλυσης απόστασης ΔR_s (range cell or bin). Η κλασματική διόρθωση του κελιού απόστασης [15] πραγματοποιείται μέσω του zero-padding με τα μη επεξεργασμένα δεδομένα της κάθε ριπής κατά ένα συντελεστή M_{zpd} , πριν πραγματοποιηθεί ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier που βασίζεται στην συμπίεση απόστασης. Έτσι, η μια μονάδα κελιού απόστασης με ακρίβεια ισούται με $\frac{\Delta R_s}{M_{zpd}}$ και το

λαμβανόμενο μήκος δεδομένων του προφίλ απόστασης με ακρίβεια είναι $M \cdot M_{zpd}$, όπου M είναι το μήκος των ανεπεξεργαστων δεδομένων του burst.

Μόλις εφαρμοστεί η DESED στα τρέχοντα δεδομένα και παραχθούν οι εκτιμούμενες μετατοπίσεις τις απόστασης όλων των σκεδαστών, ένα ευθυγραμμισμένο προφίλ απόστασης πρέπει να σχηματισθεί. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος SRRC συνίσταται από τέσσερα βήματα με την εκτίμηση της απόστασης που βασίζεται στην DESED να είναι το θεμελιώδες.

Το σχηματικό διάγραμμα στο σχήμα 4-3 παρουσιάζει τα βασικά βήματα προς την ακριβή ευθυγράμμιση απόστασης. Τα τετράγωνα που περικλείονται από το κόκκινο πλαίσιο με τις διακεκομμένες γραμμές συνδέονται με την ανά σκεδαστή επεξεργασία, σε αντίθεση με την ανά ριπή επεξεργασία.

Το δεύτερο βήμα της προτεινόμενης SRRC μεθοδολογίας είναι η μεμονωμένη εφαρμογή της ολίσθησης απόστασης, που αναφέρεται στην μετακίνηση του κάθε σκεδαστή. Συμβολίζοντας την τάξη της DESED ως p και την εκτίμηση του i -στού σκεδαστή για το k -οστό burst ως $\hat{r}_i(k)$, η αντίστοιχη κανονικοποιημένη μετακίνηση απόστασης υπολογίζεται από την σχέση

$$\Delta\hat{r}_i(k) = \text{round} \left(\frac{\hat{r}_i(k) - \hat{r}_i(o)}{\left[\frac{\Delta r_s}{M \cdot M_{zpd}} \right]} \right), \quad i = \overline{1, p} \quad (4.14)$$

Χρησιμοποιώντας την συμφυή ιδιότητα ολίσθησης συχνότητας του FFT, οι p εκδοχές της ολισθημένης φάσης της k -οστής ριπής παράγονται με

πολλαπλασιασμό με τον όρο $\exp \left[-j \frac{2\pi}{\left[M \cdot M_{zpd} \right]} (m-1) \Delta\hat{r}_i(k) \right]$ όπου $m = \overline{1, M}$.

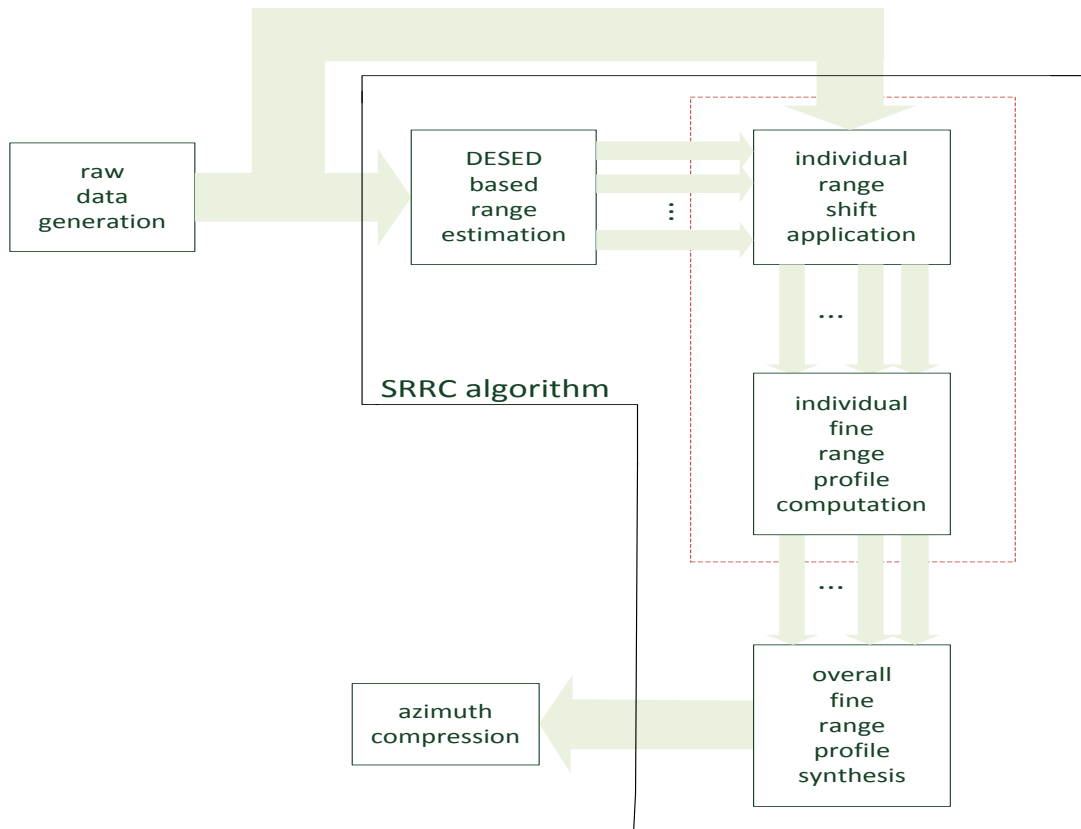
Με αυτό τον τρόπο, αντισταθμίζουμε την μεμονωμένη μετατόπιση απόστασης του κάθε σκεδαστή.

Οι εκδοχές της ολισθημένης φάσης της κάθε ριπής με τα μη επεξεργασμένα δεδομένα μετασχηματίζονται μέσω FFT (με zero-padding) σε κατάλληλες εκδοχές ολίσθησης απόστασης του αντίστοιχου προφίλ απόστασης. Αυτό

είναι το τρίτο βήμα του προτεινόμενου αλγορίθμου SRRC, κατανομαζόμενο ως μεμονωμένος υπολογισμός του ακριβούς προφίλ απόστασης.

Το τελευταίο βήμα είναι η συνολική σύνθεση του ακριβούς προφίλ απόστασης, όπου τα μεμονωμένα ακριβή προφίλ απόστασης συνδυάζονται σε ένα σύνολο του ενός. Πρώτα, κατασκευάζουμε μια μάσκα γύρω από την εκτιμώμενη αρχική θέση απόστασης του i -οστού σκεδαστή και διατηρούμε τα αντίστοιχα δείγματα από το i -οστό εξαιρετικό προφίλ απόστασης. Το μήκος της μάσκας είναι ανάλογο προς τον συντελεστή μηδενικού παραγεμίσματος (zero-padding) και, από την προοπτική του σήματος επεξεργασίας, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιήσουμε μια παραθυρική λειτουργία με μεταβλητό συντελεστή roll-off , ιδιαίτερα για τους από κοντά απέχοντες σκεδαστές. Δεύτερο, ανιχνεύουμε τις “σκιασμένες περιοχές” μεταξύ των σκεδαστών, ξανά βασιζόμενοι στις αρχικές θέσεις των. Τα αντίστοιχα δείγματα από τα p μεμονωμένα προφίλ απόστασης είναι ο μέσος όρος με σκοπό να υπολογίσουμε την συνεισφορά των “σκιασμένων περιοχών” στο συνολικό εξαιρετικό προφίλ απόστασης.

Η συμπίεση του αζιμουθίου μέσω FFT πραγματοποιείται μετά την διαδικασία της ακριβούς ευθυγράμμισης απόστασης για να λάβουμε την εικόνα ISAR με ευθυγραμμισμένη απόσταση.



Σχήμα 4-3. Διάγραμμα αλγορίθμου SRRC

4.3.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα μη επεξεργασμένα δεδομένα ISAR για τον στόχο του σχήματος 4-4 παράγονται μέσω προσομοίωσης στο matlab, που βασίζονται στο μοντέλο σήματος που παρουσιάζεται στο [7]. Οι μαθηματικοί τύποι για τα μη επεξεργασμένα δεδομένα και την προσομοίωση της περιστροφικής κίνησης είναι οι ακόλουθοι

$$x(m, n) = \sum_{k=1}^d s_k \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_m (x_k \cos(\theta_n) - y_k \sin(\theta_n)) \right] + u(m, n) \quad (4.15)$$

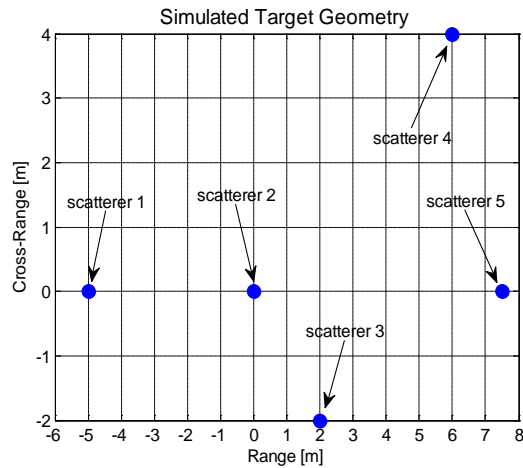
$$\theta_n = \theta_0 + \omega t_n + \frac{1}{2} \gamma (t_n - t_{start})^2$$

όπου d ο αριθμός των σκεδαστών; s_k η ένταση σκέδασης του κ-οστού σημειακού σκεδαστή; (x_k, y_k) οι καρτεσιανές συντεταγμένες του κ-οστού σημειακού σκεδαστή, σε σχέση με την θέση του ραντάρ; m ο δείκτης βηματικής συχνότητας ($m = \overline{1, M}$) και n ο δείκτης των ριπών ($n = \overline{1, N \cdot N_{CPI}}$) για ένα αριθμό προσομειωμένων CPI's (N_{CPI}); N ο αριθμός των ριπών κατά την διάρκεια του ενός CPI; $u(m, n)$ δισδιάστατη επιπρόσθετη λευκή γκαουσιανή συνιστώσα θορύβου, με προσομειωμένο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) ίσο με 10db; θ_0 η αρχική γωνία θέασης του στόχου, που υποτίθεται ότι είναι σε απόσταση 10 Km; ω η σταθερή γωνιακή ταχύτητα; γ η γωνιακή επιτάχυνση, η οποία είναι μηδέν για ομοιόμορφη περιστροφή; t_{start} η χρονική στιγμή (ως ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της διάρκειας της ριπής) στην αρχίζει μια περίοδος γωνιακής επιτάχυνσης.

Ο πίνακας 4-1 περιλαμβάνει τις προαναφερθείσες παραμέτρους προσομοίωσης.

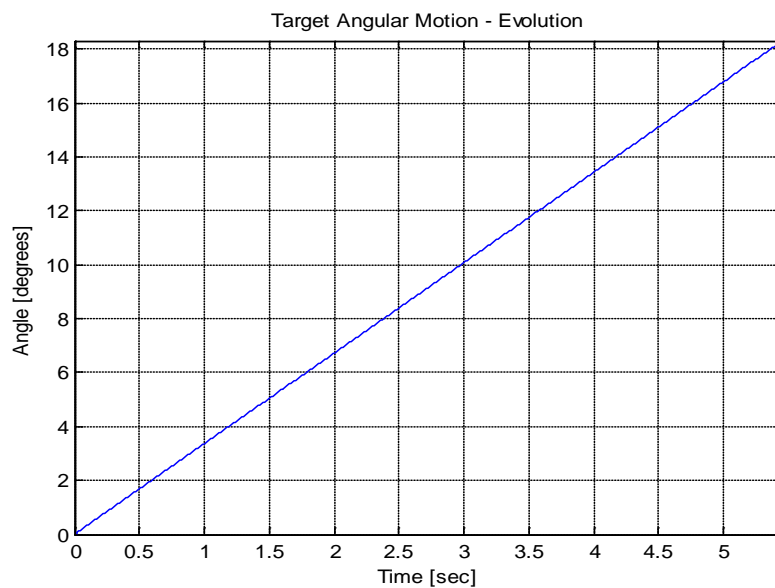
Πίνακας 4-1. Παράμετροι προσομοίωσης ISAR

Παράμετροι	Μονάδες
αρχική φέρουσα συχνότητα, f_0	10 [GHz]
ανάλυση οριζόντιας απόστασης, Δr_s	0.46875 [m]
ανάλυση κάθετης απόστασης, Δr_c	0.47244 [m]
εύρος ζώνης ραντάρ, B	320 [MHz]
number of frequencies, M	64
βήμα συχνότητας, Δf	5 [MHz]
συχνότητα επανάληψης παλμού, PRF	15 [kHz]
διάρκεια ριπής, T_b	4.266 [msec]
συμφασικό διάστημα επεξεργασίας, CPI	0.546 [sec]
αριθμός ριπών, N	128
αριθμός CPIs, N_{CPI}	10
γωνιακή ταχύτητα, ω	0.0586 [rad / sec]
γωνιακή επιτάχυνση, γ	0.64 [rad / sec ²]
Τάξη μοντέλου, p	5
συντελεστής υποδιπλασιασμού, D	2
Συντελεστής zero-padding, M_{zpd}	32

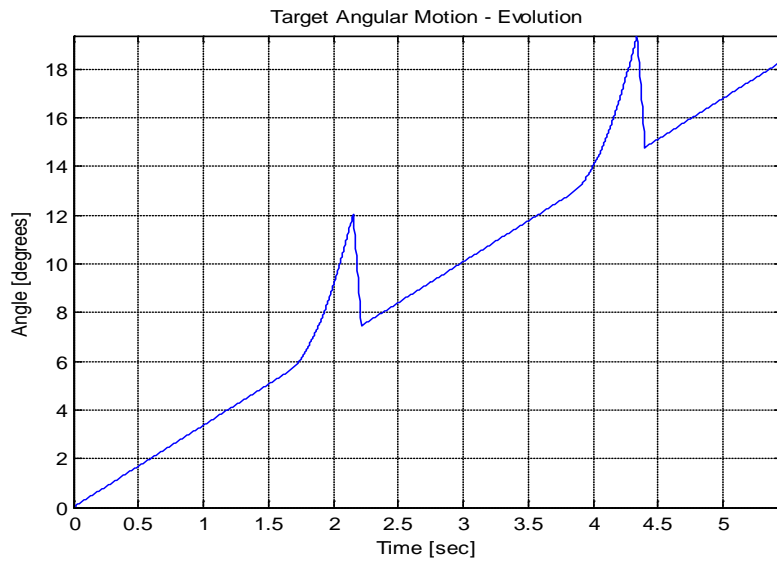


Σχήμα 4-4. Απλή γεωμετρία στόχου με πέντε σκεδαστές

Η εξέλιξη της περιστροφικής κίνησης μέσω των 10 CPI's που προσομοιώνεται στην περίπτωση της ομοιόμορφης και μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης απεικονίζεται στα αντίστοιχα δύο επόμενα σχήματα. Το τελευταίο προφίλ περιλαμβάνει την γωνιακή επιτάχυνση εντός του 4^{ou} και 8^{ou} CPI, με ομαλή μετάβαση από τις ομοιόμορφες στις μη ομοιόμορφες περιόδους περιστροφής.

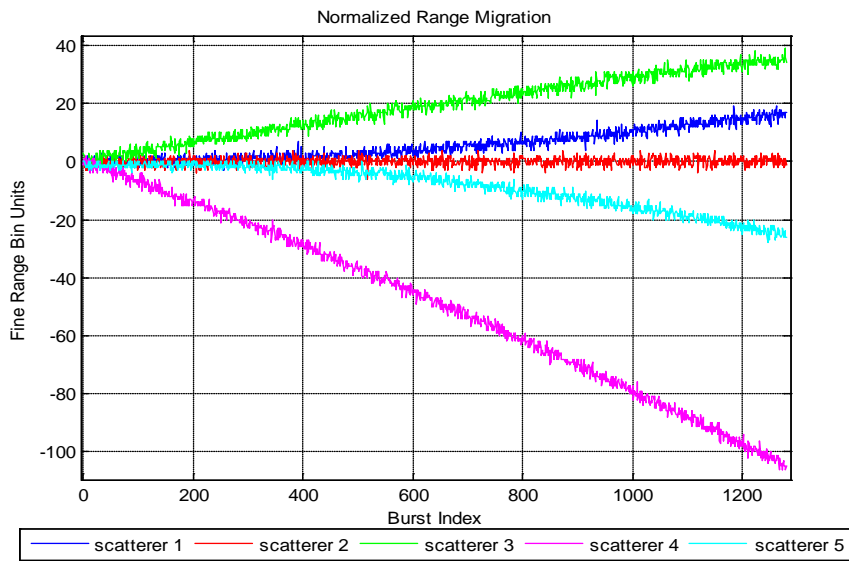


Σχήμα 4-5. Προφίλ ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης

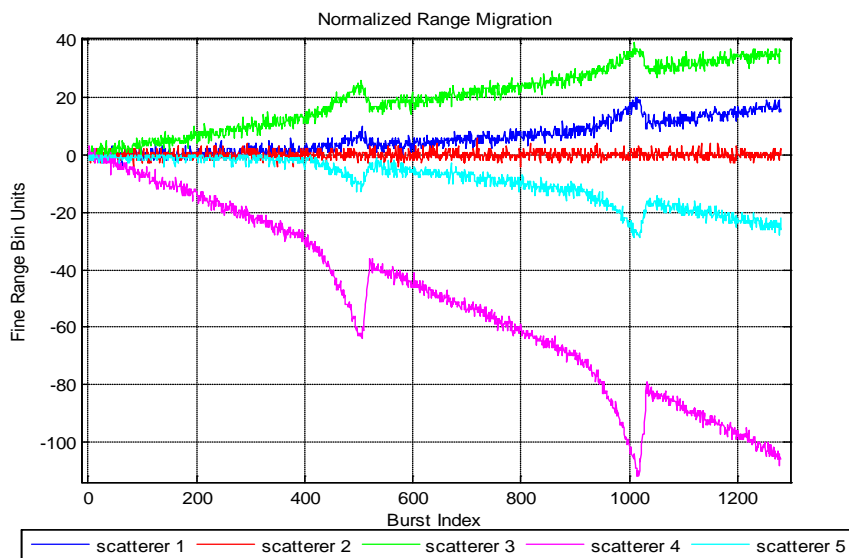


Σχήμα 4-6. Προφίλ μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης

Οι εκτιμήσεις απόστασης για κάθε σκεδαστή που βασίζονται στην DESED (όπως σημειώνεται στο σχήμα 4-4) παρουσιάζονται στα σχήματα 4-7 και 4-8 και για τα δύο σενάρια προσομοίωσης. Η μεταβολή όσο αφορά τις μονάδες των κελιών απόστασης με ακρίβεια αποδίδεται στο θόρυβο και μπορεί να εξομαλυνθεί από ένα φίλτρο κινητού μέσου όρου μικρού μήκους (π.χ 10-20 ριπές). Όπως αναμένεται οι σκεδαστές των πτερύγων (σκεδαστές 3 και 4) παρουσιάζουν σημαντική μετακίνηση στην οριζόντια απόσταση σε σύγκριση με τους άλλους σκεδαστές, με τον σκεδαστή 4 να μετακινείται από περισσότερο από τρία κελιά απόστασης κατά την διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης. Στο σχήμα 4-8, η επίδραση της μη ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης είναι εμφανής στην εκτίμηση της απόστασης του κάθε σκεδαστή. Η ομοιότητα του προφίλ του σχήματος 4-6 με την εκτίμηση απόστασης του σκεδαστή 4 (στο άκρο της πτέρυγας) είναι εμφανής και μπορεί εύκολα να εξηγηθεί μέσω της εξίσωσης (4-9).

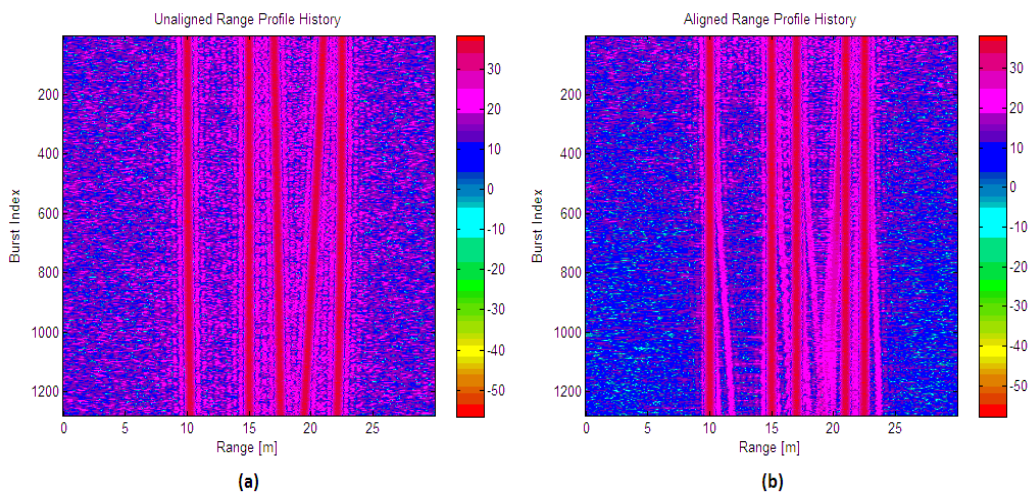


Σχήμα 4-7. Κανονικοποιημένη μετακίνηση απόστασης του κάθε σκεδαστή για ομοιόμορφη περιστροφή

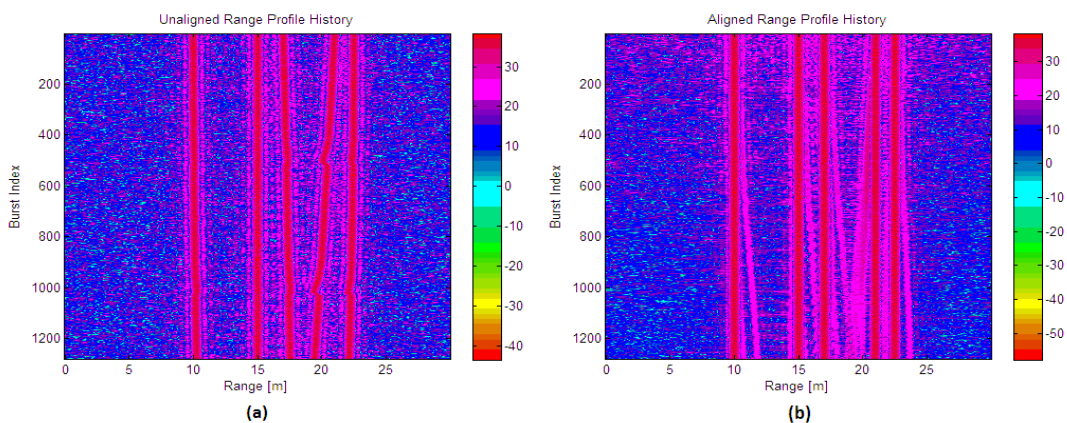


Σχήμα 4-8. Κανονικοποιημένη μετακίνηση απόστασης του κάθε σκεδαστή για μη ομοιόμορφη περιστροφή

Αφού η DESED παρέχει πολύ ακρίβεια και ευρωστία στις εκτιμήσεις απόστασης με θόρυβο, η προτεινόμενη μέθοδος ευθυγράμμισης απόστασης αναμένεται να παράγει πολύ καλά ευθυγραμμισμένα προφίλ απόστασης. Στα σχήματα 4-9(b) και 4-10(b), η ευθυγράμμιση απόστασης είναι αξιοσημείωτη, καθώς και η αξιοσημείωτη μείωση του πλευρικού λοβού εντός των “σκιασμένων περιοχών” μεταξύ των σκεδαστών.

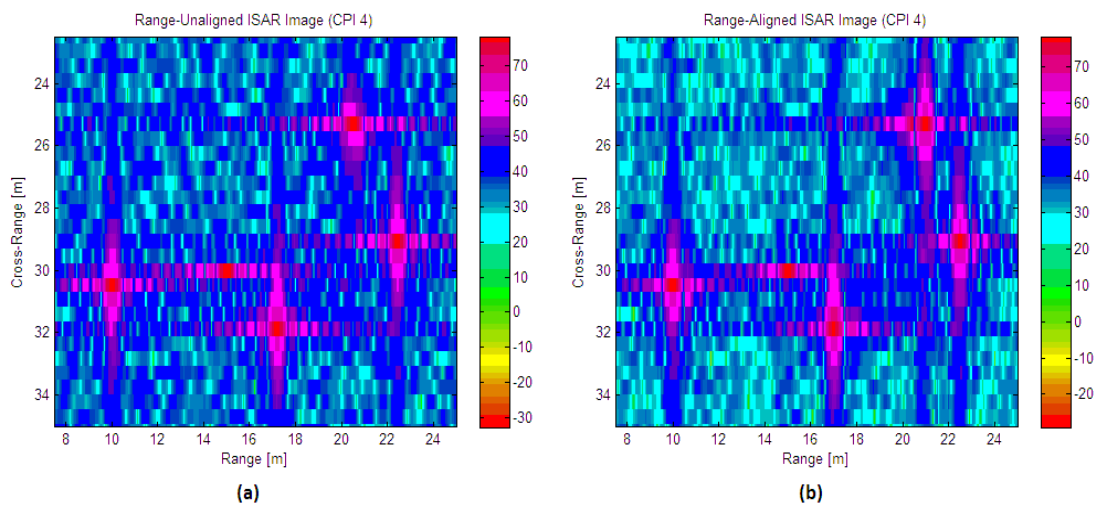


Σχήμα 4-9. Ιστορία του προφίλ απόστασης πριν (α) και μετά (β) την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης για την ομοιόμορφη περιστροφή

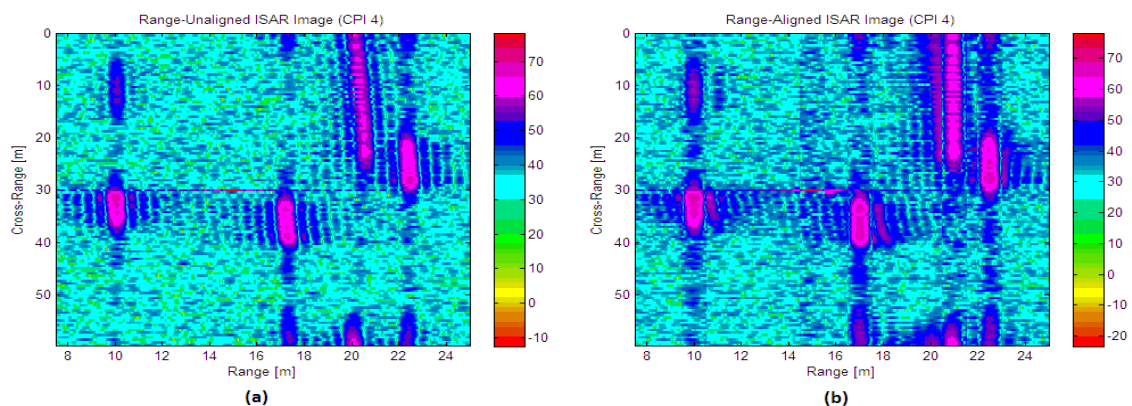


Σχήμα 4-10. Ιστορία του προφίλ απόστασης πριν (α) και μετά (β) την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης για την μη ομοιόμορφη περιστροφή

Η εστίαση, αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθόδου ευθυγράμμισης της απόστασης μπορεί επίσης να επαληθευτεί εξετάζοντας προσεκτικά τις λαμβανόμενες εικόνες ISAR πριν και μετά την εφαρμογή της. Τα σχήματα 4-11 και 4-12 δείχνουν αυτό το αποτέλεσμα καθαρά στην κατεύθυνση της απόστασης για ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφή αντίστοιχα. Επιπλέον, οι τιμές της εντροπίας της κανονικοποιημένης ισχύος των εικόνων ISAR [16], που φαίνονται στα σχήματα 4-13 και 4-14, δυνατά δείχνουν την βελτίωση της εστίασης μετά την ακριβή ευθυγράμμιση απόστασης.



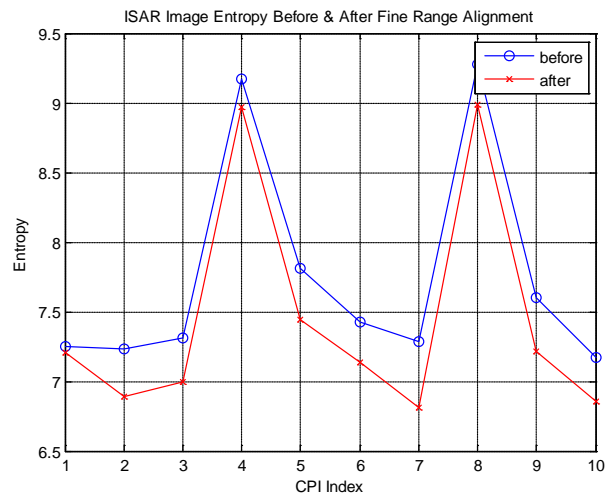
Σχήμα 4-11. Εικόνες ISAR πριν (α) και μετά (β) την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης της απόστασης για ομοιόμορφη περιστροφή



Σχήμα 4-12 . Εικόνες ISAR πριν (α) και μετά (β) την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης της απόστασης για μη ομοιόμορφη περιστροφή



Σχήμα 4-13. Εντροπία εικόνας ISAR πριν και μετά την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης της απόστασης για την ομοιόμορφη περιστροφή

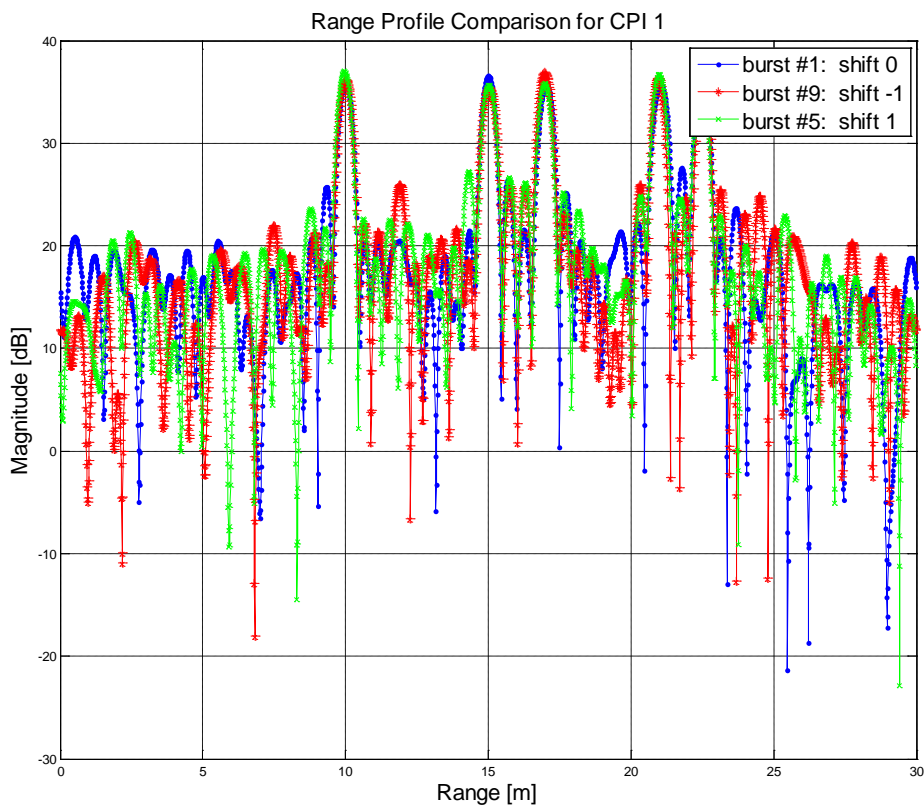


Σχήμα 4-14. Εντροπία εικόνας ISAR πριν και μετά την προτεινόμενη μέθοδο ευθυγράμμισης της απόστασης για την μη ομοιόμορφη περιστροφή

4.3.6 Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου (DESED) με άλλες μεθόδους

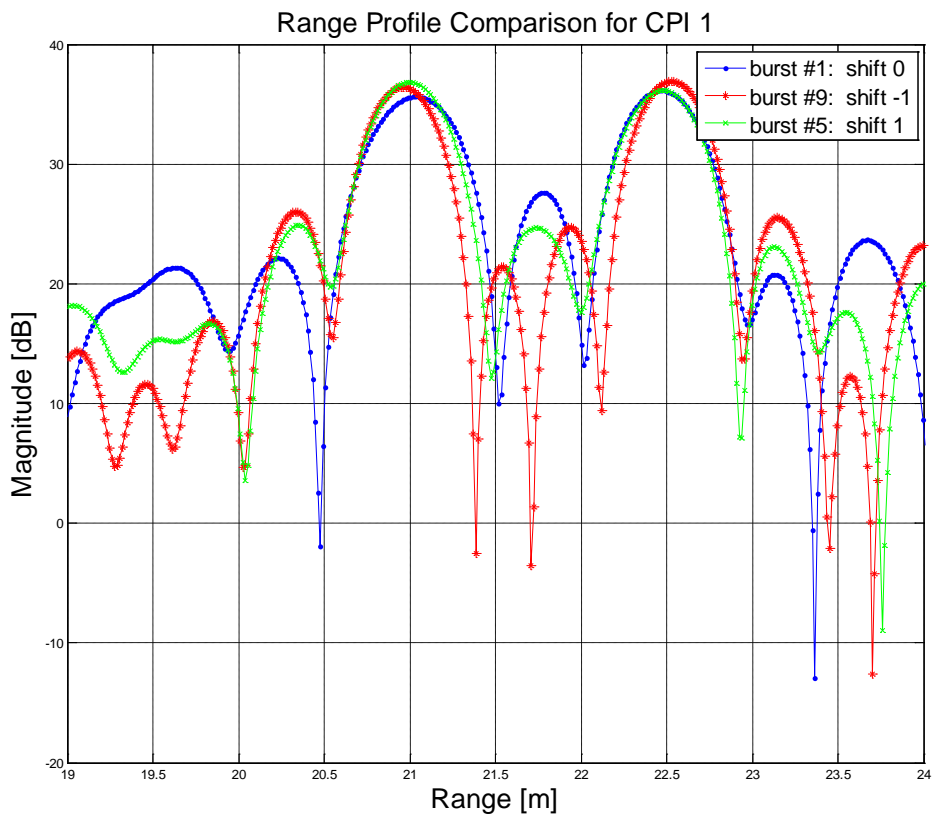
4.3.6.1 1^η Περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή -1)

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζουμε τα συγκριτικά τεστ προσομοίωσης μεταξύ της μεθόδου ετεροσυσχέτισης και της μεθόδου DESED που βασίζονται στην ευθυγράμμιση απόστασης για την περιστροφική κίνηση του στόχου. Στην 1^η περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή-1) για την ετεροσυσχέτιση παίρνουμε ως προφίλ απόστασης αναφοράς το πρώτο προφίλ απόστασης από κάθε CPI. Τα παρακάτω σχήματα 4.15 4.16 και 4.17 είναι ενδεικτικά και δείχνεται ότι με περιστροφή ο κάθε σκεδαστής μετατοπίζεται σε απόσταση ανεξάρτητα από τους άλλους και έτσι η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης που βασίζεται στην ευθυγράμμιση απόστασης αποτυγχάνει. Συγκεκριμένα το σχήμα 4-15 δείχνει μια ενδεικτική σύγκριση 3 προφίλ απόστασης για 3 ενδεικτικές τιμές ολίσθησης (+1, -1, +2) ανάλογα κάθε φορά από την περίπτωση που υπολογίζει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης. Έτσι όταν το 1^ο προφίλ απόστασης για κάθε CPI είναι το προφίλ αναφοράς (μπλέ γραφική παράσταση) θα έχει ολίσθηση 0 (ριπή No 1: ολίσθηση 0). Άρα βλέπουμε στο σχήμα 4-15 ότι για την ριπή No 9 έχουμε ολίσθηση -1 ενώ για την ριπή No 5 έχουμε ολίσθηση +1. Επίσης το μεγάλο λάθος το οποίο κάνει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης είναι ότι ενώ οι σκεδαστές μετακινούνται ανεξάρτητα λόγω της περιστροφικής κίνησης, η ετεροσυσχέτιση υπολογίζει μια κοινή τιμή ολίσθησης και αυτή πολλές φορές είναι αντίθετη στην κατεύθυνση στην οποία κινείται ο κάθε σκεδαστής. Επομένως θα πρέπει να βρούμε έναν ή δύο κοντινούς σκεδαστές από τους πέντε σκεδαστές που κινείται αντίθετα στην εκτιμώμενη ολίσθηση που υπολογίζει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης. Έτσι παρατηρούμε ότι έχω ολίσθηση -1 για την ριπή No 9, δηλαδή η κόκκινη γραφική σε σχέση με την μπλέ (γραφική για το προφίλ αναφοράς) αντί για ολίσθηση -1 προς τα αριστερά, μετακινείται προς τα δεξιά ίσως παραπάνω από ένα ακριβές κελί απόστασης (1 fine range cell).



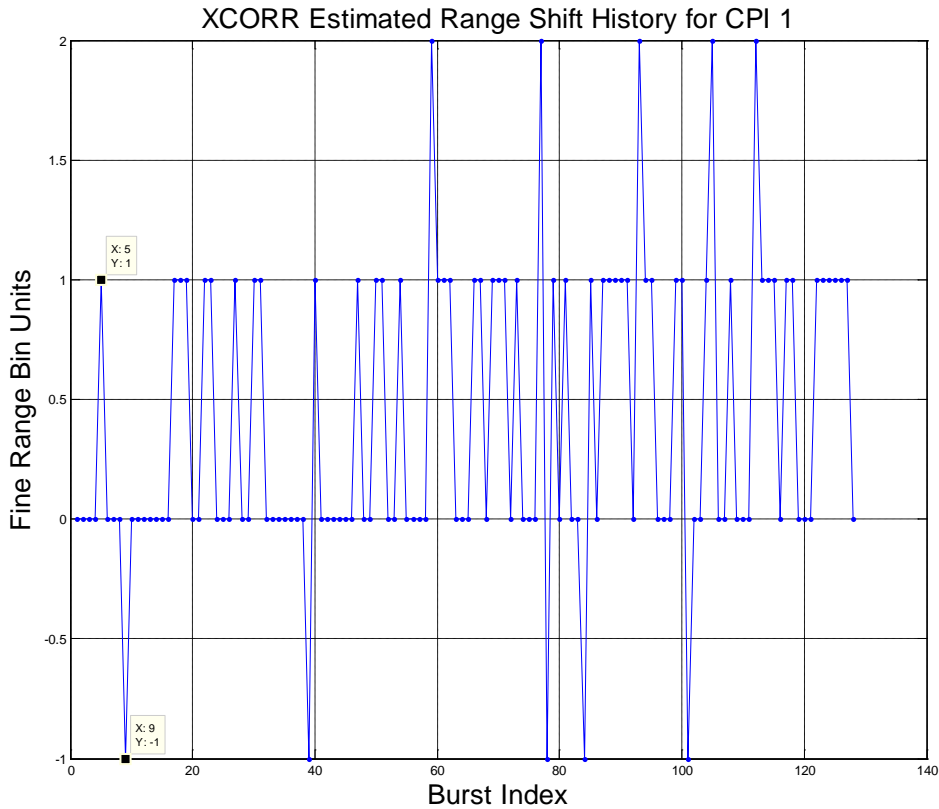
Σχήμα 4-15. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1

Στο επόμενο Σχήμα 4-16 που είναι η μεγένθυση του προηγούμενου σχήματος 4-15 διαπιστώνουμε το λάθος της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης. Συγκεκριμένα φαίνεται καθαρά ότι ο σκεδαστής στα 22.5 m για το κόκκινο χρώμα – ριπή No 9 αντί για ολίσθηση -1 αριστερά, μετακινείται προς τα δεξιά με $\frac{DR_s}{RA_{ovs}}$ να είναι κάτι παραπάνω από ένα ακριβές κελί απόστασης. Το DR_s είναι η οριζόντια απόσταση (range resolution) ενώ το RA_{ovs} είναι τα 32 υπερδειγματοληπτούμενα δεδομένα. Επομένως αυτή η δοκιμή-1 οδηγεί σε ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση. Αυτή την μετακίνηση κατά ένα κελί απόστασης θα το βλέπαμε από την αντίστοιχη εκτίμηση με την μέθοδο DESED για το ίδιο ακριβώς τρέξιμο από τα δεδομένα μας. Αυτή η μετατόπιση είναι μη ακριβής λόγω θορύβου, FFT κατά την εκτίμηση μου, αφού ο 5^{ος} σκεδαστής γνωρίζουμε ότι μετά από αρκετές ριπές θα πάει προς μικρότερες τιμές απόστασης για την κατεύθυνση περιστροφής που έχουμε ορίσει.



Σχήμα 4-16. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1 (μεγέθυνση στο Σχήμα 4-15)

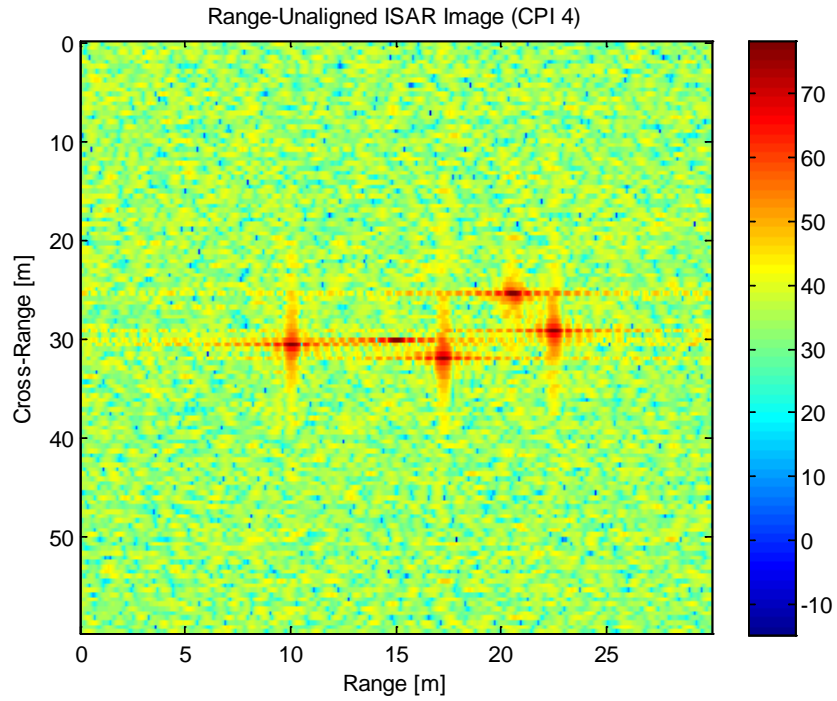
Στο παρακάτω Σχήμα 4-17 φαίνεται η ιστορία της εκτιμώμενης ολίσθησης απόστασης με την ετεροσυσχέτιση για το CPI 1. Παρατηρούμε εύκολα ότι για την ριπή No 9 η ολίσθηση είναι -1, ενώ για την ριπή No 5 η ολίσθηση είναι +1 που έχει ως αποτέλεσμα να αποτυγχάνει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης.



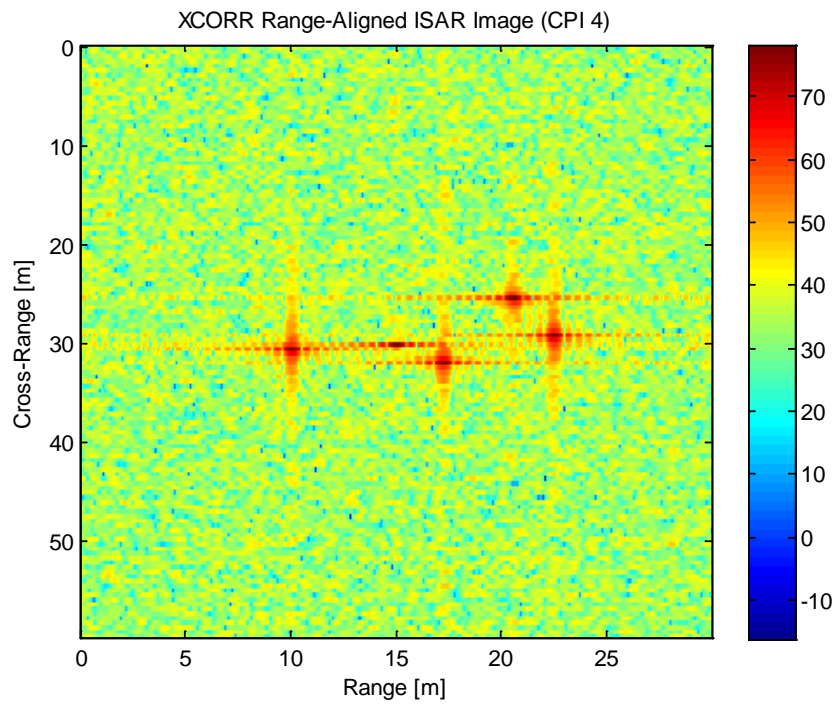
Σχήμα 4-17. Ιστορία της εκτιμούμενης ολίσθησης απόστασης με ετεροσυσχέτιση για το CPI-1

Στα παρακάτω σχήματα δείχνουμε την υπεροχή της μεθόδου DESED που βασίζεται στην ευθυγράμμιση απόστασης έναντι της μεθόδου ετεροσυσχέτισης που βασίζεται και αυτή στην ευθυγράμμιση της απόστασης.

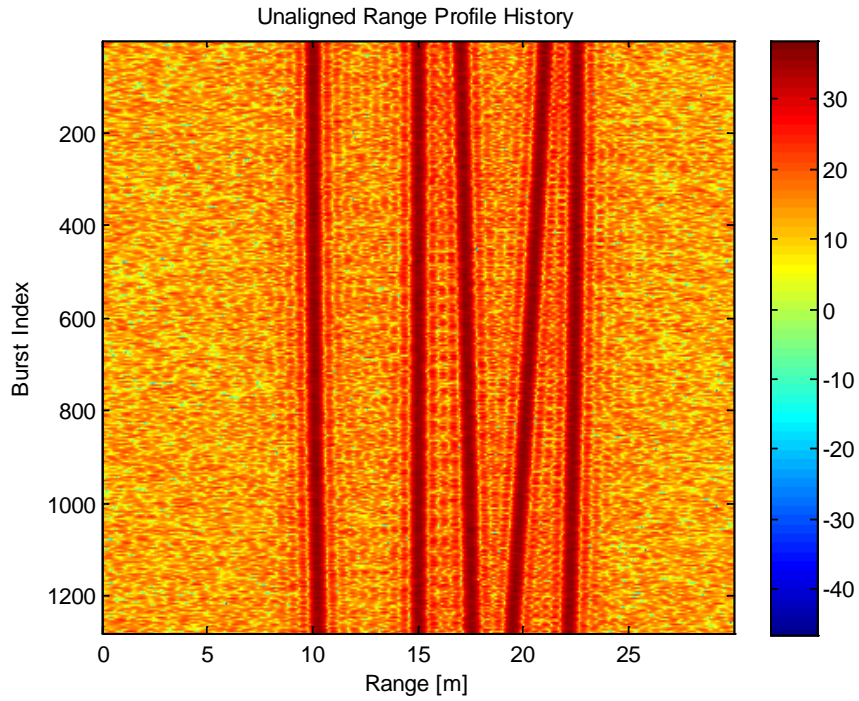
Συγκεκριμένα τα σχήματα 4.18, 4.20 και 4.22 τα οποία προέκυψαν από το τρέξιμο του αλγορίθμου μέσω του matlab, αφορούν αντίστοιχα την μη ευθυγραμμισμένη απόσταση για το CPI-4, την ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης καθώς και την ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI-4), ενώ τα σχήματα 4.19, 4.21 και 4.23 αφορούν αντίστοιχα την ευθυγράμμιση της απόστασης για το CPI-4, την ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης καθώς και την ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI-4) με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης η οποία αποτυγχάνει και έτσι τα αποτελέσματα είναι αμετάβλητα δηλ. δεν έχουμε ευθυγράμμιση απόστασης. Επομένως αποδεικνύουμε την ευρωστία της μεθόδου DESED στον προτεινόμενο καινοτόμο αλγόριθμο έναντι της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης.



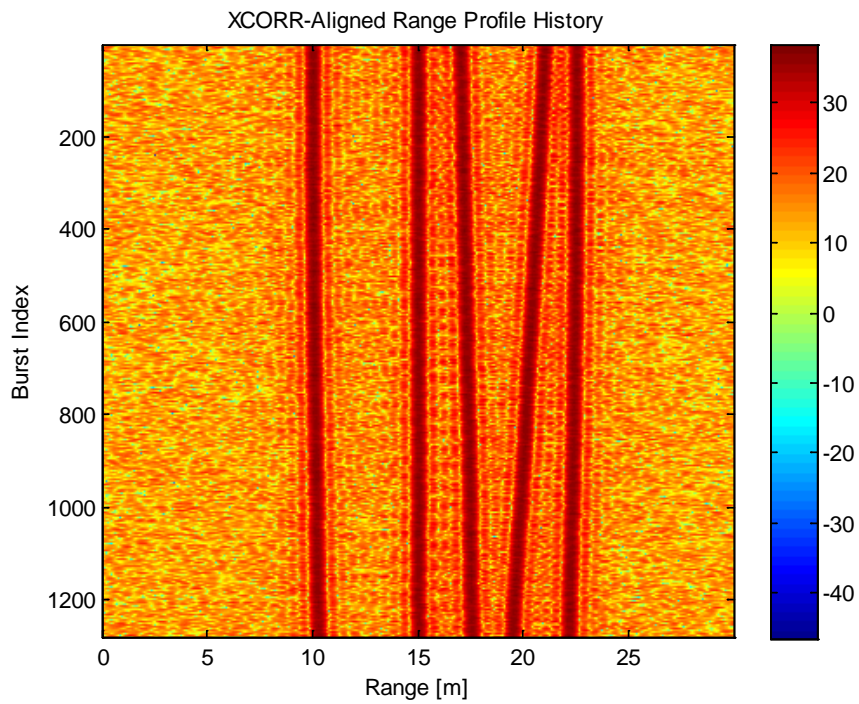
Σχήμα 4-18. Εικόνα ISAR (CPI – 4) μη ευθυγραμμισμένης απόστασης



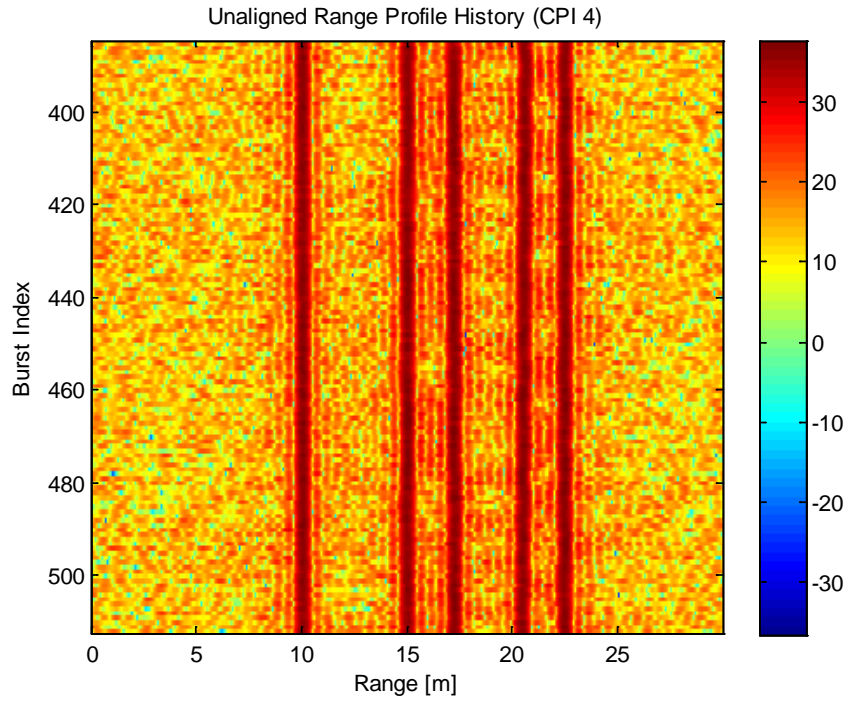
Σχήμα 4-19. Εικόνα ISAR (CPI – 4) ευθυγραμμισμένης απόστασης με ετεροσυσχέτιση



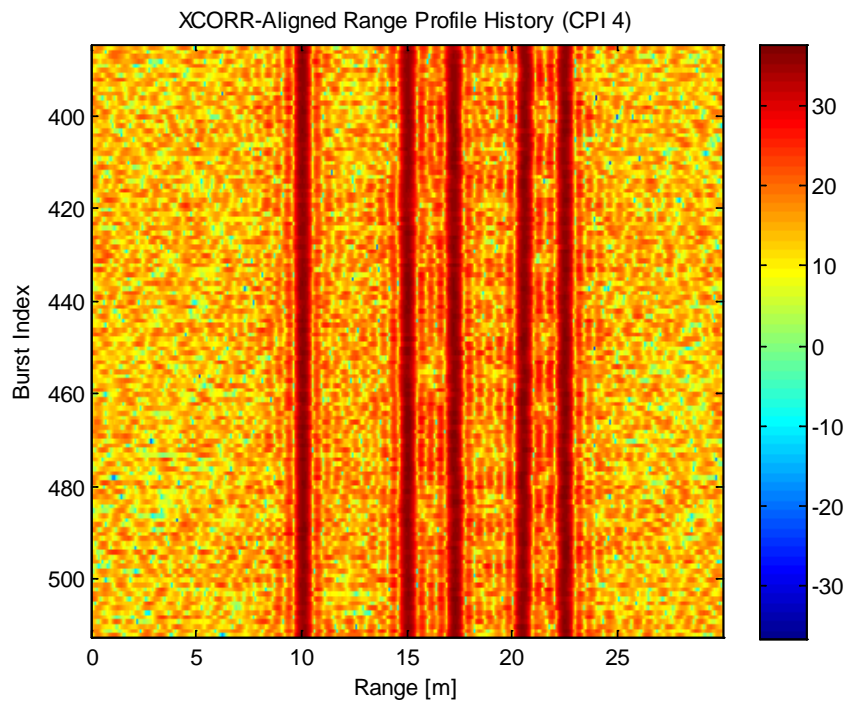
Σχήμα 4-20. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης



Σχήμα 4-21. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης με ετεροσυσχέτιση



Σχήμα 4-22. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4)



Σχήμα 4-23. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4) με ετεροσυσχέτιση

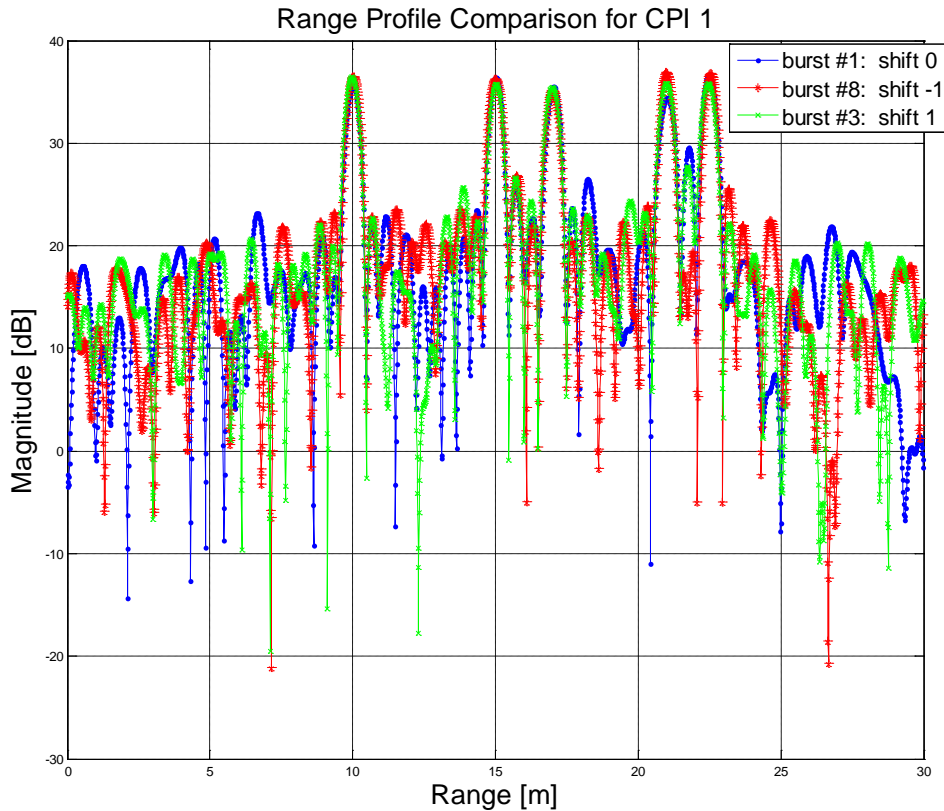
Στον παρακάτω Πίνακα 4-2 φαίνονται οι τιμές της εντροπίας για το CPI-1 και το CPI-4 που αφορούν τα μη επεξεργασμένα δεδομένα τα υπερδειγματοληπτούμενα καθώς και την ετεροσυσχέτιση.

Πίνακας 4-2. Κατώφλι εντροπίας για Raw Ovs και Xcorr

CPI's	Raw	Oversampling	Cross-correlation
CPI-1	3.7303	7.2607	7.2958
CPI-4	5.5606	9.1692	9.1963

4.3.6.2 1^η Περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή - 2)

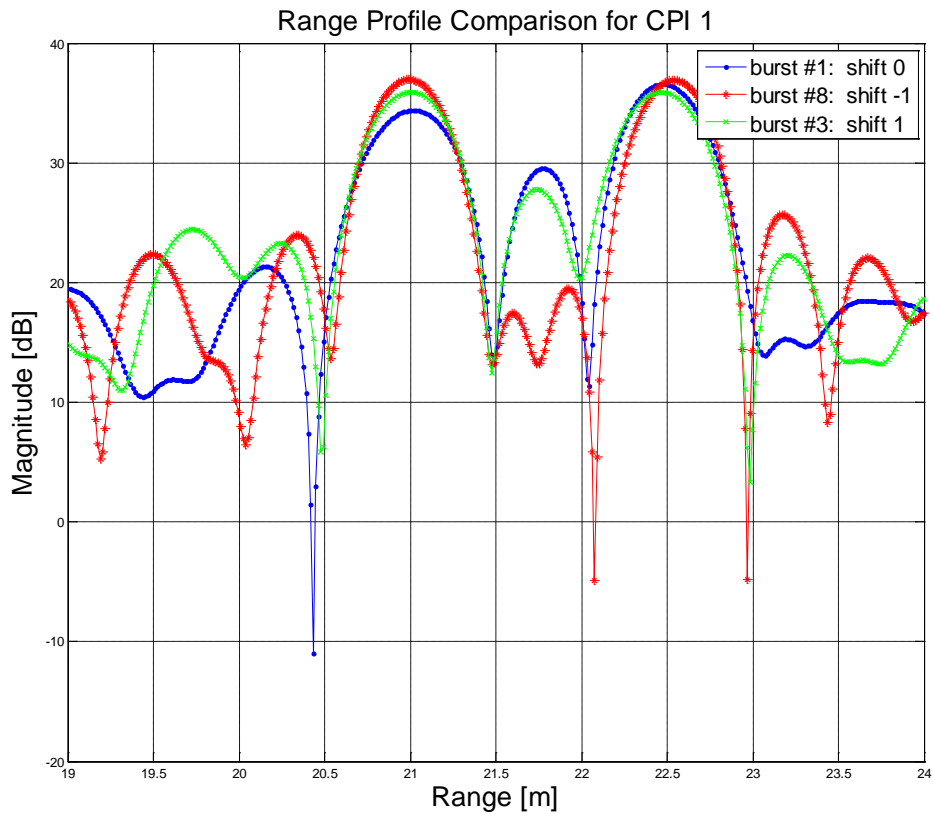
Η 1^η περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή-2) αναφέρεται σε σύστημα πραγματικού χρόνου, όπου σε κάθε CPI θέλουμε να παραχθεί εστιασμένη εικόνα. Ομοίως όπως και στην 1^η περίπτωση (δοκιμή-1) προσομοίωσης έτσι και εδώ από το σχήμα 4-24 βλέπουμε ότι για την περιστροφική κίνηση, παίρνοντας για την ετεροσυσχέτιση το 1^ο προφίλ απόστασης αναφοράς για κάθε CPI, να μετατοπίζεται πάλι ο κάθε σκεδαστής σε απόσταση ανεξάρτητα από τους άλλους και έτσι η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης που βασίζεται στην ευθυγράμμιση απόστασης αποτυγχάνει. Συγκεκριμένα το σχήμα 4-24 δείχνει μια ενδεικτική σύγκριση 3 προφίλ απόστασης για 3 ενδεικτικές τιμές ολισθησης (+1, -1, +2) ανάλογα κάθε φορά με την περίπτωση που υπολογίζει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης. Έτσι όταν το 1^ο προφίλ απόστασης για κάθε CPI είναι το προφίλ αναφοράς (μπλέ γραφική παράσταση) θα έχει ολίσθηση 0 (ριπή No 1: ολίσθηση 0). Άρα βλέπουμε στο σχήμα 4-24 ότι για την ριπή No 8 έχουμε ολίσθηση -1 ενώ για την ριπή No 3 έχουμε ολίσθηση +1. Και εδώ παρατηρούμε όπως και στην 1^η περίπτωση προσομοίωσης (δοκιμή - 1), ότι έχω ολίσθηση -1 για την ριπή No 8, δηλαδή η κόκκινη γραφική σε σχέση με την μπλέ (γραφική για το προφίλ αναφοράς) αντί για ολίσθηση -1 προς τα αριστερά, μετακινείται προς τα δεξιά ίσως παραπάνω από ένα ακριβές κελί απόστασης (1 fine range cell).



Σχήμα 4-24. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1

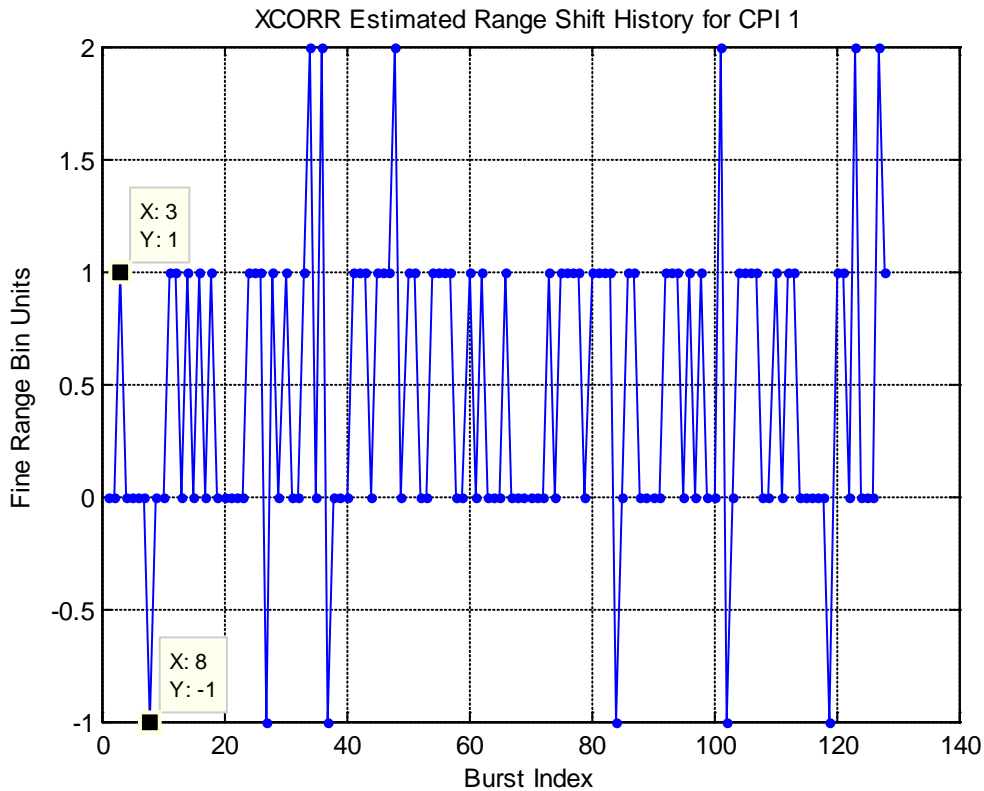
Στο επόμενο Σχήμα 4-25 που είναι η μεγένθυση του προηγούμενου σχήματος 4-24 διαπιστώνουμε το λάθος της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης. Συγκεκριμένα φαίνεται καθαρά ότι ο σκεδαστής στα 22.5 m για το κόκκινο χρώμα – ριπή No 8 αντί για ολίσθηση -1 αριστερά, μετακινείται προς τα δεξιά με $\frac{DR_s}{RA_{ovs}}$ να είναι κάτι παραπάνω από ένα ακριβές κελί απόστασης. Το DR_s είναι η οριζόντια απόσταση (range resolution) ενώ το RA_{ovs} είναι τα 32 υπερδειγματοληπτούμενα δεδομένα. Επομένως αυτή η δοκιμή-2 οδηγεί σε μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση. Αυτή την μετακίνηση κατά ένα κελί απόστασης θα το βλέπαμε από την αντίστοιχη εκτίμηση με την μέθοδο DESED για το ίδιο ακριβώς τρέξιμο από τα δεδομένα μας. Αυτή η μετατόπιση είναι μη ακριβής (λόγω θορύβου, FFT) κατά την εκτίμηση μου, αφού ο 5^{05} σκεδαστής γνωρίζουμε ότι μετά από αρκετές ριπές θα πάει προς μικρότερες τιμές απόστασης για την κατεύθυνση περιστροφής που έχουμε ορίσει. Οι

παλιές μέθοδοι αυτό ακριβώς εκμεταλλεύονταν και διόρθωναν κατά μέσο όρο την ολίσθηση απόστασης πλέον με τους στόχους να εκτελούν γρήγορες μανούβρες. Επομένως το ζητούμενο είναι μια μέθοδος ιχνηλασίας σε πραγματικό χρόνο της ολίσθησης.



Σχήμα 4-25. Σύγκριση του προφίλ απόστασης για το CPI - 1 (μεγέθυνση στο Σχήμα 4-24)

Στο παρακάτω Σχήμα 4-26 φαίνεται η ιστορία της εκτιμώμενης ολίσθησης απόστασης με την ετεροσυσχέτιση για το CPI 1. Παρατηρούμε εύκολα ότι για την ριπή No 8 η ολίσθηση είναι -1, ενώ για την ριπή No 3 η ολίσθηση είναι +1 που έχει ως αποτέλεσμα να αποτυγχάνει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης.

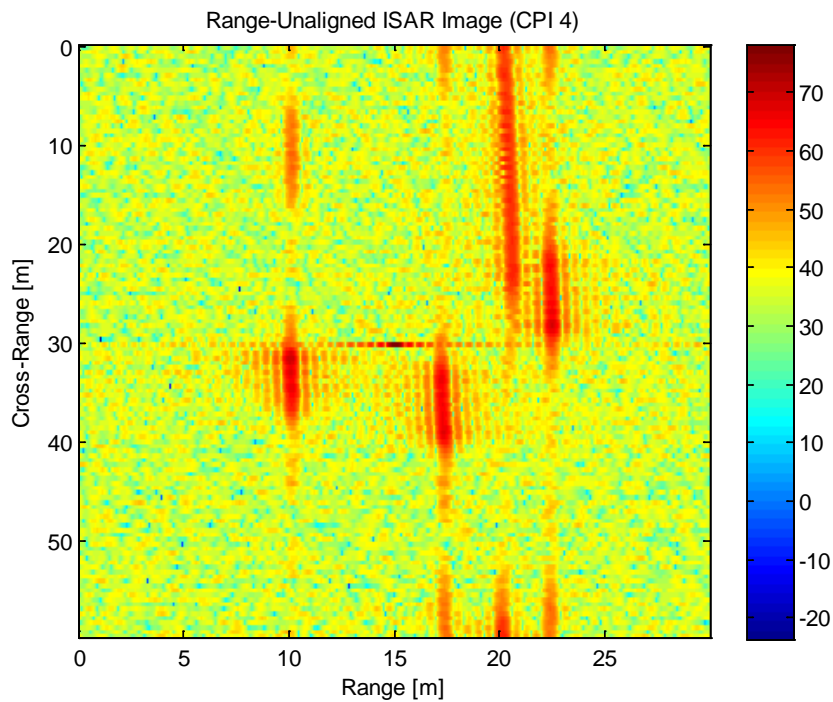


Σχήμα 4-26. Ιστορία της εκτιμούμενης ολίσθησης απόστασης με ετεροσυσχέτιση για το CPI-1

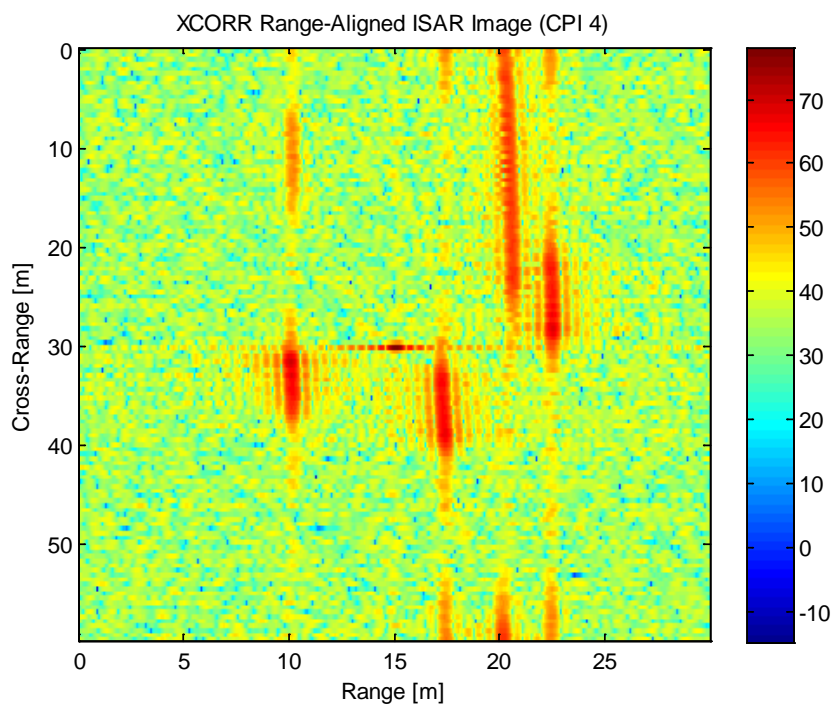
Στα παρακάτω σχήματα δείχνουμε ότι και σε αυτή την 1^η περίπτωση προσομοίωσης (τεστ-2) υπερέχει η μέθοδος DESED που βασίζεται στην ευθυγράμμιση απόστασης έναντι της μεθόδου ετεροσυσχέτισης που βασίζεται και αυτή στην ευθυγράμμιση της απόστασης.

Συγκεκριμένα τα σχήματα 4.27, 4.29 και 4.31 τα οποία προέκυψαν από το τρέξιμο του αλγορίθμου μέσω του matlab, αφορούν την μη ευθυγραμμισμένη απόσταση για το CPI-4, την ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης καθώς και την ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI-4), ενώ τα σχήματα 4.28, 4.30 και 4.32 αφορούν αντίστοιχα την ευθυγράμμιση της απόστασης για το CPI-4, την ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης καθώς και την ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI-4) με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης η οποία αποτυγχάνει και έτσι τα αποτελέσματα είναι αμετάβλητα δηλ. δεν έχουμε ευθυγράμμιση απόστασης. Επομένως

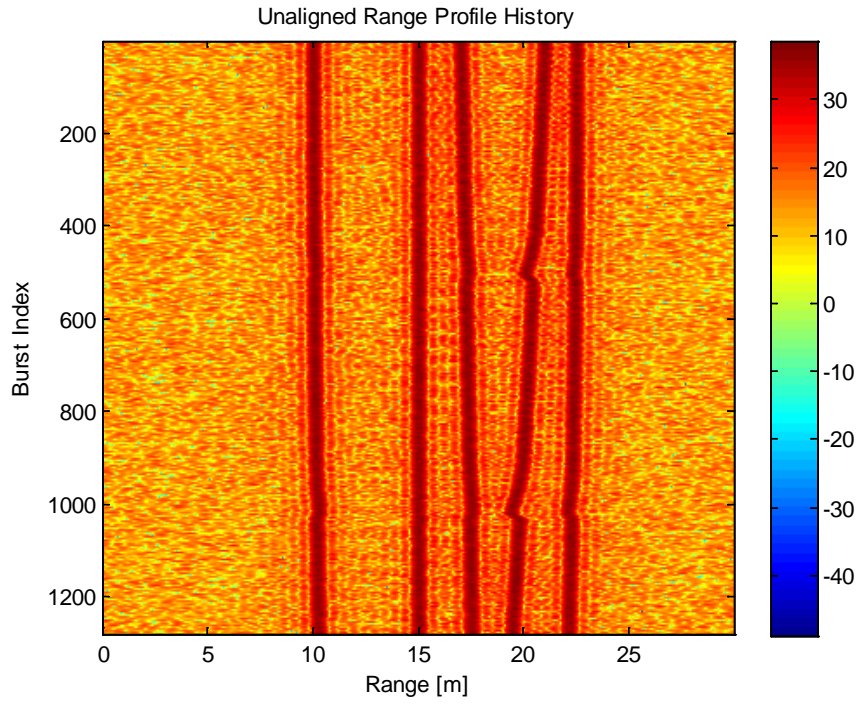
αποδεικνύουμε την ευρωστία της μεθόδου DESED στον προτεινόμενο καινοτόμο αλγόριθμο έναντι της μεθόδου της ετεροσυσχέτισης.



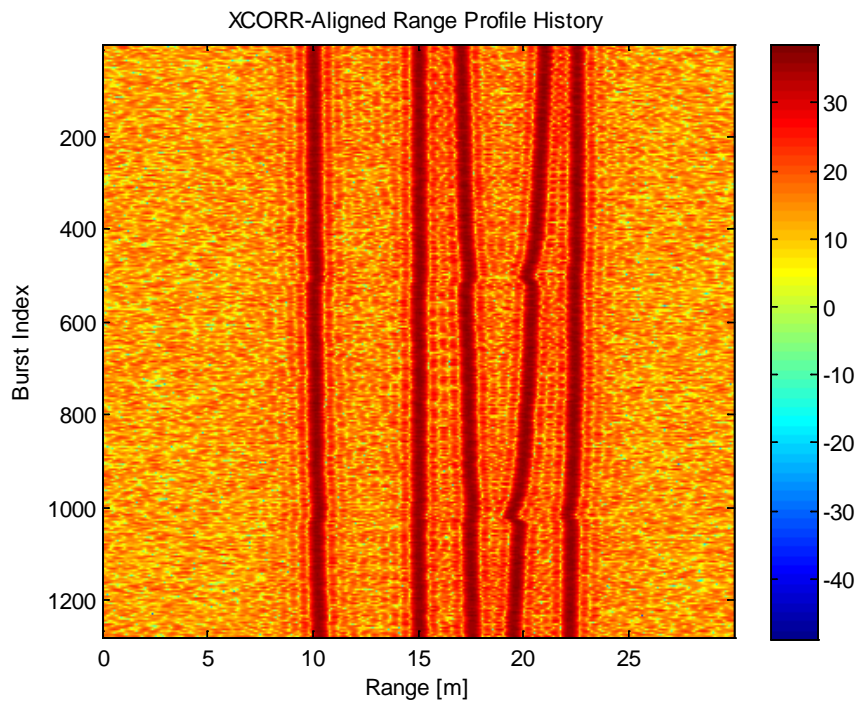
Σχήμα 4-27. Εικόνα ISAR (CPI – 4) μη ευθυγραμμισμένης απόστασης



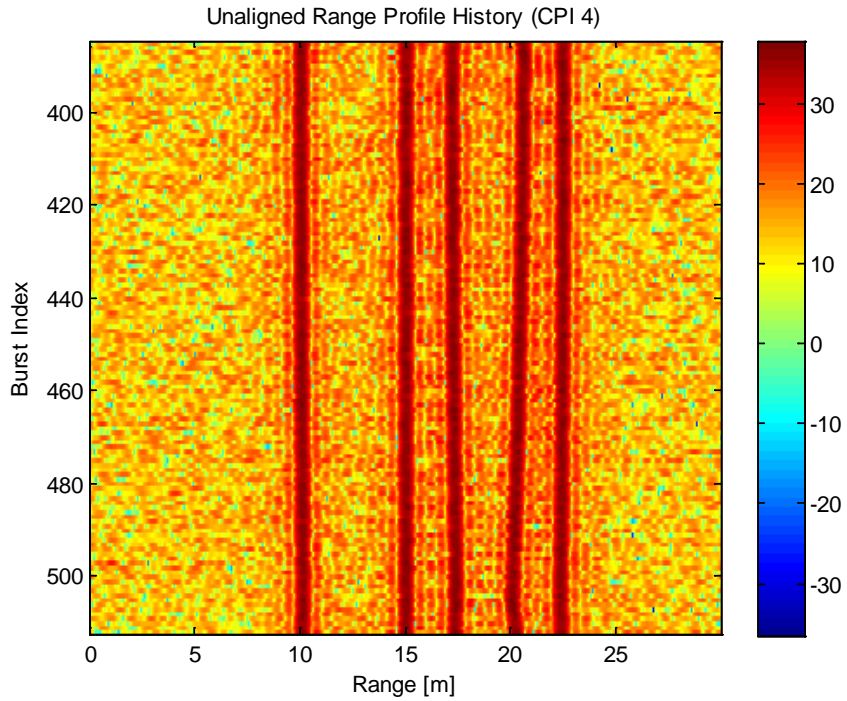
Σχήμα 4-28. Εικόνα ISAR (CPI – 4) ευθυγραμμισμένης απόστασης με ετεροσυσχέτιση



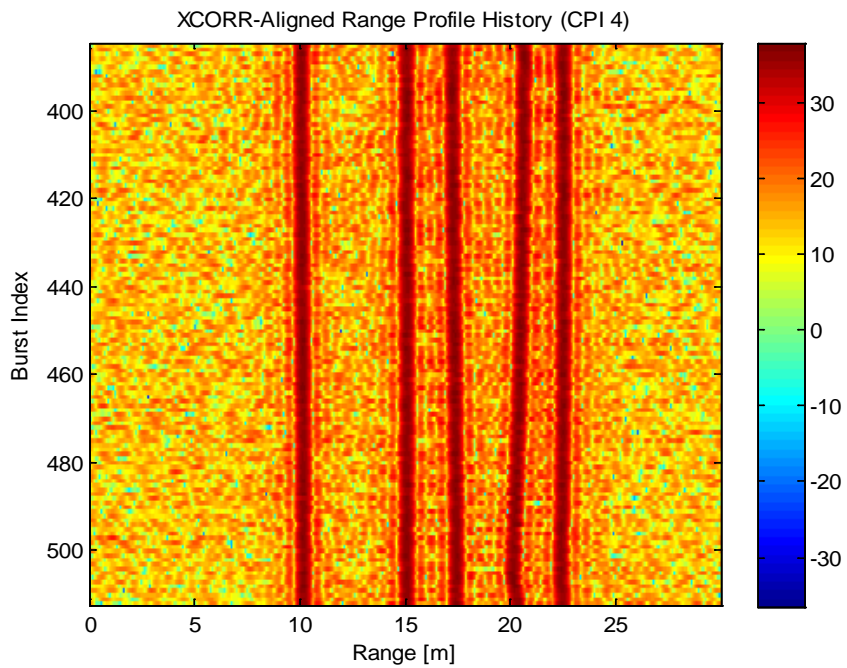
Σχήμα 4-29. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης



Σχήμα 4-30. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης με ετεροσυσχέτιση



Σχήμα 4-31. Ιστορία του μη ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4)



Σχήμα 4-32. Ιστορία του ευθυγραμμισμένου προφίλ απόστασης (CPI – 4) με ετεροσυσχέτιση

Στον παρακάτω Πίνακα 4-3 φαίνονται οι τιμές της εντροπίας για το CPI-1 και το CPI-4 που αφορούν τα μη επεξεργασμένα δεδομένα τα υπερδειγματοληπτούμενα καθώς και την ετεροσυσχέτιση.

Πίνακας 4-3. Κατώφλι εντροπίας για Raw Ovs και Xcorr

CPI's	Raw	Oversampling	Cross-correlation
CPI-1	3.7303	7.2607	7.2958
CPI-4	5.5606	9.1692	9.1963

4.3.6.2 2^η Περίπτωση προσομοίωσης (σχόλιο)

Στην 2^η περίπτωση προσομοίωσης μέσω του Matlab πραγματοποιήσαμε ένα ακόμη τεστ παρόμοιο με το προηγούμενο της 1^{ης} περίπτωσης, το οποίο ήταν πιο κοντά για την σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε ως προφίλ απόστασης αναφοράς να παίρνει η ετεροσυσχέτιση όχι το πρώτο προφίλ απόστασης από κάθε CPI αλλά καθολικά (global) το πρώτο προφίλ απόστασης του πρώτου CPI.

Παρατηρήσαμε όμως ότι λόγω της μη ικανότητας της μεθόδου ετεροσυσχέτισης να διορθώνει παρά μόνο συνολικά την ολίσθηση απόστασης, η εντροπία χειροτερεύει περισσότερο για την περίπτωση που το προφίλ αναφοράς απόστασης ισούται με το πρώτο προφίλ απόστασης του πρώτου CPI. Αυτό δε συμβαίνει διότι οι διάφορες ολισθήσεις απόστασης που υπολογίζονται για αριθμό CPI's μεγαλύτερο από ένα είναι μεγαλύτερες από ότι στο προηγούμενο τεστ. Έτσι αυτή η περίπτωση μας έδειξε ότι μπορούμε να διορθώνουμε και μεγάλες αποκλίσεις σε απόσταση καθώς αυξάνεται ο αριθμός των CPI's, οπότε και κρατάμε ένα γενικό (global) προφίλ απόστασης αναφοράς για να ευθυγραμμίσουμε όλα τα προφίλ απόστασης για όλα τα CPI's.

4.3.7 Συμπεράσματα

Στην έρευνα του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάσαμε μια καινοτόμο μέθοδο αντιστάθμισης της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση με εφαρμογή στην απεικόνιση ISAR. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην φασματική εκτίμηση υψηλής ανάλυσης με υποδιπλασιασμό του σήματος για τις ακριβείς εκτιμήσεις της θέσης της απόστασης. Συγκρινόμενη με τις κλασικές μεθόδους ευθυγράμμισης της απόστασης, η μέθοδος μας είναι ικανή να κάνει κλασματική διόρθωση του κελιού απόστασης ανά σκεδαστή και να λάβει υπόψη την διαφορετική μετακίνηση στην οριζόντια διεύθυνση του κάθε σκεδαστή. Επίσης μπορεί να έχει ένα γενικό (global) προφίλ απόστασης αναφοράς. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου ευθυγράμμισης της απόστασης αποδεικνύεται μέσω των εκτεταμένων προσομοιώσεων ISAR για την ομοιόμορφη και μη ομοιόμορφη περιστροφή, εξετάζοντας την ιστορία του προφίλ απόστασης, τις λαμβανόμενες εικόνες ISAR και τις αντίστοιχες τιμές εντροπίας πριν και μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Αντίθετα η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης αποτυγχάνει αφ' ενός μεν να κάνει κλασματική διόρθωση του κελιού απόστασης ανεξάρτητα ανά σκεδαστή, αφ' ετέρου δεν μπορεί να έχει ένα γενικό προφίλ απόστασης αναφοράς. Επίσης το μεγάλο λάθος το οποίο κάνει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης είναι ότι ενώ οι σκεδαστές μετακινούνται ανεξάρτητα λόγω της περιστροφικής κίνησης, η ετεροσυσχέτιση υπολογίζει μια κοινή τιμή ολίσθησης και αυτή πολλές φορές είναι αντίθετη στην κατεύθυνση στην οποία κινείται ο κάθε σκεδαστής. Επομένως θα πρέπει να βρούμε έναν ή δύο κοντινούς σκεδαστές από τους πέντε σκεδαστές που κινείται αντίθετα στην εκτιμώμενη ολίσθηση που υπολογίζει η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης. Επίσης στην 1^η περίπτωση (δοκιμή-1) καταλήγουμε να έχουμε ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση, ενώ στην δοκιμή-2 της ίδιας περίπτωσης καταλήγουμε να έχουμε μη ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση.

4.4 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] D. Wehner, High-Resolution Radar, London, Artech House, 2nd edition, 1995.
- [2] V. Chen, and H. Ling, Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and signal Analysis, London, Artech House, 2002.
- [3] J. Son, G. Thomas, and B. Flores, Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation, Artech House, 2001.
- [4] G. Lu, and Z. Bao, "Compensation of scatterer migration through resolution cell in inverse synthetic aperture radar imaging", IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation, Vol. 147 (2), pp. 80-85, Apr. 2000.
- [5] A. Karakasiliotis, and P. Frangos, "Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates," Proc. 5th International Symposium on Communications, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2006), Patras, Greece, July 2006.
- [6] J. Munoz-Ferreras and F. Perez-Martinez, "Uniform rotational motion compensation for inverse synthetic aperture radar with non-cooperative targets", IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 2 (1), pp. 25-34, Feb. 2008.
- [7] E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, G. Boultadakis, and P. Frangos, "A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization", Electronics and Electrical Engineering Journal, T121 Signal Technology, No. 4 (110), pp.125-130, Apr. 2011.
- [8] E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, and P. Frangos, "Combination of range alignment technique with autofocusing post-processing algorithm for ISAR image optimization", International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'11), Sofia, Bulgaria, Oct. 2011.
- [9] A. Karakasiliotis, and P. Frangos, "Comparison of Several Spectral Estimation Methods for Application to ISAR Imaging," Proc. RTO SET 080 International Symposium on 'Target Identification and Recognition using RF Systems', Oslo, Norway, 11-13 October 2004.
- [10] S. DeGraaf, "SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 7 (5), pp.729-761, May 1998.
- [11] E. Corral, G. Thomas, and B. Flores, "Effects of using superresolution techniques in ISAR imagery", Proc. CCECE 2002, Vol. 1, pp. 353-357, 2002.
- [12] P. Stoica, and Y. Selen, "Model-order selection: a review of information criterion rules", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 21 (4), pp. 36-47, July 2004.

- [13] K.-T. Kim, and H.-T. Kim, "Two-dimensional scattering center extraction based on multiple elastic modules network", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.51 (4), pp. 848-861, Apr. 2003.
- [14] Y. Wang, J. Chen, and Z. Liu, "Two-dimensional scattering center extraction using super-resolution techniques [Inverse SAR applications]", International Symposium of IEEE Antennas and Propagation Society, Vol. 2, pp. 2091-2094, June 2004.
- [15] J. Munoz-Ferreras, and F. Perez-Martinez, "Sub-integer Range-Bin Alignment Method for ISAR Imaging of Noncooperative Targets", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing-Special Issue on Advanced Image Processing for Defense and Security Applications, Vol. 2010, pp. 1-16, Feb. 2010.
- [16] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, G. Boultadakis, G. Kalognomos and P. Frangos, "Two-dimensional ISAR Model and Image Reconstruction with Stepped Frequency Modulated Signal", IET Signal Processing, Vol. 2 (3), pp. 277-290, Sept. 2008.

Κεφάλαιο 5

Επίλογος

5.1 Συμπεράσματα - μελλοντικές κατευθύνσεις

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάσαμε δύο καινοτόμους μεθόδους για την βελτιστοποίηση της εικόνας του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (Inverse Synthetic Aperture Radar-ISAR).

Η πρώτη μέθοδος που αφορά την αυτοεστίαση της εικόνας ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR) με την ευριστική μέθοδο της ελαχιστοποίησης εντροπίας, έχει μικρό υπολογιστικό κόστος με ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT) και υπολογισμό εντροπίας, σε σχέση με παραμετρικές μεθόδους που εκτιμούν τις παραμέτρους κίνησης ή με βαριές υπολογιστικά μεθόδους χρόνου-συχνότητας (Time-Frequency Methods).

Η δεύτερη μέθοδος που αφορά την αντιστάθμιση της περιστροφικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση (Slant-Range Rotational Compensation-SRRC Method) μέσω της DESED, αποτελεί μία από τις λίγες μεθόδους που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία για αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης με ξεχωριστή διόρθωση ανα σκεδαστή.

Μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες για την πρώτη μέθοδο θα μπορούσαν να συμπεριλάβουν και την χρήση της τεχνικής της τροποποιημένης μορφοκλασματικής υπογραφής με κάλυψη στρώματος, που ονομάζεται MFS (Modified Fractal Signature – Blanquet Covering, [1,2]), αντί της εντροπίας για την εστίαση της εικόνας ραντάρ ISAR. Επίσης μπορεί να γίνει εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα ραντάρ (Real-Data), είτε με την μέθοδο της εντροπίας (που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή), είτε με χρήση της μεθόδου MFS.

Μία άλλη πιθανή μελλοντική ερευνητική κατεύθυνση σχετικά με την δεύτερη μέθοδο είναι, επίσης, η εφαρμογή της μεθόδου DESED στην κάθετη απόσταση (Cross - Range Rotational Compensation - CRRC Method), ή εφαρμογή μιας άλλης μεθόδου για ιχνηλασία Doppler (Doppler tracking) μετά την διόρθωση των προφίλ απόστασης με την μέθοδο που προτείναμε στη παρούσα διατριβή.

5.2 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Yan Y. Tang, Hong Ma, Dihua Xi, Xiong Mao, Ching Y. Suen, 'Modified Fractal Signature (MFS): A New Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition' , IEEE Transactions on knowledge and data engineering, Vol. 9, No. 5, Sept. – Oct. 1997, pp. 747-762.
- [2] N.B. Ampilova, E.Y. Gurevich, I.P. Soloviev, 'Application of modified fractal signature and Regny spectrum methods to the analysis of biomedical preparation images, CEMA'11 Conference, Sofia, Bulgaria, October 2011, pp. 96 - 100.

Γλωσσάριο

Αγγλο-ελληνικοί τεχνικοί όροι ραντάρ

Αγγλικά	Ελληνικά
ambiguity function	συνάρτηση αβεβαιότητας
aspect angle	γωνία σκόπευσης/πρόσπτωσης
Autofocusing	αυτο-εστίαση
azimuth compression	συμπίεση γωνίας αζιμουθίου
backprojection technique	τεχνική οπισθοπροβολής
Bandwidth	εύρος συχνοτήτων
biased autocorrelation estimator	πολωμένος εκτιμητής αυτοσυσχέτισης
Blurring	Θόλωση
burst duration	διάρκεια ριπής
burst repetition interval	περίοδος επανάληψης ριπής
chirp signal	σήμα γραμμικά διαμορφωμένο κατά συχνότητα
coarse range alignment	προσεγγιστική ευθυγράμμιση απόστασης
coarse/fine	προσεγγιστικός/ακριβής
coherent processing interval	διάστημα συμφασικής επεξεργασίας
continuous spectra	συνεχή φάσματα
corner diffraction	περίθλαση από γωνία
covariance method	μέθοδος συνδιακύμανσης
cross-correlation lag	υστέρηση φάσης ετερο-συσχέτισης
cross-range resolution	ανάλυση κάθετης απόστασης

damping factor	παράγοντας απόσβεσης
Decimation	Υποδειγματοληψία
detection distance	απόσταση ανίχνευσης
distributed scattering mechanisms	διανεμημένοι μηχανισμοί σκέδασης
Doppler tracking	ιχνηλασία συχνότητας Doppler
edge diffraction	περίθλαση από ακμή
farthest point scatterer	μακρινότερος σημειακός σκεδαστής
fast time index	δείκτης «ταχέος χρόνου»
flat plate	επίπεδη πλάκα
focal quality indicator	δείκτης ποιότητας εστίασης
for broadside orientation	υπό κάθετη στην άτρακτο κατεύθυνση
frequency step	συχνοτικό βήμα
frequency-stepping technique	τεχνική συχνοτικού βηματισμού
full rank	πλήρους τάξεως
high range resolution profiles	προφίλ υψηλής ανάλυσης απόστασης
illuminated target	ακτινοβολούμενος στόχος
integration angle	γωνία ολοκλήρωσης
inverse aperture synthesis	σύνθεση του αντίστροφου ανοίγματος
ISAR	ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος
ISAR image	εικόνα ISAR
ISAR image integration time	χρόνος ολοκλήρωσης εικόνας ISAR
ISAR image smearing	κηλίδωση εικόνας ISAR
ISAR imaging	απεικόνιση τύπου ISAR
linear frequency modulation	γραμμική διαμόρφωση συχνότητας
localized scattering mechanisms	συγκεντρωμένοι μηχανισμοί σκέδασης
matched filtering	πανομοιότυπο φιλτράρισμα
maximum likelihood	μέγιστη πιθανότητα

nearest point scatterer	κοντινότερος σημειακός σκεδαστής
orientation angle	γωνία προσανατολισμού
peak sidelobe level	μέγιστο ύψος πλευρικών λοβών
phase code modulation	διαμόρφωση με κωδικοποίηση φάσης
phase compensation	αντιστάθμιση/απόσβεση φάσης
point scatterer model	μοντέλο σημειακών σκεδαστών
polar reformatting	ανασχηματισμός πολικών συντεταγμένων
power spectral density	φασματική πυκνότητα ισχύος
probability distribution function	συνάρτηση κατανομής πιθανότητας
pulse repetition interval	περίοδος επανάληψης παλμού
radar cross-section	κάθετη διατομή ραντάρ
radar line-of-sight	κατεύθυνση στόχευσης του ραντάρ
radar signal model	μοντέλο σήματος ραντάρ
range alignment	ευθυγράμμιση απόστασης
range cell	κελί απόστασης
range compression	συμπίεση απόστασης
range migration	μετανάστευση απόστασης
range profiles	προφίλ απόστασης
range resolution	ανάλυση απόστασης
range tracking	ιχνηλασία απόστασης
range walk	ολίσθηση απόστασης
range-Doppler principle	αρχή απόστασης-συχνότητας Doppler
rational spectra	κλασματικά ή «ρητά» φάσματα
received ISAR signal	λαμβανόμενο σήμα ISAR
received raw data	μη επεξεργασμένα λαμβανόμενα δεδομένα
rigid target	ενιαίος στόχος
rotational motion	περιστροφική κίνηση

rotational motion compensation	αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης
scattering behavior	σκεδαστική συμπεριφορά
scattering centers	κέντρα σκέδασης
scattering intensity	ένταση σκέδασης
scattering response	απόκριση σκέδασης
scattering shapes	γεωμετρίες σκέδασης
singular value decomposition	ανάλυση μοναδικών τιμών
slow time index	δείκτης «βραδέος χρόνου»
spatial smoothing preprocessing	προεπεξεργασία χωρικής εξομάλυνσης
stepped frequency modulation	διαμόρφωση βηματικής συχνότητας
stepped frequency pulse	παλμός βηματικής συχνότητας
stepped frequency waveform	κυματομορφή βηματικής συχνότητας
synthesized azimuth aperture	συνθετικό άνοιγμα της γωνίας αζιμουθίου
translational motion	μετατοπιστική κίνηση
translational motion compensation	αντιστάθμιση μετατοπιστικής κίνησης
unambiguous down-range window	παράθυρο αναμφιβόλου αποστάσεως
unambiguous maximum detection range	αναμφίβολη μέγιστη απόσταση ανίχνευσης
Wavefront	μέτωπο κύματος

